

TRILOGI BENCANA



IMAM SUBEKTI
RANTI HIDAYAWANTI



TRILOGI BENCANA

TRILOGI BENCANA

nam Subakti
Ranü Hidayawanti



PLN
INSTITUT TEKNOLOGI PLN

2022

TRILOGI BENCANA

Penyunting: Rani Sulisti
Rani Hidayat

Penyunting: INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH
AGUSTUS (ITS), Universitas Jember,
Dusun Pabelan, Gunungkidul,
Jawa Tengah 51223
Telp. : (0291) 8510042 smp@its.ac.id
Email : rani@its.ac.id

Halaman: 662 (incl. front & back)

Halaman ini merupakan salah satu bagian dari karya intelektual yang dilindungi hak cipta dan hak moral. Untuk lebih jelasnya, silakan kunjungi www.its.ac.id atau hubungi bagian pustakanya. Untuk keperluan lain, silakan hubungi bagian administrasi perpustakaan ITS. Untuk informasi lebih lanjut, silakan kunjungi www.its.ac.id.

Coeditor: Rani Sulisti & Rani Hidayat
Editor: Rani Hidayat & Rani Sulisti
Coeditor: Rani Hidayat & Rani Sulisti

ISBN : 978-602-5574-49-6
978-602-5574-66-7 (PDF)

Synopsis

Bencana adalah peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan manusia, yang disebabkan baik oleh faktor alam dan/atau faktor non-alam termasuk faktor manusia, sedemikian rupa sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis. Bencana adalah sesuatu yang tak terpisahkan dalam sejarah manusia, dan manusiapun terus berjuang untuk bebas dari bencana, sehingga menghasilkan berbagai upaya mitigasi.

Permukaan bumi sebagai habitat hidup umat manusia selalu berubah oleh proses geologi, terangkat, terlipat terhunjam tertekuk kebawah, untuk kemudian diratakan kembali oleh proses-proses erosi dan sedimentasi. Ada kalanya proses-proses tersebut tersendat dan tertahan untuk sementara waktu, untuk kemudian bejalan kembali dengan disertai pelepasan akumulasi energi yang tertahan. Maka pada saat itulah bencana alam terjadi. Dengan kata lain, bencana alam adalah bagian dari siklus alam untuk mencapai keseimbangannya kembali. Maka gempa bumi, erupsi gunung api, banjir dan berbagai bencana lainnya, akan terus berulang secara periodik mengikuti siklus alam.

Manusia sebagai mahluk sosial yang bernalar budi, akan selalu berusaha meningkatkan kesejahteraannya, termasuk mengantisipasi berbagai bencana. Maka dengan kelebihan daya penalarannya, manusia mengembangkan berbagai teknologi untuk hal tersebut, yang diantaranya menghasilkan industrialisasi.

Revolusi Industri pada sekitar tahun 1750 – 1850 adalah suatu tahapan perubahan besar, secara cepat, dan radikal yang mempengaruhi kehidupan corak manusia. Yaitu merupakan periode dimana terjadi perubahan besar-besaran dalam berbagai bidang, yang menghasilkan dampak signifikan terhadap lingkungan sosial, ekonomi, dan budaya dunia. Namun pada sisi lain justru merubah pandangan manusia, dari pandangan holistic menjadi transeden. Revolusi industri pada satu sisi berhasil meningkatkan kesejahteraan, yang tercermin dari lonjakan peningkatan populasi manusia, namun pada sisi lain justru meningkatkan konflik akibat persaingan diantara komunitas-komunitas manusia. Walaupun kemajuan teknologi telah terbukti meningkatkan kesejahteraan manusia, namun kegagalan teknologi justru kadang memicu terjadinya bencana. Bahkan manusiapun juga menciptakan berbagai teknologi perang yang sengaja dibuat untuk

menimbulkan bencana bagi pesaing-pesaingnya. Dimana perang diantara kelompok-kelompok negara, terjadi hampir disepanjang peradaban manusia.

Dampak lingkungan, seperti halnya perubahan komposisi udara, air, dan iklim, adalah reaksi alam dalam jangka panjang untuk mengembalikan keseimbangannya, yang juga sering merupakan bencana bagi manusia. Dampak lingkungan dapat terjadi sebagai reaksi atas suatu peristiwa, baik akibat proses alam ataupun ulah manusia.

Bagaimanapun, berbagai bencana dapat terjadi secara sendiri-sendiri, ataupun saling berkaitan satu dengan lainnya. Sehingga merupakan TRILOGI antara proses alam, teknologi dan dampak lingkungan. Maka, mitigasi bencana pun seyogyanya memperhatikan faktor-faktor tersebut.

Kata Pengantar

Bencana adalah peristiwa yang tidak dikehendaki oleh siapapun, yang seringkali terjadi tanpa dapat dicegah. Namun seyogyanya perlu untuk dikenali, sehingga walaupun terkadang tak dapat dicegah, setidaknya dapat di-antisipasi dan dihindari, atau setidaknya dampak buruk yang diakibatkannya dapat di minimalkan. Untuk ini maka, buku ini disusun untuk memperkenalkan berbagai jenis bencana, mulai dari penyebab, dampak yang diakibatkan, serta upaya untuk meng antisipasinya.

Bencana dapat terjadi oleh karena proses alam, perkembangan teknologi, dan dinamika lingkungan. Ketiganya masing-masing dapat menimbulkan bencana, baik secara sendiri-sendiri maupun berkaitan satu dengan lainnya. Maka dalam buku ini disebutkan sebagai Trilogi Bencana.

Pada bagian awal diuraikan betapa bencana alam sesungguhnya telah terjadi dalam sejarah bumi, bahkan jauh sebelum munculnya peradaban manusia, dimana bencana alam telah menyebabkan kepunahan berbagai spesies kehidupan. Kemudian pada sejarah peradaban manusiapun, bencana alam telah kerap kali terjadi.

Berikutnya diuraikan, betapa kemajuan teknologi, terutama pasca Revolusi Industri, telah merubah pola kehidupan manusia. Perubahan pola ini disamping menghasilkan kehidupan yang lebih baik, pada sisi lain juga memicu terjadinya bencana. Bencana teknologi terjadi, baik disebabkan oleh ke kurang sempurnaan teknologi itu sendiri, juga disebabkan oleh faktor kesengajaan. Naluri bersaing manusia telah memicu terjadinya perang besar, dan teknologi perangnya sengaja dikembangkan untuk menimbulkan bencana bagi lawan.

Pada bagian akhir diuraikan, betapa dinamika lingkungan ber reaksi atas perubahan-perubahan yang terjadi, baik oleh karena proses alam maupun pengembangan teknologi. Tak jarang reaksi lingkungan justru berbalik menimbulkan bencana atau dampak yang justru merugikan manusia. Namun dengan kesadaran nalar budinya pulalah, manusia kemudian menyadari bahwa bencana oleh berbagai sebab dapat terjadi setiap saat. Sehingga kesadaran ini berbuah pada berbagai upaya kolektif untuk menanggulangnya.

Penulis

Daftar Isi

1. PENDAHULUAN	1
2. BENCANA MASA LAMPAU	3
2.1. Teori Big Bang dan Proses Pembentukan bumi	4
2.1.1. Teori Big Bang	4
2.1.2. Pembentukan Bumi dan Awal Kehidupan	6
2.2. Bencana Pra-Peradaban	11
2.3. Bencana Pada Masa Peradaban Masa Lalu Manusia	14
3. BENCANA ALAM KOSMIK	19
3.1. Meteor Chelyabinsk	20
3.2. Kawah Meteorit Lockne & Malingen – Swedia	22
3.3. Kawah Vredefort	24
3.4. Kawah Sudbury	24
3.5. Kawah Woodleigh	25
3.6. Kawah Acraman	26
3.7. Kawah Manicouagan	26
3.8. Kawah Morokweng	27
3.9. Kawah Kara	28
3.10. Kawah Chesapeake Bay	28
3.11. Deposit Berlian Kawah Meteorit Popigai – Siberia, Rusia	29
4. PROSES GEOLOGI DAN POTENSI BENCANA ALAM	33
4.1. Teori Tektonik Lempeng	34
4.2. Potensi Bencana Alam Geologi	42
5. GEMPA BUMI & TSUNAMI	45
5.1. Jenis Gempa Bumi	46
5.2. Pencatatan Gempa	50
5.2.1. Seismoscope	50
5.2.2. Seismograf	51
5.3. Identifikasi Kekuatan Gempa	53
5.3.1. Skala Intensitas Gempa	53
5.3.2. Skala Magnitudo Gempa	55
5.3.3. Percepatan Gempa (Ground Acceleration)	56
5.4. Dampak Gempa Bumi	58
5.4.1. Dampak Ampitudo Gempa Pada Struktur Bangunan	58

5.4.2.	Dampak Percepatan Gempa Bumi	59
5.4.3.	Likuifaksi (Liquefaction)	60
5.4.4.	Pergeseran Tanah dan Longsor	63
5.4.5.	Tsunami	64
5.5.	Berbagai Peristiwa Bencana Gempa Bumi & Tsunami	69
5.5.1.	Gempa Bumi San Fransisco - 1906 (Gempa + Pergeseran Tanah)	71
5.5.2.	Gempa Bumi Chile - 1960 (Gempa + Tsunami)	73
5.5.3.	Gempa Bumi Alaska - 1964 (Gempa + Tsunami) ...	75
5.5.4.	Gempa Bumi Niigata - 1964 (Gempa + Likuifaksi)	77
5.5.5.	Gempa Bumi Nepal (Gempa + Longsor)	79
5.5.6.	Gempa Bumi Aceh - 2004 (Gempa + Tsunami)	82
5.5.7.	Gempa Bumi Yogyakarta - 2006	86
5.5.8.	Gempa Bumi Bengkulu - 2015	88
5.5.9.	Gempa Bumi Pidie - 2016	89
5.5.10.	Gempa Bumi Lombok - 2018 (Gempa Berantai) ...	90
5.5.11.	Gempa Bumi Palu/Donggala - 2018 (Gempa + Tsunami + Likuifaksi)	95
5.5.12.	Tsunami Selat Sunda - 2018 (Erupsi Vulkanik - Longsor - Tsunami)	99
5.6.	Mitigasi Gempa dan Kearifan Lokal	102
5.6.1.	Mitigasi Gempa, Tsunami dan Likuifaksi	102
5.6.2.	Kearifan Lokal	107
6.	ERUPSI GUNUNG API	111
6.1.	Genesa Gunung Api	113
6.2.	Erupsi Gunung Api	114
6.3.	Material Vulkanik	119
6.4.	Morfologi Gunung Api	123
6.5.	Jenis dan Klasifikasi Erupsi	129
6.6.	Volkanologi Indonesia	132
6.7.	Peristiwa Penting, Erupsi Gunung Api	135
6.7.1.	Toba Supervolcano	135
6.7.2.	Erupsi Mt Vesuvius (79 M)	138
6.7.3.	Erupsi Gunung Krakatau (1883)	142
6.7.4.	Erupsi Gunung Tambora (1815)	145
6.7.5.	Erupsi Gunung Merapi	148
6.7.6.	Erupsi Gunung Kelud	151
6.7.7.	Erupsi Gunung Sinabung	154
6.7.8.	Erupsi Freatik Kawah Sinila - Dieng (1979)	156
6.8.	Mitigasi Bencana Gunung Api	165

7.	DINAMIKA EKSOGEN DAN POTENSI BENCANA ALAM GEO-KLIMATOLOGI	177
7.1.	Zonasi Iklim	179
7.1.1.	Zona Tropis	179
7.1.2.	Zona Lingkaran Kutub	181
7.1.3.	Zona Sub-Tropis	182
7.2.	Erosi dan Gerakan Tanah	184
7.2.1.	Erosi	185
7.2.2.	Gerakan Tanah / Tanah Longsor	195
7.3.	Kinerja Air	195
7.3.1.	Siklus Hidrologi	196
7.4.	Potensi Bencana Geo-Klimatologi	199
8.	BANJIR, SIKLON TROPIS & KEBAKARAN HUTAN	201
8.1.	Banjir	202
8.1.1.	Daerah Tangkapan Hujan (Catchment Area)	203
8.1.2.	Intensitas Hujan	204
8.1.3.	Koefisien Limpasan (Run-off Coefficient)	207
8.1.4.	Pengertian Secara Teknis dan Faktor Penyebab Banjir	209
8.1.5.	Kapasitas Saluran dan Wilayah Pengelolaan Alur Sungai	210
8.1.6.	Banjir Bandang	215
8.1.7.	Catatan Peristiwa Bencana Banjir	216
8.1.8.	Potensi Banjir di Indonesia	227
8.2.	Siklon Tropis	229
8.3.	Kebakaran Hutan	233
8.3.1.	Dampak Kebakaran Hutan	234
8.3.2.	Berbagai Kasus Kebakaran Hutan	235
9.	GERAKAN TANAH	243
9.1.	Jenis-Jenis Gerakan Tanah	244
9.2.	Mekanisme Longsor (Landslide) Pada Lereng Tanah	250
9.2.1.	Mekanisme Longsor Translasi	251
9.2.2.	Mekanisme Longsor Rotasi	253
9.3.	Keruntuhan Lereng Batuan	259
9.3.1.	Jenis Runtuhan Lereng Batuan	259
9.3.2.	Potensi Runtuhan Batuan	260
9.3.3.	Identifikasi Potensi Keruntuhan Lereng Batuan	262
9.4.	Faktor Pemicu	265
9.5.	Stabilisasi Lereng	268
9.6.	Catatan Berbagai Bencana Gerakan Tanah Terburuk	273
9.6.1.	Longsor Gunung Granier-Perancis, 1248 (Mont Granier Landslide -1248)	273

9.6.2.	Longsor Diexi-China, 1933 (Diexi Landslides - 1933)	273
9.6.3.	Longsor Batuan di Khait-Tajikistan, 1949 (Khait Rockslide-1949)	274
9.6.4.	Longsor Yungay - Peru, 1970 (Yungay Landslide-1970)	275
9.6.5.	Longsor Armero - Colombia, 1985 (Armero Tragedy - 1985)	276
9.6.6.	Catatan Peristiwa Gerakan Tanah Dunia Abad 20	277
9.7.	Potensi Gerakan Tanah di Indonesia	283
10.	INDUSTRIALISASI DAN BENCANA TEKNOLOGI	287
10.1.	Revolusi Industri	288
10.1.1.	Latar Belakang dan Perkembangan Revolusi Industri	289
10.1.2.	Dampak Revolusi Industri	292
10.2.	Dampak Teknologi	296
10.3.	Bencana Kegagalan Teknologi	297
10.3.1.	Tragedi Bhopal (1984)	299
10.3.2.	Bencana Chernobyl (1986)	301
10.3.3.	Keruntuhan Bendungan St Francis - California (1928)	303
10.3.4.	Banjir Bandang Bendungan Vajont (Vajont Dam) - Italia (1963)	307
10.4.	Bencana Kesengajaan Teknologi	310
10.4.1.	Operasi Chastise (Dambuster - 1943)	312
10.4.2.	Proyek Manhattan	314
10.4.3.	Agen Oranye	317
11.	TEKNOLOGI PERANG	321
11.1.	Teknologi Perang Masa Lampau	321
11.2.	Teknologi Perang Masa Kini	330
11.2.1.	Perkembangan Teknologi Senjata Api	330
11.2.2.	Bom dan Bahan Peledak	333
11.2.3.	Bom Nuklir dan Senjata Pemusnah Masal	336
12.	PERANG DARI MASA KE MASA	349
12.1.	Perang Kuno (Perang Punisia)	353
12.2.	Perang Abad Pertengahan (Perang 100 Tahun, Inggris - Perancis)	356
12.3.	Perang Dunia	358
12.3.1.	Perang Dunia I (1914 - 1919)	358
12.3.2.	Perang Dunia II (1939 - 1945)	361

12.4.	Perang Dingin	366
12.4.1.	Perlombaan Senjata	368
12.4.2.	Blokade Berlin (24 Juni 1948 – 12 Mei 1949)	370
12.4.3.	Perang Korea (1950 – 1953)	373
12.4.4.	Perang Vietnam (1954 – 1975)	376
12.5.	Perdamaian dan Upaya Peredaan Konflik	381
13.	BIOSFER & DINAMIKA LINGKUNGAN	385
13.1.	Mengenal Siklus Alam	387
13.1.1.	Peredaran Matahari	388
13.1.2.	Siklus Milankovitch	392
13.1.3.	Siklus Lithosfer	395
13.2.	Biosfer	396
13.2.1.	Adaptasi dan Evolusi	399
13.2.2.	Rantai Makanan	401
13.3.	Siklus Biogeokimia	403
13.3.1.	Siklus Karbohidrat	404
13.3.2.	Siklus Nitrogen	406
13.3.3.	Siklus Sulfur (Belerang)	407
13.3.4.	Siklus Fosfor	410
13.4.	Siklus Energi	412
14.	BENCANA & DAMPAK LINGKUNGAN	417
14.1.	Polusi	418
14.1.1.	Logam Berat	419
14.1.2.	Gas-gas Beracun	422
14.1.3.	Gas Rumah Kaca	426
14.1.4.	CFC (Chloro-Fluoro-Carbons)	426
14.1.5.	Limbah Plastik	428
14.2.	Tragedi Minamata	433
14.3.	Pemanasan Global & Protokol Kyoto	436
14.3.1.	Efek Rumah Kaca	437
14.3.2.	Dampak Pemanasan Global	438
14.3.3.	Pengendalian Pemanasan Global & Protokol Kyoto	442
14.4.	Kebocoran Ozon & Protokol Montreal	444
15.	ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN (AMDAL)	449
15.1.	Sejarah Per-Undangan Lingkungan Hidup di Indonesia ..	450
15.2.	Kegiatan Wajib AMDAL	457
15.3.	Tujuan dan Fungsi AMDAL	477
15.4.	Identifikasi Dampak Lingkungan	478
15.4.1.	Identifikasi Rencana Kegiatan / Usaha	478
15.4.2.	Identifikasi Rona Lingkungan Awal	480

15.4.3. Wilayah Sebaran Dampak	482
15.5. Identifikasi Dampak Potensial	483
15.5.1. Dampak Lingkungan Sosial	484
15.5.2. Dampak Lingkungan Fisik	485
15.5.3. Dampak Ekosistem	486
15.6. Baku Mutu Lingkungan	486
15.6.1. Jenis – Jenis Baku Mutu Lingkungan	487
15.6.2. Peraturan Perundangan Tentang Baku Mutu Lingkungan	493
15.7. Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan	495
15.7.1. Rencana Pengelolaan Lingkungan (RKL) dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL)	497
15.7.2. Audit Lingkungan	497
15.8. Prosedur AMDAL	500
16. CATATAN PENUTUP	503
DAFTAR PUSTAKA	507

Daftar Gambar

Gambar 2.1.	Diagram siklus Big Bang	5
Gambar 2.2.	Diagram hipotesis nebula, pembentukan sistem tata surya matahari	6
Gambar 2.3.	Sistem tata surya Matahari	8
Gambar 2.4.	Diagram Struktur Interior Bumi	9
Gambar 2.5.	Struktur atmosfer bumi	10
Gambar 2.6.	Kawah Wilkes di Antartika	11
Gambar 2.7.	Kawah Chicxulub di semenanjung Yucatán	12
Gambar 2.8.	Lokasi gunung Vesuvius dan kota Pompeii, yang menghadap ke teluk Naples – Italia	15
Gambar 2.9.	Gunung Vesuvius di foto dari udara (1971)	16
Gambar 3.1.	Ledakan Meteor Chelyabinsk (2013)	22
Gambar 3.2.	Wilayah terkena dampak Meteor Chelyabinsk (2013) ..	22
Gambar 3.3.	Foto udara dan peta geologi kawah Lockne – Swedia	23
Gambar 3.4.	Kawah meteorit Vredefort – Afrika Selatan	24
Gambar 3.5.	Kawah meteorit Sudbury – Ontario, Kanada	25
Gambar 3.6.	Kawah meteorit Woodleigh – Shark Bay, Australia Barat	25
Gambar 3.7.	Kawah meteorit Acraman – Australia Selatan	26
Gambar 3.8.	Kawah meteorit Manicouagan – Quebec, Kanada	27
Gambar 3.9.	Kawah meteorit Morokweng – Gurun Kalahari, Afrika Selatan	27
Gambar 3.10.	Kawah meteorit Kara – Nenetsia, Rusia	28
Gambar 3.11.	Kawah meteorit Chesapeake Bay – Virginia Amerika Serikat	28
Gambar 3.12.	Kawah meteorit Popigai – Rusia	29
Gambar 3.13.	Pecahan batuan Breksi yang dihasilkan oleh tumbukan benda langit	30
Gambar 3.14.	Butiran-butiran berlian dari tambang kawah Popigai – Siberia, Rusia	31
Gambar 4.1.	Skema pergerakan arus konveksi dalam mantel	34
Gambar 4.2.	Pecahan kerak bumi menjadi lempeng-lempeng tektonik (tectonic plates)	35
Gambar 4.3.	Pergerakan divergen lempeng-lempeng tektonik	37
Gambar 4.4.	Eslandia (Iceland), negara pulau gunung api pada zona divergen di Atlantik Utara	37
Gambar 4.4.	Pergerakan konvergen lempeng-lempeng tektonik ...	38

Gambar 4.5.	Pegunungan Bukit Barisan di Sumatera, jalur pegunungan vulkanik produk konvergensi antara lempeng Hindia-Australia dengan lempeng Eurasia ..	39
Gambar 4.6.	Proses pembentukan pegunungan lipatan non-volcanic Himalaya	40
Gambar 4.7.	Busur kepulauan Aleutian, terbentuk oleh konvergensi antara Lempeng Pasifik dengan Lempeng Amerika Utara	41
Gambar 4.8.	Contoh batas transform dari pergerakan lempeng2 tektonik	41
Gambar 4.9.	San Andreas Fault, batas transform lempeng Pasifik dengan Amerika Utara	42
Gambar 5.1.	Deformasi kerak bumi sampai mencapai keruntuhan (rupture)	45
Gambar 5.2.	Sebaran pusat-pusat gempa bumi dunia	48
Gambar 5.3.	Skematik posisi Epicentrum terhadap Hypocentrum pusat gempa bumi	49
Gambar 5.4.	Seismoscope dan proses kerjanya	51
Gambar 5.5.	Seismograf Horizontal	51
Gambar 5.6.	Seismograf Vertikal	52
Gambar 5.7.	Seismogram menggambarkan selisih waktu kedatangan gelombang P dan S	53
Gambar 5.8.	Ilustrasi dampak amplitudo gempa pada bangunan tinggi	58
Gambar 5.9.	Dampak Gempa 6,8 SR di Chile Utara, 30 Januari 2013. Bagian atas bangunan mengalami kerusakan yang lebih berat, oleh karena mengalami ayunan amplitudo yang lebih besar	59
Gambar 5.10.	Amblesan yang disebabkan tambahan beban dinamis, akibat percepatan gempa	60
Gambar 5.11.	Diagram proses terjadinya Likuifaksi	61
Gambar 5.12.	Contoh skematis terjadinya likuifaksi	62
Gambar 5.13.	Likuifaksi akibat gempa bumi Niigata (1964)	63
Gambar 5.14.	Pergeseran masa tanah akibat gempa bumi, menimbulkan retakan dan rekahan pada badan jalan	64
Gambar 5.15.	Mekanisme tsunami, dipicu oleh deformasi lantai samudera	66
Gambar 5.16.	Tsunami dapat disebabkan oleh longsoran besar bawah laut dan tumbukan benda langit yang besar ke permukaan laut	67
Gambar 5.17.	Pola retakan dan Sesar San Andreas, pemicu gempa San Fransisco (1906)	72

Gambar 5.18.	Gempa bumi dan pergeseran tanah mengakibatkan terpatahkannya saluran pipa gas dan memicu kebakaran besar (San Fransisco, 17 April 1906)	72
Gambar 5.19.	Episentrum gempa bumi Chile, 22 Mei 1960	74
Gambar 5.20.	Episentrum dan konfigurasi tektonik, pada gempa Alaska (1964)	76
Gambar 5.21.	Gempa-gempa yang terjadi di sepanjang jalur kepulauan Aleutian	76
Gambar 5.22.	Jembatan Showa, runtuh akibat likuifaksi	78
Gambar 5.23.	Episentrum gempa bumi Nepal (2015)	80
Gambar 5.24.	Menara Dharahara di Durbar, sebelum dan sesudah gempa bumi 2015	81
Gambar 5.25.	Gempa bumi Aceh (2004) dan daerah-daerah terdampak Tsunami	83
Gambar 5.26.	Seismogram gempa Aceh (1907) dan (2002) yang terekam pada Seismometer	85
Gambar 5.27.	Episentrum gempa bumi Yogyakarta (2006)	87
Gambar 5.28.	Sketsa pergeseran sesar Opak pada gempa Yogyakarta (2006)	87
Gambar 5.29.	Lokasi pusat gempa Pidie Jaya, 7 Desember 2016	90
Gambar 5.30.	Pusat-pusat gempa bumi Lombok (2018)	90
Gambar 5.31.	Distribusi sesar-sesar disekitar pulau Lombok	92
Gambar 5.32.	Sketsa Flores Back Arc Thrust Fault, pemicu gempa bumi Lombok	93
Gambar 5.33.	Pusat gempa Palu/Donggala 2018, magnitudo 7,7 SR (dikoreksi 7,4 SR)	95
Gambar 5.34.	Jembatan Vatulemo yang runtuh digoncang gempa dan diterjang tsunami	96
Gambar 5.35.	Likuifaksi pergerakan tanah di wilayah Petobo	97
Gambar 5.36.	Kehancuran perumahan akibat likuifaksi	98
Gambar 5.37.	Tsunami terpicu oleh longsoran pada tubuh gunung Anak Krakatau	101
Gambar 5.38.	Peta Zonasi Gempa Indonesia	105
Gambar 5.39.	Sebaran pusat-pusat gempa bumi di Indonesia	106
Gambar 5.40.	Peta wilayah rawan tsunami Indonesia (Sumber : BNPB)	106
Gambar 6.1.	Skema proses Gambar pembentukan gunung api	114
Gambar 6.2.	Erupsi effusif dan aliran lava gunung Kilauea, Hawaii.	115
Gambar 6.3.	Erupsi Explosif gunung St. Helena, 22 Juli 1980	115
Gambar 6.4.	Erupsi Freatik di Dieng - Jawa Tengah, pada tahun 2011	116
Gambar 6.5.	Geyser di Eslandia	117
Gambar 6.6.	Fissure Eruption Mt Laki - Eslandia	118

Gambar 6.7.	Hamparan batuan beku lava, produk fissure eruption Mt Laki – Eslandia	118
Gambar 6.8.	Lava membeku membentuk struktur bantal (pillow lava)	119
Gambar 6.9.	Bongkahan “Bom Kerak Roti” (Bread-crust Bomb)	120
Gambar 6.10.	Fragmen “Batu Apung” atau Pumice	120
Gambar 6.11.	Jenis2 morfologi umum gunung api	124
Gambar 6.12.	Kawah / Kepundan berbentuk tapal kuda	125
Gambar 6.13.	Danau Kawah	126
Gambar 6.14.	Kaldera Tengger dengan gunung Bromo dan Batok didalamnya	127
Gambar 6.15.	Sketsa pembentukan volcanic neck	128
Gambar 6.16.	Morfologi Volcanic Neck	128
Gambar 6.17.	Grafik hubungan antara skala VEI dengan ketinggian lontaran material (plume)	131
Gambar 6.18.	Perbandingan kekuatan erupsi berdasarkan volume material yang dikeluarkan	132
Gambar 6.19.	Peta Gunung Api Indonesia	133
Gambar 6.20.	Jalur pegunungan Mediterania, atau Alpide Belt	134
Gambar 6.21.	Jalur pegunungan Circum Pacific, yang disebut sebagai Ring of Fire	134
Gambar 6.22.	Perspektif danau Toba, yang merupakan Kaldera Toba Supervolcano	137
Gambar 6.23.	Sketsa Peta Geologi Struktur Kaldera Toba Supervolcano	137
Gambar 6.24.	Lokasi gunung Vesuvius dan kota Pompeii, yang menghadap ke teluk Naples – Italia	139
Gambar 6.25.	Gunung Vesuvius di foto dari udara (1971)	139
Gambar 6.26.	Korban erupsi gunung Vesuvius (79 M), yang tertimbun dan tersementasi	140
Gambar 6.27.	Posisi tektonik gunung Vesuvius	141
Gambar 6.28.	Batuan vulkanik produk erupsi Vesuvius, yang disebut Tephrite	141
Gambar 6.29.	Penyebaran material pyroclastic dan gelombang tsunami pada erupsi gunung Krakatau (1883)	143
Gambar 6.30.	Perubahan landscape kompleks gunung Krakatau	144
Gambar 6.31.	Gunung Krakatau (Anak Krakatau) dengan ekosistemnya sekarang, tumbuh dari bawah laut dalam waktu < 100 tahun	145
Gambar 6.32.	Gunung Krakatau (Anak Krakatau) tahun 2014	145
Gambar 6.33.	Lokasi Gunung Tambora di Semenanjung Sanggar – Pulau Sumbawa	146
Gambar 6.34.	Gunung Tambora sebelum dan sesudah erupsi (1815)	146
Gambar 6.35.	Kaldera Gunung Tambora	147

Gambar 6.36.	Korban yang tertimbun material vulkanik, erupsi Gn Tambora (1815)	148
Gambar 6.37.	Luncuran awan panas (nuee ardante d'avalanche), erupsi Merapi (2010)	149
Gambar 6.38.	Banjir lahar dingin gunung Merapi di kali Gendol (2015)	150
Gambar 6.39.	Sabo Dam sungai Bojong, penahan aliran lahar dingin gn Merapi	151
Gambar 6.40.	Danau Kawah gunung Kelud sebelum erupsi 2007	152
Gambar 6.41.	Sistem terowongan drainase danau kawah gunung Kelud	153
Gambar 6.42.	Kubah lava gunung Kelud, setelah erupsi freatik tahun 2007	154
Gambar 6.43.	Sekilas riwayat erupsi gunung Sinabung	154
Gambar 6.44.	Luncuran awan panas (nuee ardante) pada erupsi gunung Sinabung (2010)	155
Gambar 6.45.	Korban luncuran awan panas Gunung Sinabung	155
Gambar 6.46.	Sketsa lokasi Dataran Tinggi Dieng	157
Gambar 6.47.	Kompleks vulkanik dan kaldera Dieng	158
Gambar 6.48.	Kawah Sinila	158
Gambar 6.49.	Korban gas beracun	159
Gambar 6.50.	Peta Daerah Bahaya Dieng	161
Gambar 6.51.	Aliran Lava pada erupsi effusif gunung Kilauea - Hawaii	167
Gambar 6.52.	Lontaran dan endapan abu vulkanik, erupsi gunung Kelud (2014)	168
Gambar 6.53.	Luncuran awan panas erupsi gunung Sinabung (2010).Tabel 6.6. : Indikasi dan bahaya kadar gas hydrogen sulfide	169
Gambar 7.1.	Interaksi gaya-gaya endogen dan eksogen	177
Gambar 7.2.	Zona iklim global di bumi secara geografis	179
Gambar 7.3.	Hutan Tropis Basah, Amazon - Brazil	181
Gambar 7.4.	Benua Antartika didalam zona Lingkaran Kutub Selatan	182
Gambar 7.5.	Panorama musim gugur pada Zona Sub-Tropis di Nederland	183
Gambar 7.6.	Proses penyeimbangan melalui erosi dan gerakan tanah	184
Gambar 7.7.	Proses erosi dan pemindahan material oleh media angin, membentuk Gumuk Pasir (Dunes)	185
Gambar 7.8.	Erosi Glacial membentuk lembah-lembah berbentuk "U"	186
Gambar 7.9.	Endapan Glacial yang disebut sebagai Moraine	186
Gambar 7.10.	Perkembangan bentuk lembah sungai, menunjukkan perubahan arah erosi vertikal menuju lateral	188

Gambar 7.11.	Jenis-jenis erosi air permukaan	188
Gambar 7.12.	Erosi percik (splash erosion) pada permukaan tanah	189
Gambar 7.13.	Erosi lembar (sheet erosion)	189
Gambar 7.14.	Erosi alur (rill erosion)	190
Gambar 7.15.	Erosi parit (gully erosion)	190
Gambar 7.16.	Erosi pada tebing sungai (streambank erosion)	191
Gambar 7.17.	Skematis pola perpindahan alur sungai pada daerah dataran dan pembentukan oxbow lake, oleh proses erosi tebing sungai (streambank erosion)	191
Gambar 7.18.	Abrasi pantai barat Sumatera Barat, menggeser garis pantai kearah daratan	182
Gambar 7.19.	Proses terbentuknya sinkhole, dan contoh kejadiannya di Guatemala (2007)	193
Gambar 7.20.	Diagram proses terjadinya headward erosion	194
Gambar 7.21.	Headward erosion pada lembah sungai Colorado, Utah - USA	194
Gambar 7.22.	Siklus Hidrologi	197
Gambar 8.1.	Diagram daerah tangkapan hujan (catchment area) ..	204
Gambar 8.2.	Ombrometer - alat pengukur curah hujan manual	205
Gambar 8.3.	Contoh pencatatan intensitas curah hujan rata-rata bulanan dan 10 harian, periode tahun 2001 - 2010, pada pos pencatatan Kalianget - Jawa Tengah	205
Gambar 8.4.	Contoh peta Isohyet tahunan, daerah tangkapan hujan sungai Kuiseb - Namibia	206
Gambar 8.5.	Diagram alur sungai dengan dataran banjir disekitarnya	210
Gambar 8.6.	Diagram yang menunjukkan kapasitas saluran alur sungai	210
Gambar 8.7.	Diagram zonasi teknis daerah pengelolaan sungai	211
Gambar 8.8.	Berbagai metoda peningkatan kapasitas alur sungai	213
Gambar 8.9.	Sistem jaringan kanal di Amsterdam, berfungsi sebagai banjir kanal	214
Gambar 8.10.	Contoh disain bendungan pengendali banjir, Prado Dam - Orange County Water District, USA	215
Gambar 8.11.	Bendungan Situ Gintung yang bobol pada tanggal 27 Maret 2009	216
Gambar 8.12.	Peta banjir bandang Situ Gintung - Tangerang Selatan, 27 Maret 2009	217
Gambar 8.13.	Profil bendungan Gintung, sebelum dan sesudah bobol	218
Gambar 8.14.	Peta daerah tangkapan hujan (catchment area) sungai Cimanuk dan banjir bandang Garut, 21 September 2016	219
Gambar 8.15.	Bendungan Vajont (Vajont Dam) - Italia	220

Gambar 8.16.	Longsor pada lereng Monte Toc menuju waduk Vajont	222
Gambar 8.17.	Penampang waduk Vajont, sebelum dan sesudah longsor 1963	222
Gambar 8.18.	Lokasi Bendungan Vajont dan daerah yang terdampak banjir bandang	223
Gambar 8.19.	Peta lokasi Bendungan St Francis	224
Gambar 8.20.	Bendungan St Francis, sebelum dan sesudah keruntuhannya	226
Gambar 8.21.	Profil Geologi pada bendungan St Francis	226
Gambar 8.22.	Peta Curah Hujan Tahunan kepulauan Indonesia	227
Gambar 8.23.	Peta potensi bencana banjir Indonesia (sumber : BNPB)	228
Gambar 8.24.	Penamaan siklon tropis pada berbagai wilayah	230
Gambar 8.25.	Diagram struktur siklon tropis	231
Gambar 8.26.	Siklon tropis di Amerika Serikat, dikenal sebagai Tornado	231
Gambar 8.27.	Peta sebaran titik api pada kebakaran hutan Indonesia tahun 2019	236
Gambar 8.28.	Grafik kecenderungan potensi kebakaran hutan di Indonesia	236
Gambar 8.29.	Ilustrasi kebakaran 3 juta hektar hutan di Siberia (AP via TASS)	237
Gambar 8.30.	Ilustrasi kebakaran hutan Kep Canary (AFP Photo)	238
Gambar 8.31.	Ilustrasi Kebakaran Hutan Greenland - Denmark (iStockphoto)	239
Gambar 8.32.	Pohon-pohon terbakar oleh api dalam kebakaran hutan yang dijuluki Carr Fire di Whiskeytown, California, Jumat (28/7) yang telah meng-hanguskan 1900 hektare lahan. (JOSH EDELSON/AFP)	240
Gambar 8.33.	Ilustrasi kebakaran hutan dan lahan di Australia selama musim kemarau, lazim dikenal sebagai fenomena Bushfire (Rob Griffith / AFP PHOTO)	241
Gambar 9.1.	Klasifikasi Tanah Longsor atau Gerakan Tanah (Cruden & Varnes, 1992)	245
Gambar 9.2.	Longsor Blok (Block Slide)	245
Gambar 9.3.	Longsor Translasi (Translational Slides)	248
Gambar 9.4.	Nendatan (Slump)	248
Gambar 9.5.	Robohan pada batuan (Rock Topple)	247
Gambar 9.6.	Runtuhan Batu (Rock Fall)	247
Gambar 9.7.	Runtuhan Bahan Rombakan (Debris Fall)	248
Gambar 9.8.	Rayapan Tanah (Soil Creep)	249
Gambar 9.9.	Aliran Bahan Rombakan (Debris/Earth Flow)	250
Gambar 9.10.	Ilustrasi gerak longsor (slide) translasi dan rotasi ..	251

Gambar 9.11.	Ilustrasi masa tanah yang menggelincir diatas bidang miring	251
Gambar 9.12.	Longsoran tanah rotasi	253
Gambar 9.13.	Gaya ² yang bekerja pada setiap irisan pada metoda Fellenius	255
Gambar 9.14.	Sistem gaya pada suatu elemen menurut Bishop	257
Gambar 9.15.	Model keruntuhan pada lereng batuan	259
Gambar 9.16.	Diagram potensi keruntuhan pada lereng batuan	262
Gambar 9.17.	Zona kritis longsoran bidang (plane failure) dalam stereo net	263
Gambar 9.18.	Zona kritis longsoran baji (wedge failure) dalam stereo net	264
Gambar 9.19.	Longsoran rotasi (circular failure) pada lereng batuan dengan bidang diskontinuitas yang rapat	264
Gambar 9.20.	Zona kritis robohan batuan (rock topple) dalam stereo net	265
Gambar 9.21.	Ilustrasi gerakan masa tanah/batuan yang dipicu oleh erosi/abrasi	267
Gambar 9.22.	Stabilisasi lereng dengan pengupasan	268
Gambar 9.23.	Stabilisasi lereng dengan beban perlawanan (counterweight)	269
Gambar 9.24.	Penambatan Batuan	270
Gambar 9.25.	Sistem drainase air tanah (subsurface drainage)	271
Gambar 9.26.	Contoh kombinasi stabilisasi lereng	272
Gambar 9.27.	Jejak bidang gelincir pada longsoran Mt Granier-Perancis(1248)	273
Gambar 9.28.	Landslide-made lake Diexi	274
Gambar 9.29.	Jejak longsoran pada peristiwa gerakan tanah di lembah Yarhich(1949)	275
Gambar 9.30.	Kuburan masal Yungay (Yungay mass graveyard)	276
Gambar 9.31.	Kota Armero yang terbanjiri aliran lumpur (mudflow)	277
Gambar 9.32.	Tanah longsor yang dipicu gempa di Padang Pariaman Oct. 3, 2009	284
Gambar 9.33.	Tanah longsor dusun Jemblung-Banjarnegara(2014)	284
Gambar 9.34.	Peta Potensi Gerakan Tanah di Indonesia (sumber : BNPB)	285
Gambar 10.1.	Mesin uap karya James Watt (1769)	291
Gambar 10.2.	Pertumbuhan penduduk dunia sebelum dan sesudah Revolusi Industri	293
Gambar 10.3.	Peta pusat ² industri & pertambangan di Inggris pasca Revolusi Industri	294
Gambar 10.4.	Grafik korban jiwa kecelakaan kerja per sektor di Amerika Serikat, 2009	298
Gambar 10.5.	Proses kimia penghasil pestisida Karbaril	299

Gambar 10.6.	Korban langsung tragedi Bhopal (1984)	300
Gambar 10.7.	Reaktor Nuklir Chernobyl	301
Gambar 10.8.	Peta lokasi Bendungan St Francis	303
Gambar 10.9.	Profil Geologi pada bendungan St Francis	305
Gambar 10.10.	Bendungan St Francis, sebelum dan sesudah keruntuhannya	306
Gambar 10.11.	Bendungan Vajont (Vajont Dam)- Italia	307
Gambar 10.12.	Lokasi Bendungan Vajont (Vajont Dam)	308
Gambar 10.13.	Penampang waduk Vajont, sebelum dan sesudah longsor 1963	310
Gambar 10.14.	Prinsip kerja bom memantul dalam Dambuster (Dr Barnes Wallis)	312
Gambar 10.15.	Kerusakan dam Eder akibat Operasi Chastise	313
Gambar 10.16.	Lokasi Proyek Manhattan	315
Gambar 10.17.	Komposisi kimia Agen Oranye	317
Gambar 10.18.	Operasi penyemprotan Agen Oranye di Vietnam (1971)	318
Gambar 10.19.	Dampak Agen Oranye, sebelum dan sesudah penyemprotan	319
Gambar 11.1.	Ilustrasi awal penggunaan bubuk mesiu untuk peluncuran panah api	322
Gambar 11.2.	Ilustrasi senjata penyembur Api Yunani	323
Gambar 11.3.	Replika senjata Busur Campuran (Composite Bow) ...	324
Gambar 11.4.	Replika senjata Busur Silang Beruntun	325
Gambar 11.5.	Replika Trebuset	325
Gambar 11.6.	Ilustrasi senjata Ballista Roma	326
Gambar 11.7.	Caltrop	327
Gambar 11.8.	Ilustrasi Kereta Perang Mesir (Egypt Chariot)	327
Gambar 11.9.	Ilustrasi Katapel Mekanis Archimedes	328
Gambar 11.10.	Ilustrasi dan mekanisme kerja Cakar Archimedes	329
Gambar 11.11.	Ilustrasi mekanisme kerja Sinar Penghancur Archimedes	329
Gambar 11.12.	Contoh berbagi jenis senapan laras panjang (rifle) dan perkembangannya	331
Gambar 11.13.	Gatling Gun	332
Gambar 11.14.	Contoh reaksi nuklir berupa fisi atom Uranium, menghasilkan pelepasan energi sebesar 200 MeV	337
Gambar 11.15.	Bom Atom yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki	338
Gambar 11.16.	Reaksi nuklir fusi isotop Hidrogen (Deuterium dan Tritium) di matahari, membentuk atom Helium dengan melepaskan energi sebesar 3.2 MeV	340
Gambar 11.17.	Skema proses peledakan Bom Hidrogen	341
Gambar 11.18.	Replika Tsar Bomba	343

Gambar 11.19.	Contoh senjata biologi dalam bentuk bom	348
Gambar 12.1.	Wilayah pengaruh Romawi dan Khartago sebelum Perang Punisia I	354
Gambar 12.2.	Wilayah pengaruh Romawi dan Khartago setelah Perang Punisia I	355
Gambar 12.2.	Wilayah kekuasaan Romawi setelah Perang Punisia II	355
Gambar 12.3.	Negara-negara yang terlibat Perang Dunia I	359
Gambar 12.4.	Negara-negara yang terlibat dalam Perang Dunia II ...	362
Gambar 12.5.	Negara Blok Barat dan Blok Timur pada masa Perang Dingin di Eropa	367
Gambar 12.6.	Pembagian wilayah Jerman berdasarkan Perjanjian Postdam (1945)	371
Gambar 12.7.	Peta Tembok Berlin	372
Gambar 12.8.	Pembagian semenanjung Korea berdasarkan Konferensi Postdam	373
Gambar 12.9.	Pembagian Vietnam menjadi Vietnam Utara dan Vietnam Selatan	377
Gambar 13.1.	Diagram interaksi Siklus Tektonik, Siklus Eksogen dan Siklus Batuan, yang menggerakkan Siklus Roman Muka Bumi	388
Gambar 13.2.	Diagram siklus peredaran posisi matahari terhadap permukaan bumi	389
Gambar 13.3.	Pergerakan Angin Muson di kepulauan Indonesia	391
Gambar 13.4.	Contoh posisi Aphelion dan Perihelion tahun 2011	392
Gambar 13.5.	Diagram Siklus Milankovitch	394
Gambar 13.6.	Diagram rotasi dan peredaran bumi berdasarkan Hipotesis Milankovitch	
Gambar 13.7.	Diagram siklus tektonik	395
Gambar 13.7.	Diagam Siklus Tektonik	396
Gambar 13.8.	Biosfer sebagai hasil interaksi dari elemen-elemen Lithosfer (Geosfer), Hidrosfer dan Atmosfer	397
Gambar 13.9.	Diagram Siklus Biosfer, berkaitan dengan siklus bumi	398
Gambar 13.10.	Siklus Rantai Makanan	403
Gambar 13.11.	Diagram Siklus Karbohidrat, yang merupakan molekul organic	405
Gambar 13.12.	Diagram Siklus Nitrogen	407
Gambar 13.13.	Siklus biogeokimia Belerang (Sulfur)	409
Gambar 13.14.	Siklus biogeokimia Fosfor	411
Gambar 13.15.	Diagram siklus energi yang menyertai rantai makanan	415
Gambar 14.1.	Konsentrasi lapisan Ozon di atmosfer	427
Gambar 14.2.	Diagram intervensi CFC pada siklus ozon	427
Gambar 14.3.	Perkembangan produksi plastik dunia	430

Gambar 14.4.	Hamparan limbah plastik di waterfront pulau Roatan-Karibia-Honduras	431
Gambar 14.5.	Peta Kumamoto Prefecture, dan lokasi terdampak wabah Minamata	434
Gambar 14.6.	Grafik peningkatan kadar CO2 & pengurangan kawasan hutan	443
Gambar 14.7.	Trend pengurangan gas-gas perusak ozon sampai dengan tahun 2008	447
Gambar 14.8.	Grafik perkembangan lubang Ozon di Belahan Bumi Selatan sampai dengan tahun 2014	447
Gambar 14.9.	Perkembangan lubang Ozon diatas benua Antartika ..	448
Gambar 15.1.	Interaksi antara tahapan kegiatan dengan komponen lingkungan, beserta potensi dampak yang dapat terjadi	483
Gambar 15.2.	Contoh unjuk rasa penolakan rencana pembangunan PLTN Muria	485
Gambar 15.3.	Diagram perbaikan upaya pengelolaan lingkungan (UPL)	499
Gambar 15.4.	Diagram prosedur pelaksanaan AMDAL	500
Gambar 16.1.	Diagram trilogi bencana	504

Daftar Tabel

Tabel 2.1.	Skala Waktu Geologi Relatif dan Umur Radiometrik	13
Tabel 3.1.	Ledakan Meteor Chelyabinsk (2013)	20
Tabel 5.1.	Skala intensitas gempa bumi Mercalli yang telah dimodifikasi (MMI)	54
Tabel 5.2.	Perhitungan magnitudo gempa Skala Richter, dengan metoda grafis	55
Tabel 5.3.	Gambaran dampak kualitatif besaran magnitudo gempa dalam Skala Richter	56
Tabel 5.4.	Korelasi kualitatif antara skala Richter, MMI dan percepatan gempa	57
Tabel 5.5.	Gempa bumi besar dengan korban > 100 000 orang	70
Tabel 5.6.	Daftar gempa bumi penting yang tercatat pernah terjadi	71
Tabel 5.7.	Daerah terdampak dan waktu kedatangan tsunami Aceh (2004)	84
Tabel 5.8.	Percepatan gempa per wilayah zona gempa	105
Tabel 6.1.	Daftar 10 Erupsi Vulkanik dunia dengan korban terbesar	112
Tabel 6.2.	Klasifikasi erupsi berdasarkan skala Volcanic Explosivity Index (VEI)	131
Tabel 6.3.	Bencana erupsi gunung api di Indonesia, dengan jumlah korban yang besar	135
Tabel 6.4.	Catatan erupsi pada kompleks vulkanik Dieng	163
Tabel 6.5.	Klasifikasi status aktivitas gunung api	166
Tabel 8.1.	Bencana banjir dunia yang menimbulkan korban besar ..	203
Tabel 8.2.	Koefisien Limpasan untuk jenis2 permukaan lahan	208
Tabel 8.3.	Catatan bencana Siklon Tropis yang mengakibatkan korban besar	229
Tabel 8.4.	Daerah-daerah awal pertumbuhan siklon tropis	232
Tabel 8.5.	Kebakaran Hutan di berbagai negara (2011 - 2015)	234
Tabel 9.1.	Klasifikasi Tanah Longsor (Landslides) - Varnes, 1978 ...	244
Tabel 9.2.	Harga m.a untuk persamaan Bishop	258
Tabel 9.3.	Catatan peristiwa gerakan tanah besar dunia, pada abad-20	278
Tabel 10.1.	Insiden instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir besar s/d 2009	301
Tabel 10.2.	Daftar keruntuhan bendungan yang menimbulkan kerugian besar	306
Tabel 11.1.	Berbagai organisme patogen bahan pembuat senjata biologi	347

Tabel 12.1. Negara-negara Blok Sekutu sebelum penyerangan Pearl Harbor	384
Tabel 12.2. Daftar negara-negara yang memiliki senjata nuklir	369
Tabel 12.3. Jumlah korban Perang Korea selama 1950-1953	376
Tabel 12.4. Perkiraan korban jiwa selama Perang Vietnam (1954-1975)	380
Tabel 15.1. Salinan DAFTAR KAWASAN LINDUNG, SESUAI Lampiran III Peraturan MNLH No.05 tahun 2012	458
Tabel 15.2. Daftar kegiatan wajib AMDAL sesuai Peraturan MENLH No. 05/2012	459
Tabel 15.3. Contoh baku mutu air limbah industri berdasarkan peruntukan badan air penerima (Stream Standard)	489
Tabel 15.4. Contoh baku mutu air limbah industri berdasarkan stadar air limbah (Effluent Standard)	490
Tabel 15.5. Baku mutu udara ambien nasional	491
Tabel 15.6. Baku mutu udara berdasarkan bau	492
Tabel 15.7. Baku mutu tingkat kebisingan.....	492

1

PENDAHULUAN

Bencana yang sering diidentikkan dengan sesuatu yang buruk, dalam bahasa Inggris disebut *disaster* (*disastro dalam bahasa Yunani*), secara etimologis berasal dari kata *dis* yang berarti sesuatu yang tidak enak (*unfavorable*) dan *astro* yang berarti bintang (*star*). Maka pada pandangan primitif, *disaster* pada awalnya menggambarkan peristiwa jatuhnya bintang-bintang ke bumi yang menimbulkan berbagai ketidak nyamanan (*an event precipitated by stars*). Namun dalam perkembangannya, istilah tersebut juga digunakan untuk segala bentuk kejadian yang menimbulkan berbagai korban, kerugian dan ketidak nyamanan.

Bencana adalah sesuatu yang tak terpisahkan dalam sejarah manusia. Manusia berjuang dan terus berjuang untuk bebas dari bencana, sehingga menghasilkan berbagai upaya mitigasi. Seperti misalnya, upaya mitigasi kekeringan di Mesir yang dikenal sudah dilakukan lebih dari 4000 tahun yang lalu. Kemudian konsep tentang sistem peringatan dini untuk penanggulangan dan kesiapsiagaan (*preparedness*) menghadapi bencana kelaparan (*famine*), pernah dilakukan dengan membangun lumbung raksasa yang disiapkan selama tujuh tahun pertama masa kelimpahan untuk digunakan selama tujuh tahun masa kekeringan, sudah dikenal pada tahun 2000 SM seperti yang tertulis dalam naskah-naskah Yahudi Kuno.

Bencana adalah peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan manusia, yang disebabkan baik oleh faktor alam dan/atau faktor non-alam termasuk faktor manusia, sedemikian rupa sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis. Definisi tersebut menyebutkan bahwa secara umum bencana dapat disebabkan oleh faktor alam, non-

alam ataupun manusia. Secara formal, dalam *Undang-undang Nomor 24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana* disebutkan bahwa bencana adalah suatu peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat, yang disebabkan baik oleh faktor alam dan/atau faktor non-alam maupun faktor manusia, sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

Bencana dapat terjadi oleh sebab suatu peristiwa atau rangkaian peristiwa luar biasa yang disebabkan oleh proses alam, yang dalam hal ini disebut sebagai *bencana alam*, dan dapat pula disebabkan oleh perilaku manusia sendiri, baik secara sengaja atau tidak.

Manusia dengan kelebihan nalar budinya mempunyai kemampuan mengembangkan teknologi untuk mengelola sumberdaya alam dan meng-intervensi proses alam lingkungan sekitarnya. Namun kegagalan dalam mengelola teknologi dapat menyebabkan kecelakaan, yang dalam skala besar menimbulkan bencana, yang dalam hal ini disebut sebagai *bencana teknologi*.

Ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkembang pesat, secara tidak langsung merubah pola pikir manusia, dari pola *holistik* berubah menjadi *transeden*. Yaitu, manusia tidak lagi memosisikan dirinya sebagai bagian dari lingkungan (*holistik*), akan tetapi memandang alam lingkungan sebagai obyek untuk di-eksploitasi (*transeden*). Maka alampun ber-reaksi, yang terkadang justru merugikan kepentingan manusia sendiri. Reaksi alam dapat terjadi secara mendadak sehingga menimbulkan bencana bagi manusia, namun dapat pula mengganggu keseimbangan lingkungan yang ber-angsur-angsur berdampak bencana pula bagi kehidupan manusia, yang dalam hal ini disebut sebagai *bencana lingkungan*.

Bencana alam terjadi secara alamiah mengikuti proses siklus alam, *bencana teknologi* dapat terjadi sebagai akibat kecelakaan atau ketidak-siapan teknologi, sedangkan *bencana lingkungan* terjadi sebagai akibat terganggunya keseimbangan lingkungan. Ketiganya dapat terjadi sendiri-sendiri, namun dapat pula saling terkait interaksi sebab akibat antara satu dengan lainnya, maka disebut sebagai tiga serangkai atau *trilogi bencana*.

2

BENCANA MASA LAMPAU

Apabila bencana, tanpa kehadiran manusia, diidentifikasi sebagai suatu peristiwa besar berupa perusakan atau penghancuran atas suatu sistem, maka bencana sudah terjadi jauh sebelum masa peradaban manusia, bahkan sebelum keberadaan manusia di bumi. Bahkan bumipun terbentuk atas suatu peristiwa bencana alam semesta yang besar, yaitu berupa ledakan besar yang disebut sebagai *big bang* (*Vesto Slipher-1912; Edwin Hubble-1924; Georges Lemaitre-1927; George Gamov-1948; dll*). Bumi produk peristiwa *big bang* hanyalah merupakan satu titik kecil diantara ber milyar benda langit yang ber lalu-lalang di alam semesta, tentu rentan mengalami bencana yang diakibatkan oleh interaksinya dengan benda-benda langit lainnya.

Bencana besar terhadap kehidupan di bumi yang dikenal dalam kurun waktu geologi, setidaknya pernah terjadi dua kali. Yaitu peristiwa kepunahan *Perm-Trias* pada akhir masa *Paleozoikum* sekitar 240 juta tahun yang lalu, yang merupakan peristiwa kepunahan besar yang terekam dalam jejak fosil, yang telah membinasakan sekitar 95% spesies kehidupan di bumi. Dan kemudian bencana besar yang telah mengakibatkan kepunahan kehidupan binatang raksasa keluarga *Dinosaurus*, pada akhir masa *Mesozoikum* sekitar 65 juta tahun yang lalu

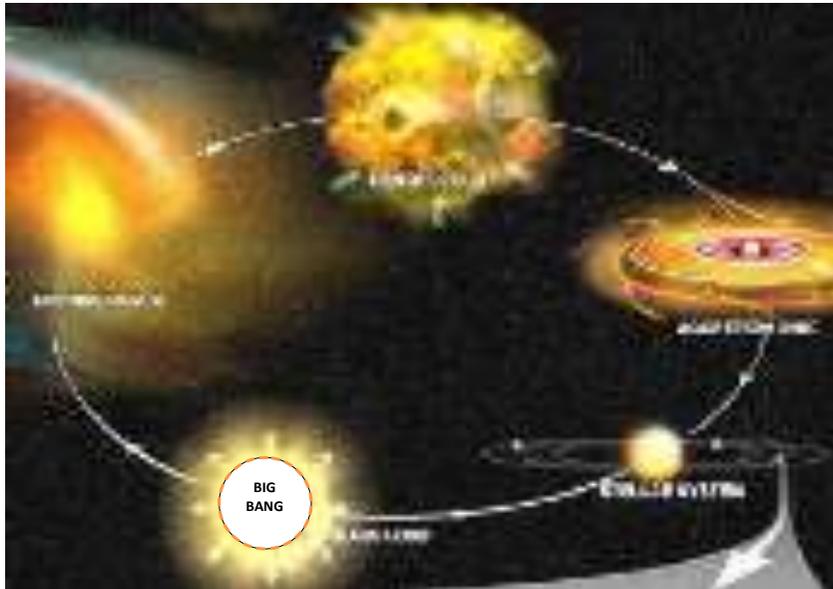
Bencana pada masa pra-peradaban manusia sepenuhnya merupakan bencana alam, oleh karena terjadi tanpa adanya intervensi manusia dengan kemampuan teknologinya, yang dapat mengganggu keseimbangan lingkungan yang kemudian menyebabkan terjadinya bencana lingkungan.

2.1. Teori *Big Bang* dan Proses Pembentukan bumi

2.1.1. Teori *Big Bang*

Teori *big bang* dikembangkan berdasarkan pengamatan pada stuktur alam semesta beserta pertimbangan teoritisnya. Dimana *Vesto Slipher* (1912) adalah orang pertama yang mengukur *efek doppler* pada "nebula spiral" (nebula spiral merupakan istilah lama untuk galaksi spiral), dan kemudian diketahui bahwa hampir semua nebula-nebula tersebut menjauhi bumi. Sepuluh tahun kemudian *Alexander Friedmann*, seorang ahli kosmologi dan matematika Rusia, menurunkan persamaan *Friedmann* dari persamaan relativitas umum *Albert Einstein*. Persamaan ini menunjukkan bahwa alam semesta kemungkinan mengembang, berlawanan dengan model alam semesta statis seperti yang di-advokasikan oleh *Einstein* pada saat itu.

Pengukuran *Edwin Hubble* (1924) terhadap jarak nebula spiral terdekat, menunjukkan bahwa nebula tersebut sesungguhnya merupakan galaksi lain. *Georges Lemaître* (1927) kemudian menurunkan persamaan *Friedmann* dan menyatakan bahwa resesi nebula yang disiratkan oleh persamaan tersebut diakibatkan oleh alam semesta yang mengembang. Sejak tahun 1924 itulah *Hubble* kemudian mengembangkan sederet indikator jarak yang merupakan cikal bakal tangga jarak kosmis dengan menggunakan teleskop *Hooker 100-inci* (2.500 mm) pada observatorium *Mount Wilson*. Hal ini memungkinkannya untuk memperkirakan jarak antara galaksi-galaksi yang telah diukur oleh *Slipher*, sehingga pada tahun 1929 *Hubble* menemukan korelasi antara jarak dan kecepatan resesi, yang sekarang dikenal sebagai *hukum Hubble*. *Lemaître* (1931) lebih jauh menyatakan, bahwa pengembangan alam semesta seiring dengan berjalannya waktu memerlukan syarat, bahwa alam semesta mengerut seiring berbaliknya waktu sampai pada suatu titik dimana seluruh masa alam semesta berpusat pada satu titik, yaitu "atom purba" dimana waktu dan ruang bermula.



Sumber :

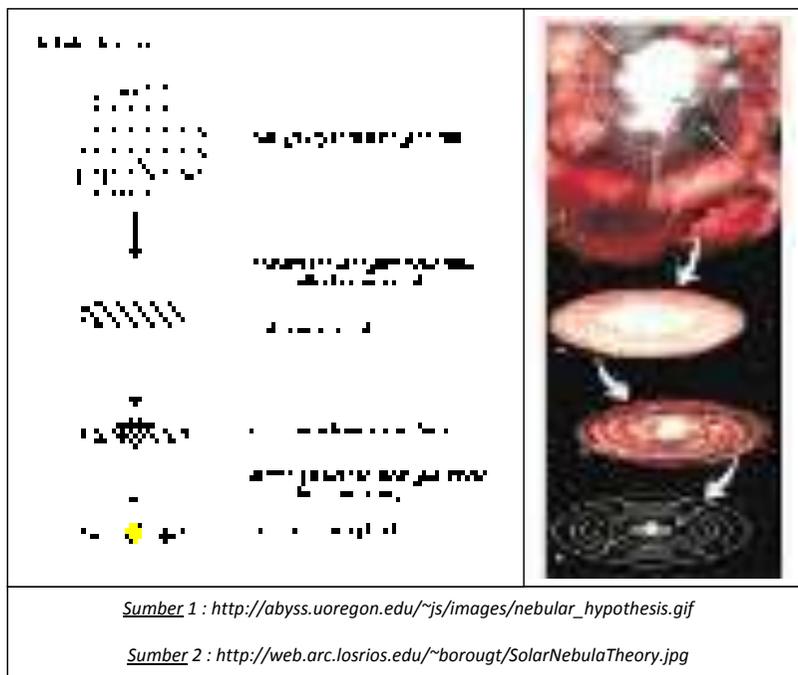
Modifikasi <http://www.everythingselectric.com/wpcontent/uploads/planetformation-theory-debunked-nebular-hypothesis.jpg>

Gambar 2.1. : Diagram siklus Big Bang

Bukti penting lain dari teori *big bang* adalah adanya sejumlah hidrogen dan helium di ruang angkasa. Dalam berbagai penelitian, diketahui bahwa konsentrasi hidrogen-helium di alam semesta bersesuaian dengan perhitungan teoritis konsentrasi hidrogen-helium sisa peninggalan peristiwa *big bang*. Sehingga, apabila alam semesta tidak memiliki permulaan, dan telah ada sejak awal, maka unsur hidrogen seharusnya telah habis berubah menjadi helium. *Gerge Gamov (1948)* menyatakan suatu pemikiran terkait dengan teori *big bang*, yaitu bahwa setelah pembentukan alam semesta melalui ledakan raksasa, sisa radiasi yang ditinggalkan oleh ledakan tersebut haruslah ada di alam semesta, dan harus tersebar merata di segenap penjuru alam semesta. Bukti tentang hal ini kemudian ditemukan oleh *Arno Penzias* dan *Robert Wilson (1965)*, yang tanpa sengaja menemukan adanya radiasi. Radiasi yang ditemukan ini disebutnya sebagai "*radiasi latar kosmis*", yang tidak terlihat memancar dari satu sumber tertentu namun meliputi keseluruhan ruang angkasa. Maka disimpulkan bahwa radiasi tersebut berasal dari sisa radiasi peninggalan tahapan awal peristiwa *big bang*.

Pada tahun 1989, NASA meluncurkan satelit *Cosmic Background Explorer (COBE)* ke ruang angkasa untuk melakukan penelitian tentang radiasi latar kosmis. COBE berhasil menemukan sisa ledakan raksasa, yang menunjukkan bahwa awal pembentukan alam semesta terjadi dari peristiwa bencana besar (*big bang*), sehingga dinyatakan sebagai penemuan astronomi terbesar sepanjang masa. Dan temuan tersebut diakui sebagai pembuktian teori *big bang*, sehingga dianggap sebagai titik akhir yang dicapai ilmu pengetahuan tentang asal muasal alam semesta, setidaknya sampai dengan saat ini.

2.1.2. Pembentukan Bumi dan Awal Kehidupan



Gambar 2.2. : Diagram hipotesis nebula, pembentukan sistem tata surya matahari

Berdasarkan teori *big bang* proses pembentukan bumi berawal puluhan milyar tahun yang lalu, dimana bencana ledakan besar menebarkan gumpalan-gumpalan nebula raksasa yang berputar pada porosnya. Putaran tersebut memungkinkan bagian-bagian kecil dan ringan terlempar keluar sedangkan bagian yang besar terkumpul pada

pusat poros putaran membentuk cakram raksasa. Selama jangka waktu sekitar 4,6 milyar tahun, nebula-nebula tersebut berangsur mendingin, membeku dan membentuk galaksi yang salah satunya adalah *Galaksi Bima Sakti*, yang didalamnya membentuk sistem tata surya, dimana bagian ringan yang terlempar keluar juga mengalami kondensasi sehingga membentuk gumpalan-gumpalan yang mendingin dan memadat, menjadi planet-planet salah satunya adalah planet bumi.

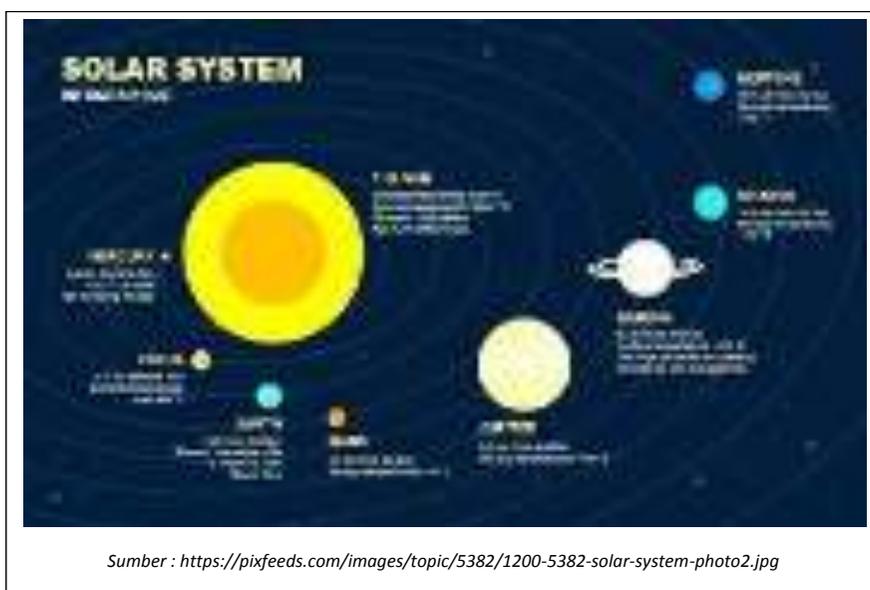
Secara umum hipotesa tersebut disebut sebagai *teori kabut* atau *hipotesis nebula*, yang pertama kali dikemukakan oleh *Emanuel Swedenborg* (1688-1772) pada tahun 1734, dan disempurnakan oleh *Immanuel Kant* (1724-1804) pada tahun 1775. Teori serupa juga dikembangkan oleh *Pierre Marquis de Laplace* secara independen pada tahun 1796, sehingga disebut sebagai *Hipotesis Nebula (Kant -laplace)*. Berbagai hipotesa dari para ahli yang mendasarkan teorinya dari konsep *hipotesis nebula*, menggambarkan bahwa proses pembentukan bumi tak terlepas dari bencana alam semesta.

Pada awal abad ke-20, *Forest Ray Moulton*, ahli astronomi Amerika bersama rekannya *Thomas C. Chamberlain*, seorang ahli geologi, mengemukakan teori yang disebut *Planetesimal Hypothesis*, yang menyatakan bahwa masa matahari yang terdiri dari masa gas, berpapasan dengan bintang lain dengan ukuran besar, sehingga hampir terjadi tabrakan. Pengaruh gaya gravitasi diantara keduanya mengakibatkan tertariknya gas dan materi ringan pada bagian tepi, sehingga terlempar meninggalkan permukaan matahari untuk kemudian menyusut membentuk gumpalan-gumpalan yang disebut *planetesimal*. *Planetesimal-planetesimal* tersebut kemudian mendingin dan memadat membentuk planet-planet yang mengelilingi matahari termasuk bumi. Bencana seperti ini akan dapat terulang, manakala dalam perjalanan orbitalnya bintang-bintang tersebut kembali mendekat dan berpapasan dengan sistem tata surya matahari.

James Jeans dan *Harold Jeffreys* (1918), mengemukakan *teori pasang-surut* yang hampir sama dengan *hipotesis planetesimal*. Yaitu adanya bintang besar yang dalam perjalanan orbitnya mendekati matahari, sehingga menyebabkan gaya tarik pada masa matahari ketika matahari masih berupa gumpalan gas. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pasang naik berbentuk gunung-gunung gelombang raksasa pada masa matahari, yang disebabkan oleh gaya tarik bintang

tersebut. Gunung-gunung gelombang tersebut mencapai tinggi yang luar biasa dan membentuk lidah pijar yang sangat besar, menjulur dari masa matahari dan merentang ke arah bintang besar tersebut. Dalam lidah pijar tersebut terjadi perapatan gas-gas dalam kolom-kolom, yang akhirnya terpecah dan terpisah menjadi benda-benda tersendiri, yaitu planet-planet termasuk bumi salah satunya.

Teori yang lainnya adalah *teori bintang kembar*, yang dikemukakan oleh ahli Astronomi *R.A Lyttleton*. Menurut teori ini, galaksi berasal dari kombinasi bintang kembar, dimana salah satunya meledak sehingga menyebarkan banyak material yang terlempar. Sementara itu, bintang yang tidak meledak, dengan kekuatan gaya gravitasinya menarik sebaran pecahan ledakan bintang tersebut, untuk beredar mengelilinginya. Bintang yang tidak meledak tersebut kemudian menjadi matahari, sedangkan pecahan-pecahan bintang yang meledak menjadi planet-planet yang mengelilinginya.

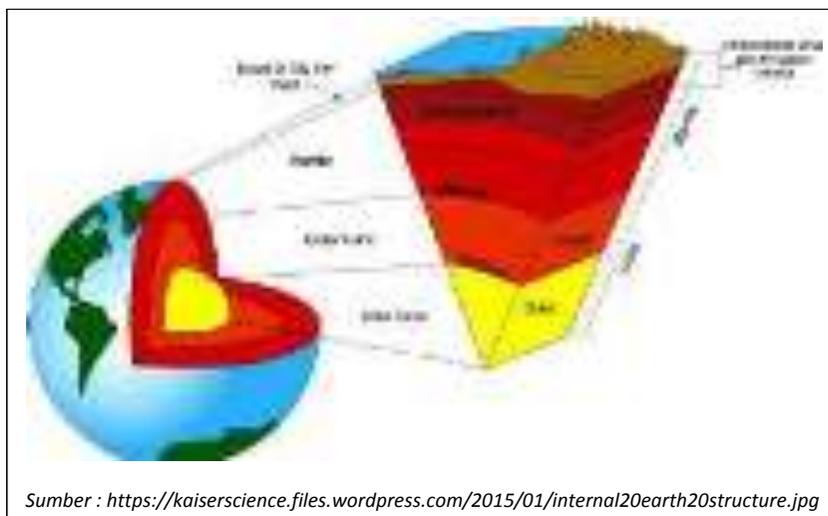


Gambar 2.3. : Sistem tata surya Matahari

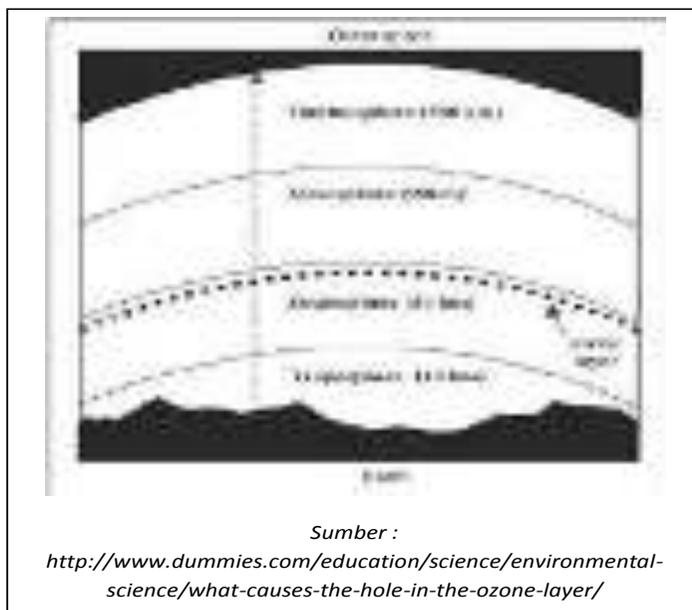
Sejarah bumi sendiri terkait dengan perkembangan planet bumi sejak awal pembentukannya sampai sekarang, dimana usia bumi diperkirakan sepertiga dari usia alam semesta. Bumi terbentuk sekitar 4,54 miliar (4.54×10^9) tahun yang lalu melalui akresi dari nebula

matahari. Pelepasan gas vulkanik diduga ber-kontribusi membentuk atmosfer tua yang nyaris tidak ber-oksigen, dan beracun bagi manusia dan sebagian besar makhluk hidup masa kini. Sebagian besar permukaan bumi meleleh oleh karena aktivitas vulkanik yang ekstrem dan seringnya tumbukan dengan benda angkasa lain. Sebuah tabrakan besar diduga menyebabkan kemiringan pada sumbu bumi dan menghasilkan bulan.

Bumi sebagai planet yang baru, terus bertumbuh sampai suhu interiornya cukup panas untuk melelehkan logam, sehingga dengan masa jenisnya yang lebih tinggi dari silikat berangsur tenggelam ke dalam inti bumi. Peristiwa yang disebut sebagai *katastrofe besi* tersebut mengakibatkan pemisahan mantel primitif dengan inti yang metalik. Proses ini terjadi sekitar 10 juta tahun setelah bumi mulai terbentuk, menghasilkan struktur bumi yang berlapis-lapis dan membentuk medan magnet. *J A Jacobs* merupakan orang pertama yang menunjukkan bahwa inti dalam pada bagian dalam yang padat berbeda dari inti luar yang padat membeku, dan mengembang keluar menjadi inti luar yang cair, disebabkan oleh inti dalam bumi yang semakin mendingin (sekitar 100°C per miliar tahun). Ekstrapolasi dari pengamatan ini memperkirakan bahwa inti terbentuk pada masa 2-4 miliar tahun yang lalu.



Gambar 2.4. : Diagram Struktur Interior Bumi



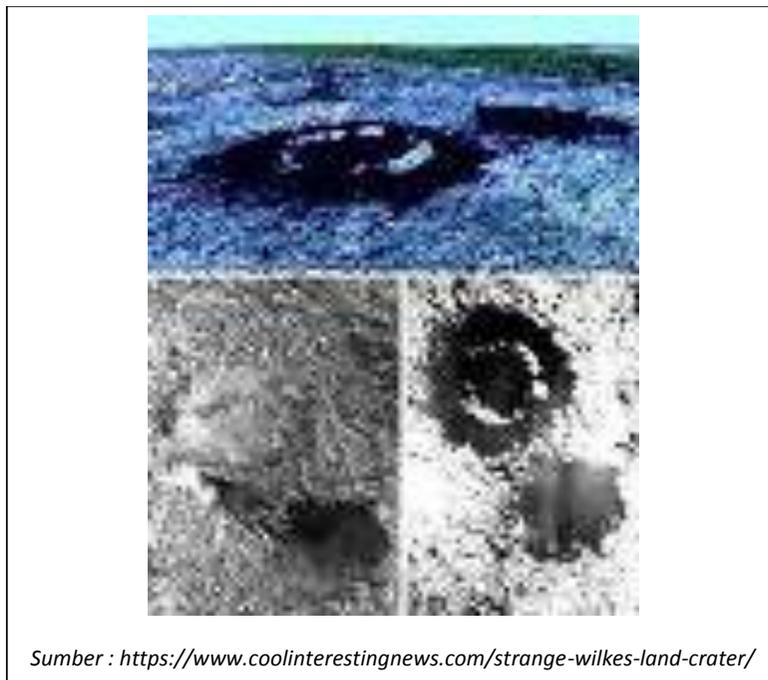
Gambar 2.5. : Struktur atmosfer bumi

Semakin mendinginnya bumi memungkinkan cairan berupa air terbentuk pada permukaannya, yang lama kelamaan ter-akumulasi menjadi badan air yang besar berupa lautan dan danau-danau, yang dinamakan hidrosfer. Maka bentuk-bentuk kehidupan awalpun mulai muncul pada sekitar 2,8 dan 2,5 miliar tahun yang lalu. Berikutnya kehidupan fotosintesis mulai muncul pada sekitar 2 miliar tahun yang lalu dan turut memperkaya kandungan oksigen di atmosfer. Selanjutnya, sebagian besar makhluk hidup yang pada awalnya masih berukuran kecil dan mikroskopis, mulai berkembang menjadi makhluk hidup multiseluler kompleks pada sekitar 580 juta tahun yang lalu. Perubahan-perubahan biologis dan geologis tersebut terus terjadi di bumi sejak awal terbentuknya, dimana organisme terus berevolusi, berubah menjadi bentuk baru atau punah seiring perubahan bumi. Proses tektonik memainkan peran penting dalam pembentukan lautan dan benua di bumi, termasuk kehidupan di dalamnya. Biosfer dalam hal ini ber-interaksi dengan atmosfer dan mempengaruhi kondisi abiotik lainnya di bumi, seperti proliferasi oksigen, pembentukan lapisan ozon di atmosfer, dan pembentukan tanah.

2.2. Bencana Pra-Peradaban

Bencana yang menimpa bumi telah terjadi jauh sebelum era peradaban manusia. Penelitian Geologi-Paleontologi menunjukkan kepunahan mendadak dari berbagai spesies kehidupan di masa lalu yang dikaitkan dengan terjadinya bencana alam.

Bencana kepunahan besar kehidupan teridentifikasi pada sekitar 250 juta tahun yang lalu, dimana sekitar 95% spesies kehidupan yang ada di bumi binasa, walaupun masih ada sisa-sisa kehidupan yang bertahan, seperti yang terekam dalam jejak fosil-fosil yang ditemukan.



Gambar 2.6. : Kawah Wilkes di Antartika

Keberadaan *kawah Wilkes* di Antartika atau *struktur Bedout* di baratdaya pesisir Australia meng-indikasikan hubungan antara tumbukan benda langit dengan kepunahan yang kemudian disebut sebagai peristiwa kepunahan *Perm-Trias*. Hal tersebut diduga diakibatkan oleh kombinasi antara tumbukan *asteroid*, letusan gunung berapi di *Trap Siberia*, gasifikasi metana hidrat, fluktuasi permukaan

air laut, dan peristiwa anoksik besar, sehingga memicu bencana lingkungan yang meluas.

Pada sekitar 65 juta tahun yang lalu, sebuah *asteroid* berukuran 10 kilometer (6,2 mil) diduga menumbuk permukaan bumi, tepatnya di pesisir semenanjung *Yucatán*, pada lokasi *kawah Chicxulub* yang dikenal saat ini. Tumbukan tersebut menyebabkan materi dan uap air terhempas ke udara sehingga menutupi cahaya matahari dan menghambat proses fotosintesis, sehingga membinasakan sebagian besar hewan raksasa keluarga *Dinosaurus*.



Gambar 2.7. : *Kawah Chicxulub di semenanjung Yucatán*

Sekitar 300 ribu tahun kemudian, setelah tumbukan meteor yang menyisakan jejak berupa *kawah Chicxulub*, benda langit ber-diameter 40 kilometer kembali membentur lautan lepas di pantai bagian barat India, meninggalkan jejak berupa kawah meteorit ber-diameter 480 km. Kawah tersebut menurut *Sankar Chattarjee*, seorang ahli Paleontologi India, merupakan kawah meteorit terbesar di bumi, dan diberi nama *Shiva (Siwa)*, dewa penghancur dalam kepercayaan Hindu. Benturan tersebutlah yang diduga memisahkan kepulauan Seychelles dari anak benua India. Beberapa ilmuwan berpendapat bahwa sebagai dampaknya, sebagian kerak bumi menguap pada titik

benturan, sehingga memicu gelombang vulkanisme basal di *Deccan Traps* (serupa dengan *Siberian Traps*), melepaskan gas beracun, tsunami raksasa, dan meluapkan banjir lava. Hal tersebut semakin memperluas cakupan kepunahan spesies-spesies makhluk hidup di bumi.

Kedua peristiwa bencana katastrofik tersebut, kemudian digunakan oleh para ahli geologi-paleontologi, sebagai penanda skala waktu geologis. Yaitu. Peristiwa kepunahan *Perm-Trias* sebagai batas berakhirnya *Masa Paleozoikum* dan dimulainya *Masa Mesozoikum*, sedangkan tumbukan asteroid sekitar 65 juta tahun yang lalu yang memicu punahnya keluarga *Dinosaurus*, sebagai penanda berakhirnya *Masa Mesozoikum* dan dimulainya *Masa Kenozoikum*.

Tabel 2.1. : Skala Waktu Geologi Relatif dan Umur Radiometrik

Skala Waktu Geologi Relatif dan Umur Radiometrik			
KEBIRUAN	MASA	ZAMAN	Umur dalam Tahun Lalu
P	Kambryunian	Kambri	1,5
		Ordovisi	64
		Siluri	6,30
M	Mesozoikum	Jurasi	200
		Kriyas	240
		Kreta	250
		Kretas Atas	300
		Kretas Bawah	140
		Senon	110
K	Kainozoikum	kuarter	1,00
		tertiary	1,00
		tertiary	500
		Kainozoikum	570
Prekambrium	usia Tengah dan Awal		2500
Archaikum	usia Awal dan Akhir		3800
(Pala Ajar)			

2.3. Bencana Pada Masa Peradaban Masa Lalu Manusia

Terjadinya bencana pada masa awal peradaban manusia dikenali dari ayat-ayat dalam kitab suci, legenda, mitos, cerita-cerita rakyat, catatan sejarah dan hasil penelitian arkeologi. Umumnya merupakan bencana alam atau bencana lingkungan, dimana oleh karena belum berkembangnya teknologi, maka pengaruh intervensi manusia kurang begitu berpengaruh.

Beberapa contohnya adalah sebagai berikut :

- *Wabah Antonine*, merupakan wabah penyakit yang menyebar pada masa Kekaisaran Romawi, pada tahun 165 M -189 M. Dinamakan demikian karena salah satu korbannya adalah *Marcus Aurelius Antoninus*, yang merupakan kaisar Romawi pada saat itu. Dinamakan juga *Demam Galen* oleh karena di-dokumentasikan dengan baik oleh *Galen*, seorang dokter Yunani. Para ahli sejarah meyakini bahwa *Demam Antonine* adalah wabah cacar air, yang terbawa oleh serdadu Romawi yang pulang berperang dari timur. Akibat wabah ini lebih dari 5 juta orang tewas di Kekaisaran Romawi. *Dio Cassius*, seorang ahli sejarah, menuliskan bahwa di Roma sendiri hampir 2000 orang meninggal setiap harinya.
- *Gempa Kreta dan Tsunami Alexandria*, terjadi pada tanggal 21 Juli tahun 365. Diawali dengan gempa bumi besar yang terjadi dibawah Laut Tengah dekat Pulau Kreta-Yunani, dengan kekuatan diperkirakan 8 SR. Gempa yang menghancurkan hampir seluruh kota di pulau Kreta tersebut diikuti dengan gelombang tsunami besar yang melanda Yunani, Libya, Siprus, Sicilia dan Mesir. Ahli sejarah *Ammianus Marcellinus* menuliskannya dengan rinci bagaimana air laut menghempas dan menghancurkan kota Alexandria. Catatan mengenai bencana alam ini ter-dokumentasikan dengan baik di Alexandria (Iskandariah)- Mesir.
- *Erupsi Gunung Vesuvius*, terjadi pada tanggal 29 Agustus 79 diteluk Naples-Italia. Semburan material vulkanik yang terjadi telah menimbun dengan cepat kota Pompeii dan Herculaneum yang berdekatan. Awalnya dimulai dengan gempa bumi yang diabaikan oleh warga kota tersebut, namun kemudian menjadi lebih besar disertai semburan awan panas, lava dan asap yang

membumbung tinggi. Kota Pompeii dan Herculaneum ditemukan kembali pada tahun 1631 setelah dilakukan penggalian. Pada abad ke-20, keberadaan kota ini terkuak dengan meninggalkan jasad-jasad manusia yang terkubur dan telah menjadi fosil utuh.

- ***Erupsi Santorini***, terjadi sekitar tahun 1645 SM. Informasi bencana alam ini diketahui melalui penelitian arkeologi. Dimana diketahui bahwa pada tahun 1645 SM, gunung berapi yang meletus di Santorini telah menghancurkan permukiman di pulau tersebut beserta Pulau Kreta di dekatnya. Sejauh ini, sisa-sisa peradaban manusia yang lenyap akibat bencana tersebut, telah ditemukan dan masih terus dipelajari.
- ***Gempa Bumi dan Tsunami Helike***, terjadi pada tahun 375 SM. Bencana alam ini mengakibatkan kota Helike yang berada di Teluk Korintus-Yunani tenggelam ke dasar laut. Korban jiwa tak diketahui. Penelitian terhadap reruntuhan permukiman manusia pada jaman itu mulai dilakukan padaakhir abad ke-19 dengan penemuan reruntuhan kota, jalan-jalan dan berbagai artefak.



Gambar 2.8. : Lokasi gunung Vesuvius dan kota Pompeii, yang menghadap ke teluk Naples - Italia



Gambar 2.9. : Gunung Vesuvius di foto dari udara (1971)

Revolusi Industri pada akhir abad 18 sampai dengan awal abad 19, dengan ditemukannya berbagai teknologi modern, telah merubah perilaku *holistik* manusia sebelumnya, menjadi pola pikir yang *transeden*. Manusia mulai meng-eksploitasi sumberdaya alam secara besar-besaran, dan mulai meng-intervensi proses alam. Maka, bencana sebagai akibat ulah manusia maupun sebagai akibat reaksi alam atas ulah manusia, mulai bermunculan. Wabah penyakit, kelaparan, perang dan berbagai konflik sosial maupun politik menjadi bencana yang umum terjadi.

Sejak awal abad ke-20, jutaan orang tewas akibat kelaparan, termasuk korban 30 juta orang yang tewas selama masa kelaparan di Cina pada periode tahun 1958-1961. Di Uni Soviet, beberapa kali terjadi bencana kelaparan yang diakibatkan kebijakan politik, yang mengakibatkan kematian jutaan orang. Bencana kelaparan telah mengakibatkan munculnya sifat buruk manusia seperti kriminalitas dan kanibalisme.

Bencana buruk lain pada abad ke-20 adalah wabah penyakit, seperti mewabahnya pandemi penyakit *Flu Spanyol* di seluruh dunia pada periode tahun 1918-1919, yang menimbulkan korban jiwa

mencapai jutaan orang, lebih besar daripada korban Perang Dunia I yang terjadi sebelumnya. Demikian pula halnya dengan berbagai perang besar seperti Perang Dunia I & II, dengan melibatkan teknologi modern telah menimbulkan berbagai bencana teknologi dengan dampak sosial yang besar.

Bencana alam dan lingkungan semakin banyak terjadi sebagai akibat intervensi teknologi. Bencana yang disebabkan meningkatnya suhu bumi (pemanasan global) menimbulkan dampak banjir, kekeringan, cuaca ekstrim dan musim yang tak terkedali, yang berpotensi meningkatkan kemiskinan dan kerentanan dalam jumlah besar seiring dengan meningkatnya populasi, sehingga meningkatkan jumlah manusia yang terkena dampaknya.

3

BENCANA ALAM KOSMIK

Bumi adalah sebuah noktah kecil dari tebaran sejumlah besar benda-benda angkasa di alam semesta yang merupakan ruang *kosmos* yang tak terbatas. Maka interaksinya dengan berbagai benda angkasa adalah keniscayaan, dan tidak mustahil mengakibatkan bencana bagi kehidupan di bumi.

Tumbukan atau bahkan hanya sekedar berpapasan dalam jarak dekat dengan benda-benda angkasa, baik berupa *meteorit*, *asteroid* atau benda-benda langit lainnya, dapat saja terjadi setiap saat tanpa dapat dihindari. Dalam hal ini lapisan atmosfer yang menyelimuti bumi berperan sebagai perisai yang melindungi permukaan bumi dari benturan benda-benda langit dan juga berbagai radiasi kosmik. Benda-benda langit yang mendekati bumi akan bergesekan dengan dengan lapisan atmosfer sehingga terbakar hancur sebelum mencapai permukaan bumi. Namun sisa benda-benda langit yang berukuran besar, yang belum habis terbakar, dapat saja mencapai permukaan bumi dan menimbulkan bencana. Demikian pula dengan radiasi sinar kosmik, seperti sinar ultraviolet yang membahayakan bagi kehidupan akan tertahan oleh lapisan *Ozon* di atmosfer, sehingga tidak mencapai permukaan bumi.

Dalam masa peradaban manusia, memang belum ditemukan catatan yang menunjukkan adanya benda langit berukuran besar yang membentur permukaan bumi. Namun demikian, jejak-jejak benturan dalam bentuk kawah-kawah meteorit yang ditemukan di berbagai tempat, menunjukkan bahwa sejak awal pembentukan bumi, sudah cukup sering terjadi benturan benda-benda langit ke permukaan bumi.

3.1. Meteor Chelyabinsk

Pada tanggal 15 Februari 2013, sebuah meteor memasuki atmosfer bumi di atas Rusia, melintas dari utara ke selatan melewati region Ural sekitar pukul 09:20:26 waktu Yekaterinburg (03:20:26 UTC), berubah menjadi bola api dan meledak di atas langit kota Chelyabinsk. Sekitar 1200 orang dilaporkan cedera akibat peristiwa ini, terutama disebabkan oleh pecahnya kaca-kaca jendela akibat gelombang kejut. Hampir 3000 bangunan di enam kota di seluruh negara dilaporkan mengalami kerusakan akibat ledakan dan jatuhnya meteor. Ledakan meteor juga menciptakan cahaya menyilaukan, cukup terang untuk dapat dilihat dan diamati dengan mata telanjang di Oblast Sverdlovsk, Tyumen, Oblast Orenburg, Bashkiria, dan Kazakhstan. Penduduk setempat menyatakan bahwa mereka menyaksikan benda terbakar yang sangat terang di langit Chelyabinsk, Sverdlovsk, Tyumen, Orenburg, Bashkiria, dan wilayah tetangganya di Kazakhstan. Rekaman video amatir menunjukkan bahwa bola api tersebut melesat di langit dan meledak tidak lama kemudian, dengan ledakan yang menghasilkan cahaya sangat terang melebihi sinar matahari.

Tabel 3.1. : Ledakan Meteor Chelyabinsk (2013)

Tanggal	15 Februari 2013
Waktu	09:20:26 YEKT (UTC+06:00)
Lokasi	<ul style="list-style-type: none">• Rusia<ul style="list-style-type: none">◦ Oblast Chelyabinsk◦ Oblast Kurgan◦ Oblast Orenburg◦ Oblast Sverdlovsk◦ Oblast Tyumen• Kazakhstan<ul style="list-style-type: none">◦ Provinsi Aktobe◦ Provinsi Kostanay
Koordinat	 55.05°N 59.8°E  Koordinat: 55.05°N 59.8°E
Nama lain	KEF-2013
Penyebab	Meteor
Cedera	1200
Kerugian harta benda	Atap pabrik runtuh, kaca jendela pecah
Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Meteor_Chelyabinsk	

Meteor Chelyabinsk merupakan salah satu objek asing terbesar yang tercatat pernah menembus atmosfer bumi sejak meteor Tunguska pada tahun 1908, dan merupakan satu-satunya peristiwa kejatuhan meteor yang tercatat menimbulkan korban dalam jumlah besar. Meteor yang jatuh di Rusia ini dapat di-klasifikasikan sebagai bola api atau *bolide*, dan peristiwanya disebut sebagai ledakan udara, oleh karena objek meledak di atmosfer dalam perjalanannya menuju bumi.

Walaupun ada pendapat yang menyatakan benda langit tersebut adalah bagian dari *asteroid 2012 DA₁₄*, objek yang mendekati bumi lima belas jam kemudian, namun sumber-sumber Rusia dan ESA mengungkapkan bahwa kedua objek ini sama sekali berbeda dan tidak berhubungan.

Akademi Sains Rusia menyatakan bahwa meteor tersebut mempunyai berat 10 ton dan memasuki atmosfer bumi dengan kecepatan 54000 kph (34000 mph, atau 15 km/s, sekitar 44 kali kecepatan suara) dan meledak pada ketinggian antara 18 dan 32 mil (30 - 50 km) diatas permukaan bumi. Namun, badan ruang angkasa AS (NASA) memperkirakan bahwa meteor tersebut jauh lebih besar, yaitu dengan diameter 17 meter (56 ft) dan berat 10 ton. Energi yang dilepaskannya kurang lebih setara dengan 500 kiloton TNT, sekitar 20-30 kali lebih kuat daripada uji nuklir Trinity di New Mexico (18 kt), atau bom atom yang dijatuhkan di Hiroshima (16 kt) dan yang dijatuhkan di Nagasaki (21 kt). Objek meledak di udara pada ketinggian 30 - 50 km (20 - 30 mil) di atas permukaan bumi. Berukuran cukup kecil, sehingga meteoroid ini tidak ter-deteksi sebelum memasuki atmosfer. Para ilmuwan menyatakan bahwa peristiwa yang sedemikian eksplosif ini merupakan peristiwa yang sangat langka dalam sejarah peradaban manusia. Walaupun sebuah meteor besar diyakini pernah menghancurkan kawasan hutan seluas lebih dari dua ribu kilometer persegi di Siberia pada tahun 1908.

Serpihan meteor yang jatuh ditemukan pada 3 lokasi, 2 dikawasan dekat danau Chebarkul, dan 1 lainnya pada 80 km (50 mil) kearah baratlaut, dekat kota Zlatoust dan perbatasan antara Bashkiria dan Oblast Chelyabinsk. Salah satu meteorit yang jatuh dekat Chebarkul membentuk kawah meteorit ber-diameter 6 meter (20 kaki). Sebuah lubang juga ditemukan oleh nelayan lokal pada permukaan danau Chebarkul yang membeku.



Gambar 3.1. : Ledakan Meteor Chelyabinsk (2013)

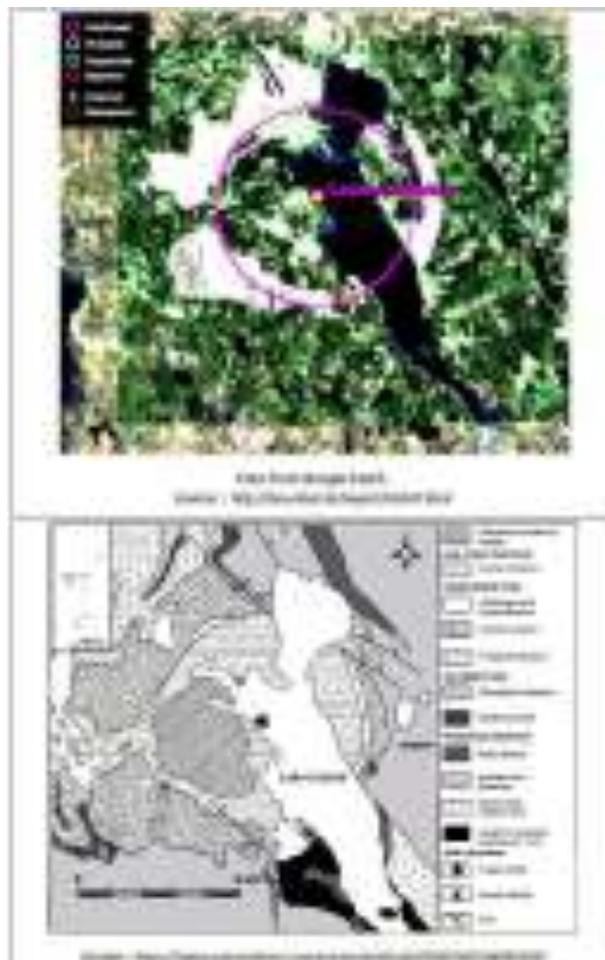


Gambar 3.2. : Wilayah terkena dampak Meteor Chelyabinsk (2013)

3.2. Kawah Meteorit Lockne & Malingen - Swedia

Bekas-bekas benturan benda langit membentuk dua kawah meteorit di kawasan Swedia, yaitu kawah Lockne yang terbentuk akibat benturan objek sebesar 600 meter, dan kawah Malingen yang terbentuk oleh benturan objek sebesar 150 meter. Menurut para ahli, peristiwa tersebut terjadi sekitar 478 juta tahun yang lalu, sebagai akibat dari tabrakan pada sabuk asteroid 12 juta tahun sebelumnya. Para peneliti bahkan berteori bahwa peristiwa tersebut menyebabkan perubahan dramatis pada iklim dan ekosistem bumi, sehingga mendorong ledakan pada spesies yang disebut *Ordovician Biodiversification*.

Kawah Lockne yang terletak 20 kilometer dari Kota Oestersund dan kawah Malingen yang lebih kecil terletak di sebelah baratdayanya. Kawah Lockne diduga terbentuk oleh benturan objek benda langit ber-diameter sekitar 600 meter, dan kawah Malingen terbentuk oleh benturan objek ber-diameter 150 meter, keduanya hanya berjarak 16 kilometer satu dengan lainnya, diperkirakan merupakan kawah meteorit kembar yang terbentuk oleh benturan benda langit yang terbelah dua. Tim peneliti yang dipimpin oleh *Jens Ormoe* dari Pusat *Astrobiology* Madrid - Spanyol, telah melakukan pengeboran ke dalam kawah, dan menemukan jejak batuan sedimen yang terdampak benturan benda langit tersebut.



Gambar 3.3. : Foto udara dan peta geologi kawah Lockne – Swedia

3.3. Kawah Vredefort

Kawah Vredefort yang terletak di Free State - Afrika Selatan, adalah kawah meteorit tertua dan terbesar yang berada di bumi. Kawah tersebut juga disebut *Dome Vredefort*, dan memiliki diameter sekitar 300 kilometer. Para ilmuwan memperkirakan bahwa kawah ini terbentuk sekitar 2 milyar tahun yang lalu, oleh tumbukan asteroid atau meteorit yang berukuran besar.



Gambar 3.4. : Kawah meteorit Vredefort - Afrika Selatan

3.4. Kawah Sudbury

Kawah Sudbury terletak di Kanada Shield, Greater Sudbury, Ontario, Kanada. Kawah meteorit ini meliputi area yang luas dengan diameter sekitar 130 km ini, merupakan kawah meteor terbesar kedua di bumi setelah kawah meteor Vredefort, diperkirakan terbentuk sekitar 1,85 miliar tahun yang lalu. Pecahan-pecahan batuan yang merupakan dampak dari tabrakan meteor ditemukan di sekitar daerah kawah, menunjukkan bahwa kawah ini memang merupakan kawah meteorit.



Gambar 3.5. : Kawah meteorit Sudbury - Ontario, Kanada

3.5. Kawah Woodleigh



Gambar 3.6. : Kawah meteorit Woodleigh - Shark Bay, Australia Barat

Kawah Woodleigh merupakan kawah meteor terbesar ketiga di Bumi, berada di Woodleigh Station - Shark Bay, Australia Barat, merupakan kawah dengan diameter mencapai 120 kilometer. Berdasarkan hasil survey dari *Australian National University*, kawah meteor ini diperkirakan terbentuk 364 juta tahun yang lalu.

3.6. Kawah Acraman

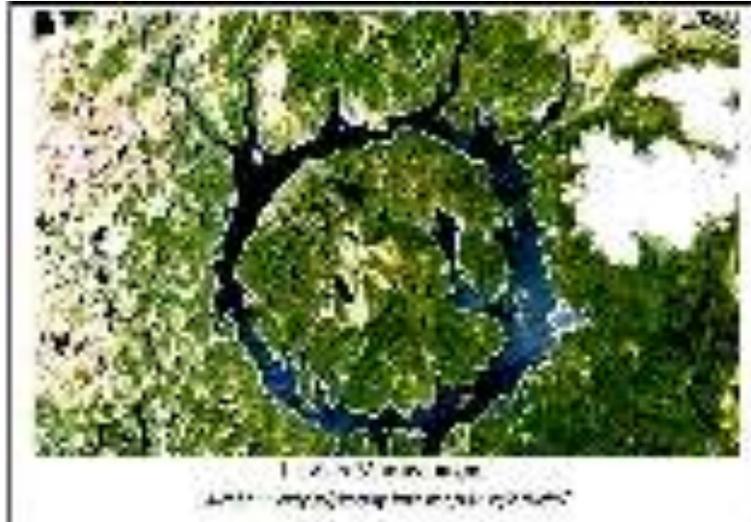
Kawah Acraman berada di di Australia Selatan, dengan diameter mencapai 90 kilometer, saat ini dikenal sebagai danau Acraman. Kawah ini diperkirakan terbentuk dari benturan meteorid pada sekitar 580 juta tahun yang lalu.



Gambar 3.7. : Kawah meteorit Acraman - Australia Selatan.

3.7. Kawah Manicouagan

Kawah Manicouagan adalah salah satu dari beberapa kawah meteor tertua dan terbesar di dunia, yang terbentuk sekitar 215 juta tahun yang lalu. Terletak di Manicouagan Regional County - Quebec, Kanada. Diameter kawah meteor ini sekitar 100 kilometer, namun sepiantas tidak terlalu terlihat, oleh karena sebagian darinya tertutup oleh genangan air.



Gambar 3.8. : Kawah meteorit Manicouagan – Quebec, Kanada

3.8. Kawah Morokweng



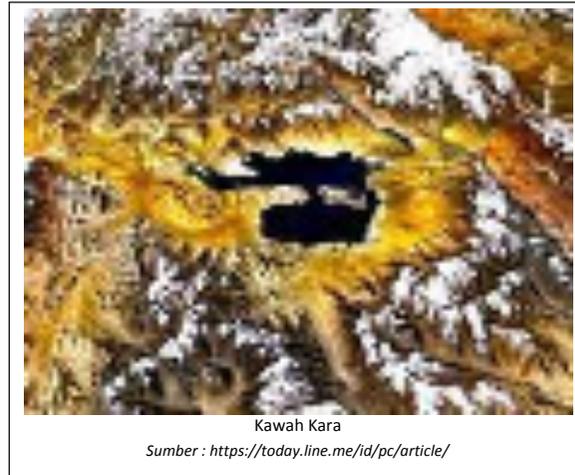
Kawah Morokweng

Sumber : <https://today.line.me/id/pc/article/>

Gambar 3.9. : Kawah meteorit Morokweng – Gurun Kalahari, Afrika Selatan

Kawah meteorit Morokweng berada di Gurun Kalahari, kota Morokweng disebelah barat laut Afrika Selatan. Kawah ini diperkirakan terbentuk oleh benturan meteorid pada 145 juta tahun yang lalu.

3.9. Kawah Kara



Gambar 3.10. : Kawah meteorit Kara – Nenetsia, Rusia

Kawah meteorit Kara terletak di Semenanjung Yugorsky - Nenetsia, Rusia. Kawah ini diperkirakan terbentuk dari benturan asteroid pada 70 juta tahun yang lalu. Namun ukuran sesungguhnya kawah ini tidak diketahui dengan pasti, oleh karena proses erosi yang intensif, sehingga menghapus bentuk morfologi kawah yang sesungguhnya.

3.10. Kawah Chesapeake Bay



Gambar 3.11. : Kawah meteorit Chesapeake Bay – Virginia Amerika Serikat

Keberadaan kawah meteorit ini baru ditemukan pada awal tahun 1980-an, dan mempunyai diameter 85 kilometer. Kawah ini terletak di Chesapeake Bay - Virginia, Amerika Serikat, diperkirakan terbentuk oleh benturan meteor pada 35 juta tahun yang lalu.

3.11. Deposit Berlian Kawah Meteorit Popigai – Siberia, Rusia



Gambar 3.12. : Kawah meteorit Popigai – Rusia

Kawah Popigai merupakan kawah meteorit di Rusia bagian utara, merupakan suatu cekungan kawah dengan diameter 100 kilometer. Kawah ini, yang merupakan salah satu kawah meteorit terbesar di bumi, terbentuk sekitar 35 juta tahun yang lalu, oleh tumbukan asteroid berukuran besar. Asteroid dengan ukuran diameter 5 – 8 kilometer ini diperkirakan membentur daratan di wilayah Siberia – Rusia, dengan kecepatan 5 – 20 kilometer/detik. Para peneliti menemukan sejumlah besar volume batuan hasil lelehan benturan meteorit tersebut yang disebut sebagai *Tagamite*.

Dalam konferensi Geokimia, Goldsmith di Sacramento – California, para ilmuwan menemukan keterkaitan antara benturan meteorit di kawah Popigai, dengan kepunahan masal yang terjadi

pada 33,7 juta tahun yang lalu, yaitu kepunahan masal pada masa Eosen (*Eocene*). Nama Eosen sendiri berasal dari bahasa Yunani *eos* (fajar) dan *ceno* (baru) yang merujuk pada kebangkitan hewan mamalia modern yang muncul pada kala itu. Sedangkan akhir zaman Eosen adalah kepunahan masal besar terakhir dalam sejarah bumi sampai saat ini. Yaitu dimana lebih dari 90 persen siput menghilang, populasi landak laut menurun drastis, ikan paus bergigi punah dan digantikan spesies yang lebih modern. Pergeseran dramatis mamalia Eropa, yang disebut *Grand Coupure*, terjadi segera sesudahnya, setelah masa transisi Eosen - Oligosen.

Dampak dari benturan benda langit besar berkecepatan tinggi mengakibatkan melelehnya batuan, dan meledakan jutaan kubik batuan ke udara. Energi yang dihasilkan dari benturan benda langit tersebut diperkirakan jauh berlipat ganda dari ledakan bom nuklir yang ada saat ini, dan lebih panas dari permukaan matahari. Energi sebesar itulah yang diduga membentuk mineral-mineral berlian.



Popigai crater impact breccia: A large 457.7-gram specimen of breccia from the massive Popigai crater in northern Siberia. Note the variety of colors, sizes, shapes and textures within a single mass - the result of a major meteorite impact which threw millions of tons of rock into the air. As fragments fell back to Earth, rocks from different strata were mixed together. Millions of years of heat and pressure compressed those assorted pieces into a solid mass known as an [impact breccia](#). Photograph by Geoffrey Notkin, copyright Aerolite Meteorites

Source : <https://geology.com/articles/popigai-crater-diamonds/>

Gambar 3.13. : Pecahan batuan Breksi yang dihasilkan oleh tumbukan benda langit

Berlian atau mineral Intan yang terbentuk berasal dari *Zona Arkean Grafit* dan *Garnet Gneiss*, yang tertimbun dibawah batuan sedimen setebal 1,5 kilometer pada titik benturan. Panas dan tekanan yang dihasilkan oleh benturan meteorit telah merubah serpihan-serpihan *Grafit* dan *Garnet* didalamnya menjadi berlian. Namun singkatnya waktu pembentukan menyebabkan banyak serpihan-serpihan *Grafit* yang hanya terbentuk menjadi butiran-butiran berlian *polikristalin* kecil.

Kantor berita resmi Rusia (*ITAR-Tass*), menyatakan bahwa berlian yang ada dalam situs yang dikenal sebagai *Popigai Astrobleme* tersebut, dua kali lipat lebih keras dari permata biasa, sehingga membuatnya menjadi ideal untuk kepentingan industri dan keilmuwan. Hal tersebut diakui oleh pemerintah Rusia, yang pada bulan September 2012 mengklaim kawah *Popigai* yang berdiameter 100 kilometer, menyimpan harta karun berupa deposit berlian dalam jumlah yang sangat besar, yang mampu memasok kebutuhan pasar dunia.



Sumber :

<http://siberiantimes.com/science/casestudy/features/a-new-perfection-found-in-diamonds-created-by-an-asteroid-in-siberian-crater-35-million-years-ago/>

Gambar 3.14. : Butiran-butiran berlian dari tambang kawah *Popigai* – Siberia, Rusia

4

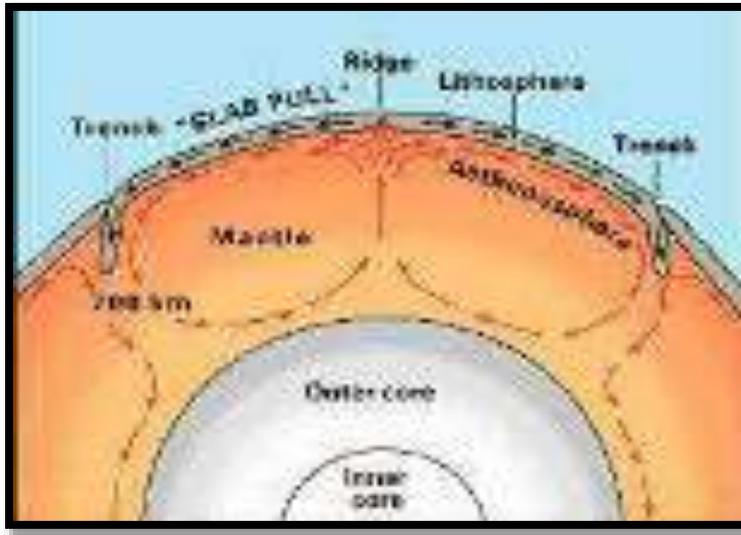
PROSES GEOLOGI DAN POTENSI BENCANA ALAM

Bumi terbentuk dari sebagian gugusan kecil dari gumpalan nebula matahari, yang terpisah oleh berbagai sebab. Gumpalan tersebut membentuk bola pijar yang berotasi sambil beredar mengitari matahari sebagai pusat gumpalan nebula induknya.

Gumpalan bola pijar tersebut berangsur angsur mendingin, membentuk inti bumi yang masih tetap panas, dengan diselimuti oleh masa padat semi plastis sampai cair kental yang dinamakan mantel atau *astenosfer*. Sementara itu, sisa-sisa material kabut yang ringan berupa debu dan gas-gas, tetap menyelimuti bagian luar dari bola pijar tersebut sebagai lapisan *atmosfer*.

Bagian luar cairan mantel yang mengalami kontak langsung dengan atmosfer, mendingin lebih cepat, sehingga membeku membentuk selaput kerak atau kulit bumi yang menutupi permukaan cairan mantel, yang disebut juga sebagai *lithosfer*. Sementara itu inti bumi yang padat pada bagian dalamnya dan masih tetap panas, baik berasal dari sisa panas bola pijar yang berangsur mendingin, maupun oleh proses radioaktif didalamnya, memanaskan bagian bawah dari mantel.

Arus konveksi terjadi pada bagian mantel yang cair kental. Yaitu dimana partikel-partikel yang terpanaskan oleh inti bumi pada bagian bawah, bergerak keatas dan menyebar dipermukaan. Sementara partikel-partikel yang lebih dingin akan turun kebawah untuk kemudian terpanaskan oleh inti bumi. Demikian seterusnya, arus konveksi pada mantel akan terus mengalir selama inti bumi masih panas.



Gambar 4.1. : Skema pergerakan arus konveksi dalam mantel

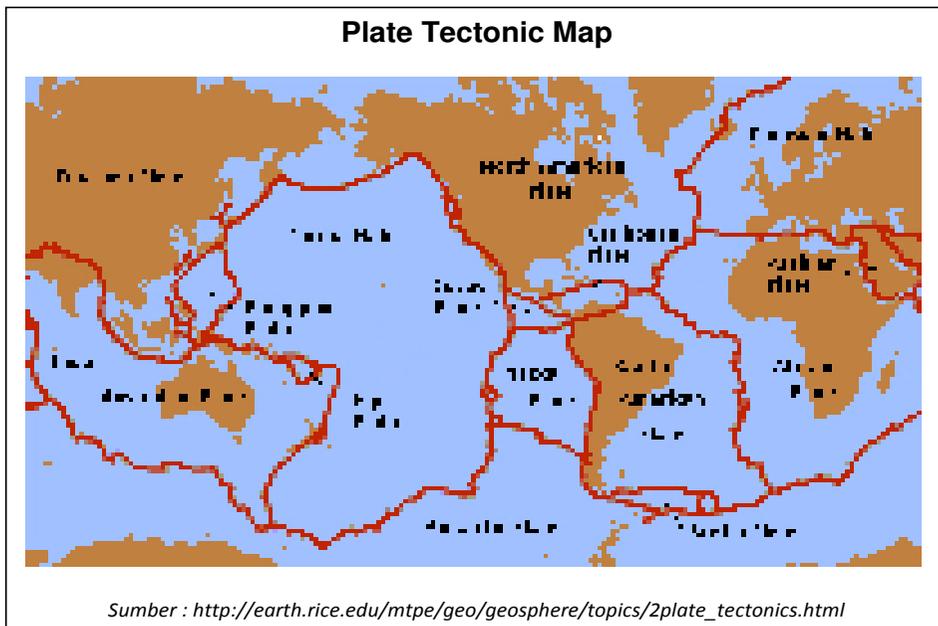
Pergerakan arus konveksi pada permukaan mantel, yang menyebar ke berbagai arah, tentu mempengaruhi kerak bumi yang mengapung di atasnya. Kerak bumi kemudian terpecah-pecah, dan bergerak mengikuti arah pergerakan arus konveksi di bawahnya. Pecahan-pecahan kerak bumi inilah yang kemudian dikenal sebagai lempeng tektonik atau *plate tectonic*, yang kelak berperan dalam proses-proses geologi *endogen* yang terjadi. Pada dasarnya ilmu geologi lebih terfokus pada pengetahuan tentang kerak bumi. Sedangkan kerak bumi sendiri, yang merupakan habitat hidup manusia serta makhluk hidup lainnya, sejatinya hanyalah merupakan selaput tipis rapuh, yang menyelimuti masa mantel yang cair kental, panas dan selalu bergerak oleh arus konveksi.

4.1. Teori Tektonik Lempeng

Pergerakan arus konveksi pada cairan mantel di bawah kerak bumi, menyebabkan gerakan-gerakan pada kerak bumi yang mengapung di atasnya. Arus konveksi yang mengalir ke atas, kemudian bergerak menyebar ke berbagai arah ketika mencapai permukaan, memecah lapisan kerak bumi dan menggesernya mengikuti arah penyebaran arus konveksi. Proses pergerakan kerak bumi beserta berbagai dampaknya, seperti perekahan, pengangkatan,

perlipatan, pematahan, termasuk dampak ikutannya seperti gempa bumi dan aktivitas vulkanik, yang disebabkan oleh gaya asal dalam perut bumi (*endogen*), disebut sebagai *proses tektonik*.

Oleh proses tektonik, kerak bumi terpecah-pecah menjadi lempengan-lempengan kerak bumi, yang disebut sebagai lempeng tektonik atau *tectonic plates*.



Gambar 4.2. : Pecahan kerak bumi menjadi lempeng-lempeng tektonik (*tectonic plates*).

Akibat pergerakan arus konveksi, kerak bumi terpecah-pecah menjadi lempeng-lempeng tektonik besar sebagai berikut :

- Lempeng Eurasia
- Lempeng Afrika
- Lempeng Antartika
- Lempeng Hindia - Australia
- Lempeng Amerika Selatan
- Lempeng Amerika Utara
- Lempeng Pasifik

Disamping itu dapat pula dicatat beberapa sub-lempeng tektonik, yang merupakan lempeng kecil pecahan dari lempeng-lempeng tektonik besar tersebut, seperti :

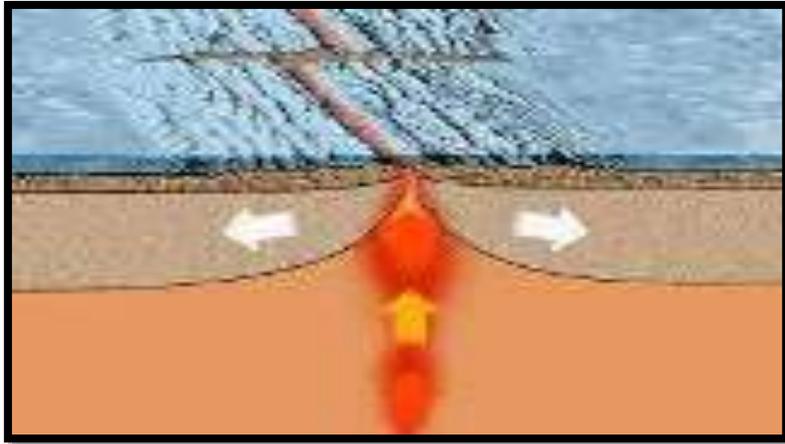
- Lempeng Karibia dan lempeng Cocos, yang merupakan transisi dari lempeng Amerika Utara dan Amerika Selatan
- Lempeng Filipina, yang merupakan pecahan dari lempeng Pasifik
- Lempeng India, yang merupakan pecahan dari lempeng Hindia-Australia
- Lempeng Nazca, yang merupakan pecahan dari lempeng Antartika
- Dsb.

Teori Lempeng Tektonik (*Plate Tectonics*) dalam ilmu Geologi, memberikan penjelasan tentang pergerakan-pergerakan dalam skala besar pada kerak bumi. Teori ini menyempurnakan teori pergeseran benua atau *Continental Drift* (*Alfred Wegener, 1912*), dan konsep *seafloor spreading* pada dekade 1960an.

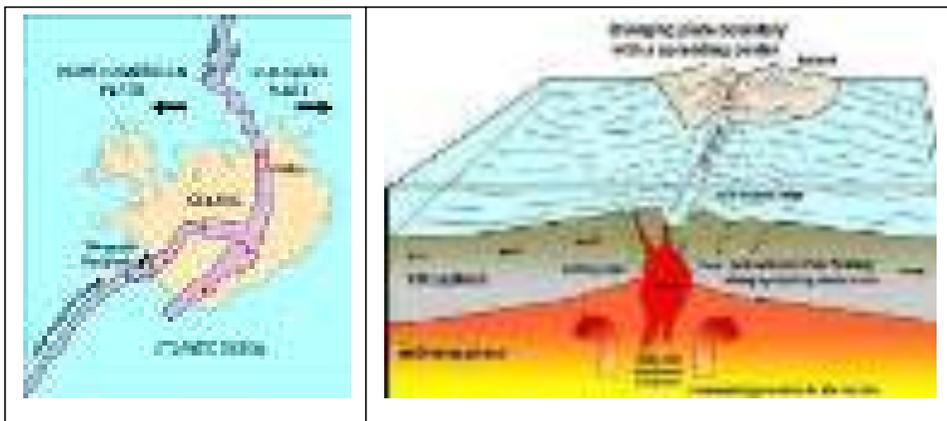
Dalam teori ini, kerak bumi yang padat berada diatas lapisan *astenosfer*, yang meskipun padat sampai semi plastis, namun dapat bergerak mengalir dengan lambat, oleh karena memiliki viskositas dan kekuatan geser (*shear strength*) yang rendah. Maka kerak bumi yang berada diatasnyapun ikut terbawa bergerak, mengikuti gerakan mengalir dari lapisan *astenosfer*, yang bergerak mengikuti aliran arus konveksi. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik dapat terjadi secara *divergen* terberai saling menjauhi, saling bertumbukan dan mendesak secara *konvergen*, atau saling menggelangsar sepanjang *batas transform* diantara dua lempeng tektonik yang berbeda.

- **Pergerakan Divergen :**

Pada titik lokasi dimana arus konveksi bergerak keatas mencapai permukaan, untuk kemudian menyebar, kerak bumi diatasnya akan menipis, kemudian terbelah menjadi lempeng-lempeng tektonik. Lempeng-lempeng tektonik tersebut kemudian memberai, bergerak saling menjauhi. Pergerakan ini merupakan pergerakan divergen.



Gambar 4.3. : Pergerakan divergen lempeng-lempeng tektonik



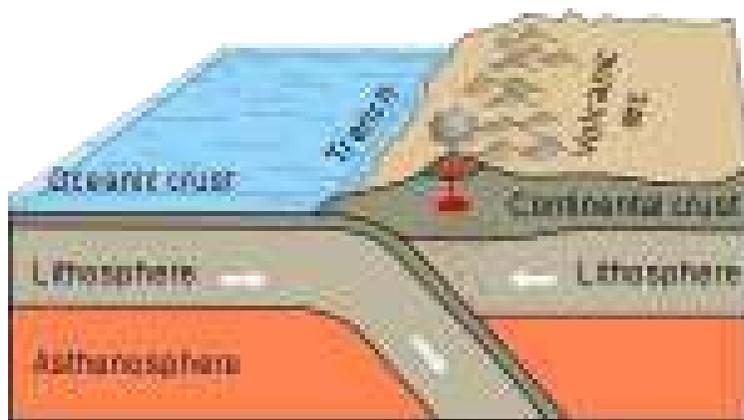
Sumber : USGS – <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>

Gambar 4.4. : Eslandia (Iceland), negara pulau gunung api pada zona divergen di Atlantik Utara.

Pada lempeng samudera proses ini menyebabkan pemekaran dasar samudera atau *seafloor spreading*, sedangkan pada lempeng benua akan membentuk lembah retakan atau *rift valley*. Pergerakan divergen yang memecah dan membelah kerak bumi, membuka celah untuk keluarnya permukaan bagian mantel yang cair. Cairan mantel tersebut kemudian mendingin, membeku membentuk kerak bumi baru. Demikian proses ini berjalan terus menerus, sehingga membentuk gundukan yang terus berkembang, membentuk pematang-pematang ditengah samudera atau *mid ocean ridge*. Salah

satu pergerakan divergen kerak bumi yang penting, adalah pembaruan antara lempeng benua Afrika dengan lempeng benua Amerika Selatan. Lempeng benua Afrika bergeser ke arah timur, sementara lempeng benua Amerika Selatan bergeser ke arah barat, dengan menyisakan jejak pematang ditengah samudera Atlantik yang disebut sebagai *Mid Atlantic Ridge*. Keselarasan bentuk pantai barat Afrika dengan pantai timur Amerika Selatan, serta keselarasan lithologinya, menunjukkan bahwa kedua sisi benua tersebut pada awalnya bersatu.

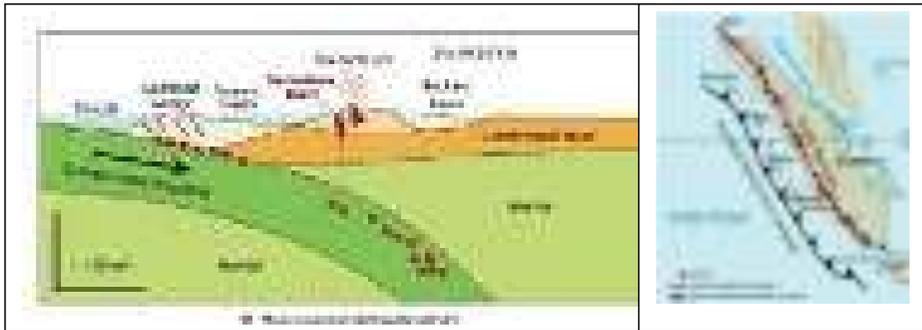
- **Pergerakan Konvergen :**



Gambar 4.4. : Pergerakan konvergen lempeng-lempeng tektonik

Pergerakan konvergen terjadi manakala lempeng-lempeng tektonik bergerak saling mendekati, saling bertumbukan dan mendesak satu dengan lainnya. Maka lempeng samudera yang lebih teguh akan tertunjam ke bawah kedalam perut bumi. Sementara itu lempeng benua yang lebih plastis akan menggelembung dan terlipat, membentuk jalur pegunungan didarat. Gempa tektonik sering terjadi pada batas konvergen ini, sebagai akibat dari pergesekan maupun pelepasan energi ketika bagian lempeng-lempeng tektonik tersebut terpatahkan.

- **Konvergensi lempeng samudera dengan lempeng benua.**



Sumber : *Virtual Upper Mantle of the Earth* – www.virtualuppermantle.info

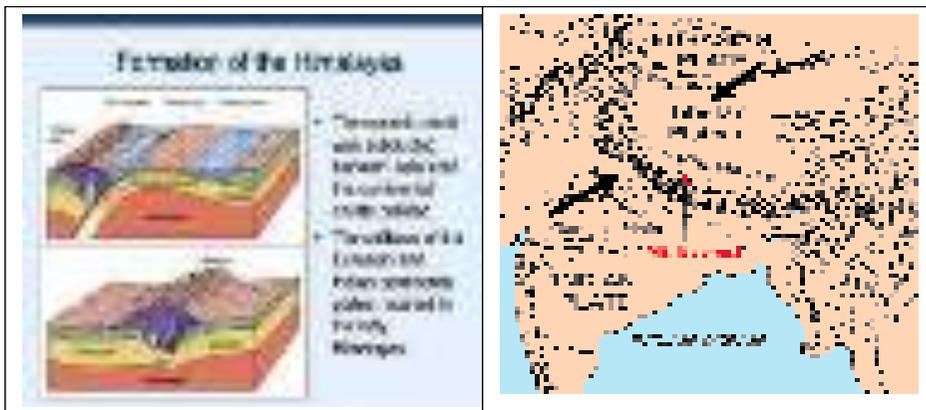
Gambar 4.5. : Pegunungan Bukit Barisan di Sumatera, jalur pegunungan volcanik produk konvergensi antara lempeng Hindia-Australia dengan lempeng Eurasia.

Lempeng samudera akan menunjam kebawah lempeng benua, masuk kedalam lapisan mantel yang suhunya tinggi sehingga meleleh. Lelehan kerak samudera ini, oleh tekanan akibat desakan lempenglempeng tektonik yang ber-konvergensi, dapat menerobos melalui celah-celah retakan pada lempeng benua di atasnya, sehingga terbentuk deretan gunung api atau *volcanic mountain range*, seringkali dengan type erupsi yang explosive. Contohnya adalah pegunungan Andes di Amerika Selatan, yang dihasilkan dari konvergensi antara lempeng Nazka dengan lempeng Amerika Selatan. Dan juga pegunungan Bukit Barisan di Sumatera serta deretan gunung api di Jawa, sebagai akibat konvergensi antara lempeng benua Eurasia dengan lempeng samudera Hindia-Australia. Sementara itu pada batas konvergensi, dimana kerak samudera menunjam kebawah, akan terbentuk palung laut dalam atau *trenches*.

- **Konvergensi lempeng benua dengan lempeng benua.**

Salah satu lempeng benua akan menunjam kebawah lempeng benua lainnya. Namun oleh karena lempeng benua ini tidak terlalu padat dan teguh, maka tidak cukup berat untuk menunjam dan meleleh didalam mantel. Maka dalam hal ini

tidak terbentuk aktivitas vulkanik, walaupun kegempaan tetap terjadi. Akan tetapi lempeng tektonik pada batas konvergensi ini akan menggelembung dan menebal, sehingga membentuk jalur pegunungan yang non-vulkanik. Contoh dari model konvergensi ini adalah pegunungan Himalaya yang terbentuk dari konvergensi antara lempeng benua Eurasia dengan lempeng benua India.

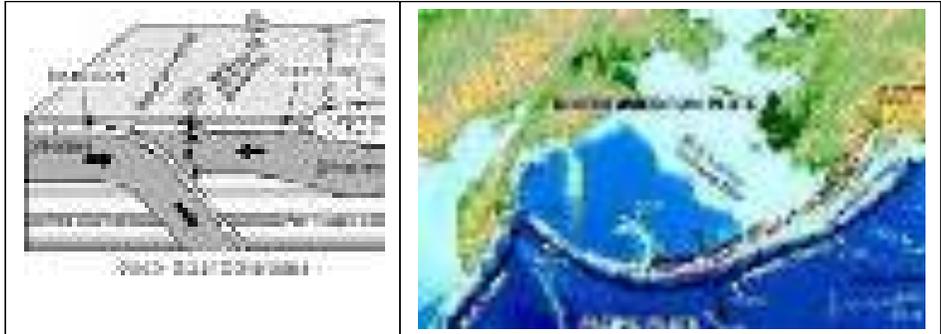


Sumber : USGS – <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>

Gambar 4.6. : Proses pembentukan pegunungan lipatan *non-volcanic* Himalaya.

- ***Konvergensi lempeng samudera dengan lempeng samudera.***

Salah satu lempeng akan menunjam kebawah lempeng lainnya, menyebabkan terbentuknya parit didasar laut, dan deretan gunung api bawah laut yang sejajar dengan parit tersebut. Puncak dari gunung-gunung api tersebut dapat saja muncul kepermukaan, sehingga membentuk gugusan pulau vulkanik. Kepulauan Aleutian di Alaska adalah contoh gugusan pulau-pulau vulkanik, sebagai akibat konvergensi antara lempeng Pasifik bagian utara dengan bagian utara lempeng Amerika Utara.



Sumber : jschwartz.com/GE/Images/AlaskaSubduction.jpg

Gambar 4.7. : Busur kepulauan Aleutian, terbentuk oleh konvergensi antara Lempeng Pasifik dengan Lempeng Amerika Utara.

- **Batas Transform :**

Transform terjadi apabila dua lempeng tektonik tidak bergerak saling memberai (*divergen*) maupun saling menumpu (*konvergen*), namun saling menggelangsar. Yaitu bergerak sejajar namun berlawanan arah, atau dapat juga searah namun berbeda kecepatannya, atau dapat juga bertemu dengan arah pergerakan membentuk sudut dengan batas pertemuannya.



Gambar 4.8. : Contoh batas transform dari pergerakan lempeng2 tektonik

Pergerakan menggelangsar ini membentuk struktur sesar mendatar atau *transform fault*. Pergerakan ini tidak menunjatkan kerak bumi kedalam mantel. Namun dapat memberikan efek panas, dan menimbulkan retakan, yang dapat berkembang menjadi rekahan, sehingga memberi jalan bagi keluarnya cairan mantel sebagai magma yang menerobos kerak bumi.



Gambar 4.9. : *San Andreas Fault*, batas transform lempeng Pasifik dengan Amerika Utara

Sesar San Andreas di California – Amerika Serikat (*San Andreas Fault*), adalah contoh batas transform dari pergerakan menggelangsar, antara tepi timur lempeng samudera Pasifik yang bergerak kearah barat laut, dengan tepi barat lempeng benua Amerika Utara yang bergerak kearah tenggara.

4.2. Potensi Bencana Alam Geologi

Proses geologi adalah proses alam yang berjalan terus-menerus secara berkesinambungan, yang digerakkan oleh peredaran energi dari dalam perut bumi (*endogen*). Maka, selama energi-energi tersebut masih berjalan dan beredar, permukaan bumi akan selalu berubah,

terangkat, terlipat terhunjam tertekuk kebawah, untuk kemudian diratakan kembali oleh proses-proses erosi dan sedimentasi.

Namun demikian proses-proses tersebut tidak selalu berjalan dengan lancar. Ada kalanya tersendat dan tertahan untuk sementara waktu, untuk kemudian bejalan kembali dengan disertai pelepasan akumulasi energi yang tertahan. Pada saat itulah bencana alam geologi dapat terjadi. Maka, titik-titik lokasi pada kerak bumi dimana proses-proses geologi mengalami hambatan, adalah titik-titik potensial untuk terjadinya bencana alam geologi.

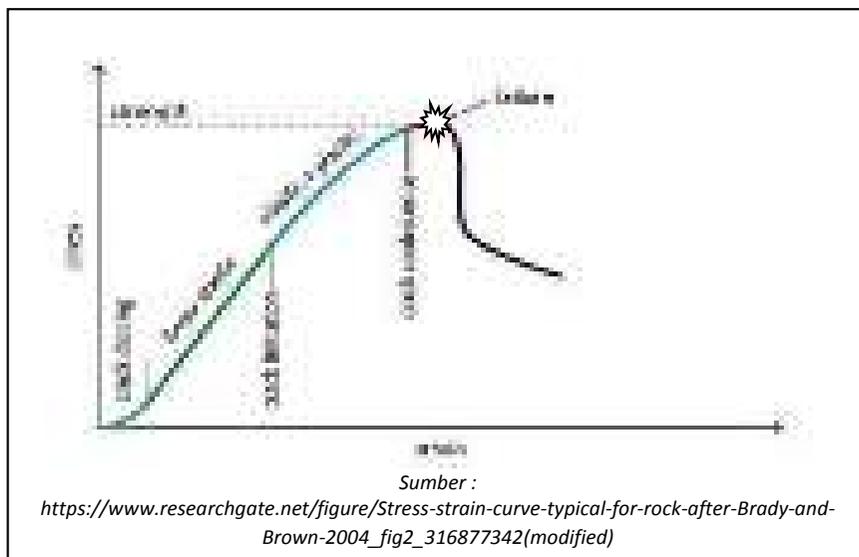
Pertemuan diantara lempeng-lempeng kerak bumi yang saling ber-interaksi adalah posisi hambatan yang dapat menimbulkan akumulasi energi. Maka pada lokasi-lokasi pertemuan diantara lempeng-lempeng kerak bumi itulah bencana alam geologi ber-potensi untuk terjadi. Bencana-bencana tersebut terutama meliputi gempa bumi dan erupsi volkanik, beserta dengan berbagai dampak ikutannya.

5

GEMPA BUMI & TSUNAMI

Gempa bumi adalah suatu peristiwa dimana kerak bumi bergetar sehingga terasa di permukaan bumi. Getaran itu sendiri terjadi sebagai akibat dari pelepasan energi secara mendadak, sehingga merambatkan gelombang seismik.

Secara umum pelepasan energi terjadi ketika suatu masa padat, dalam hal ini kerak bumi mengalami akumulasi tekanan atau regangan (*compression or tension*) terus menerus sampai mencapai batas kekuatan (*strength*) kerak bumi tersebut, sehingga mengalami keruntuhan (*failure*). Maka pada saat itulah akumulasi energi yang terkumpul selama penekanan atau peregangan terlepas dalam bentuk rambatan gelombang seismik.



Gambar 5.1. : Deformasi kerak bumi sampai mencapai keruntuhan (*rupture*)



Sumber : World Earthquake Map (www.doingverywell.com)

Gambar 5.2. : Sebaran pusat-pusat gempa bumi dunia

Interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi, baik secara *divergen*, *konvergen* ataupun *transform*, adalah mekanisme yang berpotensi menyebabkan akumulasi tegangan (*stress*), yang manakala telah mencapai atau melampaui batas kekuatan materi kerak bumi yang terkait, akan menyebabkan *failure* yang disertai dengan pelepasan energi secara mendadak, dalam bentuk rambatan gelombang seismik. Maka batas antara lempeng-lempeng kerak bumi merupakan lokasi potensial untuk menjadi pusat-pusat gempa bumi, walaupun gempa bumi juga dapat terjadi oleh sebab lainnya.

5.1. Jenis Gempa Bumi

Meskipun gempa bumi umumnya terjadi oleh sebab interaksi dari pergerakan lempeng-lempeng kerak bumi, namun gempa bumi juga dapat terjadi oleh sebab lainnya. Maka berdasarkan penyebabnya, gempa bumi meliputi :

- **Gempa Tektonik** : Yaitu gempa bumi sebagai akibat interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi.
 - Pergerakan *divergen* pada lempeng kerak bumi akan mengakibatkan regangan atau *tension* pada kerak bumi.

Maka pelepasan energi dalam bentuk getaran gempa bumi akan terjadi manakala terjadi keruntuhan atau *rupture* saat regangan melampaui batas kekuatan regang atau *tension strength* dari material kerak bumi yang mengalaminya.

- Pada batas *konvergen*, dimana kerak-kerak bumi saling mendesak, maka terjadi akumulasi tekanan atau *compression*, yang pada saatnya akan mengakibatkan keruntuhan atau *rupture*, manakala kekuatan tekan atau *compressive strength* dari material kerak bumi terlampaui, dengan disertai pelepasan energi dalam bentuk getaran gempa bumi.
- Pergerakan menggeser pada batas *transform* diantara kerak bumi akan membangun akumulasi tegangan geser atau *shear stress* pada batas *transform* tersebut. Maka, ketika batas kekuatan geser atau *shear strength* pada batas *transform* tersebut terlampaui, maka juga akan terjadi *rupture* dengan disertai pelepasan energi dalam bentuk getaran gempa bumi.

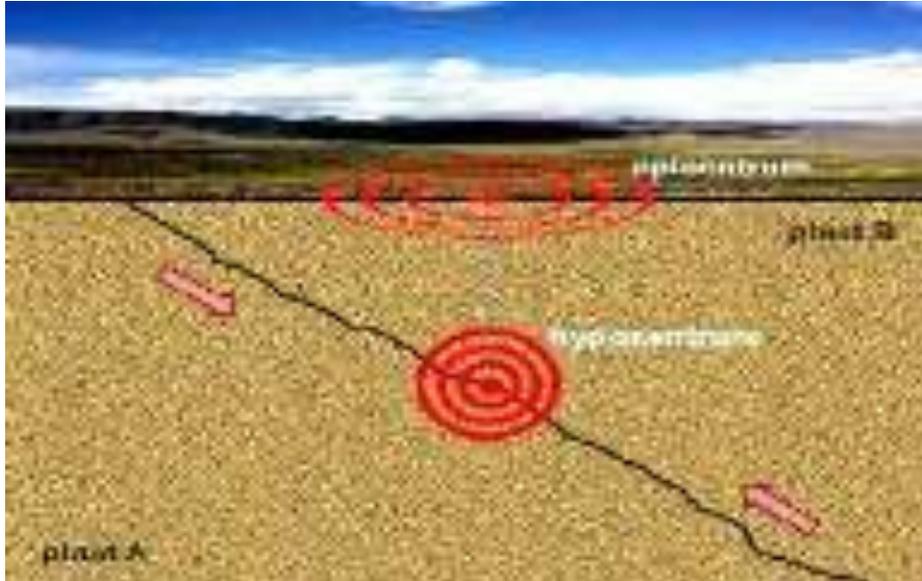
Gempa tektonik ini seringkali diikuti dengan gempa-gempa susulan, sebagai dampak dari pembentukan keseimbangan baru dari kerak bumi disekitarnya, yang terganggu oleh pelepasan energi pada saat gempa utama yang terjadi.

- **Gempa Vulkanik** : Adalah gempa bumi yang terkait dengan kegunung apian, terutama dengan erupsi gunung api. Maka umumnya gempa vulkanik bersifat lokal disekitar pusat erupsi, meskipun dapat saja menyebar luas pada erupsi yang besar.

Getaran gempa dapat terjadi pada saat pergerakan magma ke permukaan bumi. Pergesekan antara massa magma yang bergerak dengan dinding kerak bumi menimbulkan getaran yang merambat ke daerah sekitarnya. Sehingga terjadinya getaran gempa atau *tremor*, sering justru menjadi indikator akan terjadinya peningkatan aktivitas suatu gunung api. Getaran gempa bumi dapat pula terjadi pada saat *erupsi* yang *eksplosif* dimana sumbat atau kubah *lava* terpecahkan. Namun biasanya getaran akibat pelepasan energi ini lebih tersebar melalui udara, dalam bentuk gelombang suara yang bergemuruh.

- ***Gempa Tumbukan*** : Adalah gempa bumi yang disebabkan oleh tumbukan benda-benda langit yang menembus atmosfer bumi dan menumbuk permukaan bumi. Gempa ini memang jarang terjadi, oleh karena hanya tumbukan benda langit yang berukuran cukup besar sajalah yang menimbulkan gempa bumi yang signifikan. Tumbukan inipun sering meninggalkan bekas berupa *kawah-kawah meteorit*. Pada masa geologi lampau, tumbukan benda-benda langit yang besar diperkirakan telah mempengaruhi kondisi global permukaan bumi secara signifikan. Perubahan iklim, peningkatan aktivitas volcanik, punahnya berbagai *species* kehidupan secara mendadak, diduga terkait dengan terjadinya tumbukan benda-benda langit yang besar kepermukaan bumi.
- ***Gempa Runtuhan*** : Adalah gempa bumi sebagai akibat runtuhnya permukaan tanah, oleh adanya rongga-rongga besar dibawah permukaan. Hal ini kadang terjadi pada daerah berbatuan batugamping atau *limestone* (C_aCO_3). Umumnya tidak menimbulkan getaran gempa bumi besar yang berpengaruh signifikan.
- ***Gempa Buatan***: Adalah getaran gempa yang sengaja dibuat oleh manusia, seperti halnya peledakan (*blasting*) dalam pembangunan terowongan bawah tanah, uji coba nuklir bawah tanah, atau bahkan sengaja dibuat oleh manusia dalam rangka penelitian geologi bawah permukaan.

Hypocentrum adalah pusat gempa didalam kerak bumi, dimana titik pusat pelepasan energi yang merambatkan gelombang seismik bersumber. Sedangkan *epicentrum* adalah titik pusat gempa di permukaan bumi, atau merupakan proyeksi dari *hypocentrum* di permukaan bumi. Gempa bumi dalam hal ini juga di klasifikasikan berdasarkan kedalaman *hypocentrum* nya dari permukaan bumi, atau jarak antara *epicentrum* dengan *hypocentrum* nya.



Sumber : Wikiwand – www.wikiwand.com/nl/epicentrum

Gambar 5.3. : Skematik posisi *Epicentrum* terhadap *Hypocentrum* pusat gempa bumi

- ***Gempa Dangkal*** : Adalah gempa bumi dimana kedalaman *hypocentrum* nya dangkal, kurang dari 60 km dibawah permukaan bumi. Kedekatan pusat gempa dengan permukaan bumi, menyebabkan pelepasan energi dalam bentuk rambatan gelombang seismik, dapat cepat mencapai permukaan bumi sehingga memberikan dampak kerusakan yang signifikan. Gempa dangkal dapat terjadi baik pada batas *konvergen*, *divergen* maupun *transform* pada kerak bumi. Namun dapat juga terjadi berkaitan dengan pergerakan magma dalam aktivitas volkanik, ataupun pada pergeseran struktur sesar atau patahan.
- ***Gempa Menengah*** : Adalah gempa bumi dimana kedalaman *hypocentrum* nya berkisar antara 60 km sampai dengan 300 km. Dampak kerusakan akibat gempa menengah dipermukaan bumi, relatif lebih ringan daripada gempa dangkal. Hal ini disebabkan oleh lebih jauhnya jarak pusat gempa dengan permukaan bumi, sehingga energinyapun telah teredam sepanjang perjalanannya.
- ***Gempa Dalam*** : Adalah gempa bumi dengan kedalaman *hypocentrum* lebih dari 300 km. Umumnya terjadi berkaitan

dengan *konvergensi* diantara lempeng-lempeng kerak bumi, dan umumnya kurang berbahaya oleh karena jaraknya yang jauh dari permukaan bumi, sehingga sebagian besar energinya telah habis teredam disepanjang perjalanannya.

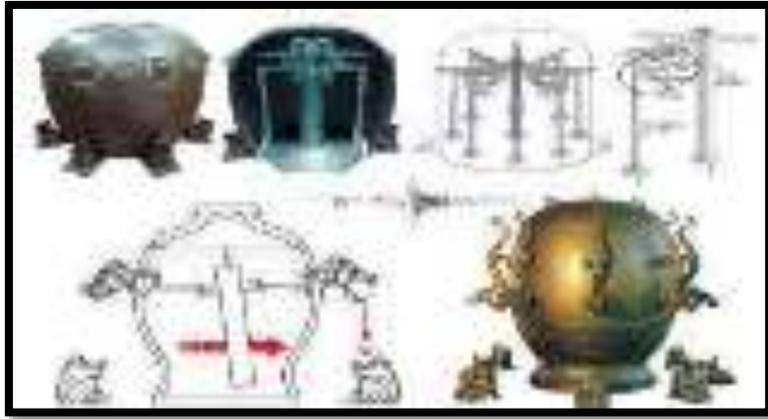
5.2. Pencatatan Gempa

Gempa bumi adalah peristiwa alam yang menarik perhatian manusia untuk dipelajari sejak dahulu kala. Keingin tahuan manusia ini meliputi antara lain, dari mana asalnya, seberapa besar kekuatannya, bagaimana karakteristik getarannya, dan kapan akan terjadinya. Diantara keingin tahuan tersebut, ramalan kapan akan terjadinya gempa bumi yang masih belum mendapatkan jawaban pasti. Meskipun beberapa kasus gempa bumi, seperti di Jepang misalnya, dapat di prediksi waktunya dengan tepat, walaupun belum ditemukan formulasi umum yang dapat diandalkan. Kemampuan identifikasi sampai saat ini, baru sampai pada melokalisir pusat-pusat gempa (*epicentrum*) secara umum.

5.2.1. Seismoscope

Seismoscope adalah alat pencatat gempa tertua yang dikenal manusia. Yaitu yang diciptakan oleh *Zhang Heng* (79 - 139 M), seorang ahli fisika dan astronomi China.

Tampak luar seismoscope *Zhang Heng* berupa guci logam yang berat, dengan 8 mulut naga yang mengarah ke 8 penjuru mata angin dengan membawa bola-bola logam pada dinding luar atas guci. Pada bagian bawah, tepat dibawah ke 8 naga tersebut, 8 patung katak dari logam dengan mulut terbuka, mengarah keatas siap menangkap bola logam yang terjatuh dari mulut naga. Setiap getaran dari salah satu arah mata angin, akan mengganggu keseimbangan bola logam pada salah satu mulut naga, sehingga terjatuh dan ditangkap oleh mulut katak logam dibawahnya. Dengan demikian arah datangnya gelombang gempa dapat dideteksi.

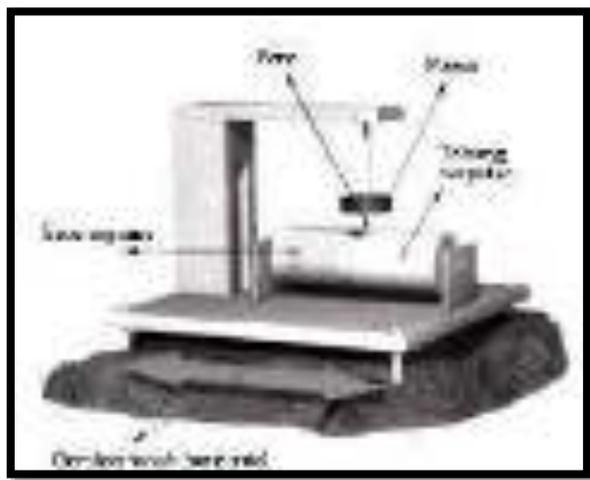


Sumber : <http://seismoscope.allshookup.org/>

Gambar 5.4. : Seismoscope dan proses kerjanya

5.2.2. Seismograf

Seismograf adalah suatu alat pencatat getaran gempa, dimana hasil pencatatannya direkam dalam bentuk grafik yang dinamakan sebagai *seismogram*.



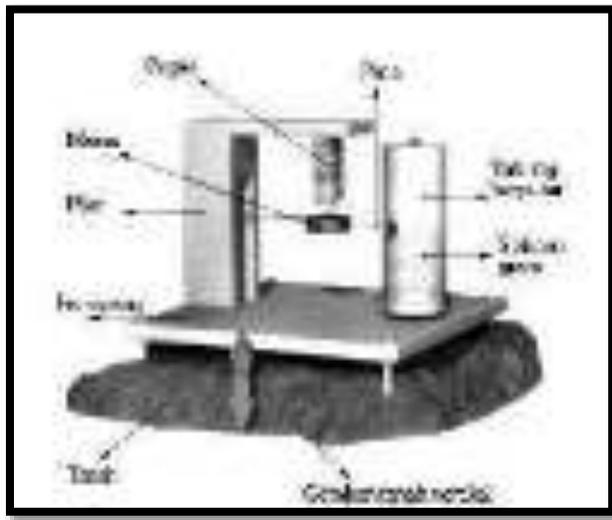
Sumber : <https://elgattuso.wordpress.com/2015/04/22/seismograf/>

Gambar 5.5. : Seismograf Horizontal

Prinsip kerja seismograf adalah dengan menggunakan *massa stationer*, yaitu suatu massa yang berat dan tergantung bebas, yang dihubungkan dengan ujung pena pencatat. Ujung pena pencatat ini

kemudian dihubungkan dengan gulungan kertas pada tabung pencatat yang berputar. Ketika terjadi getaran pada permukaan bumi, *massa stationer* tersebut akan relatif diam tak bergerak, sehingga getaran tersebut terekam dalam gulungan kertas yang berputar, dalam bentuk grafik *seismogram*.

Pada awalnya seismograf ini hanya dapat merekam getaran horizontal. Namun kemudian system seismograf ini dikembangkan juga untuk merekam getaran2 vertikal.



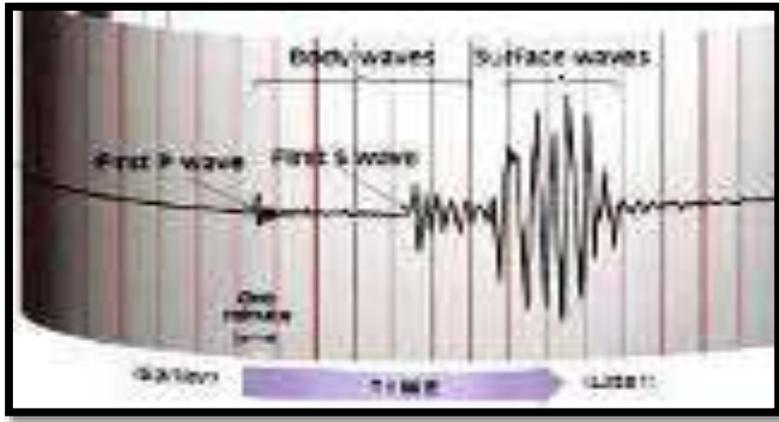
<https://elgattuso.wordpress.com/2015/04/22/seismograf/>

Gambar 5.6. : Seismograf Vertikal

Pelepasan energi dalam bentuk rambatan gelombang seismik, terutama terdiri dari gelombang longitudinal sebagai gelombang primer (*P - wave*), dan gelombang transversal sebagai gelombang sekunder (*S - wave*). Gelombang primer merambat lebih cepat dengan kecepatan sekitar 7 - 14 km / detik, sedangkan gelombang sekunder lebih lambat yaitu sekitar 4 - 7 km / detik. Namun keduanya dapat terekam dalam seismograf, sehingga dengan menghitung selisih waktu kedatangan kedua gelombang tersebut, jarak pusat gempa, baik *hypocentrum* maupun *epicentrum* dapat dihitung.

Berbeda dengan seismoscope, seismograf secara tersendiri tak dapat mendeteksi arah kedatangan gelombang gempa. Namun oleh karena jaraknya dapat diketahui, secara ter-integrasi dari beberapa

stasiun seismograf, lokasi pusat gempa dapat di-identifikasi pula. Besaran amplitudo gempa juga dapat terekam dalam seismogram, sehingga kekuatan gempa yang tercatatpun dapat dihitung pula.



Sumber : <https://www.sms.tsunsmi.warning.com/pages/seismograph>

Gambar 5.7. : Seismogram menggambarkan selisih waktu kedatangan gelombang P dan S.

5.3. Identifikasi Kekuatan Gempa

Seberapa besarnya kekuatan gempa bumi, adalah hal yang menarik perhatian para ahli, terutama yang berhubungan dengan konstruksi bangunan, oleh karena bagaimanapun hal tersebut terkait langsung dengan keamanan konstruksi bangunan tersebut. Namun bukanlah hal yang mudah untuk mengukurnya, oleh karena banyaknya parameter yang mempengaruhinya. Maka kekuatan gempa umumnya diidentifikasi secara kualitatif berdasarkan pengamatan atas dampak yang diakibatkannya, meskipun kuantifikasi diupayakan pula.

5.3.1. Skala Intensitas Gempa

Kekuatan gempa dinilai berdasarkan intensitas kerusakan yang diakibatkannya. Adalah *Giuseppe Mercalli*, seorang ahli volkanologi Italia, yang mengklasifikasikan kekuatan gempa dalam 12 tingkat, berdasarkan tingkat kerusakan yang diakibatkannya. Klasifikasi ini yang kemudian dimodifikasi oleh ahli seismology *Harry Ward* dan *Frank Neumann (1931)*, menjadi klsifikasi umum yang diakui dan

banyak digunakan, dan disebut sebagai skala MMI. *Richter* kemudian memodifikasi dalam versi 1956. Kemudian, modifikasi terakhir dilakukan pada tahun 1964 oleh *Medvedev, Sponheuer* dan *Karnik*, dan dikenal sebagai skala MSK-1964, namun skala ini masih sejalan dengan skala MMI.

Dampak gempa bumi tentunya merupakan fungsi dari jarak terhadap pusat gempa. *Epicentrum* secara umum merupakan titik terdekat dengan pusat gempa atau *hypocentrum*, sehingga akan mengalami dampak terbesar, walaupun dalam beberapa kasus terutama pada gempa dalam, hal tersebut dapat tidak berlaku. Makin menjauh dari pusat gempa, dampaknya tentu akan semakin berkurang.

Tabel 5.1. : Skala intensitas gempa bumi *Mercalli* yang telah dimodifikasi (MMI)

Modified Mercalli Intensity Scale	
I.	Not felt.
II.	Felt by persons at rest, on upper floors, or favorably placed.
III.	Felt indoors. Vibration like passing of light trucks.
IV.	Vibration like passing of heavy trucks.
V.	Felt outdoors. Small unstable objects displaced or upset.
VI.	Felt by all. Furniture moved. Weak plaster/masonry cracks.
VII.	Difficult to stand. Damage to masonry and chimneys.
VIII.	Partial collapse of masonry. Frame houses moved.
IX.	Masonry seriously damaged or destroyed.
X.	Many buildings and bridges destroyed.
XI.	Hardly left, greatly. Pipelines severely damaged.
XII.	Damage nearly total.

Sumber : <https://gsa.state.al.us/gsa/geologic/hazards/earthquakes/intro>

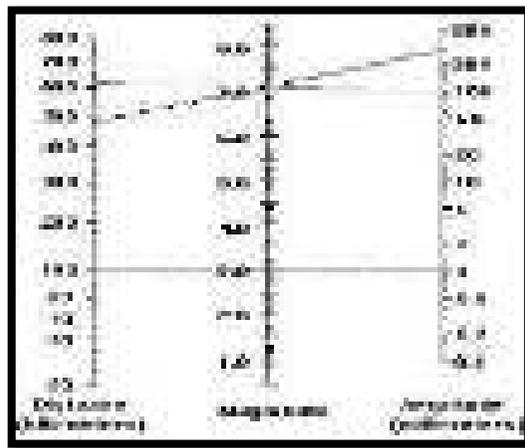
Bagaimanapun, skala intensitas gempa bumi kurang dapat memberikan indikasi kekuatan gempa secara akurat. Faktor struktur tanah atau batuan dan kualitas konstruksi bangunan, mempengaruhi dampak yang dialaminya. Gempa bumi dengan kekuatan yang sama, akan memberikan dampak yang berbeda, bukan hanya oleh sebab faktor jarak, namun juga oleh sebab struktur tanah / batuan dan kualitas konstruksi bangunan.

5.3.2. Skala Magnitudo Gempa

Adalah *Charles F Richter*, seorang fisikawan dari *Institut Teknologi California*, yang mencoba menentukan besaran gempa bumi secara kuantitatif dan absolute, tanpa tergantung pada indikator kerusakan yang diamati secara kualitatif.

Richter dalam hal ini menetapkan besaran *magnitudo* gempa dengan memanfaatkan data-data yang diperoleh dari *seismogram*. Besarnya amplitudo yang terekam dalam *seismogram* pada suatu stasion *seismograf* dalam hal ini memberikan gambaran tentang besarnya energi gempa bumi yang mencapai lokasi stasion tersebut, namun tidak menggambarkan besarnya energi yang sesungguhnya dilepaskan pada pusat gempanya. Sementara itu, dari selisih waktu kedatangan antara gelombang longitudinal (*P-wave*) dan gelombang transversal (*S-wave*), jarak pusat gempa dari stasion pencatatan dapat dihitung. Berdasarkan kedua parameter tersebut, maka besaran atau *magnitudo* gempa yang sesungguhnya pada pusat gempanya, secara matematis dapat dihitung. Namun demikian, untuk memudahkannya, *Richter* membuat cara perhitungan secara grafis, sebagai pengganti cara perhitungan dengan rumus matematik yang rumit.

Tabel 5.2. : Perhitungan *magnitudo* gempa Skala Richter, dengan metoda grafis



Sumber : <http://mathcentral.uregina.ca/beyond/articles/earthquakes/richter.html>

Namun demikian, tentu saja akan sulit untuk menafsirkan arti angka-angka *magnitudo* dalam *Skala Richter* ini dalam gambaran yang

nyata. Maka, dalam hal ini *Richter* juga membuat table sebagai panduan, untuk menggambarkan makna dari angka skala tersebut.

Tabel 5.3. : Gambaran dampak kualitatif besaran *magnitudo* gempa dalam *Skala Richter*

Number Magnitude	Earthquake Effects
0-1	Not felt by people
2-3	Felt locally, slight
3-4	Dangling lights swing
4-5	Walls crack
5-6	Furniture moved
6-7	Some trees uprooted
7-8	Many trees uprooted
9-10	Total destruction of all buildings in the general locality

Sumber : <https://earthquakenepal2015.weebly.com/the-richter-scale-and-modified-mercalli-intensity-scale.html>

5.3.3. Percepatan Gempa (*Ground Acceleration*)

Ukuran besaran gempa bumi yang berpengaruh langsung terhadap struktur suatu bangunan, adalah intensitas lokal gempa, yang secara kualitatif tergambarkan melalui identifikasi skala MMI. Namun tentu saja besaran kualitatif tersebut belum cukup memadai untuk dijadikan parameter dalam perencanaan perhitungan konstruksi bangunan tahan gempa. Nilai yang diperlukan dalam dalam hal ini adalah nilai percepatan permukaan tanah pada daerah yang terkena pengaruh gempa, untuk digunakan sebagai parameter perhitungan beban dinamis dalam perencanaan konstruksi. Sedangkan nilai percepatan tanah itu sendiri, merupakan fungsi dari besaran *magnitudo* gempa dalam skala *Richter*, dan fungsi jarak dari *Hypocentrum*, yang keduanya dapat dihitung dari pencatatan *seismogram*.

Perhitungan percepatan permukaan tanah akibat gempa, dapat dihitung dengan rumus2 sebagai berikut :

Donovan (1973) :

$$a = 1080. e^{0,5 R} (H + 25)^{-1,32}$$

Matuschka (1980) :

$$a = 119. e^{0,81 R} (H + 25)^{-1,15}$$

Dimana :

a = Percepatan permukaan tanah dalam cm/detik²

e = Bilangan natural (= 2,718)

H = Jarak Hypocentrum

R = Besaran skala Richter

Namun untuk mempermudah klasifikasi, maka satuan percepatan tersebut umumnya dikonversikan kedalam percepatan gravitasi bumi (=g), yaitu :

$$1 g = 9,81 \text{ m/detik}^2$$

$$1 \text{ Gal} = 0,01 \text{ m/detik}^2$$

$$1 g = 981 \text{ Gal}$$

Secara kualitatif, hubungan besaran magnitudo skala *Richter*, skala intensitas MMI dan percepatan gempa adalah sebagai berikut :

Tabel 5.4. : Korelasi kualitatif antara skala Richter, MMI dan percepatan gempa

PERBANDINGAN SATUAN MAGNITUDO GEMPA

<i>Skala Richter</i>	<i>Skala MMI</i>	<i>PercepatanGempa (a)</i>
3	II – III	0,003 g
4	IV – V	0,010 g
5	VI	0,030 g
6	VII – VIII	0,1 g
7	IX	0,3 g
8	X – XI	1,0 g

Meskipun konsentrasi lokasi pusat-pusat gempa telah teridentifikasi, namun lokasi pusat gempa, besaran *magnitudo* gempa serta kapan akan terjadinya, sejauh ini belum dapat diprediksi.

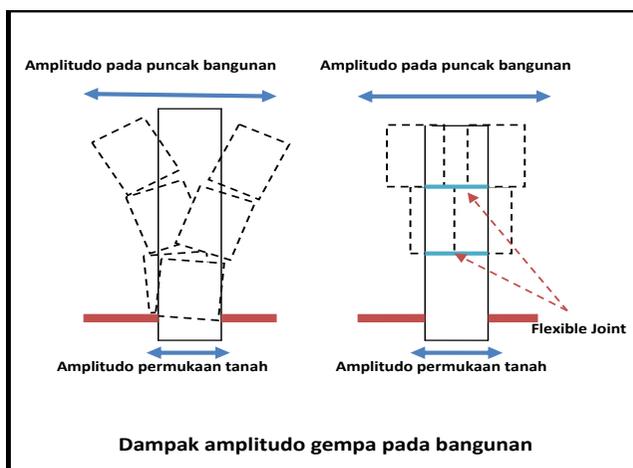
Bagaimanapun pelaksanaan konstruksi tentu tak dapat menunggu kepastian datangnya gempa. Maka, yang dapat dilakukan adalah mengasumsikan nilai percepatan permukaan tanah maksimum manakala suatu saat terjadi gempa bumi, dengan berdasarkan data statistik kejadian dimasa lalu. Untuk ini maka seyogyanya dibuat peta zonasi kegempaan yang menggambarkan percepatan maksimum secara statistik yang kemungkinan terjadi, untuk dijadikan panduan bagi para perencana konstruksi bangunan tahan gempa. Dan seyogyanya pula peta zonasi tersebut ditinjau ulang dan diperbaiki secara berkala.

5.4. Dampak Gempa Bumi

Gelombang gempa bumi menghasilkan percepatan pada masa batuan atau tanah yang dilaluinya, dan tentunya memiliki *amplitudo*, baik horizontal maupun vertikal.

5.4.1. Dampak Amplitudo Gempa Pada Struktur Bangunan

Amplitudo gelombang seismik, seperti yang terekam dalam seismograf, walaupun hanya berada dalam kisaran millimeter pada permukaan tanah. Namun pada struktur bangunan di atasnya, dampak *amplitudo* tersebut akan membesar dengan semakin tingginya bangunan. Sehingga bagian atas dari bangunan akan mengalami ayunan *amplitudo* horizontal yang lebih besar.



Gambar 5.8. : Ilustrasi dampak amplitudo gempa pada bangunan tinggi



Sumber : www.umm.ac.id/en/international/gempa-68-sr-guncang-utara-chile.html

Gambar 5.9. : Dampak Gempa 6,8 SR di Chile Utara, 30 Januari 2013. Bagian atas bangunan mengalami kerusakan yang lebih berat, oleh karena mengalami ayunan amplitudo yang lebih besar

Ayunan amplitudo yang besar akan dapat merusak, mematahkan struktur bangunan yang tinggi, bahkan merobohkannya. Dalam banyak kasus gempa bumi, kejadian seperti inilah yang mengakibatkan bencana yang menimbulkan banyak korban. Maka besaran amplitudo gempa harus menjadi pertimbangan konstruksi, terutama pada bangunan-bangunan yang tinggi.

5.4.2. Dampak Percepatan Gempa Bumi

Setiap konstruksi bangunan yang berdiri diatas tanah, tentu akan memberi beban pada tanah dimana lokasi bangunan tersebut berdiri. Beban tersebut merupakan *beban statis* yang disebabkan oleh kerja gravitasi bumi. Namun gempa bumi yang merambatkan gelombang seismik, memicu terjadinya percepatan pada lokasi bangunan berdiri, yang merupakan tambahan beban, berupa *beban dinamis* bagi masa tanah pada lokasi kedudukan bangunan tersebut. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan (*rupture*) manakala akumulasi beban-beban tersebut melampaui batas kekuatan daya dukung tanahnya, sehingga terjadi amblesan (*subsidence*).

Maka, besaran percepatan gempa seyogyanya diperhitungkan sebagai faktor beban dinamis terhadap gaya gravitasi dalam perhitungan konstruksi bangunan tahan gempa, pada lokasi-lokasi yang potensial mengalami getaran gempa bumi.



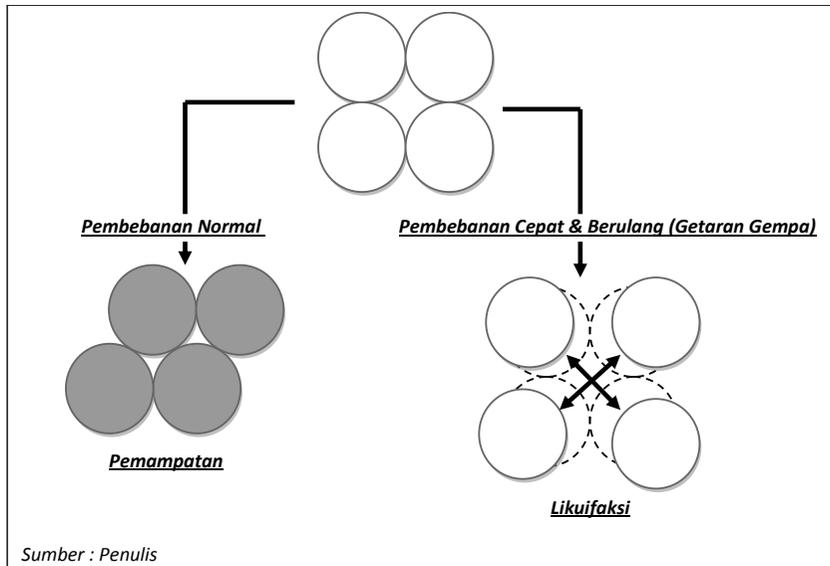
Sumber : NOAA/NCDC, NOAA National Geophysical Data Center

Gambar 5.10. : Amblesan yang disebabkan tambahan beban dinamis, akibat percepatan gempa

5.4.3. Likuifaksi (*Liquefaction*)

Likuifaksi tanah (*soil liquefaction*) adalah fenomena yang terjadi ketika tanah yang jenuh atau agak jenuh air kehilangan kekuatan dan kekakuan, akibat adanya tegangan yang disebabkan oleh misalnya getaran gempa bumi atau perubahan tegangan lainnya yang terjadi secara mendadak, sehingga tanah yang padat berubah wujud mencair atau menjadi lumpur.

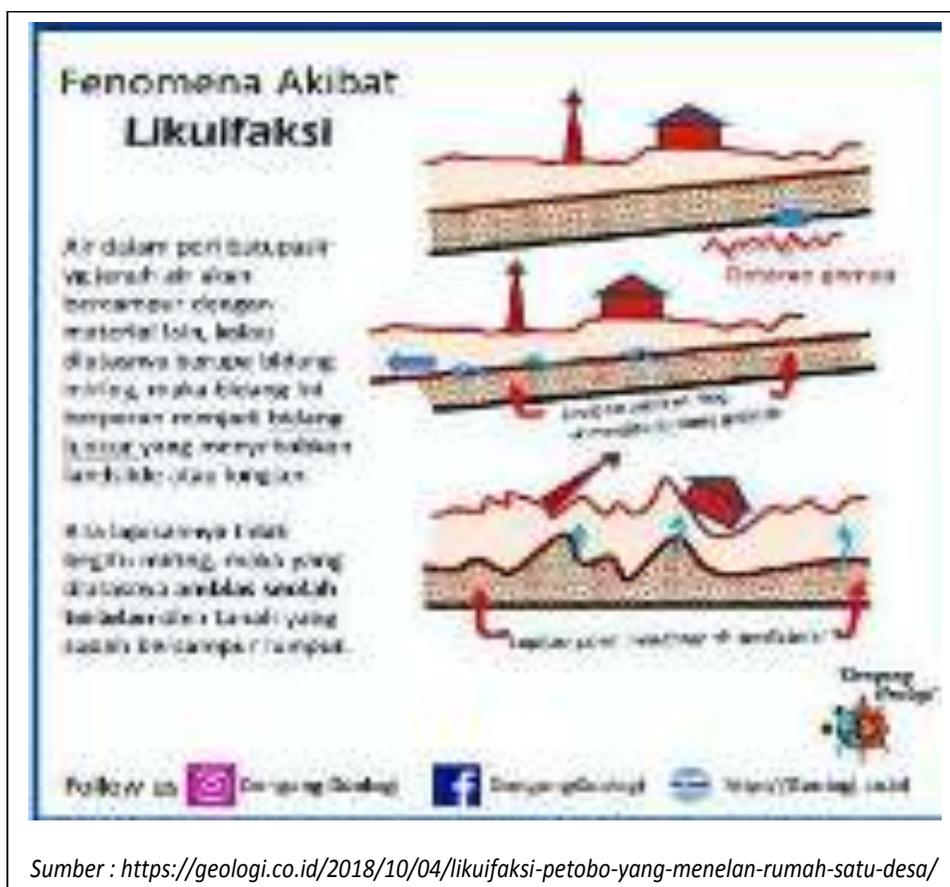
Dalam mekanika tanah, istilah mencair (*liquefied*) pertama kali digunakan oleh Allen Hazen mengacu pada kegagalan bendungan *Calaveras* di California pada tahun 1918, dimana dijelaskannya proses mekanisme aliran pencairan tanggul, yaitu ketika tekanan air dalam pori-pori tanah cukup besar, maka tekanan tersebut akan berdampak memberai partikel-partikel tanah saling menjauh dan menghasilkan suatu kondisi yang secara praktis menyerupai pasir hisap.



Gambar 5.11. Diagram proses terjadinya Likuifaksi

Fenomena ini teramati pada tanah berpasir yang jenuh air, dan renggang (tidak/kurang padat), oleh karena lapisan pasir yang renggang memiliki kecenderungan untuk memampat ketika menerima beban. Maka sebagai respon terhadap tanah yang memampat, tekanan air pori akan meningkat dan mencoba untuk mengalir keluar menuju zona yang bertekanan lebih rendah, biasanya kearah atas menuju permukaan tanah. Pada pembebanan normal air pori akan berangsur-angsur mengalir keluar, sehingga tekanan air porinyapun berangsur-angsur menurun pula dan berangsur-angsur kembali normal. Namun pada pembebanan yang berlangsung cepat dan cukup besar, atau berulang berkali-kali seperti pada getaran gempa bumi, tekanan air pori dapat meningkat dengan cepat sebelum sempat mengalir keluar, sehingga melampaui kekuatan ikatan dan kontak diantara butir-butir tanah yang merupakan pendukung beban di atasnya, sehingga memutuskan dan memberai ikatan antar butirnya. Hal ini menyebabkan lapisan tanah kehilangan kekuatan daya dukungnya, dan fenomena ini terlihat seperti mengalir menyerupai cairan lumpur, dan disebut sebagai proses pencairan (*liquefied*) atau likuifaksi. Hal seperti ini mungkin terjadi pada lapisan tanah berpasir atau berlumpur yang non-plastis, dan mungkin juga terjadi pada lapisan kerikil dan tanah liat dalam beberapa kasus walaupun jarang terjadi.

Meskipun dampak likuifaksi telah lama dikenal, fenomena tersebut lebih menjadi fokus perhatian para ahli setelah peristiwa gempa bumi *Niigata* dan *Alaska* pada tahun 1964. Likuifaksi juga merupakan faktor utama kerusakan di *Distrik Marina San Francisco* pada gempa bumi *Loma Prieta* tahun 1989, dan di pelabuhan *Kobe - Jepang*, pada peristiwa gempa bumi besar *Hanshin* pada tahun 1995. Selanjutnya, likuifaksi juga mengakibatkan kerusakan besar yang menimpa perumahan di pinggiran kota bagian timur dan kota satelit *Christchurch - Selandia Baru*, pada gempa bumi *Canterbury* tahun 2010, dan lebih meluas lagi setelah gempa susulan *Christchurch* pada awal dan pertengahan tahun 2011.



Gambar 5.12. : Contoh skematis terjadinya likuifaksi



Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Pencairan_tanah

Gambar 5.13. : Likuifaksi akibat gempa bumi Niigata (1964)

5.4.4. Pergeseran Tanah dan Longsor

Komposisi masa tanah tidak selalu bersifat *isotropic*, sehingga reaksi percepatannya terhadap gempa yang terjadi pada bagian-bagiannya tentu akan ber beda-beda pula. Hal ini dapat menimbulkan retakan-retakan dan pergeseran-pergeseran diantara satu segmen dengan segmen lainnya. Demikian pula halnya dengan struktur *diskontinuitas*, yang seringkali merupakan bagian yang lemah pada masa tanah maupun batuan, dimana pergeseran-pergeseran dapat terjadi ketika menerima percepatan yang diakibatkan oleh gempa bumi. Kinerja reaksi *hydrostatic* air tanah didalam pori-pori tanah maupun celah-celah bidang *diskontinuitas* dapat lebih memperburuk kondisi, sehingga bahkan dapat memicu terjadinya longsor pada masa tanah atau batuan.

Pergeseran-pergeseran pada masa tanah atau batuan tersebut dapat pula menimbulkan dampak bencana secara tidak langsung. Pergeseran tanah pada peristiwa gempa San Fransisco (1926) misalnya, telah mematahkan saluran pipa gas dikota itu, sehingga menimbulkan kebakaran besar. Sedangkan pada gempa Nepal (2015), longsor yang terjadi menyusul gempa bumi, justru menimbulkan korban yang lebih besar daripada dampak langsung gempa tersebut.



Sumber : www.eventzero.org/pengertian-macam-jalur-dan-akibat-gempa-bumi

Gambar 5.14. : Pergeseran masa tanah akibat gempa bumi, menimbulkan retakan dan rekahan pada badan jalan

5.4.5. Tsunami

Tsunami merupakan kata dalam bahasa Jepang, yang berarti gelombang pelabuhan. Kata ini menggambarkan terjadinya gelombang pasang yang melanda pelabuhan-pelabuhan di Jepang, mengikuti terjadinya gempa laut besar sesaat sebelumnya. Peristiwa ini sering terjadi di pantai-pantai Jepang sehingga sangat dikenal, bahkan kemudian digunakan sebagai istilah umum diseluruh dunia.

Pada awalnya ditafsirkan, bahwa gempa bumi yang berkekuatan besar dibawah laut telah mendorong masa air laut, dalam bentuk gelombang besar yang melanda pantai didekatnya. Bahkan kemudian disimpulkan, bahwa gempa laut dengan kekuatan lebih dari 6 SR akan dapat menyebabkan gelombang *tsunami*. Namun kemudian terbukti bahwa tidak semua gempa laut, bahkan dengan kekuatan besar lebih dari 6 SR sekalipun, akan memicu terjadinya *tsunami*.

Gempa Aceh (Desember 2004) dengan kekuatan > 8 SR, telah menyebabkan gelombang *tsunami* yang dahsyat dengan ketinggian mencapai 34 meter menerjang Banda Aceh, bahkan mencapai

Srilangka dan pantai timur Afrika di Somalia. Namun gempa Nias (Maret 2005), dengan kekuatan yang kurang lebih sama atau lebih besar, dan berlokasi pusat gempa lebih dekat dengan pantai barat Sumatera, justru tidak menyebabkan *tsunami*. Sementara itu gempa Pangandaran (Juni 2006), dengan kekuatan yang jauh lebih kecil (< 6 SR), justru menyebabkan *tsunami* besar, dengan ketinggian gelombang mencapai 21 meter yang menerjang pantai Pangandaran. Maka jelas bahwa tidak ada korelasi yang signifikan antara gempa laut, berapapun kekuatannya dengan *tsunami*. Atau dengan kata lain, bukan gempa laut yang menyebabkan *tsunami*, meskipun *tsunami* sering didahului oleh gempa laut.

Tsunami umumnya terjadi berhubungan dengan gempa laut akibat konvergensi yang melibatkan lempeng tektonik kerak samudera. Desakan pada batas konvergensi menyebabkan akumulasi tekanan, yang apabila telah melampaui batas kekuatan tekan atau kekuatan gesernya, maka akan terjadi deformasi *rupture* pada kerak bumi. Bagian dari kerak bumi tersebut akan melenting, mendorong masa air laut di atasnya, sehingga menimbulkan gelombang laut besar, yang dikenal sebagai *tsunami*.

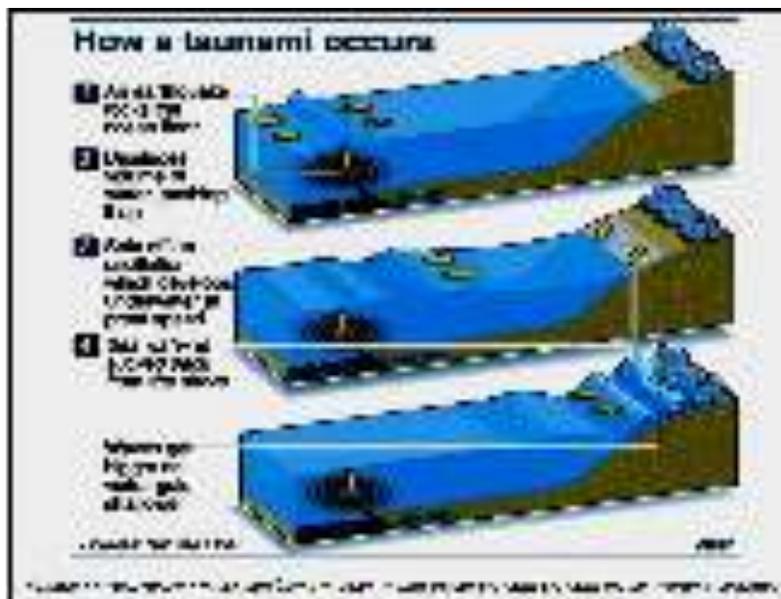
Deformasi kerak bumi dengan disertai pelepasan energi, akan merambatkan gelombang seismik dan gelombang masa air laut. Getaran gelombang seismik merambat lebih cepat daripada gelombang masa air laut, sehingga akan mendahului datangnya gelombang air laut atau *tsunami*. Namun *tsunami* tidak disebabkan oleh gelombang seismik ataupun gempa bumi di laut, oleh karena keduanya merupakan dampak dari deformasi kerak bumi di dasar laut. *Tsunami* terjadi oleh sebab deformasi yang besar didasar laut, dan deformasi besar didasar laut tentu akan mengakibatkan gempa bumi yang besar pula. Model dan besaran deformasi tersebutlah yang mempengaruhi terjadi atau tidaknya *tsunami*. Jadi bisa saja gempa besar didasar laut tidak memicu *tsunami*, seperti halnya gempa Nias (Maret 2005).

Prosesi *tsunami* yang terjadi, diawali dengan gempa laut yang besar, diikuti dengan surut laut mendadak pada tepian pantai, kemudian berlanjut dengan datangnya gelombang laut yang besar melanda pantai bahkan menerobos jauh ke daratan, untuk kemudian pada akhirnya kembali pada posisi semula. Peristiwa ini berlangsung dengan cepat, yaitu terjangan *tsunami* umumnya hanya berselang

waktu 10 s/d 20 menit dari terjadinya gempa. Sayangnya sampai saat ini belum ada metoda akurat untuk mem-prediksi gempa laut ataupun gempa bumi lainnya. Sehingga metoda peringatan dini (early warning system) *tsunami* yang diawali dari terjadinya gempa laut menjadi kurang efektif, oleh karena seandainyaupun peringatan dini *tsunami* berbunyi, masyarakat hanya memiliki waktu 10 s/d 20 menit untuk evakuasi. Maka sistem antisipasi *tsunami* yang paling efektif adalah dengan meng-identifikasi lokasi-lokasi pantai yang berpotensi dilanda *tsunami*, menghindarinya untuk dijadikan sebagai pemukiman atau konsentrasi masyarakat dalam jumlah besar secara menetap dalam waktu lama, serta mempersiapkan jalur evakuasi apabila terjadi *tsunami*.

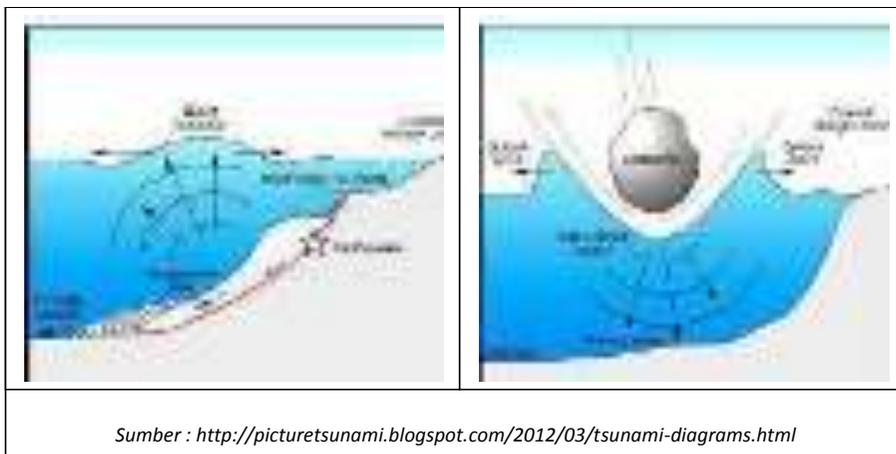
Secara umum, proses datangnya gelombang *tsunami*, dapat ter-identifikasi sebagai berikut :

1. Diawali dengan gempa laut yang kuat.
2. Surut laut mendadak mengikuti gempa laut yang kuat tersebut. Biasanya jelas teramati pada pantai2 yang landai.
3. Datangnya gelombang *tsunami*, segera setelah surut laut tersebut, yang menerobos jauh sampai ke daratan.
4. Arus balik air laut dari daratan menuju garis pantai semula.



Gambar 5.15. : Mekanisme *tsunami*, dipicu oleh deformasi lantai samudera

Namun deformasi pada lantai samudera yang diakibatkan oleh proses tektonik, bukanlah satu satunya penyebab terjadinya *tsunami*. Erupsi explosif gunung api bawah laut juga dapat menimbulkan *tsunami*, oleh karena letusan tersebut dapat mendorong masa air laut di atasnya, sehingga menimbulkan *tsunami*, seperti yang terjadi pada erupsi gunung Krakatau (1883). Disamping itu, longsoran besar pada lereng-lereng bawah laut juga dapat memicu *tsunami*, seperti yang diduga terjadi pada kasus gempa bumi Palu-Donggala (2018). Tumbukan benda langit yang berukuran besar pada permukaan laut, yang meskipun belum pernah dilaporkan terjadi, juga merupakan penyebab lain terjadinya *tsunami*. Dalam hal-hal seperti tersebut, boleh jadi *tsunami* terjadi tanpa didahului oleh gempa bumi.



Gambar 5.16. : *Tsunami* dapat disebabkan oleh longsoran besar bawah laut dan tumbukan benda langit yang besar ke permukaan laut

Sepanjang sejarah manusia, sudah sering terjadi bencana yang diakibatkan oleh *tsunami*. Faktor penyebabnya terutama adalah proses geologi, namun sayangnya sangat sedikit atau terbatas dokumentasi peristiwa *tsunami* dimasa lalu. Disamping itu juga banyak peristiwa *tsunami* skala kecil yang melanda daerah-daerah terpencil yang tidak berpenduduk sehingga luput dari pengamatan atau pencatatan. Berikut terdapat beberapa catatan bencana *tsunami* pada masa lalu yang berdampak sangat merusak serta menimbulkan banyak korban sebagai berikut :

- ***Tsunami Laut Mediterania (6000 SM)***, merupakan *tsunami* paling tua yang kejadiannya dapat dibuktikan oleh ilmuwan.

Penyebab terjadinya *tsunami* ini adalah terjadinya longsor skala besar pada gugusan es yang langsung menghantam permukaan laut mediterania sehingga menimbulkan gelombang setinggi 50 meter.

- ***Tsunami Zaman Yunani Kuno (1500 SM)***, merupakan bencana *tsunami* yang disebabkan oleh letusan gunung berapi yang berada di dekat pulau Thera. Menurut prediksi ahli geologi, *tsunami* ini menghasilkan gelombang setinggi 15 meter dan menewaskan ratusan ribuan jiwa serta menghancurkan peradaban Minoa yang sedang berkembang saat itu.
- ***Tsunami Portugal (1 November 1755)***, diawali dengan terjadinya gempa bumi dengan kekuatan 9 Skala Ricther dengan episentrum yang terletak sekitar 200 km baratdaya tanjung St Vincent. *Tsunami* tersebut terjadi di pagi hari yang kemudian diikuti oleh kebakaran hebat yang melanda kota Lisbon, sehingga menyebabkan kehancuran total ibukota Portugal tersebut. Diperkirakan 60 ribu hingga 100 ribu orang tewas akibat terjangan salah satu *tsunami* terbesar dalam sejarah yang pernah melanda daratan Eropa.
- ***Tsunami China (1782)***, gempa tektonik yang terjadi di laut China Selatan atau didekat Taiwan, diikuti dengan gelombang *tsunami* dahsyat yang menewaskan setidaknya 40 ribu orang. Berdasarkan catatan *tsunami* yang dikeluarkan Rusia, gelombang air laut masuk ke daratan hingga berjarak 120 kilometer dari bibir pantai
- ***Tsunami Krakatau (1883)***, merupakan *tsunami* yang disebabkan oleh letusan gunung Krakatau yang berada di selat Sunda. Dahsyatnya letusan menyebabkan munculnya gelombang yang menyapu bersih desa-desa yang berada di sekitar garis pantai Lampung bagian Selatan dan ujung barat pulau Jawa. Terdapat sekurang-kurangnya 36 ribu korban tewas.
- ***Tsunami Jepang (1896)***, gempa bumi memang sering terjadi di Jepang dan umumnya tidak menimbulkan banyak korban jiwa. Namun tidak seperti yang terjadi pada penghujung abad 19 dimana *tsunami* terjadi menyusul terjadinya gempa tektonik sehingga menghasilkan gelombang setinggi 30 meter yang menyapu bersih seluruh pantai timur Jepang kala itu dan menewaskan sekitar 27 ribu orang.

- **Tsunami Hawaii (1 April 1946)**, sering disebut dengan *Peristiwa April Fool* yang bermula dari terjadinya gempa di Alaska sehingga menciptakan gelombang *tsunami* yang menjangar hingga ke Hawaii yang berjarak ribuan kilometer, dan dilaporkan ada 159 orang tewas.
- **Tsunami Teluk Lituya (9 Juli 1958)**, Merupakan *tsunami* dengan gelombang tertinggi yang pernah diketahui manusia. Peristiwanya berawal dari gempa bumi yang meruntuhkan batuan dan material dengan volume sekitar 30,6 juta meter kubik sehingga menghantam permukaan air dan menciptakan gelombang tsunami setinggi 524 meter. Oleh karena *tsunami* ini terjadi di daerah terpencil, maka tidak banyak korban jiwa yang jatuh, hanya ada 2 orang nelayan yang tewas atas musibah ini.
- **Tsunami Chile (22 Mei 1960)**, merupakan *tsunami* yang sebelumnya diawali oleh gempa bumi dengan magnitudo sebesar 9.5 SR, dan merupakan gempa bumi paling kuat yang pernah terekam dalam sejarah manusia. Gempa bumi yang terjadi di siang hari sekitar pukul 15.11 waktu setempat menyebabkan terjadinya gelombang *tsunami* yang melanda pantai Chile, Alaska, Filipina, Jepang, Hawaii, Selandia Baru hingga mencapai tenggara Australia. *Tsunami* ini mengakibatkan kehancuran total di sepanjang garis pantai Chile dan korban tewas mencapai ribuan orang.
- **Tsunami Good Friday (27 Maret 1964)**, *tsunami* yang terjadi pada hari jumat di Alaska dengan gelombang setinggi 67 meter menghantam Valdes Inlet, dan gelombang kirimannya setinggi 6 meter menyapu pantai California. Berdasarkan data yang dihimpun terdapat 120 orang tewas yang mana 10 diantaranya berasal dari California.

5.5. Berbagai Peristiwa Bencana Gempa Bumi & Tsunami

Gempa bumi adalah salah satu bencana alam yang menimbulkan dampak penting bagi kehidupan manusia. Bencana ini sudah sangat dikenal sejak adanya peradaban manusia, sehingga sering pula dikaitkan dengan hal-hal yang bersifat supranatural. bahkan tertulis pula dalam berbagai kitab suci. Namun demikian berbagai bencana gempa bumi yang tercatat pernah terjadi merupakan pengalaman

sekaligus pelajaran untuk masa mendatang, oleh karena bagaimanapun gempa bumi adalah salah satu proses alam yang terus berulang.

Tabel 5.5. : Gempa bumi besar dengan korban > 100 000 orang

<u>Deadliest Earthquakes</u>				
Main article: List of earthquakes				
Rank	Death toll (estimate)	Event	Location	Date
1.	820,000–830,000	1556 Shaanxi earthquake	China	January 23, 1556
2.	280,000	2004 Indian Ocean earthquake	Indonesia	December 26, 2004
3.	242,769–700,000	1976 Tangshan earthquake	China	July 28, 1976
4.	273,400 ^[7]	1920 Haiyuan earthquake	Ningxia, China	December 16, 1920
5.	250,000–300,000	526 Antioch earthquake	Byzantine Empire (now Turkey)	May 526
6.	260,000	115 Antioch earthquake	Roman Empire (now Turkey)	December 13, 115
7.	230,000	1138 Aleppo earthquake	Zengid dynasty (now Syria)	October 11, 1138
8.	200,000	1303 Hongdong earthquake	Mongol Empire (now China)	September 17, 1303
		856 Damghan earthquake	Abbasid Caliphate (now Iran)	December 22, 856
9.	160,000	1780 Tabriz earthquake	Iran	January 8, 1780
		2010 Haiti earthquake	Haiti	January 12, 2010
10.	150,000	893 Ardabil earthquake	Abbasid Caliphate (now Iran)	March 23, 893
11.	142,807	1923 Great Kantō earthquake	Japan	September 1, 1923
12.	130,000	533 Aleppo earthquake	Byzantine Empire (now Syria)	November 29, 533
13.	123,000	1908 Messina earthquake	Italy	December 28, 1908
14.	110,000	1948 Ashgabat earthquake	Turkmen SSR, Soviet Union (now Turkmenistan)	October 5, 1948
		1290 Chihli earthquake	Mongol Empire (now China)	September 27, 1290
15.	100,000	2005 Kashmir earthquake	Pakistan (Azad Kashmir)	October 8, 2005

Source : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_disasters_by_death_toll

Tabel 5.6. : Daftar gempa bumi penting yang tercatat pernah terjadi

Year	Location	Deaths	Magnitude
1793	China	830,000	8.0
1906	San Francisco	56	7.9
1960	E. Chile	5,200	9.5
1964	Alaska	130	9.2
1975	China	1,000,000	7.8
1983	Manila Bay	8,500	8.1
1984	California	62	7.1
1997	India	6,270	8.6
2001	Sumatra, India	16,800	9.0
2004	Sumatra, Indonesia	1,500,000	9.0
2009	Pakistan	75,000	7.6
2010	Haiti	46,000 - 100,000	7.0
2011	Japan	17,000	9.0

Source: <http://www.earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqs/eqs.html>

5.5.1. Gempa Bumi San Fransisco – 1906 (Gempa + Pergeseran Tanah)

Gempa Bumi San Francisco pada tahun 1906 adalah gempa bumi besar yang mengguncang San Francisco, California dan pantai California Utara, yang terjadi pada pagi hari pada pukul 5:12, Rabu 18 April 1906. Perkiraan kekuatan gempa pada skala kekuatan Moment (M_w) adalah 7.8, namun sumber lain mencatat 7.7 sampai 8.25. Episentrum berada di pantai 2 mil (3 km) dari kota, dekat Mussel Rock. Guncangan gempa dapat dirasakan dari Oregon ke Los Angeles, dan sampai ke pedalaman ke Nevada tengah.

Gempa bumi San Fransisco pada tahun 1906 tersebut, terkait dengan pergerakan transform antara lempeng kerak bumi Pasifik dengan lempeng Amerika Utara, yang memicu pergeseran pada sesar San Andreas (*San Andreas Fault*). Sesar ini berada di California dan memanjang sekitar 800 mill dengan kedalaman 10-12 mill. Sesar San Andreas pertama kali di-identifikasi oleh profesor *Andrew Lawson* (1895) dari *University of California-Berkeley*. *Lawson* pula yang menyimpulkan bahwa sesar tersebut bergerak ke arah selatan California pada saat terjadi gempa San Fransisco pada tahun 1906, sehingga menyebabkan pergeseran sepanjang 6 meter, dan menghasilkan retak kearah utara dan selatan sepanjang 296 mil (477 km).



Gambar 5.17. : Pola retakan dan Sesar San Andreas, pemicu gempa San Fransisco (1906)



Sumber : THE HUFFINGTON POST, july 2015 - www.huffingtonpost.co.uk/2015/07/23

Gambar 5.18. : Gempa bumi dan pergeseran tanah mengakibatkan terpatuhkannya saluran pipa gas dan memicu kebakaran besar (San Fransisco, 17 April 1906).

Pergeseran sesar kemudian telah mematahkan saluran gas yang melintang dibawah tanah, sehingga menimbulkan kebakaran besar di seantero kota. Peristiwa inilah yang memakan korban besar, bahkan lebih besar dari akibat langsung dari guncangan gempa itu sendiri. Gempa bumi dan kebakaran yang terjadi ini dianggap sebagai salah satu bencana alam terburuk dalam sejarah Amerika Serikat. Korban kematian akibat gempa dan kebakaran tersebut diperkirakan mencapai lebih dari 3000 orang, dan merupakan salah satu jumlah korban tewas terbesar yang diakibatkan oleh bencana alam dalam sejarah California.

Tidak berhenti sampai disitu, gempa bumi bumi kuat dengan magnitudo 6,0 kembali mengguncang California, pada hari minggu (24/8/2014) dini hari waktu setempat. USGS mencatat bahwa gempa tersebut terjadi sekitar pukul 03.20 waktu setempat, dengan pusat gempa berada disebelah barat laut *American Canyon-California*, pada kedalaman 10,8 kilometer dibawah permukaan tanah. Akibat gempa tersebut, infrastruktur di California terutama di San Francisco mengalami kerusakan berat serta memutus aliran listrik seketika. Gempa tersebut juga mengingatkan kembali kepada kejadian serupa yang terjadi pada tahun 1989, dimana saat itu USGS mencatat magnitudo gempa bumi sebesar 6.0 SR, sehingga menyebabkan kerusakan berat pada infrastruktur serta memutus aliran listrik untuk 10 ribu rumah warga. Dalam kejadian ini, sembilan orang dilaporkan tewas serta ratusan warga lainnya mengalami luka-luka.

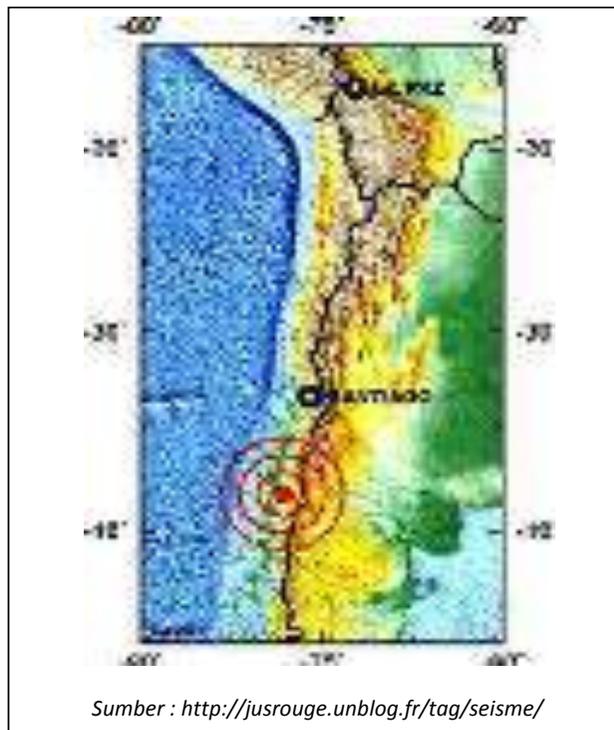
Gempa-gempa beruntun tersebut terjadi oleh karena California memang termasuk dalam wilayah rawan gempa. Yaitu merupakan wilayah yang berada pada jalur sesar San Andreas (*San Andreas Fault*), yang merupakan batas *transform* antara lempeng Pasifik dengan lempeng Amerika Utara.

5.5.2. Gempa Bumi Chile – 1960 (Gempa + Tsunami)

Gempa 9,5 SR mengguncang Chile pada tanggal 22 Mei 1960 pukul 15.11 waktu setempat selama 11 menit (USGS), dengan episentrum gempa berada di lepas pantai dekat Canete, sekitar 900 km sebelah selatan Santiago, ibukota Chile. Gempa bumi tersebut terjadi sebagai akibat konvergensi yang menyebabkan subduksi lempeng Nazca ke bawah lempeng Amerika Selatan. Gempa yang terjadi

berkekuatan lebih besar dari gempa yang memicu *tsunami* di pesisir Aceh dan Samudera Hindia pada 24 Desember 2004 (9,1 SR).

Akibatnya sungguh luar biasa, kehancuran terjadi di mana-mana, terutama di *Valdivia* dimana setengah bangunan yang ada hancur lebur. Diperkirakan jumlah korban tewas di Chile mencapai 1.655 orang, sehingga gempa itu disebut sebagai “1960 *Valdivia Earthquake (Terremoto de Valdivia)*” atau “*Great Chilean earthquake (Gran terremoto de Chile)*”.



Gambar 5.19. : Episentrum gempa bumi Chile, 22 Mei 1960.

Sekitar 15 menit pasca gempa bumi, gelombang *tsunami* raksasa setinggi 25 meter menerjang wilayah pesisir. Gelombang kejut akibat gempa di Chile juga dirasakan seluruh dunia, diikuti oleh *tsunami* yang mematikan. 15 jam kemudian ombak raksasa menghantam *Hilo* dan *Big Island* di *Hawaii*, yang berjarak lebih dari 6000 mil dari Chile, mengakibatkan kerusakan pada sekitar 600 rumah, dan 185 orang dinyatakan tewas atau hilang.

Sehari kemudian *tsunami* setinggi lebih dari 5 meter menerjang Jepang, menewaskan 138 orang. Ombak gergasi tersebut memantul menyeberangi samudera Pasifik menuju Filipina, dan menyebabkan 32 orang tewas atau hilang, untuk kemudian menyeberang ke pantai barat Amerika Serikat dan menciptakan kerusakan di California.

Gempa Chile 1960 adalah gempa bumi dengan magnitudo terbesar yang pernah tercatat sepanjang sejarah, meskipun bukan yang terburuk. Kala itu, untuk pertama kalinya kekuatan dan daya jangkau gempa dapat ter-deteksi oleh sensor-sensor yang baru dipasang di sejumlah tempat di dunia, yang sejatinya dimaksudkan untuk memonitor uji coba nuklir yang dilakukan baik oleh Amerika Serikat ataupun Uni Soviet.

Chile yang terletak pada zona kegempaan yang diakibatkan oleh konvergensi antara lempeng-lempeng kerak bumi, menjadikan negeri itu rawan gempa. Seperti ditunjukkan dengan terjadinya kembali gempa bumi pada tanggal 27 Februari 2010, dengan kekuatan 8.8 SR, yang menimbulkan korban tewas sekitar 500 orang.

5.5.3. Gempa Bumi Alaska – 1964 (Gempa + Tsunami)

Jumat 27 Maret 1964, gempa bumi dengan kekuatan super besar mengguncang Amerika Serikat, tepatnya di Alaska. Tak lama kemudian, gelombang *tsunami* menyusul menyapu kawasan pesisir, sehingga mengakibatkan 131 orang tewas, puluhan rumah dan bangunan hancur dan sebagian lainnya rusak. Gempa bumi yang terjadi di kawasan *Prince Willian Sound* dan sekitarnya pada Jumat sore sekitar pukul 17.36 waktu setempat tersebut dinamakan sebagai *Tragedi Good Friday*, oleh karena bertepatan dengan liburan umat kristiani di Amerika Serikat.

Gelombang *tsunami* yang tinggi terjadi di kawasan *Shoup Bay* dan *Valdez Inlet* dengan ketinggian mencapai 219 kaki atau 67 meter, menghanyutkan bangunan di kawasan tersebut, sedangkan di *Chenega* 25 orang dikabarkan hanyut terbawa gelombang *tsunami*. Korban jiwa terbanyak berasal dari kawasan *Prince Willian Sound*, diakibatkan oleh tanah longsor dan sapuan gelombang *tsunami*. Air limpahan dari lokasi ini juga menyerang daerah tetangga, yaitu *Port Lades*.



Gambar 5.20. : Episentrum dan konfigurasi tektonik, pada gempa Alaska (1964)

Menurut laporan Badan Geologi Amerika Serikat (USGS), gempa bumi terjadi dalam waktu beberapa menit, berkekuatan 8.5 skala Richter (SR) kemudian meningkat menjadi 9.2 SR dan diikuti dengan gelombang *tsunami*. Pusat gempa terletak pada titik 25 kilometer dibawah permukaan, tepatnya 10 kilometer disebelah timur *College Fiord*, 120 kilometer sebelah timur *Anchorage*, dan 90 kilometer sebelah barat *Valdes*.



Gambar 5.21. : Gempa-gempa yang terjadi di sepanjang jalur kepulauan Aleutian

Gempa bumi itu sendiri berkaitan dengan konvergensi antara lempeng samudera Pasifik dengan lempeng samudera bagian dari lempeng Amerika Utara, yang membentuk jalur kepulauan vulkanik Aleutian, yang menghubungkan Alaska dengan semenanjung Kamchatka di Rusia. Tercatat berbagai gempa bumi terjadi di sepanjang jalur ini, baik sebelum maupun sesudah peristiwa gempa bumi Alaska tahun 1964, menunjukkan bahwa akumulasi energi yang disebabkan oleh konvergensi diantara kerak-kerak bumi tersebut terus berlangsung, dan se waktu-waktu akan terlepas dalam bentuk gempa bumi.

Gempa bumi Alaska pada tahun 1964 ini merupakan yang terbesar sepanjang sejarah Amerika Serikat, dan kedua terdahsyat sepanjang sejarah dunia setelah gempa bumi Chile yang berkekuatan 9.5 SR pada tahun 1960. Menurut majalah *LIFE*, kekuatan gempa bumi Alaska ini setara dengan 400 kali total energi dari bom nuklir yang pernah diledakkan di era modern. Kerugian dari kerusakan akibat gempa ini diperkirakan mencapai US\$ 2,3 miliar.

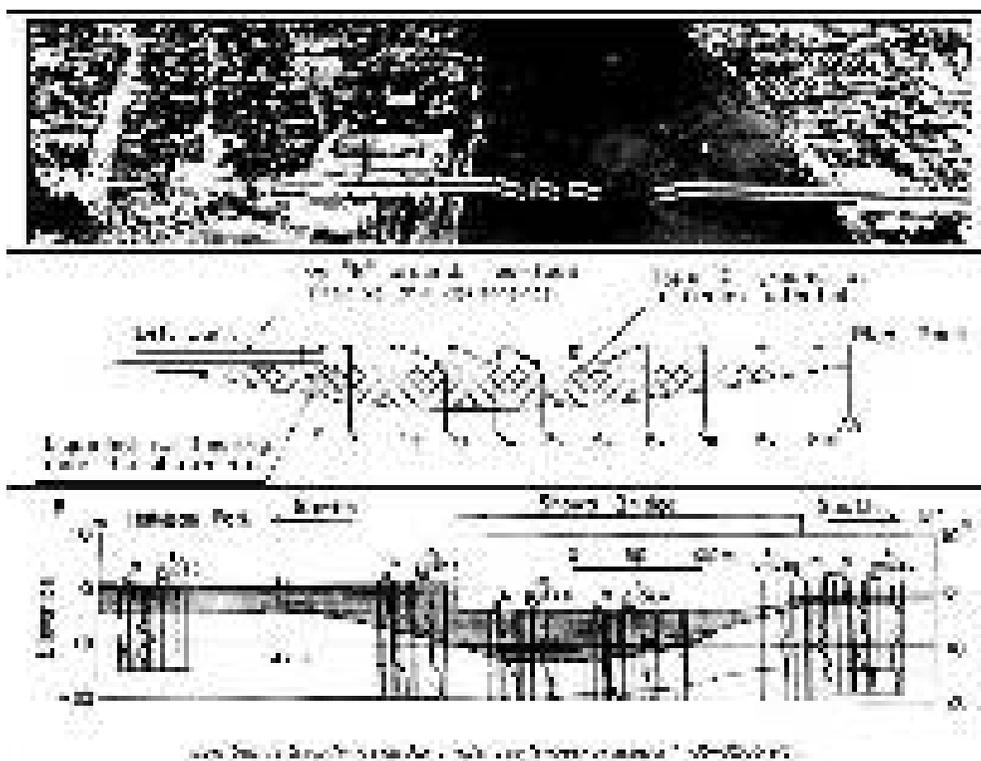
5.5.4. Gempa Bumi Niigata - 1964 (Gempa + Likuifaksi)

Gempa berkekuatan 7,6 SR mengguncang Niigata, Jepang pada tanggal 16 Juni 1964 pukul 13.01 waktu setempat. Pusat gempa berada di landas kontinen, lepas pantai barat laut Honshu sekitar 50 km utara kota Niigata, dengan kedalaman 34 km. Gempa yang diikuti tsunami ini menyebabkan likuifaksi di sebagian besar kota. Likuifaksi menyebabkan kerusakan bangunan pada kedua belah tepian sungai Shinano, termasuk meruntuhkan jembatan Showa yang melintang di atasnya. Kerusakan luas juga terjadi disekitar bandara, yang secara total menyebabkan hancurnya 3 534 bangunan, dan sedikitnya 36 orang tewas.

Gelombang *tsunami* melanda kota Niigata sekitar 15 menit setelah gempa, membanjiri dan menimbulkan kerusakan di pulau Sado, pulau Awa, dan lebih jauh lagi ke pulau Oki di Shimane Prefecture. Ketinggian gelombang *tsunami* mencapai 3 meter di pelabuhan Ryotsu, 4 meter di Shiotani dan pelabuhan Iwafune, dan sekitar 1 sampai 2 meter di Naoetsu.

Namun demikian, dampak dari likuifaksi lebih mencakup wilayah yang lebih luas, sehingga USGS mencatat peristiwa di Niigata

(1964) ini merupakan kejadian likuifaksi yang paling terkenal. Sebagian besar daratan kota Niigata merupakan endapan delta resin dari sungai Shimano dan Agano, yang terutama terdiri dari endapan pasir yang belum terkonsolidasi, sehingga mengalami likuifaksi ketika digoncang gempa bumi. Amblesan (*subsidence*) yang diakibatkannya mencapai 140 cm, dan mencakup wilayah yang luas. Bahkan pada suatu area bangunan apartemen yang dibangun diatas tanah reklamasi, seluruh blok bangunannya mengalami kemiringan dan satu diantaranya roboh total.



Gambar 5.22. : Jembatan Showa, runtuh akibat likuifaksi

Jembatan Showa yang melintang diatas sungai Shimano, runtuh hanya dalam waktu 70 detik setelah terjadinya gempa bumi. Keruntuhan ini pada awalnya memang diduga disebabkan oleh percepatan gempa. Namun hasil penyelidikan yang dilakukan kemudia menunjukkan bahwa keruntuhan tersebut disebabkan oleh likuifaksi. Likuifaksi telah menyebabkan pergeseran lateral (*lateral spreading*) pada fondasi tiang pancang dibawah jembatan, yaitu pada bagian tepi kiri sungai.

5.5.5. Gempa Bumi Nepal (Gempa + Longsor)

Gempa bumi Nepal terjadi pada tanggal 25 April 2015 pukul 11:56 waktu setempat, dengan pusat gempa pada kedalaman sekitar 15 km, dan episentrum sekitar 34 km arah timur tenggara Lamjung - Nepal, berlangsung sekitar dua puluh detik. Gempa bumi awalnya di laporkan berkekuatan 7.5 Mw oleh *United States Geological Survey (USGS)*, yang kemudian direvisi menjadi 7.8 Mw. Sedangkan *China Earthquake Networks Center (CENC)* melaporkan gempa tersebut berkekuatan 8.1 Mw. Sementara itu *India Meteorological Department (IMD)* melaporkan dua gempa bumi kuat terjadi di Nepal pada pukul 06:11 dan 06:45 waktu setempat. Gempa pertama di ukur berkekuatan 7.8 Mw dan berpusat 80 km arah barat laut Kathmandu, ibu kota Nepal, sedangkan gempa kedua berkekuatan 6.6 Mw berpusat 65 km arah timur Kathmandu dengan kedalaman 10 km, yang kemudian diikuti oleh lebih dari 50 gempa susulan berkekuatan lebih dari 4.5 Mw.

Menurut laporan USGS, intensitas gempa di Kathmandu mencapai skala IX MMI. Getaran juga gempa terasa hingga negara tetangga, diantaranya negara bagian India. Bihar, Uttar Pradesh, Assam, West Bengal, Sikkim, Jharkhand, Uttarakhand, Gujarat hingga New Delhi dan selatan Karnataka. Banyak bangunan mengalami amblesan (*settlement*) di Bihar, sementara itu retakan kecil pada tembok rumah dilaporkan di Odisha. Gempa kecil dirasakan di Kochi di selatan negara bagian Kerala. Intensitas getaran di Patna mencapai skala V MMI, dan skala IV MMI (Ringan) di Dhaka - Bangladesh. Gempa juga dirasakan di baratdaya Tiongkok mulai dari Tibet hingga Chengdu, yang berjarak 1900 km dari episentrum, terasa di Pakistan dan Bhutan.

Gempa bumi besar berikutnya terjadi pada tanggal 12 Mei 2015 pukul 12:51 waktu setempat berkekuatan 7.3 Mw, dengan episentrum 18 km arah tenggara Kodari, berdekatan dengan dengan Tiongkok, pada perbatasan antara Kathmandu dengan gunung Everest, dengan kedalaman 18.5 km. Gempa bumi ini terjadi pada jalur sesar yang sama dengan episentrum gempa 25 April 2015, namun bergeser lebih jauh ke timur, dan dianggap sebagai gempa bumi susulan dari gempa 25 April. Getaran gempa juga terasa di bagian utara India termasuk Bihar, Uttar Pradesh, West bengal dan negara bagian India lainnya. Setidaknya 153 orang tewas di Nepal setelah gempa bumi susulan ini

dan hampir 3,500 orang terluka. Sementara itu 62 orang tewas di India dan 1 orang tewas di Tiongkok.

Percepatan gempa bumi ini memicu terjadinya longsor salju di gunung Everest, dimana setidaknya 19 orang tewas, dan 120 orang terluka atau hilang. Longsor di lembah Langtang yang berlokasi di Taman Nasional Langtang mengakibatkan sedikitnya 329 orang hilang tertimbun salju longsor di desa Ghodabela dan desa Langtang. Longsoran salju tersebut diperkirakan memiliki lebar dua hingga tiga kilometer. Desa Langtang hancur tertimpa longsoran salju, dimana 300 orang diperkirakan tewas tertimbun di pemukiman-pemukiman kecil pinggiran desa seperti Chyamki, Thangsyap dan Mundu.

Peristiwa-peristiwa tersebut merupakan gempa bumi terkuat yang mengguncang Nepal sejak gempa bumi Nepal-Bihar 1934. Setidaknya lebih dari 8947 korban tewas dan lebih dari 23000 korban luka-luka. Yaitu 8786 orang tewas dan 22304 orang luka-luka di Nepal, sementara 130 orang tewas dan lebih dari 560 orang luka-luka di negara bagian India Uttar Pradesh, Bengal Barat, Sikkim dan Bihar, 27 orang tewas dan 383 orang luka luka di Tiongkok dan Tibet, 4 orang tewas dan 200 orang luka luka di Bangladesh. Bangunan-bangunan Situs Warisan Dunia UNESCO alun-alun Kathmandu Durbar runtuh, termasuk menara Dharahara yang dibangun pada 1832, menewaskan setidaknya 400 orang, dan menghancurkan Kuil Manakamana yang terletak di Gorkha.



Gambar 5.23. : Episentrum gempa bumi Nepal (2015)

Pegunungan Himalaya yang berada di wilayah Nepal merupakan hasil dari konvergensi antara 2 lempeng kerak benua, yaitu lempeng Eurasia yang relatif diam dan lempeng India yang bergerak dengan kecepatan sekitar 45 mm/tahun ke arah utara (USGS, 2015). Konvergensi antara 2 lempeng benua yang plastis, maka secara fisik dipermukaan membentuk pegunungan lipatan yang terjal dan tinggi, dengan selimut tebal salju abadi yang rentan untuk longsor.

Secara struktural, konvergensi tersebut juga membentuk jalur sesar, yang disebut sebagai *Mahendra Highway Fault*. Pusat gempa yang terjadi di Nepal ini berada pada blok Himalaya, yang merupakan bagian dari *main central thrust* dari *Mahendra Highway Fault*, yang *hanging wall*-nya berada di bagian utara. Maka, mekanisme sesar naik (*thrust fault*) yang terjadi telah memicu gempa bumi, yang memporakporandakan infrastruktur yang ada di atasnya, menyebabkan longsor salju dalam ukuran besar, serta menelan ribuan korban jiwa. Disamping kekuatan gempa yang besar dan episentrumnya yang dekat, konstruksi bangunan yang kurang memadai merupakan faktor yang menyebabkan besarnya intensitas bencana. Pada sisi lain, timbunan salju yang tebal di atas lereng-lereng yang terjal telah pula menambah intensitas bencana, yang diakibatkan oleh longsor salju.



Gambar 5.24. : Menara Dharahara di Durbar, sebelum dan sesudah gempa bumi 2015.

Gempa bumi Nepal (2015) sejatinya bukanlah yang pertama, namun merupakan yang paling dahsyat setelah gempa bumi pada tahun 1934 yang menewaskan lebih dari 16.000 orang di Nepal dan India. Beberapa gempa bumi besar yang pernah melanda Nepal dan sekitarnya, tercatat sebagai berikut :

- **15 Januari 1934**, gempa berkekuatan 8,0 SR sebagai salah satu gempa paling dahsyat dalam sejarah negeri ini, dikenal juga sebagai gempa Bihar-Nepal, menewaskan lebih dari 16000 orang di Nepal dan India. Selain itu, gempa ini juga merobohkan sejumlah bangunan bersejarah termasuk Menara historis Dharahara yang kemudian dibangun kembali namun kembali roboh pada gempa 2015.
- **29 Juli 1980**, gempa berkekuatan 6,5 SR disebelah barat Nepal menewaskan lebih dari 100 penduduk, merobohkan ribuan bangunan dan ikut menewaskan hewan-hewan ternak.
- **20 Agustus 1988**, gempa berkekuatan 6,8 SR menggoyang perbatasan India dan Nepal, mengakibatkan lebih dari 1000 orang di kedua negara tewas. Getaran gempa terasa hingga New Delhi, Bangladesh, dan Myanmar.
- **18 September 2011**, gempa berkekuatan 6,9 SR menewaskan 16 orang di India dan Nepal, dan sejumlah bangunan hancur.

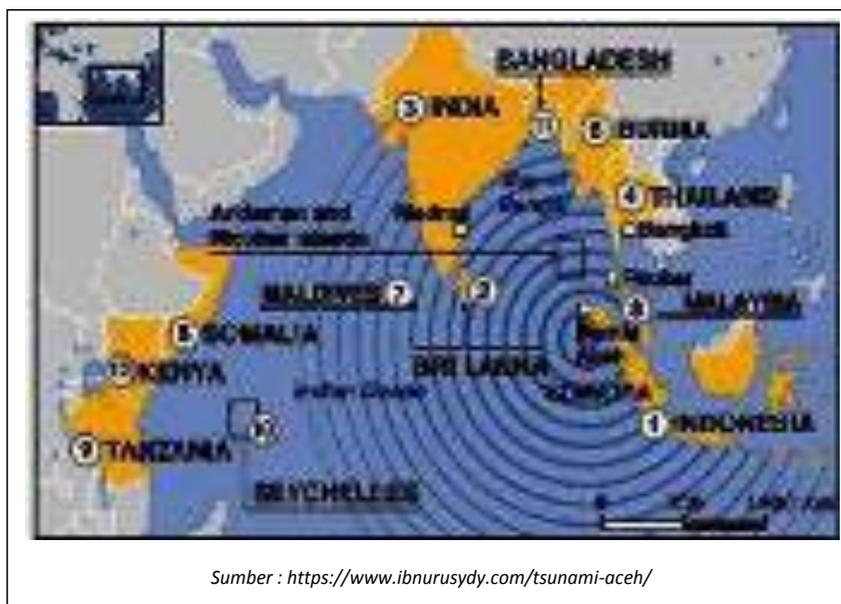
Selain gempa-gempa besar tersebut, negara di pegunungan Himalaya ini juga kerap diguncang gempa berkekuatan kecil. Seperti tahun 1993 gempa ringan di bagian tengah dan barat Nepal menewaskan seorang warga, tahun 2001 gempa ringan menewaskan 2 orang, tahun 2002 lebih dari 50 orang terluka akibat gempa, dan tahun 2003 gempa menewaskan 2 orang.

5.5.6. Gempa Bumi Aceh – 2004 (Gempa + Tsunami)

Pada tanggal 26 Desember 2004 di pagi hari pukul 07:58:53 WIB, gempa besar melanda Sumatera-Andaman dan disusul dengan *tsunami* besar yang dikenal dengan *Tsunami Aceh*. Pusat gempa berada pada posisi lintang 3.316 LU dan bujur 95.854 BT, dengan kedalaman 30 km. Magnitudo gempa bumi yang tercatat sebesar 9,1 sampai 9,3 SR tersebut merupakan gempa bumi kedua terbesar yang pernah tercatat pada seismograf dunia.

Gempa bumi tersebut terpicu oleh pergerakan konvergensi subduksi (*subduction*) lempeng-lempeng tektonik, yang juga memicu serangkaian *tsunami* yang menghancurkan di sepanjang pantai yang paling barat yang berbatasan dengan Samudera Hindia, mencapai pesisir pantai timur Afrika di Somalia, bahkan sampai ke Antartika. *Tsunami Aceh* menewaskan lebih dari 250.000 orang di 14 negara dan membanjiri pesisir pantai dengan gelombang yang mencapai ketinggian 30 meter yang.

Gempa dan Tsunami Aceh merupakan peristiwa yang berhubungan dengan megathrust pada zona subduksi antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia, dimana lempeng Indo-Australia menunjam kebawah lempeng Eurasia yang relatif diam. Sedangkan lempeng Indo-Australia bergerak dengan kecepatan 5 - 7 cm/tahun. Gempa bumi dan Tsunami Aceh tahun 2004 dicatat sebagai gempa bumi dengan bidang patahan (*rupture*) terpanjang dalam sejarah gempa bumi yang tercatat oleh manusia, yaitu ±1600 Km memanjang dari episentrum gempa dekat pulau Simeulue sampai ke kepulauan Andaman. Rekaman Video ini dibuat oleh *Vala Hjorleifsdottir* dan *Santiago Lombeyda* menunjukkan adanya kenaikan dasar laut (*uplift*) sampai dengan 20 meter sepanjang ±1600 Km.



Gambar 5.25. : Gempa bumi Aceh (2004) dan daerah-daerah terdampak *Tsunami*

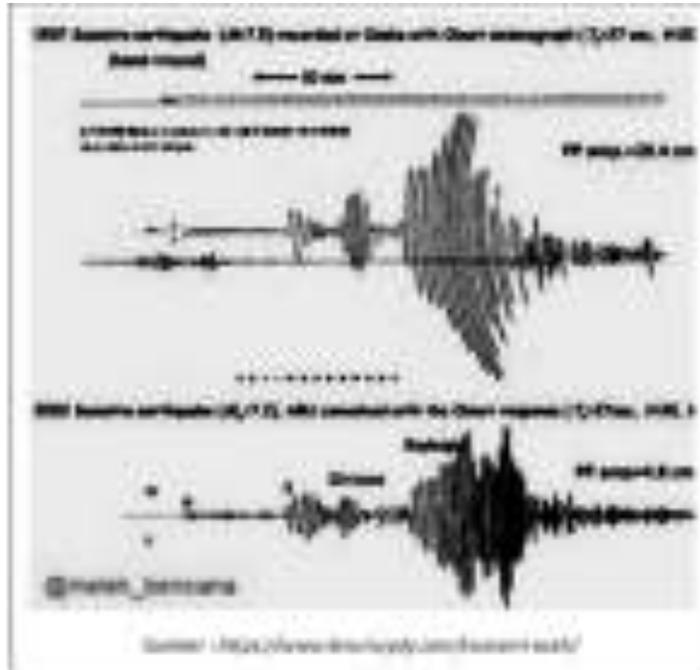
Tabel 5.7. : Daerah terdampak dan waktu kedatangan *tsunami* Aceh (2004)

The map displays the tsunami's path and arrival times across Southeast Asia. Key locations and their arrival times are as follows:

Location	Approximate Arrival Time
Sumatra (Epicenter)	00:00
Java	00:15
Malaysia	00:30
Philippines	00:45
Thailand	01:00
India	01:15
Andaman Islands	01:30
Nicobar Islands	01:45
Sumatra (Coastal)	02:00

(Sumber: www.usgs.gov)

Setelah gempa bumi besar pada tanggal 26 Desember 2004, beberapa gempa susulan masih terjadi pada jam dan hari-hari berikutnya di Sumatera, kepulauan Andaman dan Nicobar. Gempagempa susulan tersebut masih berlanjut hingga tiga sampai empat bulan kemudian, dengan magnitudo sampai dengan 6,6 SR. Gempagempa susulan tersebut menunjukkan perlepasan energi megathrust yang belum tuntas.



(Sumber : H. Kanamori, L. Rivera and W.H.K. Lee, 2010)

Gambar 5.26. : Seismogram gempa Aceh (1907) dan (2002) yang terekam pada Seismometer Omori pada Stasiun pengamat Osaka-Jepang

Sebelum peristiwa gempa-*tsunami* tahun 2004, Aceh pernah dilanda *tsunami* pada tahun 1907. Yaitu terjadi pada tanggal 4 Januari 1907, menyusul gempa bumi 7,6 Mw pada kedalaman 20 Km, dengan episentrum pada 2.48 LU dan 96.11 BT (Hiro Kanamori, dkk, 2010). Masyarakat pulau Simelue adalah korban yang mengalami dampak *tsunami* paling parah pada saat itu. Namun demikian, pengalaman tersebut menjadi pengalaman berharga yang dituturkan turun-temurun, sehingga masyarakat pulau Simelue lebih siap untuk menghadapi kejadian serupa. Hal ini terbukti, bahwa pada peristiwa gempa - *tsunami* 2004, tercatat hanya ada 6 korban tewas di kalangan masyarakat pulau Simelue.

Hiro Kanamori et al dalam papernya “Historical seismograms for unravelling a mysterious earthquake: The 1907 Sumatra Earthquake” yang dipublikasi dalam *Geophysical Journal International* tahun 2010, namun tidak menyebutkan panjang sesar yang menjadi pemicu *tsunami* Aceh 1907. Bagaimanapun panjang rekahan pemicu *tsunami* 1907 tidak dapat dipastikan oleh karena keterbatasan peralatan pada saat itu.

5.5.7. Gempa Bumi Yogyakarta - 2006

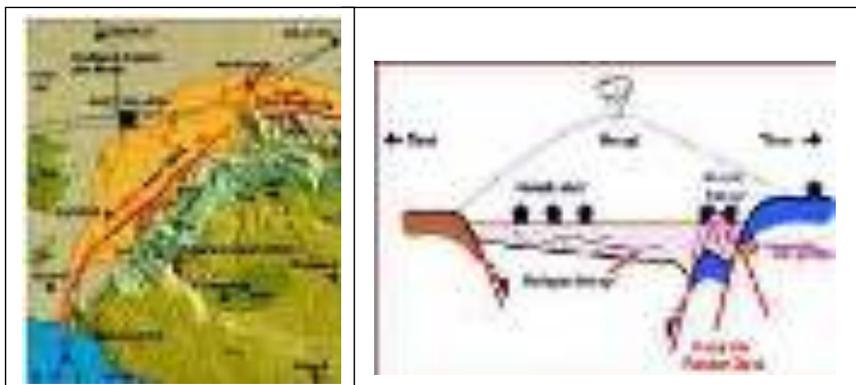
Hari Sabtu pagi pukul 05.53 WIB tanggal 27 Mei 2006, Yogyakarta digoncang gempa bumi berkekuatan 6,3 SR. Episentrum gempa terletak pada koordinat 8° LS dan 110° BT, atau sekitar 25 km kearah baratdaya dari kota Yogyakarta. Gempa tersebut telah meluluhlantakkan daerah-daerah di wilayah Provinsi DIY dan sebagian Provinsi Jawa Tengah. Menimbulkan sejumlah besar korban tewas, ribuan terluka, dan kerusakan berat maupun ringan pada sejumlah besar bangunan. Kerusakan parah terjadi di Kecamatan Imogiri, Jetis, Pleret dan Piyungan di Bantul dan Kecamatan Wedi, Gantiwarno, dan Bambanglipuro di Klaten.

Aktivitas gunung Merapi pada awalnya dicurigai sebagai faktor penyebab terjadinya gempa ini, seperti yang dialami sering terjadi sebelumnya. Akan tetapi ternyata bukan aktivitas gunung Merapi penyebab terjadinya gempa bumi saat itu, namun dinamika atau pergerakan palung Jawa yang terjadi akibat konvergensi antara lempeng India-Australia dengan lempeng Eurasia. Konvergensi tersebut telah memicu pergeseran sesar Opak yang membentang sepanjang 40 km dari pesisir pantai Bantul hingga ke Prambanan dengan arah 30° NE (Timur Laut). Sesar Opak melewati empat kecamatan yakni Pundong, Imogiri, Plered, dan Piyungan, dimulai dari Pundong dusun Potrobayan sebagai titik episentrum sampai ke Klaten, sehingga pada kecamatan-kecamatan yang dilewati sesar Opak tersebut terkena dampak terparah pada saat gempa 2006. Selain pada lintasan sesar Opak, beberapa wilayah yang terkena dampak langsung gempa ialah kawasan Bambanglipuro, Bantul, Sewon, dan Banguntapan. Daerah-daerah tersebut, walaupun tidak berada pada jalur sesar namun mengalami tingkat kerusakan yang cukup tinggi.

Sesar Opak sendiri berada dibawah permukaan, tertutup oleh timbunan material vulkanik gunung Merapi, sehingga pergeseran yang memicu gempa bumi yang berpusat pada kedalaman 17 km, nyaris luput dari pengamatan. Gempa tersebut mempunyai daya rusak yg kuat oleh karena pusat gempa yang dangkal (< 30 km) dan berada didarat dekat wilayah pemukiman padat, kekuatan gempa yang cukup besar (>5 SR), dan kondisi tanah yang belum terkonsolidasi dengan baik.



Gambar 5.27. : Episentrum gempa bumi Yogyakarta (2006)



Sumber : Geomagz 30/5/2016

Gambar 5.28. : Sketsa pergeseran sesar Opak pada gempa Yogyakarta (2006).

Gempa bumi Yogyakarta (2006) bukanlah peristiwa gempa bumi darat yang pertama, seperti yang disebutkan dalam laporan penelitian oleh *Walter et al (2008)*. *S.W. Visser (1922)* dan berita Koran *De Locomotief*, melaporkan secara rinci tentang bencana gempa bumi besar di wilayah Yogyakarta pada tanggal 10 Juni 1867. *Newcomb and McCann (1987)*, melaporkan kembali bahwa gempa Yogyakarta 1867 adalah bencana gempa dengan sumber didarat terbesar sejak abad 17, terjadi pada dinihari pukul 4;25.

Terjadi 2 kali hentakan pada gempa Yogyakarta tahun 1867, pertama gempa bumi berlangsung selama 8 detik, setelah berhenti sekitar 2 detik disusul dengan guncangan kedua yang lebih kuat selama kurang lebih 70 detik. Guncangan gempa dirasakan pada wilayah dengan radius 500 km dari Yogyakarta. Gempa Yogyakarta (1867) kemungkinan ber-magnitudo sampai 6.9, lebih kuat dari Gempa Yogya (2006). *Dr. Visser* menyimpulkan sumber-gempa memanjang ber-arah baratdaya - timurlaut dekat aliran sungai Opak, sesuai dengan jalur sesar Opak.

Gempa bumi pada tahun 1867 memporakporandakan Yogyakarta, mengakibatkan sekitar 500 orang tewas. Namun yang perlu untuk disimak adalah, bahwa wilayah yang mengalami kerusakan terparah sangat mirip dengan yang diakibatkan oleh Yogya (2006), yaitu meliputi wilayah Bantul sampai Klaten, termasuk candi Prambanan yang seperti halnya pada gempa 2006 juga mengalami kerusakan berat. Pada peristiwa gempa bumi Yogyakarta (1867), banyak rekahan-rekahan yang terbentuk pada permukaan tanah di wilayah Yogyakarta bagian selatan, dari Bantul sampai ke Klaten. Sebagian dari rekahan tersebut mengeluarkan semburan pasir dari dalam tanah, yang merupakan indikasi terjadinya proses likuifaksi.

5.5.8. Gempa Bumi Bengkulu - 2015

Pada hari Kamis 14 Mei 2015, Kabupaten Bengkulu - Kalimantan Barat digoncang gempa bumi. Gempa terjadi pada pukul 17.25.05 waktu setempat dengan kekuatan 4,2 SR, dengan lokasi pusat gempa 33 km baratdaya Singkawang, pada 0.61 LU dan 108.86 BT, dengan kedalaman 11 km, seperti yang dilaporkan oleh Stasiun Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) bandara Supadio-Pontianak.

Getaran yang dirasakan masyarakat di pesisir Kabupaten Bengkulu tersebut, bukanlah yang pertama kalinya terjadi di daerah ini, oleh karena sebelumnya pada tanggal 23 Agustus 2011 kepanikan luar biasa juga melanda warga di Kota Singkawang dan Kabupaten Bengkulu, saat mereka merasakan bumi bergoyang selama puluhan detik. Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) bandara Supadio Pontianak, saat itu memastikan guncangan yang terasa di Singkawang dan Bengkulu adalah gempa bumi

tektonik dengan kekuatan 4,4 SR, terjadi pada pukul 08.06 waktu setempat, dengan lokasi pusat gempa pada posisi 10⁰19' LU dan 109⁰19' BT, berada didarat pada kedalaman 37 KM. Walaupun demikian, tidak dilaporkan adanya korban maupun kerusakan yang signifikan pada kedua peristiwa gempa bumi tersebut.

Namun peristiwa gempa bumi di Provinsi Kalimantan Barat tersebut dinilai merupakan anomali, oleh karena letaknya jauh dari batas konvergensi lempeng-lempeng tektonik. Walaupun mekanisme pemicu gempa bumi yang terjadi belum diketahui dengan jelas, hal tersebut membuka wawasan baru, bahwa provinsi Kalimantan Barat ternyata tidak sepenuhnya bebas dari gempa bumi. Hal ini juga ditunjang oleh fakta lain, bahwa di Bengkayang terdapat gunung Niut, yang merupakan gunung api walaupun di kategorikan tidak aktif. Di daerah ini juga masih terdapat sumber air panas aktif yakni di Sungkung Akif, bahkan menurut peneliti dari Jepang di lokasi ini juga terdapat kawah purba.

5.5.9. Gempa Bumi Pidie – 2016

Gempa bumi dengan magnitudo 6.5 SR, terjadi di kabupaten Pidie Jaya – Aceh, pada tanggal 7 Desember 2016 pagi, adalah gempa dengan pusat gempa di darat, merupakan gempa dangkal dengan kedalaman pusat gempa sekitar 15 km. Lokasi pusat gempa pada 5.25 LU dan 96.24 BT, juga merupakan anomali oleh karena terletak pada pantai timur Sumatera. Hal ini berbeda dengan konsentrasi pusat-pusat gempa bumi di Sumatera, yang umumnya terpusat pada bagian barat pulau Sumatera disepanjang pegunungan Bukit Barisan. Pusat gempa bumi inipun terpisah dari zona sesar Semangko atau Sesar Besar Sumatera. Diperkirakan gempa bumi ini dipicu oleh pergerakan sesar Samalanga – Sipopok, yang merupakan cabang dari sesar Semangko, dimana sesar ini tidak ter-identifikasi oleh karena tertutup oleh endapan-endapan yang lebih muda. Sesar ini memanjang dibawah kabupaten Pidie Jaya, sehingga menimbulkan dampak kerusakan yang besar.



Sumber : BMKG

Gambar 5.29. : Lokasi pusat gempa Pidie Jaya, 7 Desember 2016.

5.5.10. Gempa Bumi Lombok – 2018 (Gempa Berantai)

Gempa bumi berkekuatan 7,0 SR mengguncang kawasan Lombok Utara, Nusa Tenggara Barat (NTB) pada hari Minggu, 5 Agustus 2018, mengakibatkan kerusakan besar banyak menelan korban jiwa.



Gambar 5.30. Pusat-pusat gempa bumi Lombok (2018)

BMKG menyatakan gempa Lombok yang terjadi pada tanggal 5 Agustus 2018 pukul 18:46:35 WIB sebagai gempa utama. Sumber gempa terletak pada koordinat 8.37 LS dan 116.48 BT, berlokasi pada 18 kilometer arah barat laut Lombok Timur - Nusa Tenggara Barat, dengan magnitudo 7,0 SR dan kedalaman 15 km. Sumber gempa Lombok tersebut berdekatan dengan sumber gempa ber-magnitudo 6,4 seminggu sebelumnya, hari Minggu 29 Juli 2018, pukul 05:47:39 WIB, yaitu pada 8.26 LS dan 116.55 BT, 28 kilometer arah barat laut Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat dengan kedalaman 10 kilometer. Berikutnya, gempa berkekuatan 6,4 SR kembali mengguncang pada hari Minggu 19 Agustus 2018 siang hari, dan 6,9 SR pada malam harinya, diikuti dengan 180 gempa susulan sampai dengan hari Selasa 21 Agustus 2018 pukul 09.00 WIB. Secara total, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat telah terjadi 1005 kali gempa susulan sejak gempa utama pada tanggal 5 Agustus 2018 sampai dengan 21 Agustus 2018.

Sampai dengan hari Selasa tanggal 21 Agustus 2018, rentetan gempa yang mengguncang Lombok sejak tanggal 29 Juli 2018 telah mengakibatkan 515 korban meninggal dunia dan 7145 orang terluka.

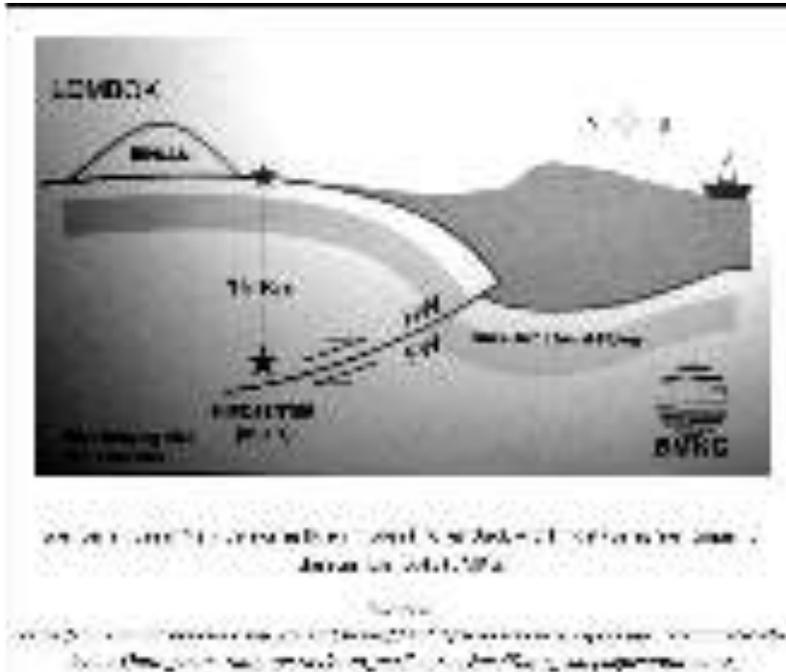
Terjadinya gempa-gempa susulan beruntun tersebut mengakibatkan terhambatnya proses penanganan dan menyebabkan masyarakat semakin trauma. Penanganan yang seharusnya sudah dapat dipercepat dengan berbagai perbaikan, terpaksa harus tertunda, sementara pemenuhan kebutuhan dasar pengungsipun juga semakin bertambah.

Gempa bumi Lombok ini disebabkan oleh pergerakan sesar Flores, yang terpicu untuk bergeser oleh konvergensi antara lempeng Indo - Australia dengan lempeng Eurasia. Sesar Flores sendiri membujur dari timurlaut pulau Bali, Lombok, Sumbawa, hingga pulau Flores. Rangkaian gempa bumi yang terjadi di Pulau Lombok, NTB, hingga Bali, disebabkan oleh sesar naik Busur Belakang Flores (*Flores Back Arc Thrust*), secara singkat disebut sebagai sesar Flores. Bidang sesar naik Busur Belakang Flores menunjam kebawah bagian daratan Lombok, sehingga menimbulkan tumbukan, yang menghasilkan gempa besar. Hal ini dapat dilihat dari kedalaman pusat gempa di lereng Utara-Timurlaut Gunung Rinjani.



Gambar 5.31. : Distribusi sesar-sesar disekitar pulau Lombok

Gempa bumi di Lombok pada tanggal 29 Juli 2018 dengan magnitudo 6,4 SR merupakan awalan (pembuka), sedangkan gempa pada 5 Agustus dengan skala 7,0 SR adalah gempa utama (*main shock*). Gempa-gempa tersebut terjadi oleh karena ada pergerakan pada satu bidang sesar dengan kemiringan 30 derajat sejauh 2-3 meter. Penyebabnya sama dan sumbernyapun sama, yaitu pergerakan sesar Busur Belakang Flores, walaupun konfigurasi gaya dan letaknya berbeda. Oleh karena aktivitas pergerakan lempeng kerak bumi, seketika pergerakan lempeng kerak bumi dari utara ke selatan menghujam kebawah, sehingga bagian lempeng kerak bumi yang bergerak dari selatan ke utara itu seolah naik, maka hal inilah yang biasa disebut sebagai sesar naik. Kawasan Lombok dan sekitarnya tersusun dari batuan vulkanik dan banyak terdapat sesar, dimana ketika terjadi gempa sesar-sesar tersebut dapat ter-aktifkan. Hal inilah yang menyebabkan gempa Lombok tidak langsung berhenti, namun diikuti oleh gempa-gempa susulan.



Gambar 5.32. : Sketsa *Flores Back Arc Thrust Fault*, pemicu gempa bumi Lombok.

Sesar (*fault*) merupakan bagian permukaan yang retak pada lapisan kerak bumi, sehingga satu blok batuan bergerak relatif terhadap blok lainnya. Sedangkan zona subduksi merupakan pertemuan antara dua lempeng kerak bumi. Sesar dan zona subduksi merupakan sumber gempa dan keduanya melingkari pulau-pulau Bali, Lombok, Sumbawa, Flores, dan sekitarnya.

Gempa bumi yang terjadi di Lombok tahun 2018 ini bukanlah yang pertama. Namun menurut catatan historis, gempa tektonik tersebut merupakan yang terbesar. Berikut rangkuman catatan tujuh gempa Lombok yang pernah terjadi dengan kekuatan di atas 6,0 SR :

1. Gempa Lombok, 25 Juli 1856 :

Gempa ini gempa tektonik pertama yang tercatat dalam literatur Belanda pada pada 1918, dalam disertasi *Arthur Wichmann* dari *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW)* bertajuk *The Earthquakes of the Indian Archipelago until the Year 1857*. *Wichmann* mencatat bahwa gempa besar terjadi di Lombok, tepatnya di Labuan Tereng, pada 25 Juli 1856. Gempa itu juga

diikuti gelombang *tsunami* yang menghantam pesisir Ampenan di Mataram. Sayangnya, dalam catatan itu tak disebutkan berapa kekuatan gempa dan ketinggian gelombang *tsunami* nya.

2. Gempa Lombok, 21-24 Desember 1970

Data dari USGS mencatat, Kota Praya di pulau Lombok diguncang dua gempa besar pada tanggal 21 dan 24 Desember 1970. Pada tanggal 21 Desember 1970, gempa berkekuatan 6,0 SR yang berpusat pada kedalaman 75 km mengguncang perairan di selatan Lombok. Pada tanggal 24 Desember 1970, gempa kembali mengguncang, dengan kekuatan 5,6 SR, dengan pusat gempa pada kedalaman 70 km. Namun, tak ada korban tewas akibat kedua gempa tersebut.

3. Gempa Lombok, 28 Mei 1972 :

USGS kembali mencatat, getaran gempa berpusat di 262 km selatan Praya pada tanggal 28 Mei 1972. Kekuatannya mencapai 6,3 SR dengan kedalaman 15 km. Tak ada korban jiwa akibat bencana ini. Hanya beberapa bangunan runtuh akibat guncangannya yang terbilang besar namun tak diikuti oleh *tsunami*.

4. Gempa Lombok, 10 April 1978 :

Menurut catatan BMKG, gempa pada tanggal 10 April 1978 ini berpusat di 297 km selatan Praya dan berkekuatan 6,7 SR. Gempa tak menimbulkan korban jiwa. Gempa yang berada di kedalaman 19 km ini hanya menimbulkan sejumlah bangunan rusak parah namun tidak diikuti *tsunami*.

5. Gempa Lombok, 30 Mei 1979 :

Sebanyak 37 orang dilaporkan tewas menurut data BMKG, dalam bencana gempa berkekuatan 6,1 SR. Selain itu, sejumlah rumah dan bangunan rusak berat.

6. Gempa Lombok, 1 Januari 2000 :

BMKG mendata bahwa gempa Lombok pada tahun baru 2000 tersebut merusak sekitar 2000 rumah. Namun gempa bermagnitudo 6,1 SR tersebut tidak menimbulkan korban jiwa dan tidak pula diikuti *tsunami*.

7. Gempa Lombok, 9 Juni 2016 :

Menurut data USGS, gempa berkekuatan 6,2 SR, dengan pusat gempa pada 284 km selatan pesisir pantai Kuta dengan kedalaman 19 km tersebut, telah melukai 9 orang. Guncangannya dirasakan kuat hingga ke pulau Bali dan pulau Sumbawa, namun tidak diikuti *tsunami*.

5.5.11. Gempa Bumi Palu/Donggala – 2018 (Gempa + Tsunami + Likuifaksi)

Gempa bumi melanda Kota Palu dan kabupaten Donggala pada hari Jum'at tanggal 28 September 2018. Gempa pertama kali mengguncang Donggala pukul 14.00 WIB, dengan magnitudo 6 SR dan kedalaman pusat gempa 10 km, mengakibatkan satu orang meninggal dunia, 10 orang terluka dan puluhan rumah rusak di kecamatan Singaraja, kabupaten Donggala. Gempa yang kembali terjadi pada pukul 17.02 WIB dengan magnitudo 7,7 SR (kemudian di koreksi menjadi 7,4 SR), merupakan gempa bumi tektonik yang terpicu oleh pergerakan Palu-Koro, dengan pusat gempa pada 0.18 LS dan 119.85 BT , 26 km ke arah utara Donggala-Sulawesi Tengah, dengan kedalaman 10 km.



Gambar 5.33. : Pusat gempa Palu/Donggala 2018, magnitudo 7,7 SR (dikoreksi 7,4 SR)

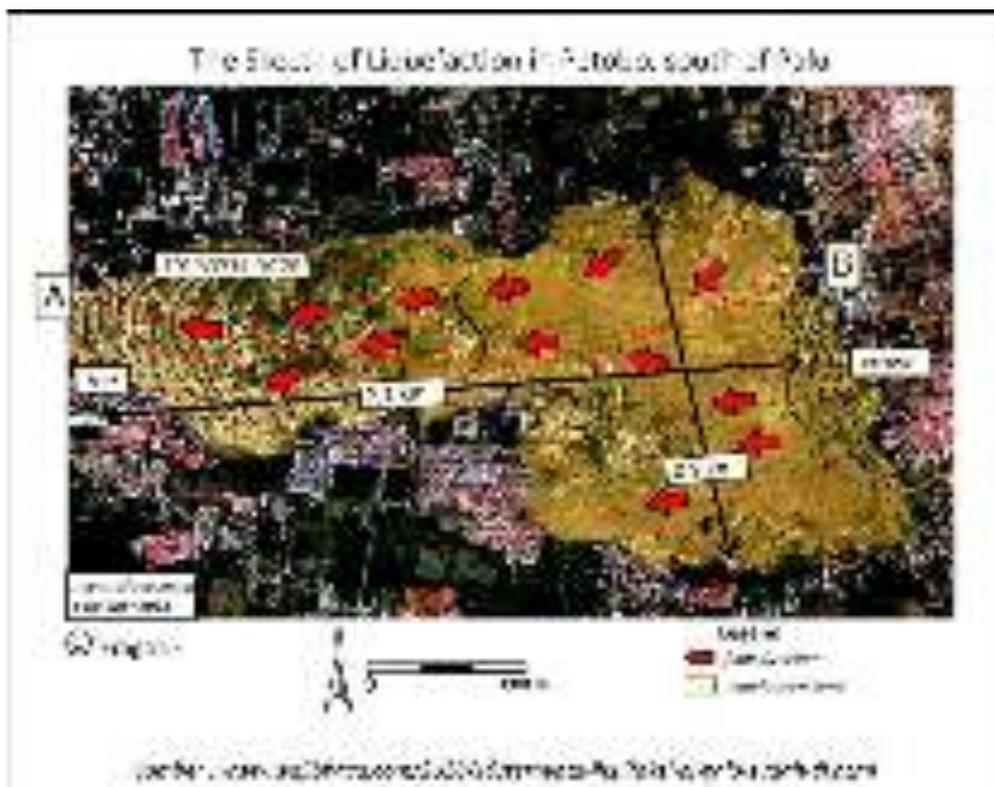
Sesar Palu-Koro sendiri merupakan jenis sesar dengan pergerakan mendatar (*strike-slip fault*), yang oleh karena tidak mempunyai komponen gerak vertikal, maka secara umum dianggap tidak berpotensi untuk memicu *tsunami*. Namun penjelasan dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), gempa ini merupakan gempa dangkal pada jalur sesar Palu-Koro, yang dibangkitkan oleh deformasi dengan mekanisme pergerakan struktur sesar mendatar yang miring, sehingga berpotensi memicu *tsunami* oleh karena mempunyai komponen gerak vertikal. Dan *tsunami* benar-benar terjadi pada pukul 17.22 WIB, dengan ketinggian mencapai 6 meter. Namun ada dugaan pula, bahwa *tsunami* yang menerjang cukup tinggi ini disebabkan oleh longsoran sedimen dasar laut pada kedalaman 200-300 meter yang terpicu oleh guncangan gempa. Guncangan gempa dan terjangan gelombang *tsunami* ini telah merobohkan jembatan Vatulemo, dan menimbulkan sejumlah besar korban, yang menurut BNPB tercatat sebanyak 384 orang meninggal, 29 orang hilang dan 540 luka berat di kota Palu.



Gambar 5.34. : Jembatan Vatulemo yang runtuh digoncang gempa dan diterjang *tsunami*

Guncangan gempa bumi ini dirasakan di Donggala dengan intensitas VII-VIII skala MMI, Palu, Mapaga VI-VII skala MMI, Gorontalo dan Poso III-IV skala MMI, Majene dan Soroako III skala MMI, Kendari, Kolaka, Konawe Utara, Bone, Sengkang, Kaltim dan Kaltara II - III skala MMI, Makassar, Gowa, dan Toraja II skala MMI.

Sejak gempa dan *tsunami* terjadi di Kota Palu dan Kabupaten Donggala, hari Jumat 28 September 2018) tersebut, sejumlah gempa susulan terus terjadi di kawasan tersebut sampai dengan Jumat malam. Tercatat, setidaknya terjadi 13 gempa dengan kekuatan di atas magnitudo 5 SR sejak pukul 14.00 WIB hingga 21.26 WIB.



Gambar 5.35. : Likuifaksi pergerakan tanah di wilayah Petobo



Perumahan di Petobo, setelah tertimbun pasir lumpur usai gempa.

Foto ini diambil Jumat (5/10/18) . Foto: Minnie Rivai/ Mongabay Indonesia

Sumber :

<http://www.mongabay.co.id/2018/10/05/fenomena-sembrun-lumpur-tenggelamkan-pemukiman-kala-gempa-sulteng/>

Gambar 5.36. : Kehancuran perumahan akibat likuifaksi

Gempa bumi 7,4 SR yang mengguncang kota Palu, Donggala dan Sigi, menimbulkan korban bencana yang lebih besar, berupa fenomena alam semburan lumpur yang disebut likuifaksi. Guncangan gempa yang sedemikian kuat menyebabkan permukaan tanah amblas, dan menyemburkan keluar lumpur, sehingga menenggelamkan kompleks perumahan, seperti terjadi di Perumahan BTN Petobo, Palu. Di wilayah Balaroa likuifaksi mencakup areal seluas 47,8 hektar, menyebabkan 1045 bangunan rusak. Kerusakan parah juga melanda Perumnas Balaroa, dimana pada saat gempa terjadi kenaikan dan penurunan muka tanah, dimana beberapa bagian amblas sedalam lima meter, sedangkan pada bagian lain terjadi kenaikan muka tanah mencapai dua meter. Likuifaksi di wilayah Balaroa ini mencakup areal seluas 47,8 hektar, dan menyebabkan 1045 bangunan rusak. Likufaksi juga terjadi di kabupaten Sigi, meliputi Mpano, Sidera, Jono Oge, dan Lolu, dengan areal terkena dampak diperkirakan mencapai 202 hektar.

Badan Geologi sesungguhnya telah menerbitkan *PETA ZONA BAHAYA LIKUIFAKSI DAERAH PALU DAN SEKITARNYA*,

PROVINSI SULAWESI TENGAH, pada tahun 2012. Namun hal tersebut sejauh ini belum sempat di-sosialisasikan dan di-implementasikan tindak lanjutnya.

Lokasi Donggala dan Palu yang berada pada sesar Palu-Koro memang merupakan wilayah yang rawan gempa dan *tsunami*. Sesar Palu-Koro merupakan sesar dengan pergerakan terbesar kedua di Indonesia setelah sesar Yapen di Papua Barat, yaitu dengan pergerakan mencapai 46 mm per tahun.

Gempa dan *tsunami* yang melanda Palu dan Donggala (2018), yang menimbulkan korban besar bukanlah yang pertama kali terjadi. Data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat bahwa gempa bumi pernah terjadi di teluk Palu dimasa lalu, yaitu :

1. **1 Desember 1927**, gempa mengakibatkan 14 orang meninggal dan 50 lainnya luka-luka.
2. **30 Januari 1930**, *tsunami* menerjang pantai barat Donggala. Tinggi *tsunami* mencapai lebih dari 2 meter selama 2 menit.
3. **14 Agustus 1938**, *tsunami* menerjang teluk Bambu, kecamatan Balaesang-Donggala. Ketinggian *tsunami* mencapai 8 hingga 10 meter, 200 korban meninggal, 790 rumah rusak, seluruh desa di pesisir barat Donggala hampir tenggelam.
4. **1 Januari 1966**, *tsunami* menyapu pantai barat Donggala dan Toli-Toli. Terjangan *tsunami* setinggi 4 meter menyebabkan 9 orang meninggal.
5. **11 Oktober 1998**, gempa terjadi di Donggala, mengakibatkan ratusan bangunan rusak berat.
6. **17 November 2008** terjadi gempa bumi di Laut Sulawesi, mengakibatkan 4 orang meninggal.
7. **18 Agustus 2012**, gempa bumi mengakibatkan 8 orang meninggal di kabupaten Sigi dan Parigi-Montong.

5.5.12. Tsunami Selat Sunda – 2018 (Erupsi Vulkanik – Longsor – Tsunami)

Pada tanggal 22 Desember 2018, peristiwa *tsunami* yang berhubungan dengan erupsi gunung Anak Krakatau di Selat Sunda, melanda pesisir Banten dan Lampung, Indonesia. Diawali pada pukul 21:03 WIB (14:03 UTC), ketika gunung Anak Krakatau meletus dan

merusak peralatan seismograf terdekat, namun stasiun seismograf lainnya mendeteksi adanya getaran terus-menerus. Berikutnya, pada pukul 21:27 WIB malam yang sama, BMKG mendeteksi adanya gelombang *tsunami* di pesisir barat Banten, walaupun tidak ada peristiwa tektonik. Hal tersebut terjadi tanpa adanya peringatan dini dari sistem sensor *tsunami*. Sehingga menimbulkan korban sedikitnya 429 orang tewas dan 1485 terluka, dimana wilayah korban dan kerusakan yang terdampak, tersebar meliputi Kabupaten Pandeglang, Kabupaten Serang, Kabupaten Lampung Selatan, dan Kabupaten Tanggamus.

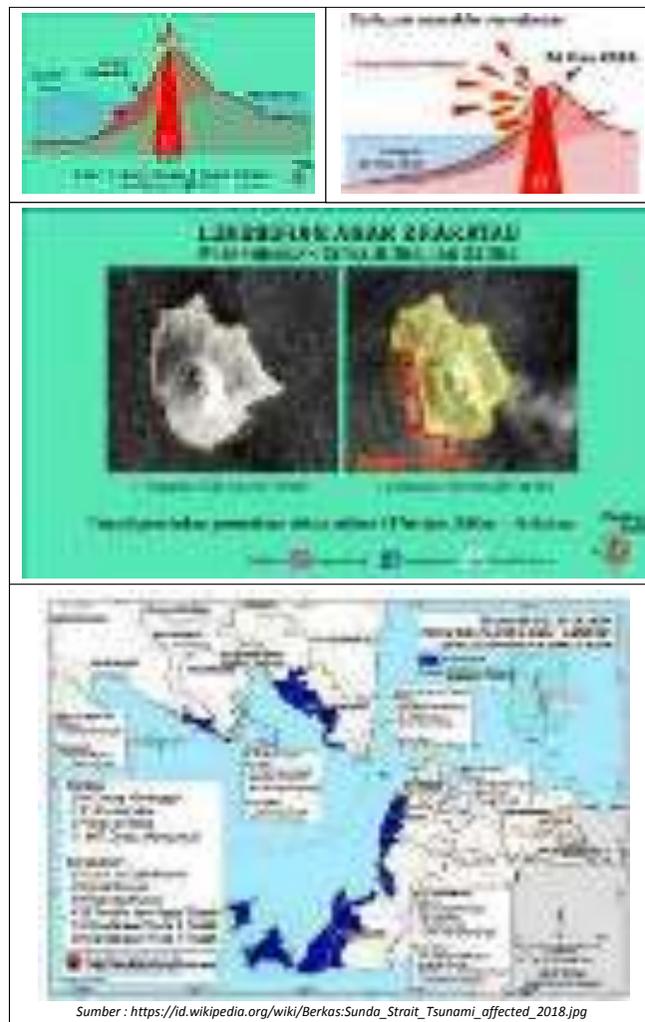
Gunung Anak Krakatau terbentuk paska erupsi dahsyat gunung Krakatau yang merupakan induknya pada tahun 1883. Namun baru muncul ke permukaan laut pada tahun 1927, tepatnya ditepian kaldera gunung Krakatau lama, diantara gunung Perbuatan dan gunung Danan yang turut hancur pada erupsi 1883. Gunung Anak Krakatau terus tumbuh, sehingga pada tahun 1959 mencapai ketinggian 152 meter dan kini puncaknya berada pada ketinggian 338 meter. Lokasinya yang berada ditepian kaldera membuat gunung Anak Krakatau memiliki lereng yang sangat curam pada sisi baratdaya. Lereng curam mengakibatkan material tubuh gunung Anak Krakatau sangat rentan mengalami longsor, baik oleh guncangan aktivitas vulkanik, kegempaan, ataupun penambahan beban.

Giachetti dkk pada tahun 2012 sesungguhnya telah mengidentifikasi potensi longsor pada gunung Anak Krakatau yang dapat memicu *tsunami*. Yaitu dengan mengamati bentuk morfologi, serta timbunan material vulkanik yang terbentuk sejak tahun 1928 s/d 1960.

Walaupun erupsi gunung Anak Krakatau terpantau telah dimulai sejak bulan Juni, dan masih berlangsung hingga Minggu sore tanggal 23 Desember 2018, namun longSORan pada tubuh gunung Anak Krakatau pada malam hari tanggal 22 Desember 2018 lah yang memicu gelombang *tsunami* setinggi 12 meter pada Sabtu malam tersebut. Walau demikian tidak menutup kemungkinan bahwa **aktivitas vulkanik** yang masih terus berlangsung menjadi salah satu pemicu terjadinya longSORan dan *tsunami* di Selat Sunda. Setelah longSOR pertama pada tanggal 22 Desember, erupsi besar yang terjadi keesokan harinya kemungkinan terpicu oleh longSORan tersebut, disebabkan oleh hilangnya timbunan material diatas pipa

saluran gunung api, sehingga mempercepat pergerakan magma menuju permukaan. Erupsi tersebut memicu longsor yang besar kembali terjadi pada tanggal 24 Desember 2018, namun tidak cukup kuat untuk memicu *tsunami*, oleh karena prosesnya yang berjalan secara bertahap.

Tsunami masih berpeluang terjadi pada hari-hari berikutnya, mengingat masih cukup besar volume timbunan material pada tubuh gunung Anak Krakatau yang belum terbawa longsor.



Sumber : <https://geologi.co.id/2018/12/26/letusan-anak-krakatau-sebabkan-longSORAN-baru/>

Gambar 5.37. : *Tsunami* terpicu oleh longsor pada tubuh gunung Anak Krakatau

5.6. Mitigasi Gempa dan Kearifan Lokal

Gempa bumi maupun *tsunami* pada dasarnya adalah proses alam untuk mencapai keseimbangannya. Hal tersebut akan menjadi bencana, apabila terjadi secara mendadak, tak terduga dan merugikan kepentingan manusia. Bagaimanapun proses tersebut berjalan secara alamiah tanpa dapat dicegah. Bahkan sejauh ini belum ada metoda yang akurat untuk mem-prediksi, baik lokasi, besaran maupun waktu kejadiannya. Kemampuan teknologi saat ini baru mampu untuk meng-identifikasi lokasi pusat-pusat gempa yang terjadi, dan me-lokalisir sebaran dampak serta percepatan maksimum yang dihasilkannya secara statistik. Walaupun dalam sedikit kasus seperti di Jepang, kejadian gempa bumi dapat diprediksi secara akurat, namun hal tersebut bersifat spesifik dan tak dapat diterapkan secara umum untuk lokasi-lokasi lainnya. Maka mitigasi yang dapat dilakukan adalah dengan upaya adaptasi, terutama pada lokasi-lokasi yang telah ter-identifikasi sering mengalaminya, termasuk informasi dari adat-istiadat masyarakat setempat, yang tertutur secara turun-temurun.

5.6.1. Mitigasi Gempa, *Tsunami* dan Likuifaksi

Gempa bumi, sejauh ini belum dapat di-prediksi dengan cukup tepat, waktu kejadian, besaran magnitudo dan percepatan yang dihasilkan, serta dampak ikutannya seperti *tsunami*, likuifaksi dan pergeseran-pergeseran tanah. Maka, dalam upaya mitigasi, yang pertama kali harus dilakukan adalah meng-identifikasi lokasi yang terkait dengan bencana gempa bumi, beserta dampak-dampak ikutannya, dengan berdasarkan pada kejadian-kejadian yang pernah terjadi, baik yang tercatat maupun tidak. Bagaimanapun, peristiwa gempa bumi pada dasarnya merupakan siklus yang berulang. Hal-hal yang perlu di-identifikasi adalah :

- Distribusi pusat-pusat gempa yang pernah terjadi beserta dengan magnitudonya. Dapat dibuat dalam bentuk peta kegempaan atau peta percepatan gempa, yang hendaknya selalu di mutakhirkan secara berkala.

- Zona sesar aktif seyogyanya di-identifikasi, oleh karena berpotensi untuk terpicu bergeser oleh gempa-gempa besar, atau berpotensi menjadi pusat gempa pada saat terpicu bergeser.
- Pantai-pantai yang berhadapan dengan pusat-pusat gempa laut, termasuk konfigurasi morfologinya, terkait dengan bahaya *tsunami*. Terutama dataran pantai yang landai (biasanya merupakan obyek wisata pantai), dan teluk-teluk yang menjorok ke daratan (dalam kasus gempa bumi Palu, bentuk morfologi teluk terbukti telah memperbesar daya terjang *tsunami*).
- Potensi likuifaksi pada daerah-daerah yang rawan gempa, dalam bentuk peta potensi likuifaksi.
- Daerah-daerah yang pernah mengalami bencana gempa, *tsunami* ataupun likuifaksi, baik yang tercatat maupun berdasarkan penuturan masyarakat.

Catatan identifikasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar mitigasi penanggulangan bencana gempa bumi beserta dampak-dampak ikutannya. Yaitu diantaranya adalah dengan penerapan konstruksi bangunan tahan gempa untuk meminimalkan kerusakan dan korban keruntuhan bangunan yang diakibatkan oleh guncangan gempa. Hal ini dapat dilakukan dengan memasukkan faktor percepatan gempa didalam perencanaan disain konstruksi bangunan. Untuk itu, Indonesia telah menerbitkan *Peta Percepatan Gempa Indonesia* untuk digunakan sebagai pedoman. Peta tersebut dibuat berdasarkan data-data kegempaan yang pernah terjadi, dan akan selalu dimutakhirkan secara berkala. Disamping itu daerah-daerah potensisl likuifaksi ataupun zona sesar-sesar aktif memang sudah selayaknya dihindari.

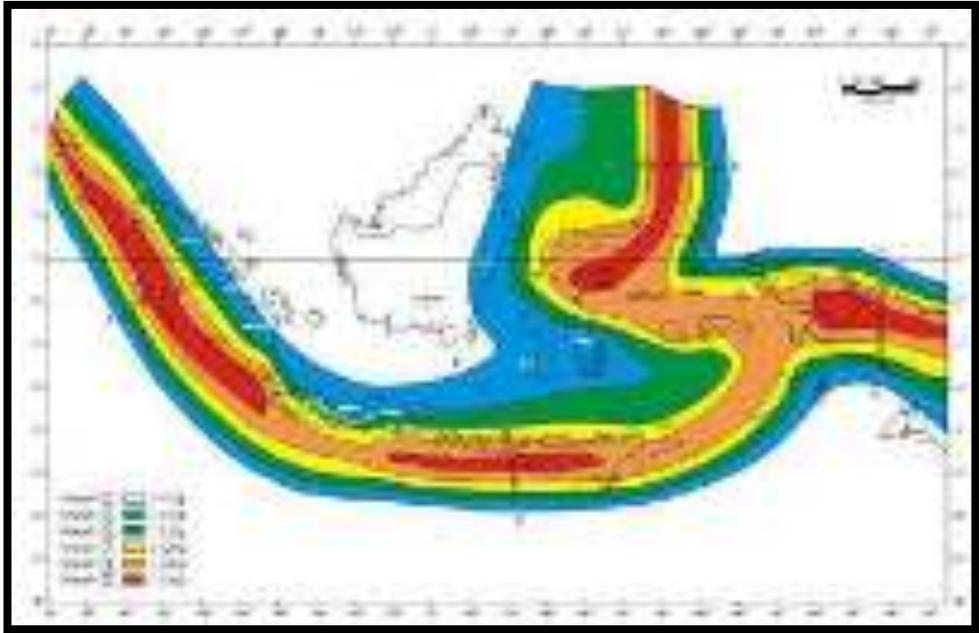
Tsunami terjadi oleh sebab deformasi dasar laut sebagai akibat konvergensi diantara lempeng-lempeng kerak bumi. Sehingga pantai-pantai laut yang berhadapan langsung dengan laut terbuka dimana konvergensi kerak bumi terjadi, secara teoritis merupakan wilayah rawan *tsunami*, yang seyogyanya mendapat perhatian untuk diantisipasi. Maka, identifikasi lokasi pantai-pantai yang rawan *tsunami*, harus merupakan prioritas pertama yang dilakukan dalam mitigasi bencana *tsunami*.

Beberapa indikasi proses datangnya gelombang *tsunami* yang perlu untuk dikenali, adalah sebagai berikut :

1. Diawali dengan gempa laut yang kuat.
2. Surut laut mendadak mengikuti gempa laut yang kuat tersebut. Biasanya jelas teramati pada pantai-pantai yang landai.
3. Datangnya gelombang *tsunami*, segera setelah surut laut tersebut, yang menerobos jauh sampai ke daratan.
4. Arus balik air laut dari daratan menuju garis pantai semula.

Namun demikian, selang waktu antara gempa laut yang kuat dengan datangnya gelombang *tsunami* relatif sangat singkat, dalam banyak kasus hanya berkisar antara 10 sd 20 menit. Sehingga seandainya pun indikasi awal berupa gempa laut yang kuat telah terdeteksi, akan sangat sulit untuk meng-evakuasi sejumlah besar orang dalam waktu singkat. Maka, menghindari berkumpulnya sejumlah besar orang dalam waktu yang lama, dan mempersiapkan jalur evakuasi yang dapat dilalui dengan cepat, adalah prioritas utama dalam mitigasi bencana *tsunami*.

Tsunami adalah bencana yang relatif sangat jarang terjadi dibandingkan dengan gempa bumi. Sangat jarang orang yang mengalami sendiri bencana *tsunami* pada tempat yang sama, lebih dari sekali dalam hidupnya, sehingga dalam banyak peristiwa, korban bencana *tsunami* sering terjadi justru oleh ketidak tahuan masyarakat. Maka sosialisasi bencana *tsunami* seyogyanya dilakukan secara terus menerus pada wilayah-wilayah yang potensial untuk mengalaminya.



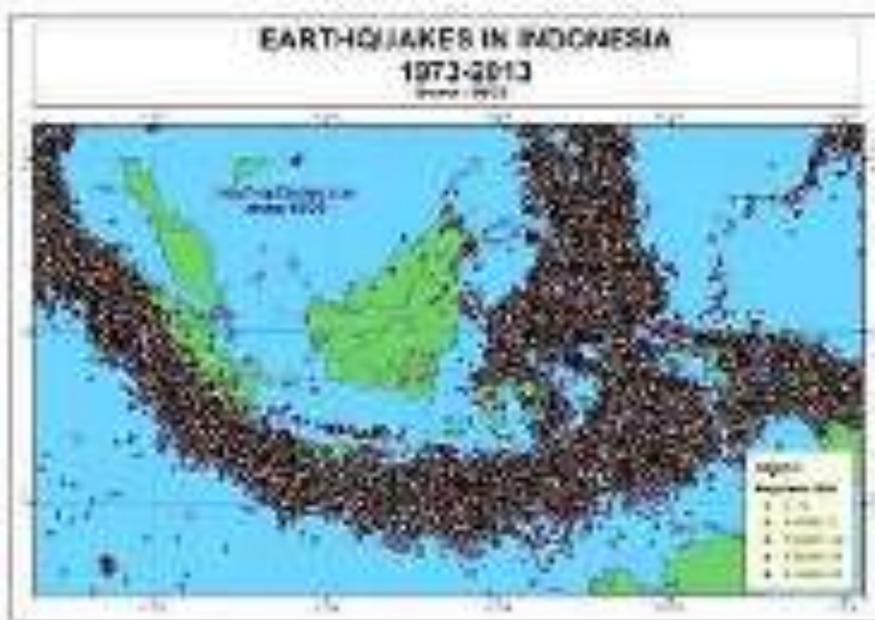
Sumber : Sumber : Badan Geologi – Kementerian ESDM

Gambar 5.38. : Peta Zonasi Gempa Indonesia

Wilayah/Provinsi	Percepatan puncak maksimum (cm/s ²)	Percepatan puncak maks (maksimum A_{max} (g))			
		Tanah Keras	Tanah Perlembehan	Tanah Lembehan	Tanah Ekstrem
1	0,04	0,04	0,05	0,06	Diperkirakan maksimum
2	0,10	0,10	0,12	0,15	Maksimal
3	0,15	0,15	0,18	0,22	terlepas lokasi
4	0,20	0,20	0,24	0,30	
5	0,25	0,25	0,30	0,36	
6	0,30	0,30	0,36	0,45	

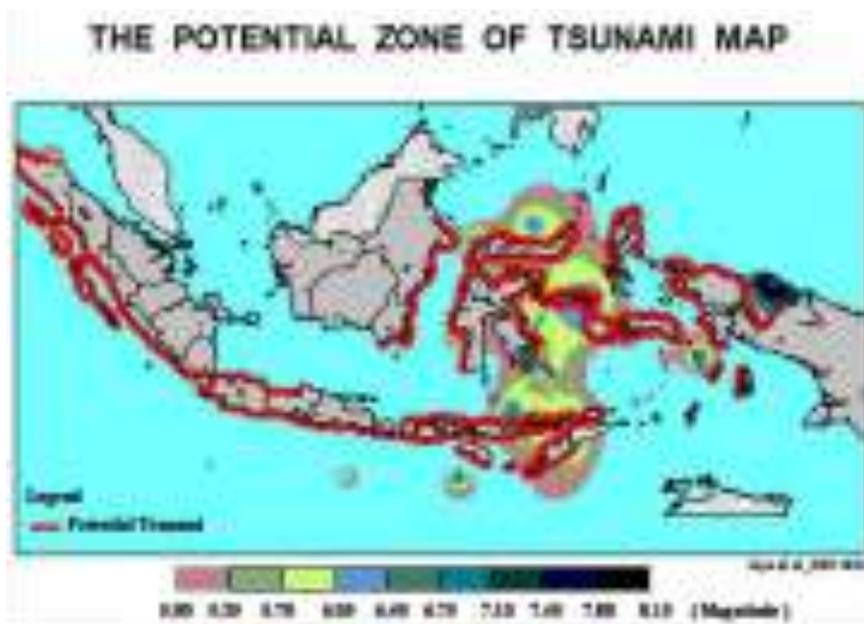
Sumber : Sumber : Badan Geologi – Kementerian ESDM

Tabel 5.8. : Percepatan gempa per wilayah zona gempa



Rekaman titik-titik pusat gempa di Indonesia selama 40 tahun atau sepanjang tahun 1973-2013. (sumber: earthquake.usgs.gov)

Gambar 5.39. : Sebaran pusat-pusat gempa bumi di Indonesia



Sumber : BNPB

Gambar 5.40. : Peta wilayah rawan tsunami Indonesia (Sumber : BNPB)

5.6.2. Kearifan Lokal

Gempa bumi dengan segala dampaknya, adalah proses geologi yang telah terjadi berulang kali sejak terbentuknya kerak bumi, jauh sebelum peradaban manusia. Maka makhluk hidup dimuka bumipun secara turun temurun secara alamiah telah ber-adaptasi. Sehingga, walaupun belum dapat dijelaskan secara ilmiah, seringkali naluri makhluk hidup telah mendahului men-deteksi akan datangnya bencana alam gempa bumi maupun *tsunami*. Misalnya, gajah-gajah tunggangan di pesisir pantai Phuket-Thailand, yang mendadak gelisah dan berlarian tak terkendali menuju ketinggian, beberapa saat sebelum *tsunami* menerjang.

Likuifaksi yang terjadi pada gempa bumi Palu pun sesungguhnya bukan hal baru. Nenek moyang masyarakat Palu telah merekam kejadian likuifaksi dalam istilah lokal, yang menandakan bahwa mereka telah mengenalinya sejak lama. Likuifaksi disebut dengan istilah *nalodo* yang berarti amblas terhisap lumpur. Maka daerah-daerah rentan *nalodo* ini dahulunyapun dikosongkan.

Tsunami telah melanda daerah-daerah di pinggiran samudera Hindia pada Desember 2004, menyebabkan ratusan ribu orang tewas, bangunan luluh lantak, dan bumi Aceh seolah menjadi kuburan masalnya. Namun, ada satu kabupaten di Aceh, yang berada di tengah-tengah samudera, yang walaupun bangunan-bangunannya memang hancur, namun kearifan lokal telah menyelamatkannya, dimana korban jiwa tercatat hanya 6 orang.

Adalah pulau Simelue yang sejak 1999 menjadi kabupaten tersendiri, yang berada sekitar 150 km lepas pantai barat Aceh, dan di kelilingi laut samudera Hindia. Gugusan pulau ini berada diatas persimpangan palung laut besar, terbentuk dari pertemuan antara lempeng Eurasia dengan Indo-Australia, namun relatif terselamatkan dari bencana *tsunami* 2004.

Berawal dari pengalaman sejarah pada tahun 1907 yang lalu, dimana bencana *tsunami* melanda pulau Simeulue. Bencana ini menelan korban jiwa cukup banyak, rumah hancur, kehilangan harta benda, serta meninggalkan trauma yang mendalam. *Tsunami* yang berasal dari bahasa Jepang, di pulau Simelue dikenal dengan nama *smong*.

Smong menjadi pelajaran hidup tersendiri bagi masyarakat Simeulue, dimana masyarakat Simeulue tidak ingin bencana dahsyat 1907 tersebut terulang kembali. Melalui adat tutur, kearifan lokal dan cerita turun menurun, menjadikan masyarakat Simeulue selalu siap siaga jika se-waktu waktu *smong* datang. Kesiapan itu terbukti ketika minggu terakhir Desember 2004 sekitar pukul 09.00 pagi, gempa dahsyat dan *smong* menyapa pulau ini. Ribuan rumah penduduk hancur dan rata dengan tanah namun korban jiwa hanya 6 orang. Kearifan lokal melalui budaya tutur, serta cerita budaya dan seni, membuat ribuan masyarakat yang tinggal hanya beberapa meter dari tepi laut, langsung menyelamatkan diri berhamburan ke gunung, sambil membawa anak-anak, orang tua, perempuan dan sanak saudara. Tak lupa mereka mengingatkan teman dan sanak saudaranya dengan teriakan "*Smong...smong...smong. Smong datang, ayo lari....*" Itulah teriakan para pemuda desa, yang lari menyelamatkan diri ke atas gunung.

Guna mengingatkan, ancaman *tsunami* atau *smong* ini tak hanya di-sosialisasikan melalui budaya tutur, namun juga dalam bentuk syair (lagu) yang bercerita tentang *smong* ini. Entah siapa yang menciptakannya, namun mereka mendapatkan syair ini turun temurun hingga dikenal diseantero pulau. Bait syair ini, dilantunkan para budayawan, tokoh adat dan para seniman Simeulue sebagai berikut :

Enggel mon sao curito...(Dengarlah sebuah cerita)
Inang maso semonan...(Pada zaman dahulu)
Manoknop sao fano...(Tenggelam satu desa)
Uwi lah da sesewan...(Begitulah mereka ceritakan)
Unen ne alek linon...(Diawali oleh gempa)
Fesang bakat ne mali...(Disusul ombak yang besar sekali)
Manoknop sao hampong...(Tenggelam seluruh negeri)
Tibo-tibo mawi...(Tiba-tiba saja)
Anga linon ne mali...(Jika gempanya kuat)
Uwek suruik sahuli...(Disusul air yang surut)
Maheya mihawali...(Segeralah cari)
Fano me singa tenggi...(Tempat kalian yang lebih tinggi)
Ede smong kahanne...(Itulah smong namanya)
Turiang da nenekta...(Sejarah nenek moyang kita)
Miredem teher ere...(Ingatlah ini betul-betul)
Pesan dan navi da...(Pesan dan nasihatnya).

Pesan leluhur dari syair itu menyebutkan, andai ada gempa kuat, disusul air laut surut, jangan ketepi pantai memungut ikan yang menggelepar ditepian pantai, oleh karena sebentar lagi akan datang *smong*. Jika hal itu terjadi, berlarilah ke gunung menyelamatkan diri. Bawalah anak-anak, orang tua, dan perempuan berlari menjauhi pantai, dan berteriaklah, *smong... smong...smong....* Hal itulah yang berlanjut hingga kini dan menyelamatkannya dari bencana *tsunami* atau *smong*.

Ketika *smong* datang, kerbau-kerbau yang biasa berada ditepian pantai, berlarian ke gunung. Itu menjadi salah satu tanda alam lainnya. Saat gempa dahsyat, anak muda terlebih dahulu berlarian ketepi pantai guna melihat apakah air laut surut. Ketika hal itu terjadi, dan mereka mendengar suara gemuruh bagaikan daun kering terbakar, barulah mereka yakin *smong* akan datang. Maka tugas selanjutnya adalah meneriakkan alarm alami melalui mulut ke mulut, berteriak, *smong...smong...smong*. Teriakan itu berlanjut ke seluruh penjuru desa saling bersahutan.

6

ERUPSI GUNUNG API

Volcanology atau ilmu kegunung apian adalah ilmu pengetahuan tentang kegunung apian, yang merupakan bagian dari ilmu geologi, oleh karena bagaimanapun keberadaan gunung api tidak terpisahkan dari proses-proses geologi yang berjalan.

Sejarah perkembangan pengetahuan tentang kegunung apian, berawal dari pengenalan peradaban manusia atas gejala-gejala kegunung apian, meskipun pada tingkat yang sangat sederhana, dan mengandung sifat mistis. Hal tersebut ditandai dari penemuan-penemuan fosil manusia purba, disekitar gunung-gunung api, baik di Afrika atau tempat lainnya, bahkan juga di Indonesia. Contohnya adalah penemuan di kota *Pompeii* dan *Herculanum*, suatu kota tua yang tertimbun oleh material vulkanik letusan gunung api *Vesuvius* pada tahun 79 Masehi.

Bangsa *Poline* beranggapan bahwa kegiatan gunung api berada dibawah kendali Dewa *Pelee*. Sementara itu legenda bangsa Indian di *Oregon-Amerika Serikat*, mengisahkan konflik antara dewa api di *Mt. Mazama* dengan dewa salju di *Mt. Shata*. Pertempuran antara keduanya menghancurkan *Mt. Mazama*, dan menyisakan danau kawah atau *crater lake*. Legenda senada juga dijumpai pada bangsa Yunani kuno dan Romawi.

Penalaran ilmiah tentang kegunung apian, pertama kali dilakukan *Empedocles* (492 - 432 SM), dimana ia menghabiskan waktu selama beberapa tahun didekat puncak *Mt. Etna*. Dimana ia meyakini, bahwa didalam perut bumi terdapat cairan panas yang membentuk gunung api. Berikutnya muncul beberapa pengamat gunung api seperti *Strabo* (1600), *Martin Lister* (1638-1711), *Charles Lyell* dan *Scrope* (1827). *Scrope* lah yang kemudian meletakkan dasar-dasar *volcanology* modern, dimana ia berpendapat akan adanya peran fungsi gas dalam

magma didalam aktivitas suatu gunung api. Sejak saat itu penelitian tentang kegunung apian berkembang pesat, dimana banyak muncul para peneliti kegunung apian. Diantaranya adalah *Frank A Perret* yang mendukung teori *Scrope*, tentang peranan kandungan gas sebagai motor penggerak magma.

Pada abad ke 20, disamping *Frank A Perret*, ada pula *Thomas A Jagger* dari MIT (*Massachusset Institute of Technoly*), dan penelitian tentang kegunung apian pun semakin berkembang pesat. Pusat-pusat pengamatan gunung api mulai didirikan diberbagai tempat, seperti di *Hawaiian Volcano Observatory - Hawaii*.

Bencana yang diakibatkan oleh letusan atau erupsi gunung api, yang terjadi diberbagai tempat di dunia sejak dahulu kala, dengan menimbulkan sejumlah besar korban baik jiwa maupun harta, semakin menarik perhatian para ilmuwan untuk menelitinya lebih rinci secara ilmiah.

Tabel 6.1. : Daftar 10 Erupsi Volkanik dunia dengan korban terbesar

<u>Ten deadliest Volcanic Eruptions</u>				
Main article: List of volcanic eruptions by death toll				
Rank	Death toll	Event	Location	Date
1.	71,000+	1815 eruption of Mount Tambora (see also Year Without a Summer)	Indonesia	April 10, 1815
2.	36,000+	1883 eruption of Krakatoa	Indonesia	August 26, 1883
3.	30,000	Mount Pelée	Martinique	May 7, 1902
4.	23,000	Armero tragedy	Colombia	November 13, 1985
5.	15,000	1792 Unzen earthquake and tsunami	Japan	May 21, 1792
6.	10,000	Mount Kelud	Indonesia	1586
7.	6,000	Santa Maria	Guatemala	October 24, 1902
8.	5,000	Mount Kelud	Indonesia	May 19, 1919
9.	4,011	Mount Galunggung	Indonesia	1822
10.	3,500	El Chichón	Mexico	1982
Source : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_disasters_by_death_toll				

6.1. Genesa Gunung Api

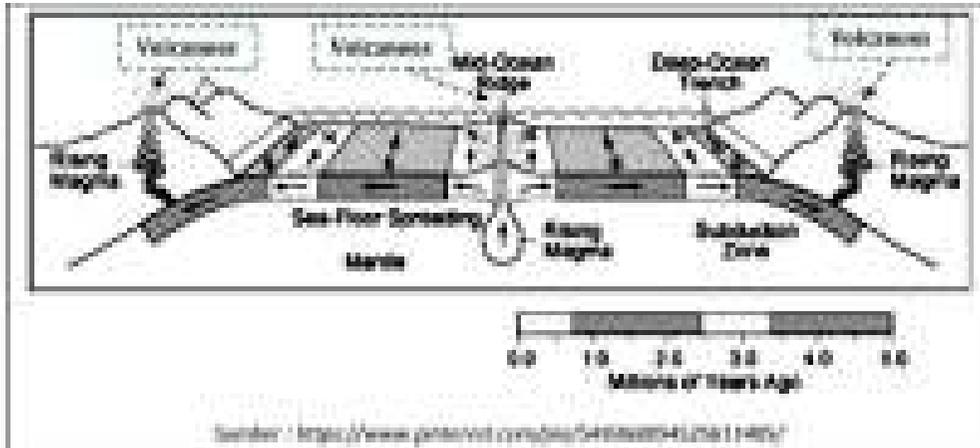
Aktivitas gunung api adalah suatu proses dimana cairan magma menerobos kerak bumi. Apabila magma dapat menerobos sampai ke permukaan bumi, maka peristiwa itu disebut sebagai erupsi gunung api (*volcanic eruption*). Hal ini dapat terjadi oleh berbagai sebab, yaitu sebagai berikut :

- Adanya bukaan atau rekahan terbuka pada kerak bumi, sehingga memungkinkan magma, baik yang berasal dari cairan mantel maupun bagian kerak bumi yang meleleh, menerobos keluar ke permukaan bumi.
- Adanya tekanan yang mendesak, sehingga mendorong magma keluar sampai ke permukaan bumi.
- Akibat tekanan dari gas-gas yang terbentuk pada saat proses *differensiasi* magma, yang terakumulasi membentuk tekanan yang tinggi.
- Kombinasi diantara ke 3 faktor diatas.

Batas *divergen* adalah titik awal dimana arus konveksi naik ke permukaan sehingga membentuk titik-titik panas (*hot spot*) pada kerak bumi, sebelum kemudian menyebar keberbagai arah. Pada titik-titik ini, kerak bumi mengalami regangan (*tension*), sehingga menipis untuk kemudian pecah membentuk celah-celah terbuka dan memberai. Melalui celah-celah terbuka inilah magma dari cairan mantel keluar meleleh ke permukaan bumi menjadi aliran lava encer yang berkomposisi *basaltis*.

Konvergensi diantara lempeng kerak samudera dengan lempeng tektonik lainnya, menjamkannya kedalam mantel yang panas sehingga meleleh menjadi magma. Magma lelehan kerak bumi ini umumnya lebih kental dan asam atau *granitis*, yang oleh tekanan *konvergensi* dapat terdorong keatas sehingga keluar ke permukaan bumi.

Meskipun kurang intensif, pergerakan *transform* diantara lempeng-lempeng tektonik dapat juga memicu aktivitas gunung api. Bagaimanapun gesekan diantara lempeng-lempeng tektonik menghasilkan panas, dan dapat membuka celah untuk jalan keluarnya magma.



Gambar 6.1. : Skema proses pembentukan gunung api

6.2. Erupsi Gunung Api

Erupsi gunung api adalah suatu proses dimana magma keluar sampai ke permukaan bumi, oleh sebab adanya celah yang memungkinkannya, dengan didorong oleh tekanan yang berasal dari dalam bumi. Berdasarkan cara keluarnya magma sampai ke permukaan bumi, maka jenis erupsi terdiri dari :

- **Erupsi Effusif** : Yaitu dimana magma cair mengalir sampai ke permukaan bumi melalui celah-celah yang terbuka. Dapat terjadi apabila memang tersedia celah terbuka untuk jalan keluarnya. Cairan magma cukup encer untuk dapat mengalir ke permukaan, dan tidak cepat membeku sehingga tidak mudah untuk menyumbat celah jalan keluarnya. Hal ini umumnya terjadi pada batas *divergen* lempeng-lempeng tektonik, oleh karena gerakan memberai kerak bumi terus menerus membentuk celah bukaan jalan keluarnya magma. Sementara cairan mantel dengan komposisi *basaltis*, adalah magma yang encer sehingga dapat dengan mudah mengalir keluar ke permukaan bumi. Gunung *Kiluea* dan *Maunaloa* di Hawaii adalah contoh *hot spot* dari type *erupsi effusif*.



Sumber : <https://wallaceterryjr.com/2016/02/29/the-serenity-of-big-volcanoes-recovery-running-around-kilauea/>

Gambar 6.2. : Erupsi *effusif* dan aliran *lava* gunung Kilauea, Hawaii.

- **Erupsi Explosif** : Yaitu dimana magma keluar kepermukaan bumi dengan cara meletus (*explosion*). Hal ini dapat terjadi oleh karena magma yang kental sehingga sulit untuk mengalir dan cepat membeku, celah bukaan yang tidak cukup lebar, serta tekanan yang besar. Magma yang membeku sebelum mencapai permukaan dapat membentuk sumbat lava (*volcanic plug*), yang menyumbat jalan keluarnya magma. Oleh akumulasi tekanan yang terus menerus terbentuk, sumbat lava dapat terus didorong, bahkan terhancurkan. Maka terjadilah erupsi yang explosif, dimana cairan magma terlempar keatas permukaan bumi, bersama dengan material padat dari sumbat lava yang terhancurkan.



Sumber : USGS

Gambar 6.3. : Erupsi Explosif gunung St. Helena, 22 Juli 1980.

Konvergensi diantara lempeng-lempeng tektonik adalah proses geologi yang memungkinkan terbentuknya akumulasi tekanan yang terus menerus. Sementara itu penunjaman kerak samudera kedalam mantel menyebabkan pelelehan kerak bumi, dan membentuk magma *granitis* yang kental. Maka *erupsi eksplosif* sering terjadi pada rangkaian gunung api yang ber-asosiasi dengan *konvergensi* lempeng-lempeng tektonik, yang melibatkan kerak samudera.

- ***Erupsi Freatik / Hydrothermal (Phreatic / Hydrothermal Eruption)*** : Erupsi ini bukanlah erupsi gunung api, walaupun dapat berkaitan dengan aktivitas gunung api. Erupsi ini dipicu oleh mendekatnya air tanah didalam lapisan pembawa air (*aquifer*) pada sumber panas, yang dapat berupa magma. Atau dapat pula magma yang menerobos kerak bumi, mendekati lapisan *aquifer*. Sehingga terjadi pemanasan dan penguapan pada air tanah didalam *aquifer*. Akumulasi uap air didalam *aquifer* membentuk akumulasi tekanan uap yang semakin besar. Tekanan uap air dalam *aquifer* yang besar dapat meletup menyemburkan air panas (maka disebut juga sebagai erupsi hidrothermal), dengan disertai dengan uap air (*fumarola*) dan gas-gas lainnya seperti H₂S (*solfataras*) dan CO/CO₂ (*mofet*). Dapat juga disertai material-material padat dalam berbagai ukuran, yang berasal dari batuan-batuan disekitar *aquifer*. Bahkan dapat juga menyemburkan cairan magma didekatnya, yang dalam hal ini disebut sebagai *Phreatomagmatic Eruption*.



Sumber : TEMPO.CO – <https://m.tempo.co/read/news/2011/05/30/177337585/jejek-letusan-dieng-dari-masa-ke-masa>

Gambar 6.4. : Erupsi Freatik di Dieng – Jawa Tengah, pada tahun 2011.

Geysir adalah suatu fenomena menarik dari erupsi freatik. Yaitu berupa semburan air panas yang memancar secara periodik. Dimana air tanah dalam hal ini merembes kedalam *aquifer* yang dekat dengan sumber panas, kemudian ter-uapkan. Ketika akumulasi tekanan uapnya sudah cukup besar, maka uap air beserta air panas didalam *aquifer* dipancarkan keluar hingga habis. Kekosongan *aquifer* kemudian diisi kembali oleh rembesan air tanah, untuk dipanaskan dan dipancarkan kembali manakala tekanan uapnya sudah cukup kuat. Demikian terjadi terus menerus secara periodik. Fenomena menarik ini dapat dilihat dan diamati di *Yellowstone National Park - USA*, dan juga di *Eslandia*. Erupsi Freatik ini memang umumnya berhubungan dengan aktivitas gunung api meskipun tidak selalu. Sumber panas lainnya seperti halnya pergesekan antara lempeng-lempeng tektonik pada batas *transform*, juga dapat memicu erupsi Freatik.



Sumber : Siple English Wikipedia-<https://simple.wikipedia.org/wiki/Geysir>

Gambar 6.5. : Geyser di Eslandia

Magma keluar ke permukaan bumi melalui bukaan pada kerak bumi. Dapat terpusat melalui lorong tunggal, atau dapat pula melalui rekahan terbuka yang memanjang. Maka berdasarkan jalan keluarnya magma, erupsi gunung api dapat merupakan :

- **Erupsi Sentral** : Magma keluar ke permukaan bumi terpusat melalui lorong tunggal (*vent*), baik secara effusif maupun explosif. *Hot spot* dapat merupakan awal terbentuknya erupsi sentral, yang kelak dapat saja berkembang menjadi erupsi linier, manakala berkembang menjadi pergerakan *divergen*. Beberapa titik erupsi sentral dapat saja bersumber pada dapur magma yang sama.

- **Erupsi Linier (Linear / Fissure Eruption)** : Magma keluar ke permukaan bumi melalui rekahan terbuka yang memanjang, maka disebut juga sebagai *fissure eruption*. Biasanya magma *basaltis* yang encer meleleh keluar melalui rekahan terbuka yang memanjang, dan membajiri areal yang luas disepanjang rekahan, yang kemudian setelah membeku membentuk paparan batuan beku *lava* yang luas. Erupsi linier ini dapat berawal dari beberapa erupsi sentral, yang berjajar disepanjang rekahan, yang kemudian bergabung menyatu sejalan dengan berkembangnya rekahan. Oleh karena itu, erupsi linier sering berasosiasi dengan proses tektonik yang membentuk rekahan-rekahan pada kerak bumi, yaitu terutama pada batas *divergen*, terkadang juga pada batas *transform*.



Sumber : https://en.wikipedia.org/wiki/Fissure_vent

Gambar 6.6. : Fissure Eruption Mt Laki - Eslandia



Sumber : https://en.wikipedia.org/wiki/Fissure_vent

Gambar 6.7. : Hambaran batuan beku *lava*, produk fissure eruption Mt Laki - Eslandia

6.3. Material Vulkanik

Material vulkanik adalah material-material dari dalam perut bumi yang dikeluarkan ke permukaan pada saat erupsi gunung api. Material-material ini dapat berupa material cair, material padat, ataupun berupa gas.

- **Material Cair** : *Lava* adalah cairan magma yang keluar ke permukaan bumi pada saat erupsi gunung api, baik secara effusif mengalir di permukaan bumi, atau secara explosif terlempar keluar pada saat letusan gunung api.

Lava yang keluar ke permukaan secara effusif umumnya berkomposisi *basaltis* yang encer. *Lava* yang encer ini ketika keluar ke permukaan bumi dapat mengalir menyebar dan membeku menutupi dataran yang luas. Namun apabila aliran *lava* ini masuk ke dalam air laut, maka perbedaan temperatur akan menyebabkan cairan *lava* tersebut menggumpal, sehingga ketika membeku membentuk struktur seperti bantal atau *pillow lava*.



Gambar 6.8. : *Lava* membeku membentuk struktur bantal (*pillow lava*)

Lava dapat pula keluar ke permukaan secara explosif, terlempar bersama dengan material sumbat lava yang hancur pada saat erupsi yang explosif. Gumpalan-gumpalan *lava* ini terlempar ke udara untuk kemudian membeku, baik di udara maupun setelah jatuh ke bumi. Bagian luar dari gumpalan *lava* ini tentu akan lebih cepat mendingin dan membeku dibandingkan dengan bagian

dalamnya, sehingga membentuk bongkahan-bongkahan besar (*volcanic bomb*) berukuran > 64mm, dengan bagian permukaannya mengerak seperti roti. Bongkahan-bongkahan ini sering disebut sebagai “Bom Kerak Roti” (*Bread-crust Bomb*).



Sumber : Geoscience News and Information – geology.com/rocks/picture/pumice.jpg

Gambar 6.9. : Bongkahan “Bom Kerak Roti” (*Bread-crust Bomb*).

Ketika gumpalan *lava* terlempar keudara, terjadi proses pendinginan yang sangat cepat, dengan disertai terlepasnya kandungan gas didalamnya secara serentak. Maka terbentuk fragmen-fragmen batuan yang sangat berpori, sehingga sangat ringan dan dapat mengapung diatas air. Fragmen batuan ini adalah “Batu Apung” (*Pumice*).



Sumber : Geoscience News and Information – geology.com/rocks/picture/pumice.jpg

Gambar 6.10. : Fragmen “Batu Apung” atau *Pumice*.

- **Material Padat** : Material padat hasil erupsi gunung api, biasa disebut sebagai *Pyroclastic*, umumnya dihasilkan oleh erupsi yang bersifat eksplosif. Magma yang membeku dan membentuk sumbat lava, terhancurkan oleh tekanan yang besar pada saat erupsi, sehingga menjadi fragmen-fragmen dalam berbagai ukuran, mulai dari debu vulkanik sampai dengan bongkahan-bongkahan berukuran besar. Oleh karena diendapkan langsung dari udara, tanpa mengalami transportasi oleh air, maka umumnya mempunyai bentuk butir dengan kebulatan (*roundness*) yang buruk, atau berbentuk menyudut (*angular*), dan terpilah buruk (*poorly sorted*).

Volcanic Block : Adalah fragmen-fragmen *pyroclastic* dengan ukuran besar > 64 mm, yang terlempar pada saat erupsi. Umumnya terakumulasi pada lereng-lereng gunung api tak jauh dari kepundan pusat letusannya bersama dengan *volcanic bomb*, meskipun dapat saja terlempar jauh manakala letusannya sangat kuat.

Lapili : Adalah fragmen-fragmen *pyroclastic* yang berukuran kerikil (2 mm s/d 64 mm), yang oleh karena ukurannya yang lebih kecil, dapat terlempar lebih jauh dari pusat erupsinya.

Tufa (Tuff) : Adalah material *pyroclastic* yang berukuran pasir atau lebih halus (<2mm). Material ini dapat terlempar lebih jauh dan terbawa angin, sehingga sering menyebar sangat jauh dari pusat erupsinya sebagai abu gunung api atau *volcanic ash*.

Awan Panas (Nuee Ardante) : Sumbat lava menyumbat kepundan gunung api, terpanaskan dan terdorong oleh tekanan magma yang bergerak dibawahnya pada saat meningkatnya aktivitas gunung api. Material halus dari sumbat lava yang hancur pada saat erupsi inilah yang kemudian membentuk awan panas atau *nuee ardante*, dengan temperatur dapat mencapai 200°C.

Awan panas ini dapat meluncur menuruni lereng gunung api, bersamaan dengan guguran sumbat lava (*nuee ardante d'avalanche*). Fenomena ini khas pada erupsi gunung Merapi di Jawa Tengah, dan penduduk sekitarnya memainkannya dengan *Wedhus Gembel*.

Awan panas dapat pula tertembakkan keatas pada erupsi eksplosif yang sangat kuat (*nuee ardante d'explosion*), sehingga

membentuk tebaran awan panas pada ketinggian ratusan bahkan ribuan meter diatas kepundan.

Apabila lubang kepundan membuka kearah samping, maka erupsi explosif yang sangat kuat akan dapat menembakkan awan panas secara lateral mengikuti arah bukaan kepundannya (*nuee ardante d'explosion dirigee*) dengan kecepatan yang sangat tinggi (dapat mencapai 200 km/jam). Peristiwa ini pernah terjadi pada erupsi gunung Vesuvius tahun 79 M. Sedemikian tingginya kecepatan luncur awan panasnya, sehingga menimbun kota *Pompeii* di Italia Selatan, bersama dengan seluruh penduduknya tanpa sempat menghindar.

Lahar : Adalah aliran lumpur yang terdiri dari timbunan material vulkanik di lereng gunung api, yang belum terkonsolidasi dalam berbagai ukuran fragmen, dari halus sampai kasar bahkan bongkahan-bongkahan besar. Kondisi jenuh air oleh berbagai sebab, seperti curah hujan yang tinggi, menyebabkan timbunan material vulkanik tersebut berubah menjadi lumpur, yang mengalir menuruni lereng.

Apabila aliran lumpur tersebut disebabkan oleh curah hujan yang tinggi, maka disebut sebagai *lahar hujan* atau *lahar dingin*. Gunung Merapi di Jawa Tengah, yang merupakan gunung api paling aktif didunia, dengan perioda erupsi hampir setiap tahun sekali, memiliki sejumlah besar timbunan material vulkanik pada lerengnya. Maka *banjir lahar dingin* dapat terjadi pada setiap musim hujan, dan tidak selalu terkait dengan aktivitas gunung api itu sendiri.

Pada gunung api yang memiliki danau kawah, air danau kawah akan terpanaskan pada saat meningkatnya aktivitas vulkanik. Pada saat terjadi erupsi, maka air danau kawah yang panas akan tertumpah keluar, dan membanjiri timbunan material vulkanik di lereng gunung api. Maka terjadilah aliran lumpur panas menuruni lereng. Aliran lumpur panas ini disebut sebagai *lahar panas*. Erupsi gunung Kelud di Jawa Timur yang mempunyai danau kawah pada tahun 1919, adalah peristiwa letusan gunung api yang menyebabkan *banjir lahar panas*.

- **Material Gas** : Gas yang dikeluarkan pada saat erupsi vulkanik, terutama pada erupsi freatik, dapat berupa kandungan unsur-unsur gas dalam magma yang terbebaskan pada saat erupsi, atau dapat juga berasal dari reaksi kimiawi yang terjadi akibat interaksi magma dengan batuan yang diterobosnya. Gas-gas yang banyak dikeluarkan umumnya adalah oksida-oksida *sulfur* (S), *karbon* (C) dan uap air (H₂O).

Fumarola : Adalah sumber gas berupa uap air (H₂O), yang terbentuk sebagai akibat pemanasan dari air tanah yang terpanaskan oleh magma. Sering berhubungan dengan erupsi Freatik, dan disertai dengan munculnya mata air panas, kadang-kadang dalam bentuk erupsi secara periodik atau *geyser*. Fenomena ini sekarang dapat direkayasa secara *artificial* untuk menghasilkan energi Panas Bumi atau *Geothermal*.

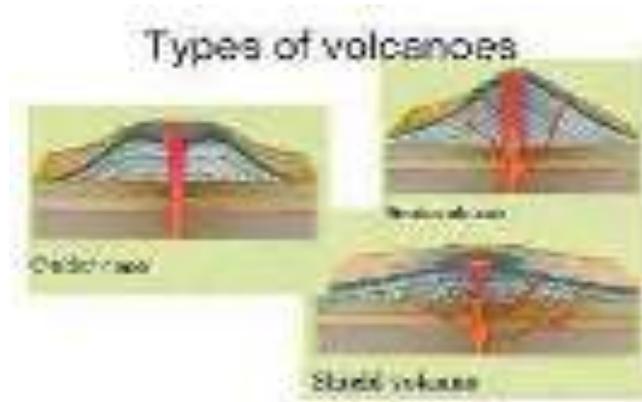
Solfatara : Adalah gas-gas oksida *sulfur* seperti SO₂ dan SO₃ yang beracun, atau *sulfida hydrogen* (H₂S). Gas-gas tersebut berbau sangat menyengat, sehingga walaupun beracun namun mudah ter-deteksi dan dihindari.

Mofet : Adalah gas-gas *oksida karbon* seperti CO₂ dan CO. Gas-gas ini mempunyai berat jenis yang lebih besar dari udara, sehingga cenderung ter-konsentrasi pada bagian bawah dekat dengan permukaan bumi, terutama pada lembah-lembah. Pada konsentrasi yang tinggi gas-gas ini akan memenuhi udara dekat permukaan bumi dan mendesak *oksigen* menjauhi permukaan bumi sehingga dapat menyebabkan mati lemas kekurangan *oksigen*. Untuk gas *carbon monoksida* atau CO, beracun apabila terhisap, oleh karena dapat menyerap *oksigen* dalam darah.

6.4. Morfologi Gunung Api

Badan gunung api terbentuk oleh adanya desakan keatas magma dari dalam perut bumi, sehingga umumnya membentuk morfologi berupa kerucut (*cone*), dengan cekungan pada puncaknya yang merupakan kawah pusat erupsi, dimana *lava* dan material-material vulkanik padat dikeluarkan. Maka bentuk kerucutnyapun dipengaruhi oleh material-material vulkanik yang dikeluarkannya. Bentuk yang umum dari kerucut gunung api adalah : *Cinder Cone* atau *Maar*, *Perisai* (*Shield Volcano*) dan *Strato* atau *Composite Volcano*.

Disamping itu ada pula bentuk-bentuk khusus lainnya yang jarang ditemui.



Sumber : <http://www.mtmtv.info/shield-cinder-cone-and-composite-volcanoes-ee309c1/>

Gambar 6.11. : Jenis2 morfologi umum gunung api

- **Cinder Cone atau Maar** : Morfologi ini berbentuk cekungan atau kubangan kawah, yang dikelilingi oleh tanggul yang dibentuk oleh timbunan material-material vulkanik hasil erupsi. Kerucut gunung api dalam hal ini belum terbentuk sempurna, namun terus berkembang untuk membentuk kerucut yang lebih sempurna. Morfologi ini meng-indikasikan gunung api yang baru terbentuk, atau merupakan *embrio* gunung api.

Morfologi ini juga terbentuk pada erupsi Freatik, dimana letusannya tidak cukup kuat untuk melontarkan jauh material-material padat, dan hanya tertimbun disekitar kawah pusat erupsinya membentuk tanggul-tanggul pembatas kawah.

- **Perisai (Shield Volcano)** : Morfologi ini berbentuk kerucut dengan lereng-lerengnya yang landai menyerupai perisai. Terbentuk oleh erupsi yang effusif, dimana *lava* yang encer meleleh keluar dari kepundan atau kawah pusat erupsinya, dan mengalir keluar menyebar kesegala arah, untuk kemudian membeku membentuk lereng yang landai. Bentuk morfologi ini typical *hot spot* pada batas pergerakan *divergen* lempeng-lempeng tektonik, seperti halnya gunung-gunung api di Hawaii.
- **Strato / Composite Volcano** : Morfologi ini berbentuk kerucut dengan lereng curam, yang dibentuk oleh timbunan berbagai berbagai material padat hasil erupsi yang berlapis lapis (*strato*).

Lapisan-lapisan tersebut tak jarang diselingi dengan sisipan *lava* yang membeku, sehingga disebut juga sebagai *Composite Volcano*. Morfologi ini mengidentifikasi erupsi eksplosif yang berulang-ulang, dapat juga dengan diselingi oleh erupsi effusif.

- ***Kerucut Kembar (Twin Cone)*** : Dalam perjalanannya menerobos kerak bumi hingga ke permukaan, magma sebagai masa cair akan cenderung memilih celah-celah yang lemah yang mudah diterobos. Maka mungkin saja magma dari dapur magma yang sama menerobos melalui lebih dari satu jalur, atau ber cabang-cabang. Dapat juga magma membeku menyumbat jalur terobosannya, sehingga memaksa magma mencari jalur lainnya. Maka terobosan magma dalam hal ini dapat membentuk kerucut kembar, dimana keduanya menjadi gunung api aktif, atau hanya satu saja yang aktif, sedangkan yang lainnya tidak aktif atau *dormant*. Contoh-contoh kerucut kembar ini antara lain adalah : *Gunung Marapi - Singgalang di Sumatera Barat ; Gunung Gede - Pangrango di Jawa Barat ; Gunung Sindoro - Sumbing di Jawa Tengah ; Gunung Merapi - Merbabu di Jawa Tengah.*
- ***Kawah atau Kepundan*** : Adalah cekungan pada puncak kerucut gunung api, yang merupakan pusat erupsi dari gunung api. Cekungan kawah ini dapat berupa cekungan tertutup, atau cekungan terbuka berbentuk tapal kuda, dimana hal tersebut menunjukkan arah penyebaran material erupsinya. Cekungan ini dapat pula terisi air sehingga membentuk danau kawah, seperti pada gunung Kelud di Jawa Timur, sebelum erupsi pada tahun 2007.



Sumber : Tak teridentifikasi (*unidentified*)

Gambar 6.12. : Kawah / Kepundan berbentuk tapal kuda



Sumber : <https://www.funtime.com.tw/package/2018-12-16>

Gambar 6.13. : Danau Kawah

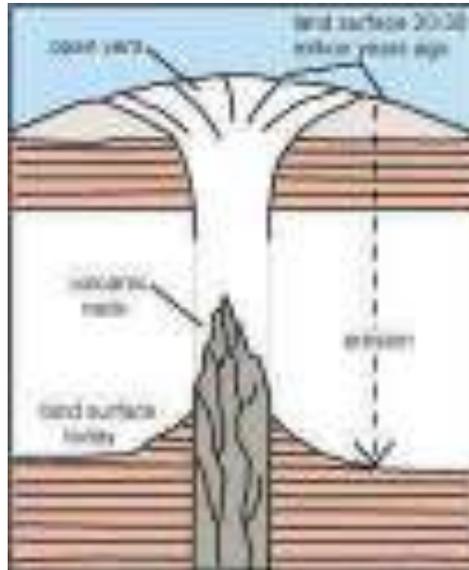
- **Kaldera :** Kaldera terbentuk dari erupsi eksplosif gunung api yang sangat besar (*paroxima*), yang menghancurkan dan meruntuhkan sebagian besar dari tubuh gunung api tersebut. Sejumlah besar magma dalam dapur magma ikut terlemparkan pada peristiwa ini, sehingga menimbulkan rongga besar didalam dapur magma, yang menyebabkan runtuhnya lapisan batuan di atasnya. Dalam hal ini bentuk awal kerucut gunung api musnah dan berubah menjadi cekungan yang luas. Gunung api baru dapat saja tumbuh pada dasar kaldera ini, seperti halnya gunung Bromo yang tumbuh didasar kaldera gunung api Tengger lama di Jawa Timur, bahkan bersama dengan gunung Batok yang merupakan kembarannya. Danau Toba di Sumatera Utara, juga merupakan kaldera dari erupsi raksasa (*giant eruption*) gunung api Toba pada sekitar 75 000 tahun yang lalu, namun tidak diikuti dengan aktivitas gunung api baru seperti halnya gunung Bromo di kaldera Tengger.



Gambar 6.14. : Kaldera Tengger dengan gunung Bromo dan Batok didalamnya

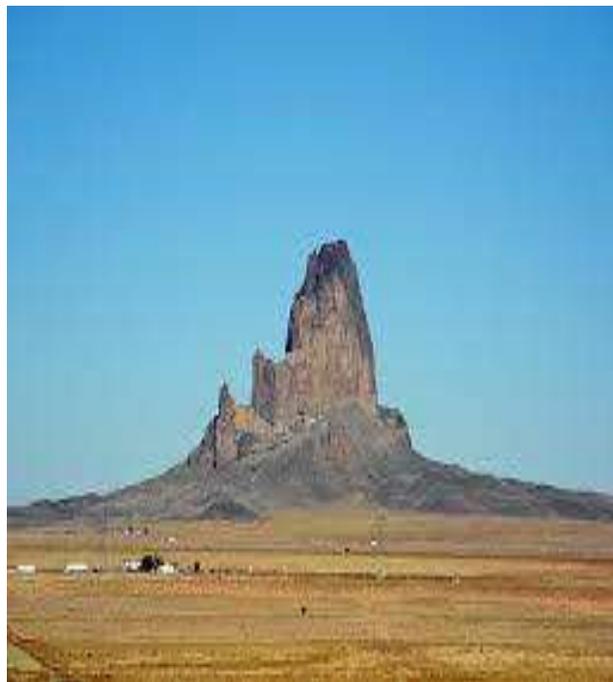
- **Volcanic Neck** : Magma dapat membeku didalam lorong perjalanannya menuju permukaan bumi dan membentuk sumbat *lava*. Sumbat lava yang cukup padat menghentikan aktivitas gunung api, atau mengalihkan aktivitas gunung api melalui celah lain yang memungkinkan magma menerobos sampai ke permukaan.

Sumbat *lava* ini merupakan batuan beku yang keras dan tahan erosi, lebih keras dan lebih tahan erosi dari batuan sekitarnya. Sehingga dalam kurun waktu geologi, erosi mengikis batuan-batuan disekitarnya, dan menyisakan batuan beku sumbat *lava* ini dalam bentuk kolom yang menonjol diantara dataran sekitarnya.



Sumber : <http://www.landforms.eu/Lothian/volcanic%20neck.htm>

Gambar 6.15. : Sketsa pembentukan *volcanic neck*



Sumber : <http://www.mtmtv.info/volcanic-neck-formation-6bbb41e/>

Gambar 6.16. : Morfologi *Volcanic Neck*

6.5. Jenis dan Klasifikasi Erupsi

Jenis umum dari erupsi gunung api adalah *effusif* dan *explosif*. Namun demikian seringkali erupsi gunung api berselang seling diantara keduanya seperti ditunjukkan secara spesifik oleh beberapa gunung api sebagai model. Maka secara konvensional, model-model tersebut digunakan sebagai dasar dalam klasifikasi kualitatif untuk meng-identifikasi jenis (*type*) erupsi gunung api.

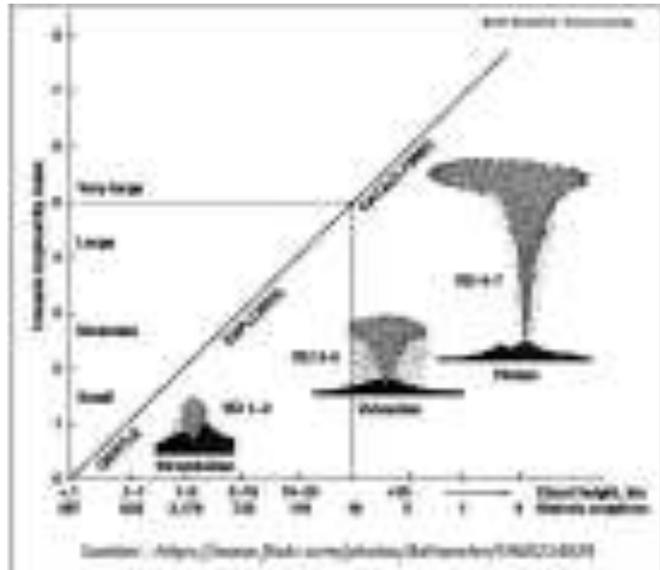
- **Type Hawaiian** : Erupsi gunung Kiluea di Hawaii adalah model spesifik dari type erupsi ini. Erupsi ini dicirikan dengan *lava basalt* yang encer, sehingga cairan *lava* terlempar dan meleleh, mengalir keluar dari lubang kepundan atau rekahan (*fissure*), kemudian mengalir jauh dan menutupi dataran yang luas. Nyaris tak ada material *pyroclastic* yang dikeluarkan pada erupsi ini.
- **Type Stromboli** : Type ini mengambil model erupsi gunung Stromboli di kepulauan Aeolian - Italia. Letupan-letupan terjadi secara periodik dalam interval waktu beberapa menit, diakibatkan oleh letupan gelembung gas dalam magma yang naik ke permukaan. Letupan ini melemparkan gumpalan-gumpalan *lava basaltic* sampai *andesitic*, dalam ukuran lapili sampai bongkah-bongkah (*volcanic bomb*), terkadang diikuti dengan sejumlah kecil lelehan aliran *lava* dan lontaran debu vulkanik. Meskipun lontaran gumpalan *lava* cair dapat mencapai ketinggian hingga ratusan meter, namun erupsi ini relatif tidak berbahaya, oleh karena arealnya yang terbatas serta peristiwanya yang terus menerus.
- **Type Vulcanian** : Type ini mengambil contoh pada erupsi pulau kecil bergunung api volcano di Italia, yang menurut legenda Romawi kuno merupakan tempat persemayaman Dewa Vulcan. Magma yang kental, dengan komposisi *andesitic*, *dacitic* bahkan *rhyolitic*, lebih cepat membeku, sehingga membentuk sumbat atau bahkan kubah *lava* yang menghalangi jalan keluarnya magma. Maka akumulasi tekanan yang besar menghancurkan sumbat tersebut, dan melontarkan material pecahannya, diantaranya dalam bentuk debu vulkanik, awan panas yang meluncur dengan kecepatan tinggi sehingga sering menjadi bencana yang mematikan. Peristiwa ini dapat terulang terjadi

kembali pada periode mingguan, bulanan atau tahunan, sejalan dengan terbentuk kembalinya sumbat *lava*.

- **Type Plinian** : Merupakan erupsi explosif yang merusak (*destructive*). Nama Plinian diambil dari pengamat muda bangsa Romawi bernama *Pliny*, yang menyaksikan dan mencatat peristiwa erupsi mematikan gunung Vesuvius di Italia pada tahun 79 Masehi. Magma yang sangat kental dengan komposisi asam (*dacitic - rhyolitic*), membentuk sumbat yang sangat kuat pula, sehingga akumulasi energi yang sangat besar pula yang dapat menghancurkannya. Letusan yang sangat kuat melontarkan berbagai material vulkanik, berupa *pyroclastic* abu vulkanik panas, lapili sampai dengan *volcanic bomb* mencapai jarak sampai dengan 50 km dengan kecepatan sangat tinggi. Semburan abu awan panas dari gunung Vesuvius inilah yang pada tahun 79 Masehi menimbun total kota Pompeii. Letusan yang sangat kuat ini sering menghancurkan puncak kerucut gunung api yang bersangkutan, seperti pada letusan gunung St Helena pada tahun 1980. Erupsi Plinian dengan energi yang sangat besar, melontarkan pula sebagian besar isi dapur magma. Sehingga peristiwa ini biasanya diikuti dengan masa tidur (*dormant*) yang panjang, untuk mengisi kembali dapur magma yang kosong.
- **Type Surtseyan** : Erupsi ini merupakan erupsi *hydromagmatic*, dimana terjadi kontak antara masa air dengan magma atau *lava* yang panas, sehingga terjadi letupan-letupan. Model dari type ini adalah pulau gunung api Surtsey di Islandia, dimana erupsi gunung api bawah laut terjadi antara tahun 1963 - 1965. Material vulkanik hasil erupsi ini umumnya adalah *lava basalt*, uap air dan debu vulkanik.

Klasifikasi erupsi vulkanik yang lebih kuantitatif dan terukur dilakukan dengan menggunakan skala **Volcanic Explosivity Index (VEI)**. Parameter yang digunakan dalam klasifikasi ini adalah volume material vulkanik (*ejecta*) yang dikeluarkan, dan ketinggian lontaran material vulkanik (*plume*) pada saat erupsi. Skala ini bersifat terbuka, yaitu meskipun nilai tertinggi didasarkan pada kejadian yang tercatat dalam sejarah manusia yaitu 8, namun tidak menutup kemungkinan adanya erupsi gunung api berkekuatan erupsi dengan skala **Volcanic Explosivity Index (VEI)** lebih dari 8. Sebagai contoh, erupsi gunung

Galunggung - 1982 (VEI = 4); St Helena - 1981 (VEI = 5); Krakatau - 1883 (VEI = 6); Tambora - 1815 (VEI = 7). Sementara itu, erupsi gunung api Toba sekitar 75 000 tahun yang lalu dan erupsi *Yellowstone National Park* di Amerika Serikat, diperkirakan mempunyai skala VEI > 8.



Gambar 6.17. : Grafik hubungan antara skala VEI dengan ketinggian lontaran material (*plume*)

Tabel 6.2. : Klasifikasi erupsi berdasarkan skala *Volcanic Explosivity Index (VEI)*

VEI	Description	Plume Height/Volume	Classification	How often	Example
0	non-explosive	< 100 m < 1000 m ³	Non-eruptive	daily	Mount Fuji
1	gentle	100-1000 m 10-10000 m ³	Non-Explosive	daily	Mount Fuji
2	explosive	1-10 km 1000-10000 m ³	Small Explosive	monthly	Mount Fuji, 1982
3	eruptive	1-10 km 10-1000-10000 m ³	Volcanic	yearly	Mount Fuji, 1981
4	large eruptive	10-20 km > 100-1000-10000 m ³	Volcanic	100s of years	Galunggung, 1982
5	gigantic	> 20 km 1 km ³	Plinian	100s of years	St. Helens, 1981
6	colossal	> 20 km 100 km ³	Parity Plinian	100s of years	Kelut, 1981
7	super-colossal	> 20 km 1000 km ³	Ultra-Plinian	1000s of years	Tambora, 1815
8	mega-colossal	> 20 km 10000 km ³	Ultra-Plinian	10000s of years	Yellowstone, 2 ka

Sumber : <http://www.volcanicexplosivity.com>



Gambar 6.18. : Perbandingan kekuatan erupsi berdasarkan volume material yang dikeluarkan

6.6. Volkanologi Indonesia

Indonesia adalah negara dengan jumlah gunung api terbesar di dunia, dimana terdapat 127 gunung api, dengan 76 diantaranya gunung api aktif. Berbagai bencana erupsi gunung api tercatat telah sering terjadi dan menimbulkan jumlah korban yang signifikan.

Jajaran gunung api di Indonesia merupakan bagian dari dua jalur pegunungan utama dunia. Yaitu jalur pegunungan di Indonesia bagian barat yang merupakan bagian ujung timur dari jalur pegunungan Mediterania (*Mediterranean Belt*) yang disebut juga sebagai *Alpide Belt*, dan jalur pegunungan di Indonesia bagian timur yang merupakan bagian dari jalur Lingkar Pasifik (*Circum Pacific*) yang dikenal sebagai Cincin Api (*Ring of Fire*).

Konvergensi antara lempeng samudera Indo-Australia dan lempeng benua Eurasia memicu aktivitas vulkanik di Indonesia bagian barat, sementara di Indonesia bagian timur dipicu oleh konvergensi

antara lempeng samudera Pasifik (termasuk lempeng Filipina) dengan lempeng benua Eurasia.

Gunung Merapi di Jawa Tengah tercatat sebagai gunung api paling aktif didunia. Sementara itu erupsi gunung Tambora (1815) dan gunung Krakatau (1883), adalah erupsi besar yang dikenal dalam sejarah dunia, yang telah mempengaruhi iklim secara global. Dan juga erupsi *Toba Supervolcano* pada sekitar 75000 tahun yang lalu, sebelum peradaban manusia, yang menyisakan danau Toba, sebagai kaldera raksasa dengan pulau Samosir ditengahnya.



Gambar 6.19. : Peta Gunung Api Indonesia



Gambar 6.20. : Jalur pegunungan Mediterania, atau *Alpide Belt*



Gambar 6.21. : Jalur pegunungan *Circum Pacific*, yang disebut sebagai *Ring of Fire*

Tabel 6.3. : Bencana erupsi gunung api di Indonesia, dengan jumlah korban yang besar

.Gunung Api	Lokasi	Tanggal Letusan	Korban Jiwa
Merapi	Jawa Tengah	03 November 2010	353
Kelut	Jawa Timur	10 Februari 1990	35
Galunggung	Jawa Barat	05 April 1982	68
Merapi	Jawa Tengah	06 Oktober 1972	29
Kelut	Jawa Timur	26 April 1966	212
Agung	Bali	17 Maret 1963	1,148
Merapi	Jawa Tengah	25 November 1930	1,369
Kelut	Jawa Timur	19 Mei 1919	5,110
Awu	Sulawesi Utara	07 Juni 1892	1,532
Krakatau	Selat Sunda	27 Agustus 1883	36,600
Galunggung	Jawa Barat	08 Oktober 1822	4,011
Tambora	Sumbawa	10 April 1815	71,000+

Sumber : <https://www.indonesia-investments.com/id/bisnis/risiko/bencana-alam/item243?>

6.7. Peristiwa Penting, Erupsi Gunung Api

6.7.1. Toba Supervolcano

Danau Toba di Sumatera Utara, dengan panjang sekitar 100 km dan lebar 30 km, dengan pulau Samosir ditengahnya, diidentifikasi sebagai kaldera besar hasil erupsi explosif dari gunung api *supervolcano* Toba. Namun dari ukuran kalderanya, maka volume material vulkanik yang dikeluarkannya sangatlah besar, bahkan jauh lebih besar dari volume materal vulkanik yang dikeluarkan pada erupsi gunung Krakatau (1883) atau bahkan erupsi gunung Tambora (1815). Yaitu diperkirakan 2800 kali lebih besar dari erupsi gunung Vesuvius (1980).

Van Bemmelen (1939), menyimpulkan keberadaan gunung api Toba dimasa lalu, berdasarkan temuan batuan vulkanik berupa Batu Apung (*Pumice*) disekeliling danau Toba. Disamping itu batuan beku *Ignimbrite*, suatu batuan beku asam dengan kandungan Silika

(Kwarsa-SiO₂) yang sangat tinggi, menunjukkan jejak adanya erupsi vulkanik magma asam. Diperkirakan peristiwa itu terjadi pada sekitar 75000 tahun yang lalu pada awal peradaban manusia, tentunya dengan kekuatan sangat besar, yaitu type *Ultra Plinian* dengan VEI >8.

Berikutnya beberapa peneliti menemukan debu *Rhyolite*, yang seusia dengan formasi batuan Toba di Malaysia, bahkan juga sejauh 3000 km ke utara hingga India Tengah. Beberapa ahli kelautanpun menemukan jejak-jejak batuan Toba di samudera Hindia dan teluk Benggala.

Sejauh ini tidak ada erupsi vulkanik besar didalam sejarah peradaban manusia yang sebanding dengan erupsi *supervolcano* Toba. Satu-satunya erupsi yang sebanding dengan erupsi Toba, adalah erupsi *supervolcano Yellowstone* di Amerika Serikat, yaitu sedikit lebih kecil dari Erupsi Toba, dan juga terjadi pada pra-peradaban manusia.

Peneliti lain seperti *Verstappen (1961)*, *Yokoyama & Hehanussa (1981)* serta *Nishimura (1984)*, menafsirkan bahwa kaldera Toba terbentuk oleh beberapa kali erupsi. Bahkan *Knight et al (1986)* dan *Chesner & Rose (1991)*, lebih detail memberi perkiraan bahwa kaldera Toba terbentuk melalui 3 kali erupsi besar.

- **Erupsi Pertama** terjadi sekitar 800 ribu tahun yang lalu, membentuk kaldera dibagian selatan danau Toba, meliputi daerah Prapat dan Porsea.
- **Erupsi Kedua** sekitar 500 ribu tahun yang lalu, lebih kecil dari erupsi pertama, membentuk kaldera dibagian utara danau Toba, meliputi daerah antara Silalahi dan Haranggaol.
- **Erupsi Ketiga** terjadi pada sekitar 75 ribu tahun yang lalu adalah yang terbesar diantaranya, menghasilkan kaldera yang menjadi danau Toba sekarang, dengan pulau Samosir ditengahnya.

Supervolcano terbentuk oleh adanya dapur magma yang sangat besar. Dapur magma tersebut menjadi kosong oleh erupsi yang sangat besar. Maka pengisian kekosongan magma didalam dapur magma memerlukan waktu yang lama pula. Ditambah dengan magma asam yang kental, sehingga bergerak sangat lambat, namun lambat laun membentuk kubah berupa pulau Samosir.



Sumber : IndoCropCircles.wordpress.com

Gambar 6.22. : Perspektif danau Toba, yang merupakan Kaldera Toba *Supervolcano*



Sumber : <http://eniac.sci.kagoshima-u.ac.jp/~oyo/advanced/caldera/toba.html>

Gambar 6.23. : Sketsa Peta Geologi Struktur Kaldera Toba *Supervolcano*

Luasnya danau kaldera Toba kurang lebih menggambarkan besarnya ekosistem yang dihilangkan oleh erupsi *superoolcano* Toba. Namun suatu ekosistem barupun kembali ber-angsur angsur tumbuh, dan kembali memulai perputaran siklusnya, yaitu diantaranya dengan berkembangnya ekosistem danau Toba dengan pulau Samosir yang tumbuh ditengahnya.

6.7.2. Erupsi Mt Vesuvius (79 M)

Vesuvius adalah nama gunung api pada pantai barat Italia, yang berhadapan dengan teluk Naples, pada koordinat 40°49' LU dan 14°26' BT. Kerucut gunung api Vesuvius sendiri tumbuh didalam kaldera gunung api kuno, Somma, yang erupsi terakhirnya diperkirakan sekitar 17000 tahun yang lalu. Gunung api Vesuvius menjadi terkenal oleh karena erupsinya pada tahun 79 M, yang menghacur totalkan kota Pompeii dan Herculaneum dari kekaisaran Romawi. Peristiwa tersebut diamati dan dicatat oleh pengamat muda bangsa Romawi bernama *Pliny*, sehingga erupsinya kemudian dikenal sebagai *type Plinian*.

Erupsi gunung Vesuvius terakhir sebelum erupsi tahun 79 M, diperkirakan terjadi sekitar 1800 tahun sebelumnya, sehingga penduduk kota Pompeii tak ada yang menyadari bahwa Vesuvius adalah gunung api. Maka erupsi katastrofik mendadak yang terjadi pada tanggal 24 Agustus 79 M, dan diduga terjadi selama 24 jam terus menerus menghancurkan kota Pompeii beserta penduduknya tanpa sempat menghindari. Oleh karena aliran material *pyroclastic* panas (1 830°F atau 999°C) dengan kecepatan 724 km/jam (450 mph) dengan cepat menimbun seluruh kota beserta isinya. Dengan kecepatan yang sedemikian tinggi, diduga merupakan aliran awan panas *type nuee ardante d'explosion dirigee*. Selanjutnya, kota Pompeii terkubur selama hampir 1700 tahun, sampai kemudian ditemukan kembali ketika para pekerja bangunan menggantinya untuk membangun istana raja Charles III, pada tahun 1748.



Gambar 6.24. : Lokasi gunung Vesuvius dan kota Pompeii, yang menghadap ke teluk Naples - Italia



Gambar 6.25. : Gunung Vesuvius di foto dari udara (1971)

Sesungguhnya, tanda-tanda kembali aktifnya gunung Vesuvius bukannya tidak ada. Pada tanggal 5 Februari 62, terjadi gempa bumi dengan kekuatan 7,5 SR terjadi disekitar gunung esuvius, terasa sampai ke kota Naples yang berjarak 32 km. Kerusakan pada berbagai bangunan dan korban jiwa berjatuhan di kota Pompeii, bahkan sejumlah ternak domba mati oleh karena menghisap gas beracun. Namun hal ini nampaknya belum disadari oleh penduduk disekitar Vesuvius, sampai gunung tersebut benar-benar meletus pada tahun 79.

Suatu hal yang menarik bahwa sebelum erupsi Vesuvius (79 M), istilah *volcano* yang merupakan akar kata dari *volcanology* yang berarti ilmu ke-gunung apian, belumlah dikenal. *Volcano* berasal dari kata *Vulcan*, yaitu nama dewa penguasa api dan logam bangsa Romawi.

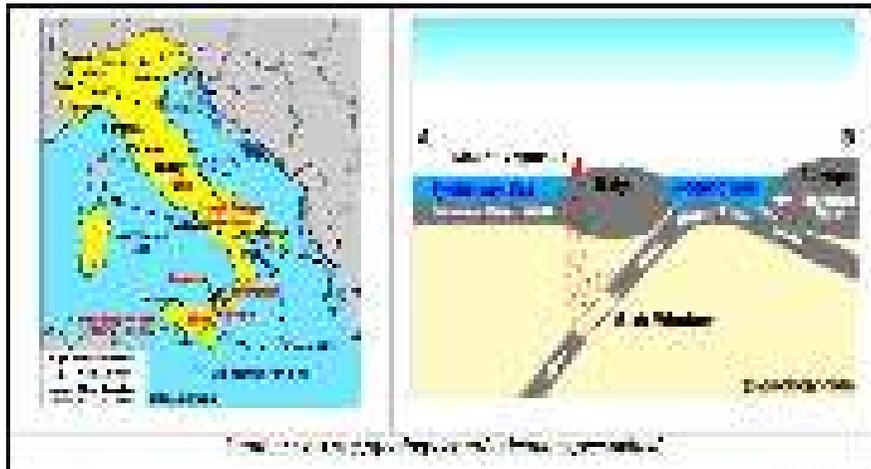


Plaster casts of people who died in the city of Pompeii during the 79 AD eruption of Mount Vesuvius. They were buried by the ashfall. Image: *Garden of the Fugitives*. This photo was taken by Lancevortex and is distributed under a [GNU Free Documentation License](#).

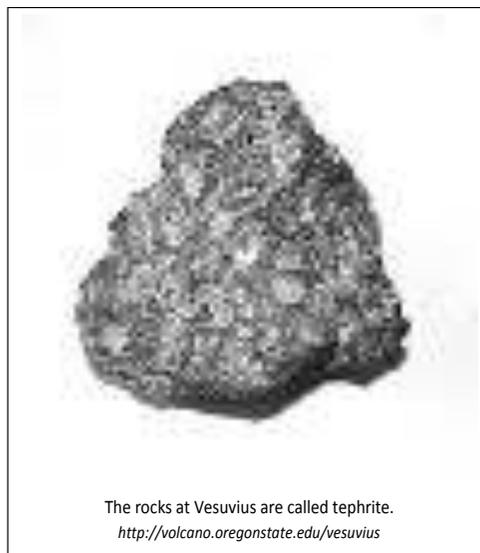
Sumber : <https://geology.com/volcanoes/vesuvius/>

Gambar 6.26. : Korban erupsi gunung Vesuvius (79 M), yang tertimbun dan tersementasi

Gunung api Vesuvius terletak diatas zona subduksi, dimana lempeng tektonik Afrika yang bergerak kearah utara dengan kecepatan 2 - 3 cm per tahun, menunjam kebawah lempeng Eurasia. Pergerakan ini secara perlahan semakin menutup cekungan Mediterania (*Mediterranean basin*).



Gambar 6.27. : Posisi tektonik gunung Vesuvius



Gambar 6.28. : Batuan vulkanik produk erupsi Vesuvius, yang disebut *Tephrite*

Vesuvius adalah bagian dari busur vulkanik Campanian, yang terbentuk oleh konvergensi antara lempeng Afrika dengan lempeng Eurasia. Busur ini memanjang disepanjang semenanjung Italia, yang disamping Vesuvius juga meliputi gunung-gunung api Etna, Campi Flegrei, Vulcano dan Stromboli.

Dibawah Vesuvius, bagian bawah dari lempeng yang menunjam ter-robek, terpisah dari bagian atasnya, sehingga membentuk apa yang disebut sebagai *slab window*. Hal ini menyebabkan komposisi kimia batuan vulkanik, produk erupsi Vesuvius yang tumbuh didalam kaldera gunung api Somma, agak berbeda dengan batuan-batuan vulkanik produk erupsi gunung api lainnya pada busur Campanian. Komposisi batuan vulkanik Vesuvius terutama adalah batuan *Andesit*, yang merupakan batuan intermediate dengan kandungan silika 53-63%, yang dapat pula berupa aliran material *pyroclastic* ataupun abu vulkanik (*volcanic ash*), terutama ketika terjadi erupsi *Plinian*, sehingga berpotensi menimbulkan sejumlah besar korban.

Erupsi gunung api Vesuvius kembali terjadi pada tahun 1631, menelan korban sekitar 3500 orang. Namun sejak saat itu aktivitas vulkanik gunung Vesuvius relatif stabil, walaupun beberapa kali erupsi yang merusak terjadi pada periode akhir tahun 1700an, 1800an dan awal tahun 1900an, seperti pada tahun 1906 yang menimbulkan lebih dari 100 orang korban. Erupsi Vesuvius terakhir tercatat pada tahun 1944, pada saat perang dunia II, dimana bebatuan abu vulkanik (*volcanic ash*) menyebabkan gangguan dan kerusakan pesawat, pada bandara didekatnya.

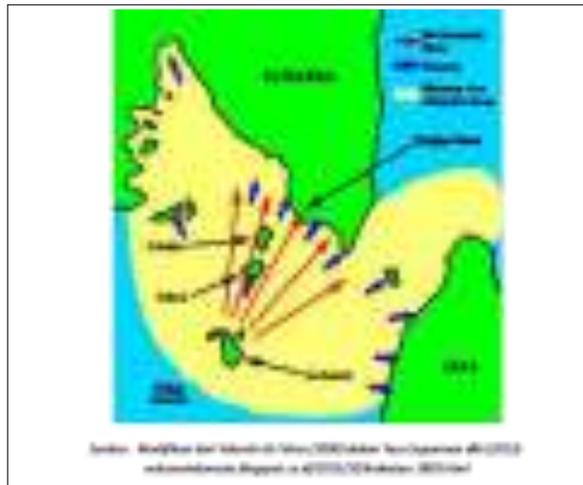
6.7.3. Erupsi Gunung Krakatau (1883)

Krakatau adalah kepulauan vulkanik aktif yang berada di selat Sunda, antara pulau Sumatera dan Jawa. Nama ini pernah disematkan pada salah satu puncak gunung api disana, yaitu gunung Krakatau di pulau Rakata dengan puncak-puncaknya gunung Rakata, Danan dan Perbuwatan, yang musnah karena letusannya sendiri pada tanggal 27 Agustus 1883.

Erupsi eksplosif yang dahsyat tersebut, dengan *type Plinian* dan $VEI = 6$, menyemburkan awan panas dan gelombang *tsunami* yang melanda pantai Banten dan Lampung, mengakibatkan korban jiwa 36000 orang lebih. Sementara itu debu vulkanik yang disemburkannya

mempengaruhi iklim global. Dunia sempat gelap selama beberapa hari akibat debu yang menutupi atmosfer. Hamburan debu nampak dilangit Norwegia hingga New York, sementara itu matahari bersinar redup sampai setahun berikutnya.

Para ahli memperkirakan adanya gunung Krakatau Purba yang merupakan induk gunung Krakatau yang meletus pada tahun 1883. Hal ini diantaranya ditafsirkan dari naskah Jawa Kuno yang berjudul *Pustaka Raja Parwa*, yang diperkirakan berasal dari tahun 416 M. Berend George Escher dan para ahli lainnya, menafsirkan bahwa gunung *Baluwarna* dalam naskah tersebut adalah gunung Krakatau Purba yang dimaksud. Gunung tersebut mempunyai ketinggian 2000 meter dpl dan lingkaran pantai 11 km. Erupsi besar Krakatau Purba menyisakan kaldera laut, dengan tepian kawahnya dikenal sebagai pulau Rakata tempat tumbuhnya gunung Krakatau, pulau Panjang (*Lang island*) dan pulau Sertung (*Verlaten island*). Erupsi Krakatau Purba ditafsirkan mempunyai andil atas terjadinya abad kegelapan di bumi, sehingga mengakibatkan berakhirnya masa kejayaan Persia Purba, punahnya kebudayaan Maya di Amerika dan banyak peristiwa sejarah lainnya. Oleh karena erupsi yang diperkirakan berlangsung selama 10 hari tersebut, dengan kecepatan muntahan material mencapai 1 juta ton per detik, telah membentuk perisai atmosfer setebal 20-150 meter, sehingga menurunkan temperatur sampai dengan 5-10°C selama 10-20 tahun.



Gambar 6.29. : Penyebaran material *pyroclastic* dan gelombang *tsunami* pada erupsi gunung Krakatau (1883)

Pada tahun 1927, sekitar 40 tahun lebih setelah erupsi 1883, tumbuh gunung api baru dari dalam kaldera gunung Krakatau, yang dinamakan sebagai gunung Anak Krakatau (namun sampai saat ini tetap disebut sebagai gunung Krakatau). Gunung ini terus tumbuh dari bawah laut sehingga sampai saat ini telah mencapai ketinggian 230 meter dpl (sedangkan gunung Krakatau sebelumnya mempunyai ketinggian 813 meter dpl).



Gambar 6.30. : Perubahan *landscape* kompleks gunung Krakatau

Erupsi gunung Krakatau pada tahun 1883 adalah contoh bencana katastrofik yang menghancurkan siklus kehidupan dalam suatu ekosistem, yaitu dengan tenggelamnya pulau Rakata. Setidaknya dua kali dalam siklus gunung Krakatau terjadi erupsi katastrofik yang menghancurkan ekosistem setempat, yang dikenal dalam sejarah manusia. Erupsi volkanik dalam hal ini telah memusnahkan suatu ekosistem khususnya di pulau Rakata, namun alam akan selalu menemukan jalannya untuk tumbuh kembali dan ekosistem baru pun terbentuk kembali.



Sumber : visitbanten.com/wp-content/uploads/2014/09/KRA.jpg

Gambar 6.31. : Gunung Krakatau (Anak Krakatau) dengan ekosistemnya sekarang, tumbuh dari bawah laut dalam waktu < 100 tahun



Sumber : visitbanten.com/wp-content/uploads/2014/09/KRA.jpg

Gambar 6.32. : Gunung Krakatau (Anak Krakatau) tahun 2014

6.7.4. Erupsi Gunung Tambora (1815)

Gunung Tambora terletak di semenanjung Sanggar pulau Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, merupakan gunung api aktif berbentuk *stratovolcano*. Gunung api ini mengalami erupsi explosif yang besar pada tahun 1815. Namun berdasarkan penelitian *carbon dating*, setidaknya sebelum erupsi 1815 gunung Tambora pernah 3 kali mengalami erupsi besar.



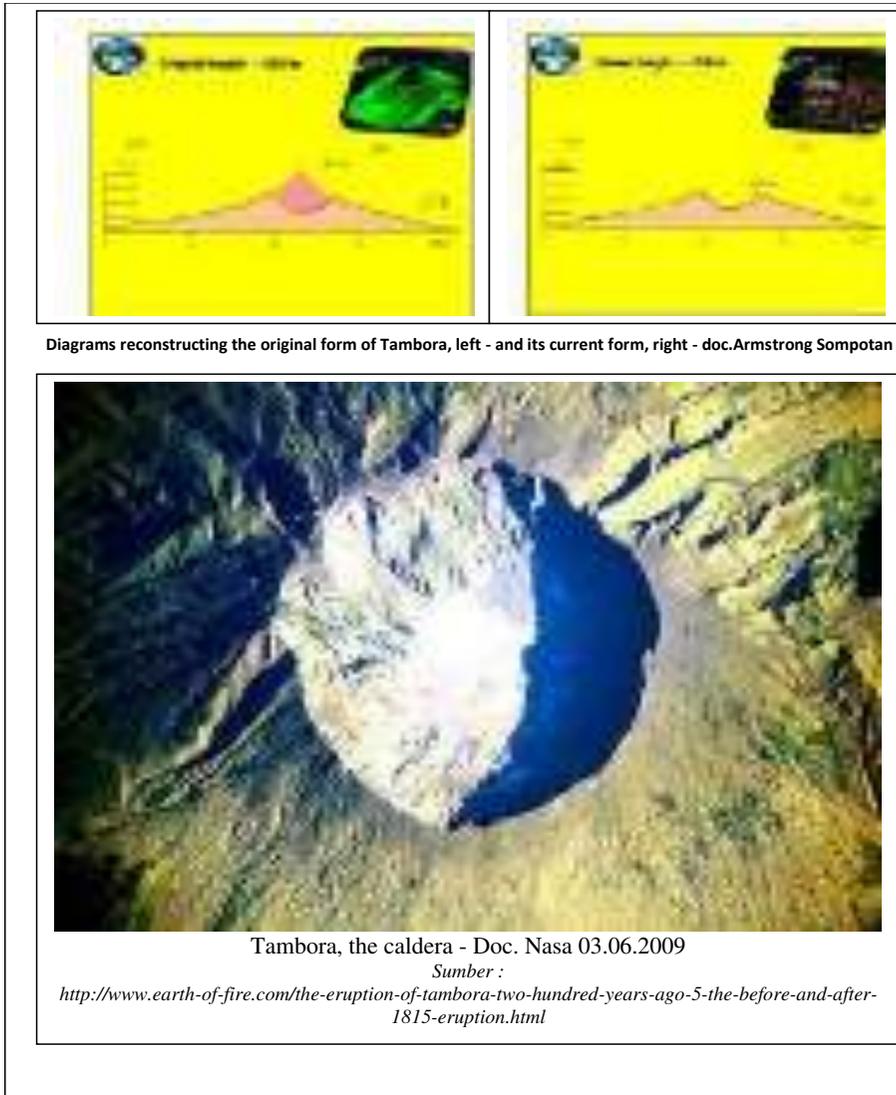
Sumber : https://readtiger.com/wkpw/en/Mount_Tambora

Gambar 6.33. : Lokasi Gunung Tambora di Semenanjung Sanggar – Pulau Sumbawa

Erupsi explosif besar yang tercatat, terjadi pada bulan April 1815, merupakan erupsi type *Ultra-Plinian* dengan VEI = 7. Sedemikian kuatnya erupsi ini, sehingga menghilangkan sebagian besar dari kerucut gunung api itu sendiri. Gunung Tambora yang pada awalnya diperkirakan memiliki ketinggian 4200 meter dpl, hanya tersisa 2730 meter sesudah erupsi. Diperkirakan sejumlah sekitar 100 km³ material *pyroclastic* berkomposisi *trachyandesite* dikeluarkan dengan perkiraan massa 1,4 X 10¹⁴kg. Hal ini meninggalkan kaldera dengan ukuran 6 – 7 km, dengan kedalaman 600 – 700 meter.



Gambar 6.34. : Gunung Tambora sebelum dan sesudah erupsi (1815)



Gambar 6.35. : Kaldera Gunung Tambora

Erupsi gunung Tambora tahun 1815, setidaknya telah merenggut korban jiwa 71000, dimana 11000 – 12000 diantaranya merupakan korban langsung. Peristiwa ini menenyapkan *Kerajaan Tambora*, oleh karena tertimbun secara total oleh muntahan material vulkanik. Sisa kerajaan yang terkubur ini ditemukan di kedalaman 3 meter pada endapan *pyroclastic*, pada posisi yang sama tidak berubah dengan posisi saat terjadinya erupsi, sehingga sering disebut sebagai *Pompeii dari timur*.



Gambar 6.36. : Korban yang tertimbun material vulkanik, erupsi Gn Tambora (1815)

Erupsi Tambora melontarkan abu vulkanik sampai ketinggian lebih dari 43 km mencapai lapisan *stratosfer*. Partikel abu ini tetap berada di atmosfer bumi pada ketinggian 10 - 30 km selama beberapa tahun, sehingga mempengaruhi iklim secara global

Pada tahun 1816 misalnya, negara-negara di belahan bumi utara mengalami masa yang disebut sebagai *tahun tanpa musim panas*. Pada tanggal 4 Juni 1816, cuaca penuh es dilaporkan terjadi di Connecticut - Amerika Serikat, untuk selanjutnya pada tanggal 6 Juni 1816, salju turun di Albany, New York dan Dennysville. Sementara itu Kanada mengalami musim panas yang sangat dingin, dengan salju yang tertimbun setebal 30 cm didekat Quebec dari tanggal 6 sampai 10 Juni 2016. Hal tersebut disebabkan oleh lapisan kabut kering yang merupakan *aerosol sulfat* pada lapisan *stratosfer*, yang berasal dari erupsi gunung Tambora. Kabut inilah yang mengurangi cahaya matahari, yang tak dapat dihilangkan baik oleh angin maupun hujan, dan tentunya mempengaruhi reaksi fotosintesa pada berbagai tetumbuhan, terutama di belahan bumi utara.

6.7.5. Erupsi Gunung Merapi

Gunung Merapi adalah gunung api paling aktif, dengan perioda erupsi yang umumnya explosif, antara 1 sampai 5 tahun. Terletak di Jawa Tengah pada perbatasan dengan provinsi Daerah Istimewa

Yogyakarta, dengan morfologi *stratovolcano*, dengan ketinggian pada tahun 2006 adalah 2968 meter dpl. Ketinggian ini selalu berubah dengan seringnya terjadi erupsi yang eksplosif. Type erupsinya adalah *vulcanian* dengan klasifikasi VEI = 3 - 4, dengan sesekali diselingi dengan erupsi yang effusif. Kemungkinan juga dimasa lalu pernah mengalami erupsi type *Plinian* dengan klasifikasi VEI = 5.

Karakteristik erupsi gunung Merapi ditandai dengan pembentukan kubah *lava* yang menyumbat jalan keluarnya magma. Namun dorongan magma mendesaknya terus keatas, sehingga kubah *lava* ini terus tumbuh. Kubah *lava* ini pada saatnya akan menjadi tidak stabil dan runtuh, meluncur kebawah menuruni lereng, dengan membawa serta berbagai material volkanik, termasuk debu awan panas (masyarakat setempat menyebutnya sebagai *wedhus gembel*). Luncuran awan panas ini masuk dalam kategori *nuee ardante d'avalanche*.



Gambar 6.37. : Luncuran awan panas (*nuee ardante d'avalanche*), erupsi Merapi (2010)

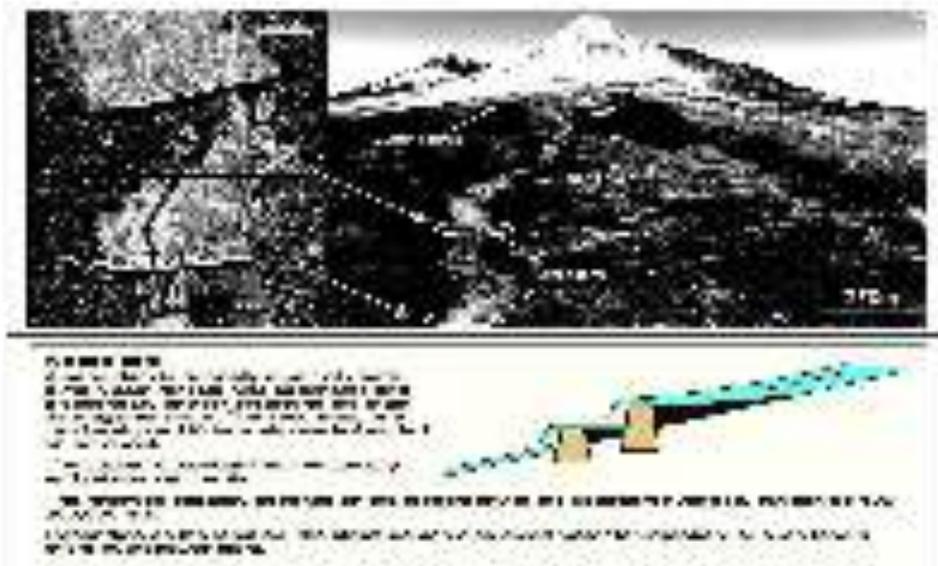
Erupsi pada tahun 1006, diduga telah menghancurkan kerajaan Medang atau Mataram Kuno disebelah timur, yang terkenal telah membangun candi Borobudur, seperti tercatat sebagai *Tragedy Pralaya* dalam naskah *Babad Tanah Jawa*. Diperkirakan erupsi saat itu ber type *Vulcanian - Plinian*, dengan klasifikasi VEI = 4 - 5. Sedangkan semburan awan panas kearah timur diduga merupakan *nuee ardante d'explosion dirige*, yang sejenis dengan erupsi Vesuvius (79 M) di Italia.

Disamping awan panas dan sesekali aliran *lava*, bahaya lain terkait dengan gunung Merapi adalah banjir lahar dingin. Timbunan berbagai material vulkanik yang belum ter-konsolidasi pada lereng Merapi, akan mudah melumpur oleh curah hujan yang tinggi. Lumpur ini merupakan lahar dingin yang dapat mengalir menuruni lereng, dengan daya rusak yang tinggi. Aliran lahar dingin ini diantaranya melalui kali Krasak, kali Boyong, terkadang juga kali Kuning menuju kali Code. Banjir lahar dingin ini tidak terkait langsung dengan erupsi atau peningkatan aktivitas vulkanik gunung Merapi, akan tetapi terkait dengan curah hujan. Yaitu terjadi pada musim hujan ketika terjadi curah hujan yang tinggi dipuncak Merapi. Maka lahar dingin disini disebut juga sebagai *lahar hujan*. Namun demikian aktivitas vulkanik yang sangat aktif menyebabkan akumulasi timbunan material vulkanik yang terus meningkat, sehingga potensi banjir lahar dingin akan selalu ada dari waktu ke waktu. Upaya yang telah dilakukan untuk meng-antisipasi banjir lahar dingin ini, diantaranya adalah dengan membangun *Sabo Dam*, pada aliran-aliran sungai yang sering dilalui oleh lahar dingin.



Sumber : ANTARANEWS.COM – www.antaraneews.com/berita/592930/bnpb-potensi-banjir-lahar-merapi-masih-tinggi

Gambar 6.38. : Banjir lahar dingin gunung Merapi di kali Gendol (2015)



Sumber : GUNUNG MERAPI : MOUNTAIN OF FIRE –
gunungmerapi.weebly.com/hazards.html

Gambar 6.39. : Sabo Dam sungai Bojong, penahan aliran lahar dingin gn Merapi.

Gunung Merapi mempunyai kerucut kembarannya, yaitu gunung Merbabu disebelah timur. Gunung Merbabu, dengan ketinggian 3145 meter dpl, saat ini termasuk dalam kategori tidak aktif atau *dormant*, namun memiliki kawah dan tercatat pernah meletus pada tahun 1560 dan 1797.

6.7.6. Erupsi Gunung Kelud

Gunung kelud terletak di Jawa Timur, merupakan *stratovolcano*, dengan type erupsi yang *explosif*. Dikenal sejak tahun 1000 M, merupakan gunung api aktif dengan periode erupsi antara 9-25 tahun, dengan kekuatan erupsi mencapai VEI = 5. Sehingga dicatat sebagai gunung api yang berbahaya bagi manusia, terutama oleh karena lokasinya yang berada dekat dengan kota-kota besar berpenduduk padat, seperti Kediri, Blitar dan Malang.

Kekhasan gunung Kelud adalah adanya danau kawah, yang dalam erupsi dapat memuntahkan lahar panas dalam jumlah besar.



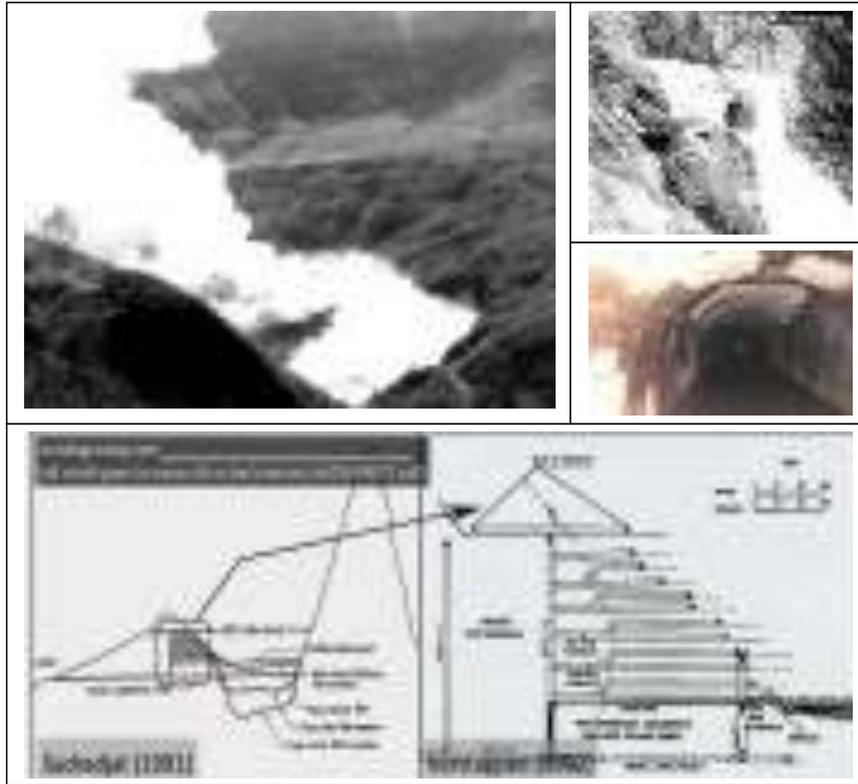
Danau Kawah Gunung Kelud sebelum letusan 2007. Foto: Kristianto

Sumber : <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/letusan-kelud-dulu-dan-2014/>

Gambar 6.40. : Danau Kawah gunung Kelud sebelum erupsi 2007

Peristiwa tersebut terjadi pada erupsi tahun 1919, tepatnya tanggal 20 Mei siang hari. Erupsi ini termasuk diantara yang paling mematikan oleh karena menelan korban 5160 jiwa, dan merusak 15000 hektar lahan pertanian produktif. Hal tersebut diakibatkan oleh aliran lahar panas, yang meluncur sampai sejauh 38 Km. Walaupun pada tahun 1905 di Kali Badak telah dibangun bendung penahan lahar. Dan pada tahun 1907 telah digali pula saluran melalui pematang, atau dinding kawah bagian barat, dan telah berhasil mengeluarkan air danau kawah sebesar 4,3 juta meter kubik.

Oleh karena erupsi besar inilah maka kemudian dibangun sistem saluran terowongan pembuangan air danau kawah. Keseluruhannya berjumlah 7 terowongan dan diselesaikan pada tahun 1926. Namun sistem terowongan ini mengalami kerusakan berat pada erupsi tahun 1966. Maka dibangun terowongan baru 45 meter dibawah terowongan lama yang diselesaikan pada tahun 1967. Terowongan ini, dinamai Terowongan Ampera, berfungsi mempertahankan volume air danau kawah, agar tidak melampaui 2,5 juta meter kubik.



Sumber : <https://rumahgunung.files.wordpress.com/2012/05/kelud11.jpg>

Gambar 6.41. : Sistem terowongan drainase danau kawah gunung Kelud

Pada tahun 2007, terjadi erupsi yang menyimpang dari type erupsi gunung Kelud yang explosif, yaitu berupa erupsi freatik yang berupa leleran dan letupan-letupan kecil. Gejala unik terjadi dengan munculnya asap tebal putih dari tengah danau kawah, dan diikuti dengan munculnya kubah *lava*. Kubah *lava* ini terus tumbuh sehingga mencapai diameter 469 meter dan volume 16,2 juta meter kubik. Maka danau kawah gunung Kelud praktis menghilang, yang tersisa hanya berupa kolam kecil air keruh di sisi selatan kubah *lava*.

Erupsi besar berikutnya terjadi pada tahun 2014, tanggal 13 Februari malam hari. Erupsi explosif ini menyebarkan abu vulkanik sampai ke wilayah Tasikmalaya di Jawa Barat, sehingga memaksa ditutupnya bandara-bandara di Jawa Tengah dan Jawa Timur, untuk kegiatan penerbangan selama beberapa hari. Di Yogyakarta, ketebalan abu vulkanik gunung Kelud bahkan melampaui ketebalan abu

volkanik erupsi gunung Merapi. Akibat erupsi explosif tahun 2014 ini, kubah *lava* yang terbentuk pasca erupsi freatik tahun 2007 hancur, dan kawah kering gunung Kelud terbentuk kembali. Dimungkinkan danau kawah gunung Kelud akan kembali terbentuk pada masa-masa berikutnya.



Gambar 6.42. : Kubah *lava* gunung Kelud, setelah erupsi freatik tahun 2007

6.7.7. Erupsi Gunung Sinabung



Gambar 6.43. : Sekilas riwayat erupsi gunung Sinabung

Gunung Sinabung adalah *stratovolcano* di Sumatera Utara dengan ketinggian 2460 meter dpl. Gunung ini termasuk dalam kategori *dormant* sebelum erupsi tahun 2010, sehingga pada peta gunung api Indonesiapun belum tercatat sebagai gunung api aktif. Sebelumnya, gunung ini pernah meletus pada tahun 1600, namun kemudian tertidur pada waktu yang lama, sehingga banyak orang yang melupakannya. Oleh karena status *dormant* yang cukup lama, maka tak banyak catatan yang diketahui tentang gunung Sinabung sebelumnya. Namun dari laporan erupsi pada tahun 2010, diperkirakan erupsi ini merupakan erupsi type Vulcanian, dengan VEI = 3 - 4.



Sumber : www.newsth.com/ruptik/wp-content/uploads/2016/02/Gunung-Sinabung.jpg

Gambar 6.44. : Luncuran awan panas (*nuee ardante*) pada erupsi gunung Sinabung (2010)



AFP PHOTO / SUTANTA ADITYA

Sumber :

<http://www.tribunnews.com/regional/2014/02/02/update-sinabung-erupsi-masih-terjadi-korban-bertambah-jadi-15-jiwa>

Gambar 6.45. : Korban luncuran awan panas Gunung Sinabung

Erupsi gunung Sinabung pada tahun 2010, yang berlanjut pada tahun 2013, 2014 bahkan 2015, adalah erupsi eksplosif yang mengeluarkan abu vulkanik dan awan panas, dan juga selingan lelehan *lava* pijar. Semburan abu vulkanik merupakan bencana utama erupsi pada tahun 2010, dengan tinggi kolom mencapai 3000 meter di atas puncak gunung, bahkan pada erupsi tahun 2013 mencapai 8000 meter, menyebar terutama ke arah selatan menyelimuti kota Berastagi, Sibolangit bahkan sampai ke kota Medan. Sementara itu luncuran awan panas menuruni lereng dengan kecepatan tinggi, mencapai jarak luncur lebih dari 1,5 Km.

Model erupsi gunung Sinabung kedepan, kemungkinan akan mengikuti pola erupsi gunung Merapi di Jawa Tengah, yaitu dengan pola luncuran awan panas *nuee ardante d'avalanche*. Dan kemungkinan juga dengan pola banjir lahar dingin dikemudian hari, apabila akumulasi material vulkanik yang tertimbun dilereng gunungnya sudah cukup banyak.

Seperti halnya gunung Merapi, gunung Sinabung juga memiliki kerucut kembar, yaitu gunung Sibayak. Gunung ini merupakan *stratovolcano*, dengan ketinggian 2212 meter dpl, yang memiliki kawah aktif dan erupsi terakhir tercatat pada tahun 1881.

6.7.8. Erupsi Freatik Kawah Sinila - Dieng (1979)

Dataran Tinggi Dieng adalah kawasan vulkanik aktif di Jawa Tengah, yang masuk wilayah Kabupaten Banjarnegara dan Kabupaten Wonosobo. Letaknya berada di sebelah barat kompleks Gunung Sindoro dan Gunung Sumbing. Secara administrasi, Dieng meliputi wilayah Desa Dieng Kulon, Kecamatan Batur, Kabupaten Banjarnegara dan Dieng ("Dieng Wetan"), Kecamatan Kejajar, Kabupaten Wonosobo.

Dieng memiliki Ketinggian rata-rata adalah sekitar 2000 m dpl. Suhu berkisar 12–20 °C pada siang hari dan 6–10 °C pada malam hari. Pada musim kemarau (Juli dan Agustus), suhu udara dapat mencapai 0 °C pada pagi hari dan memunculkan embun beku yang oleh penduduk setempat disebut *bun upas* ("embun racun")

Dataran tinggi Dieng adalah dataran dengan aktivitas vulkanik di bawah permukaannya, sesungguhnya merupakan kaldera dengan

gunung-gunung di sekitarnya sebagai tepinya. Terdapat banyak kawah sebagai tempat keluarnya gas, uap air dan berbagai material vulkanik lainnya, yang salah satunya adalah kawah Sinila. Keadaan ini sangat rawan bagi penghuni wilayah sekitarnya, seperti yang terjadi dengan bencana erupsi gas pada kawah Sinila (1979). Dimana bukan hanya gas beracun, tetapi juga dimungkinkan terjadi gempa bumi, erupsi lumpur, tanah longsor, dan banjir. Kawah Sinila sendiri terletak diantara desa Batur, desa Sumberejo dan desa Pekasiran, yang lokasinya berdekatan kawah Timbang dan kawah Sigludug. Maka, ketika terjadi erupsi pada kawah Sinila pada tanggal 20 Februari 1979, gempa yang ditimbulkan membuat warga berlarian ke luar rumah, namun terperangkap oleh gas beracun yang terpencar keluar dari kawah Timbang, sehingga sejumlah 149 warga dan ternak tewas akibat keracunan gas.



Gambar 6.46. : Sketsa lokasi Dataran Tinggi Dieng



Struktur kompleks vulkanik Dieng, yang terdiri dari kaldera (garis merah) di sisi timur dan graben/cekungan Batur (garis hitam) di sisi barat. Nampak sejumlah kerucut vulkanis yang tumbuh dalam kompleks vulkanik ini. Digambar ulang dari Sukhyar (1994). Sumber: Sudibyo, 2017 dengan basis Google Maps.

Sumber : <https://ekliptika.wordpress.com/tag/sinila/>

Gambar 6.47. : Kompleks vulkanik dan kaldera Dieng



Sumber : <https://droppedbox.wordpress.com/tag/kawah-sinila/>

Gambar 6.48. *Kawah Sinila*



Gambar 6.49. : Korban gas beracun

Tragedi Sinila terjadi pada hari Selasa 20 Februari 1979. Bencana diawali dengan rentetan tiga gempa dangkal, dimana gempa pertama terjadi pada pukul 01:55 WIB dengan getaran cukup kuat dengan skala intensitas sekitar 4 - 5 MMI (*Modified Mercalli Intensity*), cukup kuat untuk membangunkan orang-orang yang terlelap. Gempa kedua menyusul terjadi pada pukul 02:40 WIB, getarannya juga cukup kuat pula dirasakan warga desa Pesurenan. Dan gempa ketiga mengguncang pada pukul 04:00 WIB.

Tanpa disadari, rentetan gempa telah menyebabkan gangguan keseimbangan perut bumi Dataran Tinggi Dieng bagian barat. Retakan-retakan timbul dan menyebar dalam tanah yang sejatinya sudah rapuh karena terbelah oleh aneka sesar dan diperlemah oleh alterasi hidrotermal khas vulkanisme. Retakan-retakan tersebut menembus cebakan-cebakan (*reservoir*) gas volkanik yang ada pada kedalaman 1 - 2 kilometer. Akibatnya, isi cebakan berupa gas karbondioksida (CO_2) dan uap air bertekanan tinggi menemukan jalan keluarnya. Pergerakan gas dan uap tersebut melalui jalan termudah yang sudah ada, yaitu titik lemah yang berujung pada *kawah Sinila*. Kawah ini merupakan cekungan bergaris tengah sekitar 50 meter yang terisi air sehingga menjadi sebuah telaga yang diberi nama telaga Nila atau telaga Sinila. Kawah tersebut kurang dikenal dibandingkan dengan kawah-kawah lainnya, seperti kawah Candradimuka, telaga

Dringo dan sumur (kawah) Jalatunda, dan dikenal sebagai kawah yang tenang..

Maka *erupsi freatik* pun terjadi, dimulai pukul 05:04 WIB, dimana dorongan sangat kuat dari gas dan uap bertekanan tinggi membobol dasar *kawah Sinila* diiringi dentuman menggelegar. Material letusan pun menyembur tinggi hingga beberapa ratus meter, membentuk kolom coklat gelap raksasa. Bongkahan-bongkahan tanah dan bebatuan hingga seukuran 40 sentimeter terlontar sampai jarak 150 meter, bersama dengan uap pekat yang terus mengepul. Sekitar pukul 06:00 WIB terjadi semburan kedua, dengan disertai terbentuknya lubang pada tanah, 250 meter di sebelah barat-baratdaya *kawah Sinila* pada pukul 06:50 WIB. Kawah baru inipun menyemburkan material erupsi dan kepulan uap pekat, dengan disertai suara gemuruh susul menyusul seperti petir atau gludug. Sehingga kawah baru itupun kemudian diberi nama *kawah Sigludug*.

Pada pukul 06:00 WIB itu *kawah Sinila* mulai melelehkan lahar. Lahar bergerak mengikuti alur batang sungai kecil didekatnya. Sekitar pukul 07:00 WIB, *kawah Sinila* kembali memuntahkan laharnya. Lahar mengalir hingga sejauh kurang lebih 4 kilometer, memotong jalan raya utama Dieng dan hampir menjangkau jalan lintas selatan di dekat desa Kaliputih. *Kawah Sigludug* pun turut memuntahkan lahar, namun dengan volume lebih kecil. Lahar *Sigludug* hanya mengalir sejauh 1 kilometer mengikuti alur batang kali Tempurung untuk kemudian berhenti sebelum gerbang desa Kepucukan.

Selasa pagi itu penduduk Kepucukan yang tak mungkin mengungsi ke utara oleh karena menuju *kawah Sinila* dan *kawah Sigludug*, dan juga tak mungkin ke timur oleh karena lahar *Sinila* telah memutus jalur tersebut, bergerak kearah barat. Namun semburan gas CO₂ dari dua lubang dan kawah Timbang mengalir jauh ke selatan-baratdaya, menyusuri lembah sungai kecil, dan pada jarak 800 meter dari kawah Timbang bersua dengan barisan pengungsi Kepucukan. Tak terelakkan lagi dalam tempo singkat barisan ini bertumbangan ditempat. Sisanya berbalik arah kembali ke Kepucukan, tanpa menyadari bahwa lubang-lubang kecil yang sama juga bermunculan disekitar SD Inpres Kepucukan, bahkan satu diantaranya tepat berada ditepi jalan setapak yang dilalui. Maka seketika 145 orang tewas menghisap gas beracun. Pukul 11:00 WIB aktivitas di *kawah Sinila* dan

tertutup sebagian yang boleh ada aktivitas terbatas hanya pada siang hari dan hanya pada saat angin berhembus.

Secara geologis Dataran Tinggi Dieng adalah kaldera, atau cekungan (depresi) vulkano-tektonik, produk erupsi vulkanik yang dahsyat, yang diikuti oleh pergerakan tektonik pensesaran, mirip dengan proses pembentukan danau Toba (*Toba Supervolcano*). Sehingga dataran tinggi ini disebut juga Kompleks Vulkanik Dieng. Kompleks vulkanik Dieng meliputi area sepanjang 14 kilometer (barat-timur) dan lebar 6 kilometer (utara-selatan). Sekitar setengah hingga satu juta tahun yang lalu, sebagian kompleks vulkanik ini adalah bagian barat dari gunung Prahur purba, yang mengalami erupsi dahsyat pada masa akhir hidupnya, menyisakan kaldera dengan diameter 7 kilometer. Sisa tubuhnya (setinggi 2566 meter dpl) menjadi Gunung Prahur muda yang merupakan batas sisi timur kaldera. Sedangkan batas sisi barat dan selatannya masing-masing ditempati oleh gunung Nagasari (2365 meter dpl) dan gunung Bisma (2365 meter dpl), merupakan 2 kerucut vulkanik yang lahir dalam aktivitas pasca kaldera. Aktivitas pasca kaldera juga membentuk gunung Seroja (2275 meter dpl), yang kemudian mengalami erupsi parasitik pada bagian kakinya dan membentuk kawah 800 meter, yang terisi air menjadi telaga Menjer. Terbentuk pula gunung Merdada dan gunung Pangonan (2308 meter dpl), dengan kawah pada puncaknya, namun hanya kawah Merdada yang tergenang air menjadi telaga Merdada. Di sekitar Gunung pangonan dan Merdada kemudian lahir gunung Pagerkandang / Sipandu (2241 meter dpl) dan Igir Binem. Gunung Pagerkandang memiliki kawah kering, namun pada bagian kakinya tumbuh kawah parasiter yang tergenang air menjadi telaga Sileri. Sementara itu Igir Binem memiliki dua kawah berisi air yang saling berdampingan, yaitu telaga Warna dan telaga Pengilon.

Kerucut-kerucut vulkanik tersebut mulai tumbuh sekitar 17000 tahun yang lalu. Sementara leleran lava termuda dalam kaldera berumur 8500 tahun, yaitu aliran lava Sikunang. Setelah itu masih tumbuh lagi sejumlah kerucut vulkanik, yang seluruhnya terpusat di sekitar batas selatan kaldera, seperti gunung Sidede (2231 meter dpl), gunung Pakuwaja (2395 meter dpl), gunung Sikunir (2463 meter dpl), gunung Sikendil (2340 meter dpl), gunung Prambanan dan gunung Watusumbul (2154 meter dpl).

Setelah kaldera Dieng terbentuk dan aktivitas pasca kaldera menggerakkan sesar normal, pada sisi barat, menyebabkan amblesan (*subsidence*) membentuk *graben Batur*. Dan celah-celah sesar pada *graben* tersebut kemudian menjadi jalur lemah yang diterobos magma dari dapur magma di bawah kaldera. Maka sejumlah kerucut vulkanik pun tumbuh, seperti gunung Dringo dan gunung Petarangan (2135 meter dpl), dimana keduanya tumbuh pada masa yang sama dengan gunung Pانونan dan gunung Merdada. Sementara itu gunung Legetang tumbuh pada sisi timur *graben Batur*.

Tabel 6.4. : Catatan erupsi pada kompleks vulkanik Dieng

Tahun	Nama Gunung/Kawah	Aktivitas letusan	Produk Letusan/korban
1450	Pakuwojo	Letusan normal	Abu/Pasir ?
1825/1826	Pakuwojo	Letusan normal	Abu/Pasir ?
1883	Kw.Sikidang/Banteng	Peningkatan kegiatan	Lumpur kawah
1884	Kw.Sikidang	Letusan normal	?
1895	Siglagak	Pembentukan celah	Uap belerang
1928	Batur ?	Letusan Normal	Lumpur dan batu
1939	Batur	Letusan normal	Uap dan Lumpur, 5 orang meninggal
1944	Kw.Sileri	Gempabumi dan letusan	Lumpur/59 meninggal, 38 luka-luka, 55 orang hilang
1964	Kw.Sileri	Letusan normal	lumpur
1965	Kw.Condrodimuko/Telaga Dringo	Hembusan fumarola, lumpur (?)	Uap air dominan
1979	Kw.Sinila	Hembusan gas racun	Gas CO ₂ , CO ?, CH ₄ , Korban 149 meninggal
1990's	Kw. Dieng Kulon	Letusan freatik	lumpur

Karakter Letusan : Dominan letusan freatik dan gas (terutama CO₂)(Sumber VSI)
 Sumber : <https://geologi.co.id/2011/05/30/kompleks-gunung-dieng-gunung-tua-yang-sedang-bergolak/>

Erupsi di kompleks vulkanik Dieng umumnya memiliki skala kecil, hanya berkisar 1 - 2 VEI, seperti yang tercatat sejak tahun 1786. Namun pemanasan oleh magma terhadap tubuh kompleks vulkanik Dieng yang intensif dan berkesinambungan menimbulkan alterasi hidrotermal yang melemahkan kekuatan batuan, sehingga tanah Dieng menjadi lebih rapuh dan mudah longsor. Diduga pernah terjadi erupsi yang besar dengan segala dampaknya sehingga Dieng sempat kosong dari hunian manusia selama beberapa waktu, sebelum kemudian mulai dihuni kembali pada abad ke-19. Namun dalam tiga abad terakhir karakter letusan pada kompleks vulkanik Dieng merupakan erupsi freatik, yang kerap diikuti lontaran/semburan lumpur dengan lubang erupsi yang berbeda-beda. Maka ancaman paling utama di Dieng adalah gas beracun, dalam wujud gas CO₂. Gas ini berasal dari magma jauh di kedalaman Dieng, yang melepaskan cairan hidrotermal yang kaya gas CO₂ secara terus menerus, dan tercebak pada kedalaman sekitar 1 kilometer. Dari sinilah gas-gas tersebut mengalir keluar melalui lubang-lubang kawah dan celah-celah retakan disekitarnya.

Kawah Sikidang melepaskan gas CO₂ dalam konsentrasi 5,7 % yang tergolong rendah. Namun kawah Sileri yang paling aktif meletus, memiliki konsentrasi gas CO₂ yang cukup tinggi sebesar 56 %. Bahkan kawah Sikendang, kawah kecil yang terletak di sisi telaga Warna, melepaskan gas CO₂ hingga 73,8 %. Pengukuran gas CO₂ dalam tanah menunjukkan bahwa baik kaldera maupun graben Batur umumnya mengandung gas CO₂ dalam konsentrasi lebih dari 0,5 % (angka batas aman). Kandungan gas CO₂ yang besar di dalam tanah membawa implikasi bahwa mereka akan terbebaskan ke udara saat terjadi gangguan besar, baik berupa gempa bumi maupun letusan gunung berapi.

Bahaya gas beracun di kompleks vulkanik Dieng sesungguhnya telah teridentifikasi sejak lama oleh Van Bemmelen. Maka pemantauan aktivitas vulkanik dan pelepasan gas-gas beracunpun menjadi fokus perhatian pos pemantauan gunung api Dieng.

6.8. Mitigasi Bencana Gunung Api

Proses erupsi gunung api beserta dampaknya, pada dasarnya bersifat terbatas disekitar lokasi pusat erupsinya, namun pada erupsi yang kuat (*VEI tinggi*) dapat berdampak luas. Walaupun erupsi gunung api hampir selalu disertai dengan getaran gempa bumi, namun hal tersebut bukanlah dampak utama. Bahkan, gempa vulkanik dalam banyak kasus justru mendahului terjadinya erupsi gunung api. Yaitu dimana pergesekan dan pergerakan magma mendekati permukaan, yang menimbulkan getaran (*tremor*) merupakan salah satu indikator peningkatan aktivitas vulkanik sebelum erupsi.

Maka pada dasarnya erupsi gunung api dapat di-prediksi, oleh karena selalu diawali dengan beberapa indikator yang dapat diamati, walaupun berbeda untuk setiap gunung api. Indikator-indikator tersebut diantaranya adalah :

- Timbul atau meningkatnya getaran (*tremor*) vulkanik.
- Munculnya gas-gas (dengan bau yang spesifik) ataupun uap air, dapat berupa asap pada kawah gunung api.
- Meningkatnya temperatur mata air ataupun air danau kawah.
- Meningkatnya temperatur permukaan tanah disekitar puncak atau kawah gunung api. Sering pula ditandai dengan turunnya binatang-binatang hutan dari area sekitar puncak gunung.
- Dan lain-lain.

Namun demikian, perioda ulang erupsi setiap gunung api berbeda, sehingga pada gunung-gunung api dengan perioda ulang erupsi yang panjang indikator-indikator tersebut sering terlupakan. Padahal berdasarkan data erupsi gunung api yang tercatat, erupsi besar dengan tingkat *Volcanic Explosivity Index (VEI)* tinggi, mempunyai perioda ulang yang panjang. Bagaimanapun, secara umum bahaya bencana gunung api akan berkaitan dengan tingkat aktivitas kegunung apiannya. Maka seyogyanya pada gunung-gunung api aktif dilakukan pengamatan terus menerus untuk mengidentifikasi status aktivitasnya dari waktu ke waktu. Mitigasi dampak bencana gunung api, kemudian disusun berdasarkan status aktivitasnya.

Tabel 6.5. : Klasifikasi status aktivitas gunung api

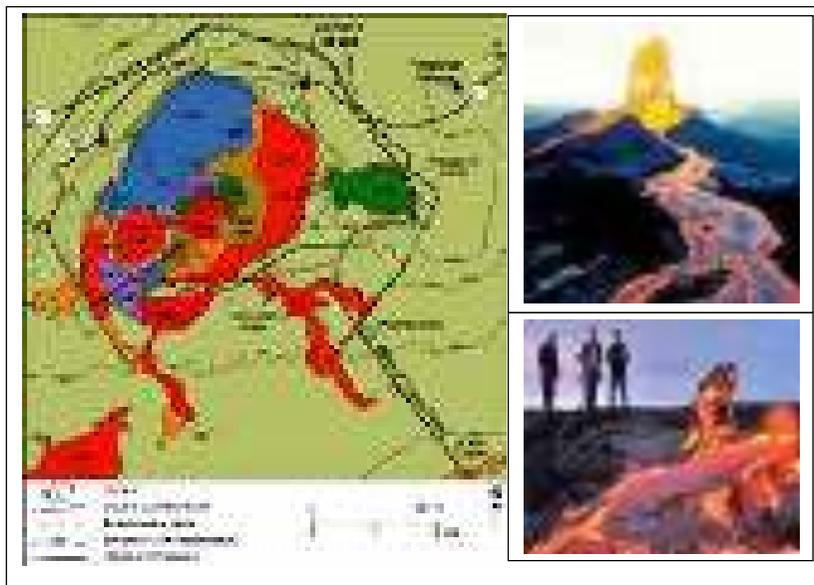
Skema peringatan gunung berapi di Indonesia Tingkatan status gunung berapi di Indonesia menurut Badan Geologi Kementerian ESDM		
Status	Makna	Tindakan
AWAS	<ul style="list-style-type: none"> • Menandakan gunung berapi yang segera atau sedang meletus atau ada keadaan kritis yang menimbulkan bencana • Letusan pembukaan dimulai dengan abu dan asap • Letusan berpeluang terjadi dalam waktu 24 jam 	<ul style="list-style-type: none"> • Wilayah yang terancam bahaya direkomendasikan untuk dikosongkan • Koordinasi dilakukan secara harian • Piket penuh
SIAGA	<ul style="list-style-type: none"> • Menandakan gunung berapi yang sedang bergerak ke arah letusan atau menimbulkan bencana • Peningkatan intensif kegiatan seismik • Semua data menunjukkan bahwa aktivitas dapat segera berlanjut ke letusan atau menuju pada keadaan yang dapat menimbulkan bencana • Jika tren peningkatan berlanjut, letusan dapat terjadi dalam waktu 2 minggu 	<ul style="list-style-type: none"> • Sosialisasi di wilayah terancam • Penyiapan sarana darurat • Koordinasi harian • Piket penuh
WASPADA	<ul style="list-style-type: none"> • Ada aktivitas apa pun bentuknya • Terdapat kenaikan aktivitas di atas level normal • Peningkatan aktivitas seismik dan kejadian vulkanis lainnya • Sedikit perubahan aktivitas yang diakibatkan oleh aktivitas magma, tektonik dan hidrotermal 	<ul style="list-style-type: none"> • Penyuluhan/sosialisasi • Penilaian bahaya • Pengecekan sarana • Pelaksanaan piket terbatas
NORMAL	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak ada gejala aktivitas tekanan magma • Level aktivitas dasar 	<ul style="list-style-type: none"> • Pengamatan rutin • Survei dan penyelidikan

Sumber : Badan Geologi – Kementerian ESDM

Bencana erupsi gunung api terjadi sebagai akibat sebaran dari material-material vulkanik, baik material cair, padat maupun gas, yang dikeluarkan pada saat terjadi erupsi.

Lava, adalah magma yang merupakan material cair, yang keluar kepermukaan bumi pada saat terjadi erupsi *effusif* gunung api, namun dapat pula terlempar keluar pada saat erupsi yang *explosif*. *Lava* yang berupa masa cair kental panas dengan temperatur $>500^{\circ}\text{C}$ bergerak menuruni lereng, meskipun mengalir lambat namun mempunyai daya merusak yang tinggi. Biasanya mengalir melalui alur-alur tertentu, menyusuri lembah-lembah pada lereng gunung, walaupun terkadang menyimpang keluar dari alur yang biasa dilaluinya. Penyimpangan aliran *lava* dari alur yang biasa dilalui inilah yang sering menjadi bencana yang menimbulkan korban, sehingga kemungkinan perubahan alurnya perlu diidentifikasi.

Pada umumnya jalur aliran *lava* sudah dikenal, sehingga relatif mudah untuk dihindari. Bahkan pengenalan alur aliran lava ini dapat menjadi obyek wisata gunung api yang menarik, oleh karena dapat dilihat dari dekat. Hal seperti ini dijumpai pada erupsi *effusif* gunung api Kilauea di Hawaii.



Sumber : <https://wallaceterrycjr.com/2016/02/29/the-serenity-of-big-volcanoes-recovery-running-around-kilauea/>

Gambar 6.51. : Aliran *Lava* pada erupsi *effusif* gunung Kilauea – Hawaii.

Pyroclastic, merupakan material padat yang hancur dan tersebar oleh erupsi eksplosif dari gunung api dalam berbagai ukuran. Umumnya tertimbun pada lereng-lereng disekitar kepundan pusat erupsi gunung api, namun material yang halus dalam bentuk debu vulkanik dapat tersebar jauh terutama pada erupsi eksplosif yang kuat dengan tingkat *VEI* tinggi.

Walaupun endapan debu vulkanik dalam jangka panjang dapat menyuburkan tanah pertanian dan perkebunan, namun sesaat dalam jangka pendek timbunan debu vulkanik yang tebal akan menjadi bencana tak langsung, yang merusak dan mematikan tetumbuhan. Sementara itu timbunan debu vulkanik tebal pada atap-atap bangunan, dapat merobohkan bangunan. Sebaran debu vulkanik yang pekat di udara juga akan dapat mempengaruhi kesehatan masyarakat. Debu vulkanik yang sangat halus apabila terhisap akan dapat mengganggu dan menyebabkan infeksi pada saluran pernafasan.

Pada erupsi eksplosif yang sangat kuat, debu vulkanik dapat tersebar sampai ratusan sampai ribuan kilometer, seperti pada erupsi gunung Galunggung (1982) dan gunung Kelud (2010). Bahkan pada erupsi gunung Tambora (1815) dan gunung Krakatau (1883), debu vulkanik yang dilontarkan tersebar hampir meliputi seluruh permukaan bumi, sehingga mempengaruhi iklim secara global. Erupsi gunung Tambora (1815) misalnya, telah menjadikan daratan Eropa mengalami tahun tanpa musim panas para tahun 1816.



Sumber : MONGABAY INDONESIA - www.mongabay.co.id/tag/meletus

Gambar 6.52. : Lontaran dan endapan abu vulkanik, erupsi gunung Kelud (2014).

Awan panas, adalah termasuk material padat *pyroclastic* dengan temperatur tinggi, yang meluncur menuruni lereng oleh sebab gaya gravitasi, atau bahkan ditembakkan dengan kecepatan sangat tinggi pada letusan eksplosif yang kuat dengan skala *VEI* yang tinggi.

Arah luncuran awan panas ini umumnya melalui jalur-jalur yang biasa dilalui, yang dapat dikenali dari bentuk-bentuk bentang alamnya. Seperti pada kawah-kawah yang berbentuk tapal kuda misalnya, menunjukkan arah luncuran material *pyroclastic* termasuk awan panas, pada bagian dinding kawah yang terbuka, walaupun tidak menutup kemungkinan adanya luncuran material vulkanik yang menyimpang, keluar dari jalur-jalur tradisional tersebut. Namun demikian, pada erupsi gunung api yang mempunyai perioda ulang panjang, ciri bentuk bentang alam tersebut terkadang memudar tidak dikenali, bahkan dilupakan. Sehingga mengurangi tingkat kewaspadaan masyarakat sekitarnya, dan menimbulkan korban bencana, ketika erupsi benar-benar terjadi, seperti pada peristiwa erupsi gunung Sinabung, yang mempunyai perioda ulang erupsi sekitar 200 tahun.



Sumber : *Ekliptika* – <https://ekliptika.wordpress.com/category/sinabung/>

Gambar 6.53. : Luncuran awan panas erupsi gunung Sinabung (2010).

Banjir Lahar Dingin yang terjadi pada kaki gunung api, tidak selalu berkaitan langsung dengan aktivitas gunung api. Lahar dingin sendiri adalah merupakan lumpur yang terbentuk dari material vulkanik dalam berbagai ukuran, yang tertimbun pada lereng-lereng gunung api disekitar pusat erupsinya. Timbunan material yang belum ter-konsolidasi ini, apabila tercampur air sampai jenuh akan berubah menjadi lumpur, yang oleh gaya gravitasi mengalir menuruni lereng sebagai banjir lahar. Aliran lahar ini mempunyai daya merusak yang tinggi sehingga berpotensi menyebabkan bencana. Curah hujan yang tinggi pada daerah ber-iklim tropis yang basah, ber-potensi untuk memicu terjadinya banjir lahar ini. Maka banjir lahar dingin disini tidak berhubungan langsung dengan erupsi gunung api, namun berkaitan dengan curah hujan yang tinggi, sehingga disebut juga sebagai *lahar hujan*. Aliran banjir lahar dingin pada dasarnya dapat diidentifikasi, yaitu dengan meng-identifikasi lokasi dimana material-material vulkanik ter-akumulasi, dan mempelajari bentuk-bentuk bentang alam lembah yang memungkinkan untuk menjadi jalur aliran lahar dingin. Maka, mitigasi bencana banjir lahar dingin dapat dilakukan pada jalur aliran yang biasa dilaluinya. Salah satu upaya mitigasi yang dapat dilakukan adalah dengan membangun *Sabo Dam*.

Sabo Dam merupakan bangunan bendungan dengan pelimpas yang dibangun untuk mencegah bahaya banjir lahar. Fungsi *sabo dam* secara lebih khusus adalah sebagai bangunan penahan sementara lahar yang akan turun dari hulu ke hilir secara maksimal, untuk kemudian dialirkan sesuai kapasitas daya tampung saluran dibagian hilir, sehingga tidak melimpas keluar dari salurannya. Teknik *sabo dam* yang diperkenalkan oleh *Tomoaki Yokota* ini memiliki manfaat selain sebagai pengendali lahar akibat letusan gunung api, juga sebagai pengendali erosi hutan dan daerah pertanian serta mencegah bahaya longsor. Material vulkanik berupa pasir dan bebatuan yang tertahan di *sabo* juga dapat dimanfaatkan sebagai material bahan bangunan.

Banjir Lahar Panas, pada dasarnya sama dengan banjir lahar dingin. Namun demikian, banjir lahar panas terjadi pada gunung api yang memiliki danau kawah dengan volume air danau yang cukup besar, dan terjadi berkaitan langsung dengan aktivitas erupsi gunung api yang bersangkutan. Yaitu dimana peningkatan aktivitas gunung api akan memanaskan air danau kawah, yang kemudian dilontarkan pada saat erupsi, sehingga bercampur dengan material vulkanik pada

lereng gunung api, membentuk lumpur panas yang disebut sebagai lahar panas, yang meluncur menuruni lereng.

Salah satu cara mitigasi bencana lahar panas ini adalah dengan mengurangi volume air danau kawah. Yaitu seperti yang dilakukan pada gunung Kelud, dimana terowongan drainase menembus badan gunung dibangun untuk mengeluarkan air danau kawah. Namun demikian, terowongan tersebut saat ini tidak lagi berfungsi dengan telah menghilangnya danau kawah setelah erupsi 2010, tertutup oleh kubah lava baru yang terbentuk.

Gas Beracun Gunung Api, terbentuk dari senyawa-senyawa volatile magma yang terbebaskan pada saat magma bergerak mendekati permukaan, atau sebagai produk dari reaksi kimia dengan batuan yang diterobosnya. Produk gas yang dihasilkan tidak selalu dikeluarkan pada saat erupsi, namun juga dapat diproduksi setiap saat. Gas beracun ini dapat keluar melalui rongga atau rekahan yang ada. Gas utama yang sering muncul adalah CO, CO₂, H₂S, NO_x, SO₂, dan HCl. Namun gas beracun yang sering menimbulkan korban adalah gas CO, walaupun tidak menutup kemungkinan bahwa gas yang lainnya pun dapat menimbulkan bencana pula. Kompleks gunung berapi yang sering mengeluarkan gas beracun salah satunya adalah kompleks gunung api Dieng di Jawa Tengah, yaitu pada kawah Sinila dan kawah Timbang.

- *Gas CO (gas karbon monoksida)*

Karbon monoksida merupakan produk pembakaran yang tidak sempurna. Karbon monoksida (CO) merupakan senyawa yang tidak berbau, tidak berasa, dan pada suhu normal berbentuk gas yang tidak berwarna. Hal inilah yang menyebabkan gas CO menjadi gas yang mematikan bila terhisap sampai pada takaran tertentu.

Pernah pada tanggal 28 Mei 2011, kadar gas CO meningkat mencapai 0.86 % dikawasan kawah Timbang kompleks gunung api Dieng. Sebelumnya juga pernah terjadi peristiwa bencana gas beracun di kawah Sinila pada tahun 1979, yang menelan korban 149 penduduk meninggal.

Salah satu kemampuan gas CO yang masuk ke paru-paru dan masuk ke pigmen merah atau hemoglobin mengakibatkan terjadinya ikatan carboxy hemoglobin yang lebih stabil

dibandingkan ikatan oksigen hemoglobin. Dengan terjadinya ikatan carboxy hemoglobin ini membuat aktifitas peredaran oksigen keseluruh tubuh menjadi terganggu, sehingga proses metabolisme otot dan fungsi enzim intra seluler juga terganggu. Kondisi ini akan lebih parah pada orang yang mengalami gangguan otot jantung atau sirkulasi darah perifer. Selain itu dampak yang diakibatkan dari gas CO bervariasi tergantung dari status kesehatan individu. Orang yang berbadan gemuk dapat mentolerir pajanan CO sampai kadar carboxy hemoglobinnya (HbCO) mencapai 40%. Kondisi ini akan berbeda jika dialami oleh orang yang menderita penyakit jantung atau paru-paru. Kadar CO yang tinggi juga dapat menyebabkan perubahan tekanan darah, ritme jantung abnormal bahkan gagal jantung, dan kerusakan pembuluh darah perifer.

Gejala yang muncul ketika terjadi keracunan gas CO pada konsentrasi rendah mirip dengan gejala flu, pusing, pernafasan terganggu dan rasa mual. Pada konsentrasi tinggi bisa langsung menimbulkan kematian mendadak. Tindakan preventif yang bisa diambil untuk meminimalisir keadaan yang tidak diinginkan adalah dengan memasang detektor karbon monoksida. Detektor ini akan mendeteksi adanya gas CO pada tingkat tertentu dan memberikan peringatan dengan suara alarm. Selain itu juga dapat menggunakan cara lain yaitu penggunaan masker dan alat pelindung diri dan menjauhi tempat-tempat yang berpotensi mengeluarkan gas CO. Apabila terjadi keracunan pada seseorang hal yang bisa dilakukan adalah memberikan nafas buatan dan langsung membawa korban ke puskesmas atau rumah sakit terdekat.

- ***Gas CO₂ (gas karbon dioksida)***

Gas ini berbahaya karena tidak berbau dan tidak berwarna. Gas ini memiliki berat jenis lebih tinggi dari udara, sehingga mudah terbawa ke tempat yang lebih rendah, seperti pemukiman penduduk ataupun lembah-lembah.

Peningkatan kadar karbon dioksida dapat menimbulkan masalah gangguan pernafasan, dengan tingkat keparahan sesuai kadarnya di dalam udara yang terhisap. Pada kadar lebih dari 5

persen gas ini dapat menimbulkan sesak nafas, sedangkan pada kadar lebih 30 persen dapat menyebabkan kematian.

Dalam *Emergency Responses Guidebook 2008*, Karbon dioksida termasuk gas inert yang aman dalam kadar yang masih normal namun beracun pada kadar yang tinggi.

- **Gas Hidrogen Sulfida (H_2S)**

Gas hidrogen sulfide (H_2S) mempunyai sifat asam, merupakan gas tidak berwarna, berbau busuk seperti bau telur busuk, berat jenis sekitar 1.19, termasuk gas beracun, mudah terbakar dan dapat membentuk campuran yang eksplosif dengan udara. Gas ini yang lebih berat dari udara, termasuk gas berbahaya dan dapat dikenali dari baunya yang tajam. Dalam kadar rendah, gas ini dapat memicu iritasi pada mata, dan dalam kadar yang tinggi dapat mengiritasi pernafasan. Sesuai *Emergency Response Guidebook 2008*, hidrogen sulfida termasuk gas beracun dan mudah terbakar sehingga sangat berbahaya. Indikasi dan bahaya kadar gas hidrogen sulfide bagi kesehatan adalah sebagai berikut :

Tabel 6.6. : Indikasi dan bahaya kadar gas hydrogen sulfide

10-20 ppm	Berbau seperti telur busuk, tidak berbahaya
20-100 ppm	Pusing kepala, aman untuk 8 jam exposure
100-200 ppm	Indera penciuman "hilang", "menusuk" mata dan telinga
500 ppm	Susah nafas selama 30 menit
700 ppm	Meninggal dalam 15 menit
1000 ppm	Mati dalam 1 menit

Sumber : *Emergency Response Guidebook 2008*

- **Gas SO_2 (Sulfur dioksida)**

Gas ini mudah dikenali karena memiliki bau yang cukup menyengat. Keracunan gas ini dapat menyebabkan sulit bernafas, sakit dada, iritasi pada mata, hidung dan tenggorokan, batuk-batuk dan lain-lain. Berdasarkan pada *Emergency Response*

Guidebook 2008, sulfur dioksida termasuk gas korosif, memiliki potensi bahaya pada kesehatan yaitu :

- Beracun, dapat berakibat fatal jika terhisap, tertelan dan terserap melalui kulit.
- Uap SO₂ dapat mengiritasi dan korosif.
- Kontak dengan gas atau gas cair dapat menyebabkan luka bakar, luka parah dan / atau radang dingin.
- Pembakaran api akan dapat menyebabkan iritasi, korosif dan / atau gas beracun.

Selain memiliki potensi bahaya kesehatan gas ini memiliki potensi bahaya lain yaitu :

- Dapat membakar walaupun tidak mudah terbakar.
- Uap dari gas cair pada dasarnya lebih berat daripada udara dan dapat menyebar disepanjang tanah.
- Dapat bereaksi dengan air sehingga menimbulkan kontaminasi.

- ***Gas NO_x (oksida2 nitrogen)***

NO_x adalah salah satu partikulat yang membawa dampak terhadap suhu dan kualitas atmosfer. NO_x atau oksida nitrogen adalah kelompok gas yang ada di atmosfer. Oksida nitrogen terdiri dari gas NO atau nitrogen monoksida dan nitrogen dioksida atau NO₂. NO adalah gas yang terbanyak dari jumlah NO_x yang ada di udara. Kandungan NO_x didaerah gunung api juga dipengaruhi oleh aktifitas gunung tersebut. Pembentukan dari gas NO dan NO₂ merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen yang ada diudara. Reaksi antara oksigen dan nitrogen akan membentuk NO, sedangkan reaksi dimana kadar oksigennya lebih banyak akan menghasilkan NO₂. Kadar NO_x setiap harinya dapat bervariasi sebagai berikut :

1. Kadar NO_x stabil sebelum matahari terbit dan dapat sedikit lebih tinggi dari kadar minimum hariannya.
2. Sekitar jam 6-8 pagi kadar NO meningkat seiring meningkatnya aktivitas manusia.

3. Kadar ozon dapat meningkat seiring menurunnya kadar NO.
4. Produk pencemaran NO_x dapat berupa asam nitrat, yang kemudian diendapkan sebagai garam nitrat didalam air hujan dan debu.

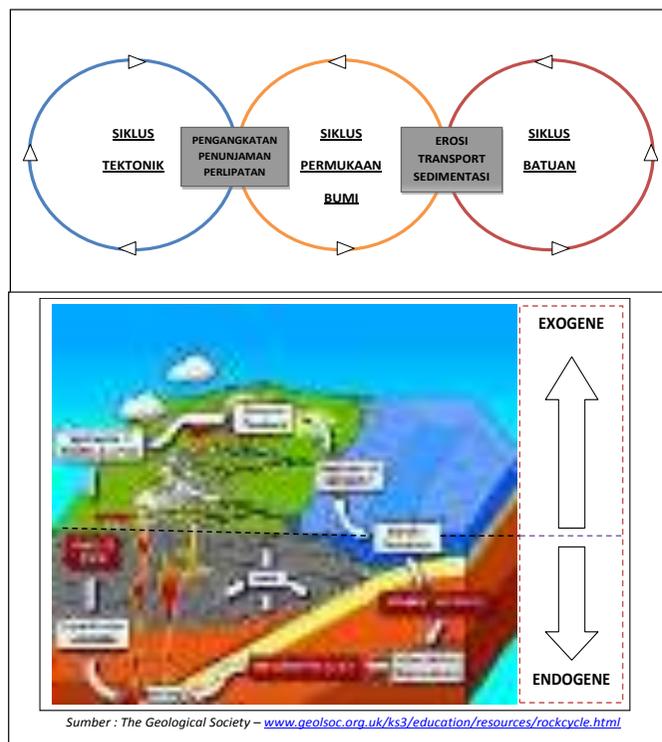
NO_x meliputi gas-gas seperti NO dan NO₂, namun yang berbahaya adalah NO₂ oleh karena dapat berdampak keracunan sebagaimana halnya gas CO. Sementara itu gas NO diudara dalam keadaan ambient normal dapat mengalami oksidasi menjadi NO₂.

NO₂ yang terhisap akan dapat meracuni paru2. Yaitu dimana kadar NO₂ yang melebihi 100 ppm dapat menyebabkan edema paru-paru (pembengkakan pulmonari), sementara itu pada kadar 800 ppm dapat mengakibatkan kematian dalam waktu pemajanan 29 menit atau kurang. Pemajanan pada kadar 5 ppm selama 10 menit dapat mengakibatkan gangguan pernafasan. Maka, untuk meminimalkan dampak buruk saat berada dilingkungan yang rawan konsentrasi gas2 NO_x, perlu melengkapi diri dengan alat pelindung seperti masker.

7

DINAMIKA EKSOGEN DAN POTENSI BENCANA ALAM GEO-KLIMATOLOGI

Proses dinamika alam pada permukaan bumi, pada dasarnya akan selalu berupaya terus menerus untuk mencapai keseimbangan. Perubahan-perubahan pada permukaan bumi oleh gaya-gaya *endogen* dari dalam perut bumi ataupun oleh faktor-faktor penyebab lainnya, akan dapat memicu bekerjanya gaya-gaya *eksogen* dari luar, untuk menyeimbangkannya kembali.



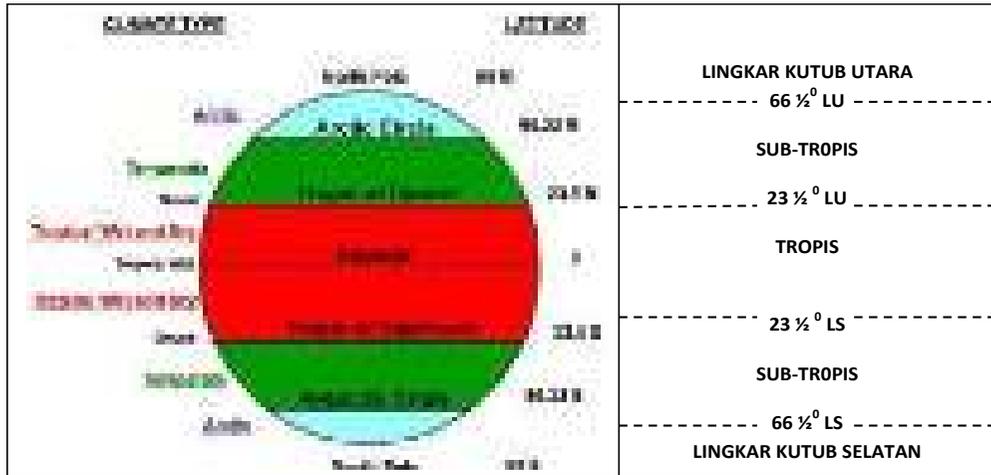
Gambar 7.1. : Interaksi gaya-gaya *endogen* dan *eksogen*.

Interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi menyebabkan terjadinya pengangkatan-pengangkatan pada permukaan bumi, dan juga penunjaman-penunjaman membentuk bagian-bagian yang cekung. Maka proses-proses *eksogen*, yang merupakan akibat dari interaksi antara permukaan bumi dengan atmosfer yang menyelimutinya, dengan serta merta akan menghancurkan dan mengerosi bagian-bagian yang terangkat, serta memindahkan material-material hasil erosinya untuk mengisi bagian-bagian yang cekung dipermukaan bumi. Proses-proses tersebut berjalan dengan bantuan berbagai media, baik berupa air, angin ataupun es (*gletscher*), dimana sirkulasi air merupakan media utama penggerak proses-proses *eksogen* tersebut.

Proses penyeimbangan oleh gaya-gaya *eksogen*, adakalanya terpicu untuk bergerak dengan cepat, sehingga menimbulkan gangguan atau bahkan kerusakan yang merugikan. Maka dalam hal ini, proses *eksogen* telah menimbulkan bencana. Seperti halnya gerakan tanah atau tanah longsor yang menimbulkan korban bencana, sesungguhnya hanyalah proses penyeimbangan *eksogen* yang dipercepat. Demikian pula dengan bencana banjir, yang sesungguhnya merupakan siklus hidrologi yang dipercepat.

Walaupun proses-proses *eksogen* pada dasarnya merupakan proses klimatologis, namun dapat dipengaruhi pula oleh proses-proses *endogen*, seperti halnya gempa bumi dan erupsi gunung api, sehingga dapat juga disebut sebagai proses *Geo-Klimatologi*. Sedangkan bencana alam yang terjadi sebagai akibat percepatan proses penyeimbangannya, boleh juga disebut sebagai bencana alam *Geo-Klimatologi*.

7.1. Zonasi Iklim



Sumber : andrewhaeipbcc.weebly.com/effect-of-latitude.html

Gambar 7.2. : Zona iklim global di bumi secara geografis.

Peredaran bumi mengitari matahari dan rotasi bumi pada porosnya, menghasilkan reaksi berbeda pada berbagai bagian dipermukaan bumi, sesuai posisinya terhadap matahari, seperti tercermin pada zona iklim yang ber beda-beda. Posisi matahari terhadap permukaan bumi, yang bergeser secara periodik diantara garis balik utara ($23\frac{1}{2}^{\circ}$ Lintang Utara) dan garis balik selatan ($23\frac{1}{2}^{\circ}$ Lintang Selatan) membagi permukaan bumi kedalam zona iklim yang berbeda, setidaknya menjadi 3 zona iklim, yaitu : *Zona Tropis*, *Zona Sub-Tropis* dan *Zona Kutub*.

7.1.1. Zona Tropis

Zona Tropis dapat didefinisikan sebagai daerah yang secara geografis terletak diantara garis $23\frac{1}{2}^{\circ}$ lintang utara dan $23\frac{1}{2}^{\circ}$ lintang selatan, dengan iklim tropis. Pada dasarnya wilayah yang termasuk dalam iklim tropis, terdiri dari daerah tropis kering yang meliputi padang pasir, *stepa*, dan *savana* kering, dan daerah tropis basah yang meliputi hutan tropis, daerah-daerah dengan angin musim dan *savana* lembab.

Adapun ciri-ciri iklim tropis adalah sebagai berikut :

- Suhu udara rata-rata tinggi, oleh karena dilalui oleh peredaran matahari. Umumnya suhu udara berkisar antara 20 - 23°C. Bahkan di beberapa tempat rata-rata suhu tahunannya dapat mencapai 30°C.
- Amplitudo suhu rata-rata tahunan yang kecil, dimana disekitar khatulistiwa (*equator*) berkisar antara 1 - 5°C, sementara kisaran amplitudo hariannya dapat lebih besar.
- Tekanan udara relatif rendah dengan perubahan secara perlahan dan beraturan.
- Curah hujan relatif tinggi, lebih tinggi dari daerah-daerah lainnya di bumi dan tidak mengenal musim dingin.
- Terdapat gerakan-gerakan aliran udara konveksi.

Didalam wilayah dengan iklim tropis hanya dikenal 2 musim, yaitu musim kering (kemarau) dan musim basah (hujan). Walaupun tidak semua wilayah beriklim tropis mempunyai iklim spesifik yang sama, namun umumnya mempunyai batas rentang suhu tahunan yang relatif sama.

Iklim yang basah dengan curah hujan yang tinggi, menyebabkan proses pelapukan pada batuan, terutama dekomposisi kimiawi berjalan lebih intensif, sehingga seringkali membentuk tanah pelapukan yang tebal, yang memungkinkan tetumbuhan dapat berkembang dengan baik, sehingga membentuk hutan-hutan tropis yang basah (*tropical rainforest*). Maka dengan penyinaran matahari terus menerus sepanjang tahun, mengintensifkan proses *fotosntesis* yang menghasilkan oksigen (O_2), sehingga sering disebut sebagai paru-paru dunia, oleh karena merupakan pemasok utama oksigen (O_2) di atmosfer.

Di belahan bumi Barat, negara-negara yang termasuk dalam *Zona Tropis* diantaranya adalah Meksiko, seluruh negara di Amerika Tengah, kepulauan Karibia dan Bahama, bagian utara Amerika Selatan termasuk Kolombia, Equador, Peru, Bolivia, Venezuela, Guyana, Suriname, Guyana Perancis, serta bagian utara dari Chile, Argentina, Paraguay dan Brasil.

Di Afrika hampir seluruh negara berada dalam *Zona Tropis*, kecuali Maroko dan Tunisia di utara, dan Lesotho, Swaziland dan Afrika Selatan di selatan. Sementara Timur Tengah memiliki empat

negara tropis yaitu Yaman, sebagian dari Arab Saudi, Oman dan Uni Emirat Arab. Sementara itu sebagian besar India di Asia Selatan, dan seluruh negara Asia Tenggara berada dalam *Zona Tropis*.

Australia bagian utara, Mikronesia, kepulauan Marshall, Kiribati dan sebagian besar negara pulau lainnya disekitar Oceania Pasifik Selatan, juga termasuk kedalam *Zona Tropis*.



Sumber : <https://www.hopespeak.com/blog/wp-content/uploads/2014/12/The-Amazon-Rainforest.jpg>

Gambar 7.3. : Hutan Tropis Basah, Amazon – Brazil

7.1.2. Zona Lingkar Kutub

Zona ini meliputi wilayah yang berada didalam lingkaran garis lintang 60° lintang utara dan 60° lintang selatan, dengan dicirikan oleh iklim kutub yang dingin. Wilayahnya meliputi Amerika Utara, Greenland, dan pantai utara Siberia untuk *Zona Lingkar Kutub Utara*. Sedangkan pada *Zona Lingkar Kutub Selatan* meliputi daratan benua Antartika.

Ciri-ciri iklim kutub adalah sebagai berikut :

- Hampir seluruh wilayahnya tertutup es, dimana komposisi tanahnya sebagian besar merupakan batuan induk yang mengalami sedikit pelapukan.
- Usia tetumbuhan relatif pendek, berkisar antara 30 - 140 hari, terdiri dari jenis lumut-lumutan dan semak-semak yang berkembang hanya pada musim panas.

- Memiliki musim dingin yang panjang (9 bulan), serta musim panas yang berlangsung singkat (3 bulan).
- Curah hujan rendah (100 - 250 mm/tahun).
- *Permafrost*, yaitu memiliki tanah bagian bawah yang membeku secara permanen.
- Kecepatan angin yang tinggi dan suhu yang sangat dingin dengan kisaran suhu rata-rata 10⁰C s/d -35⁰C.
- Rawa dan genangan air permukaan terbentuk hanya pada musim panas, sebagai akibat mencairnya es dipermukaan tanah.
- Sangat sedikit curah hujan tahunan, dan air permukaan tidak dapat menembus *permafrost* dibawahnya sehingga hanya akan tergenang didalam kolam yang dangkal selama musim panas yang pendek.



Sumber : Sergio Pitamitz – www.bbc.co.uk/nature/places/Antartctica

Gambar 7.4. : Benua Antartika didalam zona Lingkaran Kutub Selatan

7.1.3. Zona Sub-Tropis

Secara geografis, *Zona Sub-Tropis* terletak di antara *Zona Tropis* dengan *Zona Lingkaran Kutub*. *Zona Sub-Tropis utara* terletak diantara garis balik utara (23 ½⁰ LU) hingga *Lingkaran Kutub Utara* atau disebut sabagai *Lingkar Artik* (66 ½⁰ LU). Sedangkan *Zona Sub-Tropis Selatan* terletak diantara garis balik selatan (23 ½⁰ LS) hingga *Lingkaran Kutub Selatan* atau disebut sebagai *Lingkar Antartika* (66 ½⁰ LS). Namun demikian, dalam literatur klimatologi zona ini lebih rinci dipisahkan

menjadi 2 sub-zona, yaitu zona iklim sub-tropis diantara $23\frac{1}{2}^{\circ}$ LU/LS sampai 40° LU/LS, dan zona iklim sedang diantara 40° LU/LS dengan *Lingkar Kutub Utara/Selatan* ($66\frac{1}{2}^{\circ}$ LU/LS).

Ciri-ciri iklim *Sub-Tropis*, diantaranya adalah banyak terdapat gerakan-gerakan udara siklonal, tekanan udara yang sering ber ubah-ubah, arah angin yang bertiup ber ubah-ubah tidak menentu, dan sering terjadi badai secara mendadak. Amplitudo suhu tahunan lebih besar dan amplitudo suhu harian lebih kecil dibandingkan dengan daerah iklim lainnya.

Zona Sub-Tropis memiliki 4 musim, yaitu musim semi, musim panas, musim gugur, dan musim dingin. Keempat musim tersebut memiliki karakteristik tersendiri, dengan suhu maksimal, suhu minimal, kelembaban, maupun kondisi kehidupan organisme yang berbeda. *Zona Sub-Tropis* dengan musim hujan jatuh pada musim dingin, dengan musim panas yang kering disebut beriklim *Mediterania*. Sedangkan apabila curah hujan jatuh pada musim panas dengan musim dinginnya yang kering disebut beriklim *Tiongkok*.



Sumber : www.fresher.ru/2014/10/17/osen-v-amsterdame

Gambar 7.5. : Panorama musim gugur pada *Zona Sub-Tropis* di Netherland

Zona Sub-Tropis dibelahan bumi utara meliputi :

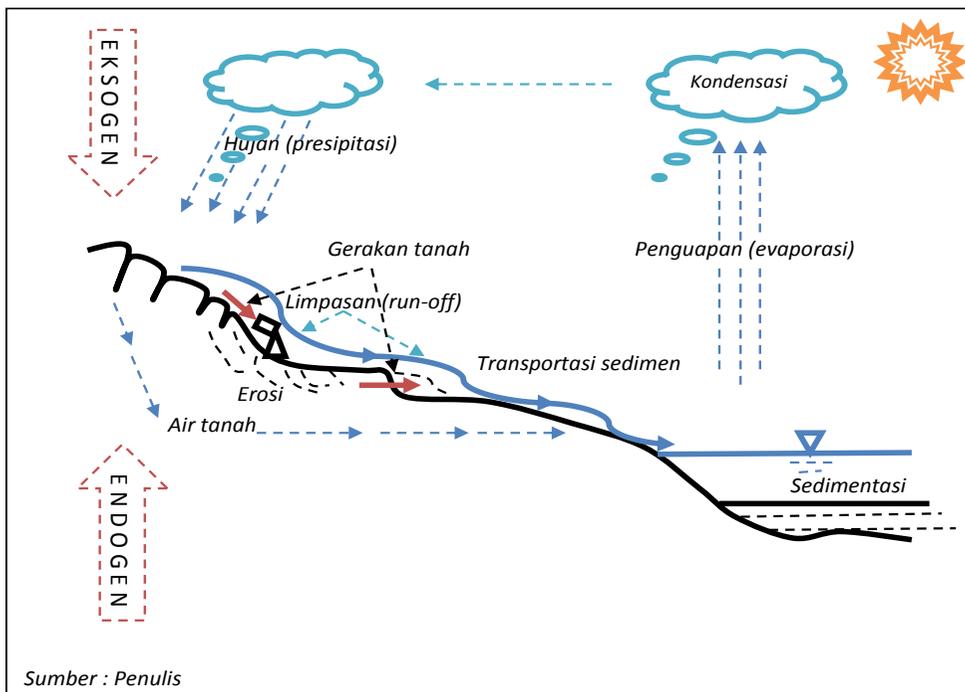
- Sebagian besar Eropa, kecuali Skandinavia.
- Kawasan Asia Tengah, Asia Timur, dan Asia Barat sebelah utara.
- Amerika Serikat dan sekelilingnya
- Afrika Utara dan Afrika Bagian Selatan.

Sedangkan pada belahan bumi bagian selatan meliputi :

- Australia bagian selatan.
- Bagian selatan Amerika Selatan.

7.2. Erosi dan Gerakan Tanah

Erosi dan gerakan tanah adalah salah satu proses penyeimbangan, dimana bagian-bagian dari permukaan bumi yang terangkat oleh proses *endogen* dihancurkan dan dipindahkan, untuk mengisi bagian-bagian cekung dan lebih rendah.



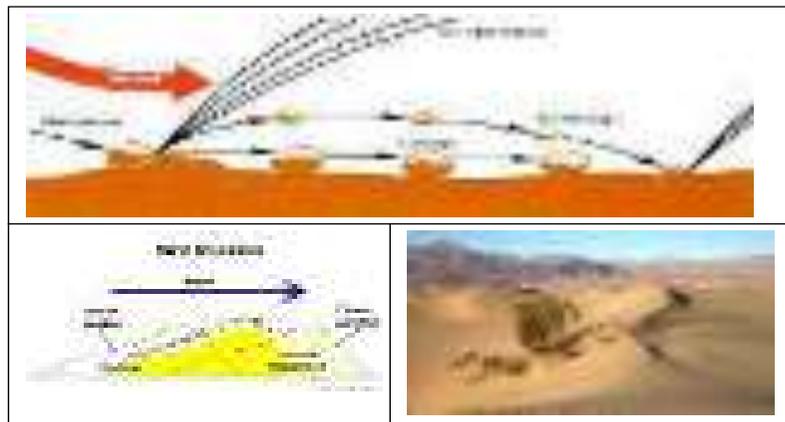
Gambar 7.6. : Proses penyeimbangan melalui erosi dan gerakan tanah

Erosi berjalan oleh adanya pergerakan dari media erosi, seperti air, es (*gletscher*) ataupun angin. Sedangkan gerakan tanah, atau yang lebih dikenal sebagai tanah longsor, berjalan oleh adanya gaya gravitasi, yang sering kali juga dipicu oleh erosi, sehingga mempercepat pemindahan material tanah atau batuan ketempat yang lebih rendah.

7.2.1. Erosi

Apabila pelapukan merupakan proses pelepasan ikatan komponen-komponen batuan dari batuan asalnya, baik secara mekanis maupun kimiawi, erosi memisahkan komponen-komponen yang terlepas tersebut secara fisik untuk kemudian dipindahkan. Maka, proses pemindahan tersebut akan dipengaruhi oleh kinerja gaya gravitasi dan media erosi yang terkait (air, es, angin).

- Erosi Angin



Sumber : John W Johnston in NIPISSING BEACH NATURE TRAIL
individual.utoronto.ca/john_johnston/ipperwash/home.html

Gambar 7.7. : Proses erosi dan pemindahan material oleh media angin, membentuk Gumuk Pasir (*Dunes*)

Angin sebagai udara yang bergerak mempunyai energi kinetik yang mampu untuk mengikis dan memindahkan material. Maka pada daerah dengan kecepatan angin yang tinggi, angin merupakan agen erosi dan pemindahan sedimen yang cukup signifikan, terutama untuk material-material yang berukuran halus dan kering. Maka daerah beriklim gurun di pusat-pusat benua, dan juga pantai-pantai yang berangin kencang, adalah wilayah yang potensial untuk hal tersebut.

- Erosi Es (Gletscher)

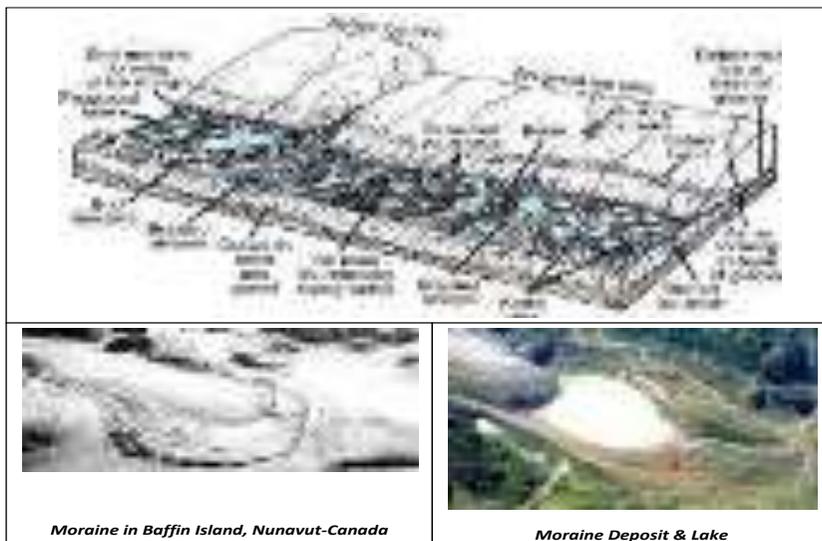
Gletscher adalah masa es yang terdiri dari butiran-butiran es, merupakan masa cair semi padat yang bergerak menuruni lereng oleh sebab gaya gravitasi. Cairan semi padat yang sangat pekat

menyebabkan pergerakan menuruni lereng menjadi sangat lambat, namun mempunyai daya *erosi* (*eskersi*) dan pengangkutan sedimen yang sangat besar, sehingga mampu mengikis batuan dasar dan mengangkutnya dalam bentuk fragmen-fragmen berukuran halus sampai bongkah-bongkah kasar. Daya erosi yang kuat pada aliran pekat yang mengalir lambat relatif ter-distribusi merata pada seluruh bidang erosi, baik pada dasar aliran maupun pada bagian sisi, sehingga meninggalkan jejak berupa lembah berbentuk “U”.



Sumber : U.S.Geological Survey photo by Bruce Molnia

Gambar 7.8. : Erosi *Glacial* membentuk lembah-lembah berbentuk “U”



Sumber : GEOCACHING - <https://www.geocaching.com>

Gambar 7.9. : Endapan *Glacial* yang disebut sebagai *Moraine*

Pengendapan terjadi manakala aliran *gletscher* kehilangan daya angkut sedimennya, ketika memasuki dataran landai dikaki lereng, dan ketika es mulai mencair, membentuk endapan yang disebut sebagai *moraine*, yang terdiri dari timbunan material klastik yang terpilah sangat buruk (*very poorly sorted*) dan berbentuk tajam-tajam (*angular*).

- **Erosi Air Permukaan**

Air adalah media erosi dan pemindahan material sedimen yang paling signifikan pembentuk roman muka bumi. Aliran air yang terus menerus mengalir sepanjang tahun mengikuti daur hidrologi, bak pisau ukir tajam yang mengikis membentuk detail permukaan bumi. Hal ini terutama terjadi didaerah beriklim tropis yang basah, dimana aliran sungai mengalir sepanjang tahun, tanpa diselingi musim dingin. Bagian air yang mengalir dipermukaan, atau limpasan permukaan yang sering disebut sebagai *run-off*, adalah media erosi yang mempunyai potensi energi untuk mengikis permukaan bumi. Faktor alam yang mengendalikan daya erosi air, adalah besarnya curah hujan, oleh karena semakin besar masa air yang mengalir semakin besar pula daya erosinya. Faktor lainnya adalah kemiringan lereng, dimana lereng yang lebih terjal akan mengalirkan air lebih deras dengan kecepatan lebih tinggi.

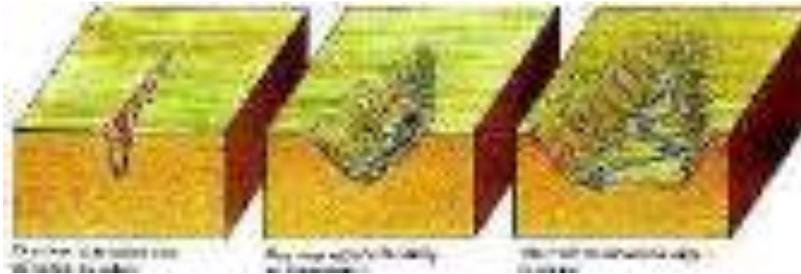
$$E_k = 0.5 m V^2$$

Dimana :

E_k = Energi Kinetik

m = Masa air; V = Kecepatan aliran air

Semakin terjal kemiringan lereng, semakin deras pula aliran permukaan yang terjadi, sehingga semakin tinggi pula energi kinetiknya dan semakin tinggi pula daya erosinya. Semakin kebawah mendekati elevasi permukaan laut, daya erosi kearah vertikal semakin berkurang, namun daya erosi lateralnyalah yang semakin meningkat dengan semakin bertambahnya masa air. Sehingga pada daerah pegunungan lembah sungai sering menunjukkan morfologi berbentuk "V", yang menunjukkan dominasi erosi vertikal. Semakin kebawah berangsur-angsur erosi kearah lateral mengambil alihnya, sehingga lembah sungai berubah lebih landai menjadi bentuk "U".

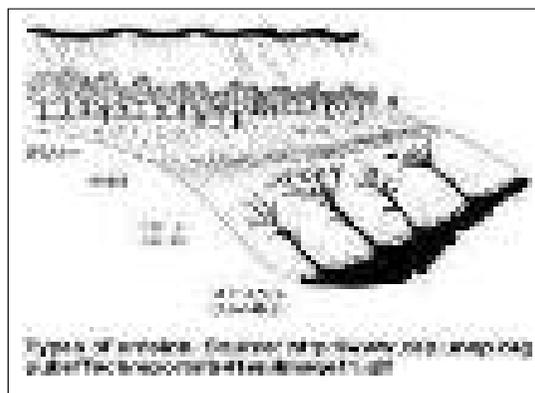


Sumber : coolgeography.co.uk/GSCE/Year 10/PhysicalWorld/Upper valley/upper_valley.htm

Gambar 7.10. : Perkembangan bentuk lembah sungai, menunjukkan perubahan arah erosi vertikal menuju lateral

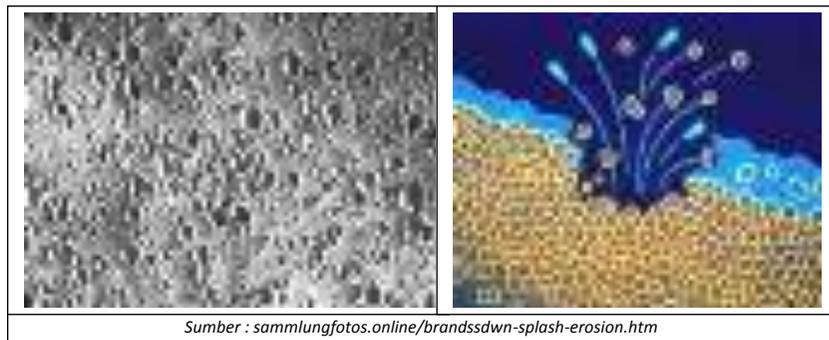
Lebih lanjut, ketika memasuki dataran rendah, aliran air sungai semakin mendekati elevasi muka air laut. Maka pengaruh daya erosi vertikal semakin menghilang, digantikan oleh erosi lateral yang semakin meningkat. Disini alur sungai menjadi dinamis bergerak berpindah-pindah, tak jarang dengan meninggalkan jejak berupa genangan-genangan melengkung berbentuk busur yang dinamakan sebagai *oxbow lake*.

Erosi air permukaan telah mulai terjadi sejak benturan air hujan ke permukaan bumi, sampai dengan terminal nya di laut. Maka berdasarkan kejadiannya, erosi terdiri dari erosi percik (*splash erosion*), erosi lembar (*sheet erosion*), erosi alur (*rill erosion*), erosi parit (*gully erosion*), erosi sungai (*river erosion*), dan erosi oleh ombak laut atau disebut sebagai *abrasi*.



Gambar 7.11. : Jenis-jenis erosi air permukaan

- **Erosi Percik (*splash erosion*)** merupakan proses dimana partikel-partikel tanah di permukaan terkelupas dari ikatannya oleh benturan energi kinetik air hujan, sehingga terlepas dan berpindah tempat. Kondisi terkelupasnya partikel-partikel tanah, arah dan jarak perpindahannya, tentu dipengaruhi oleh faktor kemiringan lereng, kecepatan dan arah angin, kekasaran permukaan tanah, dan penutup tanah. Dalam banyak hal, vegetasi penutup permukaan tanah, berperan sebagai peredam energi kinetik benturan percikan air, sehingga sering dimanfaatkan dalam upaya penanggulangan erosi.



Gambar 7.12. : Erosi percik (*splash erosion*) pada permukaan tanah

- **Erosi lembar (*sheet erosion*)** adalah erosi yang terjadi ketika lapisan tipis permukaan tanah di daerah berlereng terkikis oleh kombinasi air hujan dan air larian (*run-off*). Proses erosi lembar ini seringkali merupakan kelanjutan dari erosi percik, pada tanah permukaan yang terbuka tanpa penutup.



Gambar 7.13. : Erosi lembar (*sheet erosion*)

- **Erosi Alur (*rill erosion*)** adalah proses dimana pengelupasan dan pemindahan partikel-partikel tanah terjadi oleh aliran air *run off* yang terkonsentrasi dalam alur-alur air. Alur-alur yang terbentuk biasanya masih dangkal dan bersifat temporer, sehingga mudah hilang dengan berhentinya aliran air, dan dapat mudah pula dihilangkan dengan pengolahan tanah apabila tidak dikehendaki.



Gambar 7.14. : Erosi alur (*rill erosion*)



Gambar 7.15. : Erosi parit (*gully erosion*)

- **Erosi Parit (*gully erosion*)** terjadi sebagai perkembangan lebih lanjut dari erosi alur, dimana saluran yang terbentuk sudah semakin dalam dan lebar, serta bersifat semi permanen, walaupun hanya dialiri air pada saat ada curah hujan.
- **Erosi Sungai (*river erosion*)** adalah proses pengikisan oleh aliran air dalam sungai. Proses ini meliputi pengerusan dasar sungai (*channel erosion*) dan pengikisan pada tebing sungai (*streambank erosion*). Pengerusan dasar sungai terjadi oleh daya erosi vertikal dari aliran sungai, terutama pada lereng-lereng terjal yang ber arus deras. Sedangkan pengikisan pada tebing sungai terjadi sebagai akibat erosi lateral, terutama terjadi pada daerah dataran.



Gambar 7.16. : Erosi pada tebing sungai (*streambank erosion*)



Sumber : www.revision.co.zw/wp-content/upload/2015/06/migration-of-meanders-min-600x429.jpg

Gambar 7.17. : Skematis pola perpindahan alur sungai pada daerah dataran dan pembentukan *oxbow lake*, oleh proses erosi tebing sungai (*streambank erosion*)

Pada tingkat yang lebih lanjut, erosi tebing ini berperan dalam menggeser alur sungai didaerah dataran. Tak jarang dengan meninggalkan jejak berupa genangan berbentuk busur (*oxbow lake*), yang merupakan alur sungai lama yang telah ditinggalkan (*abandoned channel*).

- **Abrasi** adalah istilah yang sering digunakan untuk menggambarkan penggerusan tepian pantai oleh benturan ombak laut. Abrasi dapat menyebabkan kemunduran garis pantai kearah darat, atau setidaknya menghambat proses sedimentasi pada dataran pantai. Pada tepian pantai yang terjal, abrasi pada bagian bawah tebing yang diikuti oleh runtuh atau longsornya bagian atas tebing pantai, berangsur-angsur menggeser garis pantai kearah daratan.



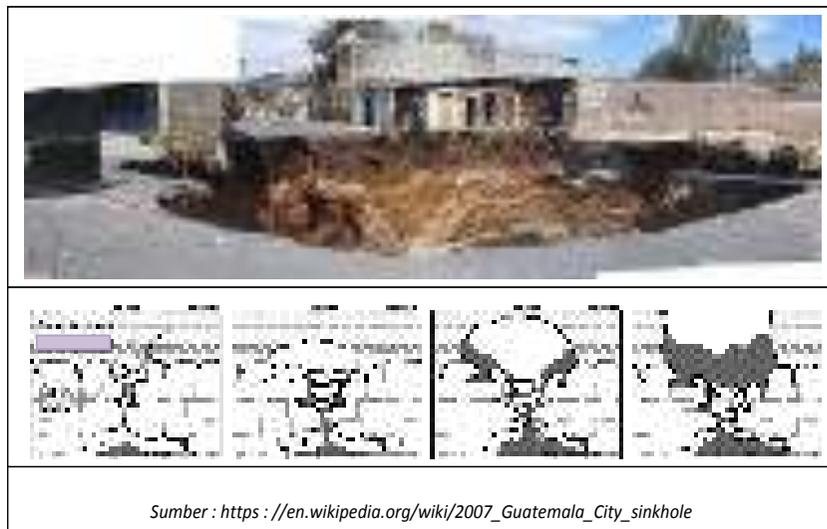
Gambar 7.18. : Abrasi pantai barat Sumatera Barat, menggeser garis pantai kearah daratan.

- Erosi Air Tanah

Pergerakan air tanah dapat menyebabkan erosi, baik secara mekanis, pelarutan secara kimiawi ataupun kombinasi keduanya. Material ter-erosi akan terbawa dan diendapkan pada tempat lain, seperti pada rongga pori batuan.

Proses pelarutan kimiawi air tanah terjadi pada daerah berbatuan yang mudah larut, seperti Batugamping (Ca CO_3) dan

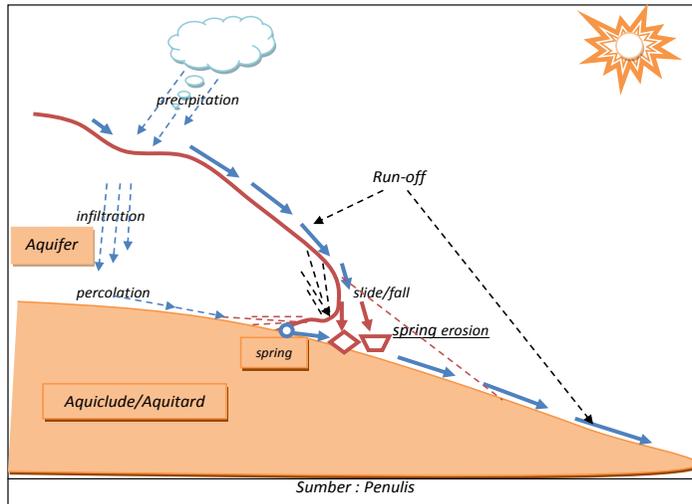
Dolomite (Ca Mg CO_3). Yaitu, dimulai dari rembesan air tanah melalui rekahan, sesar, bidang perlapisan batuan ataupun berbagai struktur bukaan lainnya, dengan disertai penggerusan dan pelarutan batuan yang mudah larut tersebut. Rekahan atau bukaan-bukaan lainnya yang tergerus dan terlarutkan akan semakin membesar dan akan membentuk jaringan gua bawah tanah. Manakala gua-gua bawah tanah tersebut semakin membesar, maka berpotensi untuk menimbulkan keruntuhan pada bagian atasnya. Hal ini akan membentuk cekungan yang mirip dengan kawah pada permukaan tanah di atasnya, yang disebut sebagai *sinkhole*. Tak jarang keruntuhan pada permukaan tanah tersebut terjadi secara mendadak, sehingga menimbulkan kerusakan.



Gambar 7.19. : Proses terbentuknya *sinkhole*, dan contoh kejadiannya di Guatemala (2007)

Pelarutan yang terus berlanjut akan semakin memperbesar *sinkhole* sehingga membentuk lembah pelarutan yang terisi air, sehingga membentuk cekungan genangan yang disebut sebagai *dolina*, yang sering dijumpai pada daerah *karst*. Pergerakan air tanah dibawah permukaan, juga dapat menimbulkan erosi secara mekanis. Air tanah yang mengalir disepanjang batas antara lapisan tanah yang lulus air (*aquifer*) dengan lapisan kedap air (*aquiclude/aquitard*) dibawahnya, mempunyai daya erosi secara mekanis. Pada mata air ketika air tanah muncul ke permukaan,

aliran air tanah akan dapat menggerus bagian atas dari mata air, sehingga membentuk lubang mata air yang semakin menjorok ke dalam ke arah hulu. Proses ini biasanya diikuti dengan longsornya bagian atas dari mata air, sehingga membentuk tebing yang terjal. Proses ini berlanjut, sehingga menyebabkan alur sungai semakin memanjang ke arah hulu, maka disebut sebagai erosi makan ke hulu atau *headward erosion*.



Gambar 7.20. : Diagram proses terjadinya *headward erosion*



Gambar 7.21. : *Headward erosion* pada lembah sungai Colorado, Utah - USA

7.2.2. Gerakan Tanah / Tanah Longsor

Secara alamiah lahan akan selalu berubah, baik oleh proses alam maupun buatan manusia. Dan secara alamiah pula akan selalu bereaksi menyesuaikan diri atas perubahan yang terjadi, untuk mencapai keseimbangannya kembali. Ketika proses penyesuaian dirinya berjalan lebih cepat, sehingga mengganggu kepentingan manusia, maka sering disebutkan bahwa lahan tersebut berada dalam kondisi tidak stabil.

Gerakan tanah (*mass movement*) adalah suatu peristiwa alam dimana masa tanah atau bebatuan bergerak menuruni kemiringan lereng oleh sebab gaya gravitasi. Sering pula disebut dalam istilah yang lebih umum sebagai tanah longsor (*landslide*). Sedangkan dari cara bergeraknyapun ber macam-macam pula. Seperti menggelincir (*sliding*), nendatan (*slumping*), roboh (*toppling*), runtuh (*falling*), merayap (*creeping*), atau mengalir (*flowing*). Demikian pula halnya dengan material yang terkait, dapat berupa masa tanah (*soil*), masa batuan (*rock*), atau bahan rombakan lainnya (*debris*). Bagaimanapun, peristiwa tersebut menunjukkan bahwa kondisi lahan berada dalam keadaan tidak stabil, dan sedang bergerak menuju kestabilannya. Walaupun gaya gravitasi bumi merupakan faktor utama penggerak gerakan tanah, namun faktor-faktor lainnya seperti gempa bumi, erupsi gunung api, kemiringan lereng, infiltrasi air tanah, abrasi ataupun erosi bahkan aktivitas manusia, dapat menjadi faktor pemicu yang mempercepat pergerakan tanah menuju keseimbangannya kembali, yang sering justru dapat menimbulkan bencana.

7.3. Kinerja Air

Air merupakan media proses *eksogen* yang paling dominan dalam proses penyeimbangan permukaan bumi. Air merupakan media penting bagi proses pelapukan batuan, media erosi dan transportasi untuk memindahkan rombakan material batuan yang terlapukan, dari daerah-daerah yang terangkat menuju cekungan-cekungan pada daerah yang lebih rendah.

7.3.1. Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi adalah peredaran air secara umum, dari laut ke atmosfer melalui penguapan (*evaporasi*), kemudian jatuh ke permukaan bumi sebagai hujan (*presipitasi*), sebagian meresap ke dalam tanah (*infiltrasi*) dan sebagian lainnya mengalir di permukaan sebagai limpasan (*run-off*), kemudian membentuk aliran sungai yang mengalir menuju ke laut. Tahapan siklus hidrologi selengkapnya meliputi proses-proses *evaporasi*, *transpirasi*, (*evapo-transpirasi*), *sublimasi*, *kondensasi*, *adveksi*, *presipitasi*, *run off*, dan *infiltrasi & perkolasi*.

- *Evaporasi*

Siklus hidrologi diawali oleh terjadinya penguapan air yang ada di permukaan bumi. Air yang tertampung pada badan air seperti danau, sungai, laut, sawah, bendungan atau waduk berubah menjadi uap air, yang terutama disebabkan oleh pemanasan matahari.

Evaporasi merubah air yang berwujud cair menjadi uap air yang berwujud gas, sehingga memungkinkannya untuk naik ke bagian atas atmosfer bumi.

- *Transpirasi*

Penguapan air di permukaan bumi tidak hanya terjadi pada badan air dan tanah, namun juga berlangsung pada jaringan makhluk hidup, seperti hewan dan tumbuhan. Penguapan semacam ini disebut sebagai *transpirasi*, yaitu merubah air yang berwujud cair dalam jaringan makhluk hidup menjadi uap air dan membawanya naik ke atas menuju atmosfer. Gabungan diantara seluruh penguapan air pada permukaan bumi, baik yang berasal dari badan-badan air permukaan maupun makhluk hidup, disebut sebagai *evapo-transpirasi*.

- *Sublimasi*

Perubahan es sebagai masa padat menjadi uap air tanpa melalui fasa cair, disebut sebagai *sublimasi*. Proses ini dapat terjadi pada zona kutub, zona sub-tropis pada musim dingin, ataupun pada puncak-puncak pegunungan tinggi dimana terdapat akumulasi es.

- **Kondensasi**

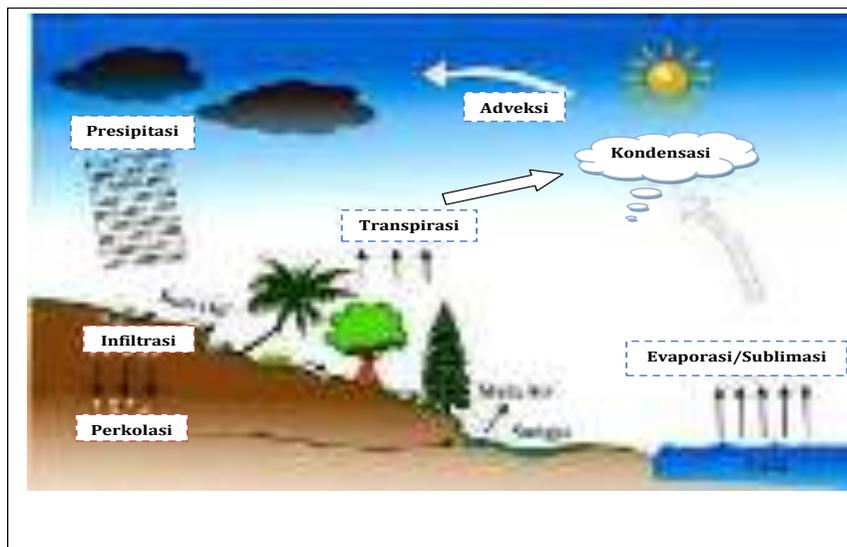
Kondensasi adalah proses akumulasi dan pepadatan uap air di atmosfer, sehingga membentuk butiran-butiran air. Seringkali terlihat dalam bentuk awan yang berwarna abu-abu gelap.

- **Adveksi**

Adveksi adalah proses perpindahan gumpalan butiran-butiran air di atmosfer, biasanya disebabkan oleh tiupan angin.

- **Presipitasi**

Ketika gumpalan butiran-butiran air di atmosfer semakin memadat sehingga semakin berat, maka oleh gaya gravitasi bumi, akan jatuh kepermukaan bumi sebagai curahan hujan atau *presipitasi*.



Gambar 7.22. : Siklus Hidrologi

- **Limpasan (Run Off)**

Bagian dari air hujan yang mengalir dipermukaan bumi menuju tempat yang lebih rendah disebut sebagai limpasan atau *run off*. Aliran air permukaan ini mengalir membentuk alur-alur (*rill*) membesar menjadi parit-parit (*gully*) sehingga kemudian bergabung membentuk aliran sungai yang lebih besar, mengalir untuk bermuara di lautan ataupun danau.

- ***Infiltrasi & Perkolasi***

Sebagian dari air hujan yang jatuh ke permukaan bumi, meresap ke bawah permukaan bumi (*infiltrasi*) melalui pori-pori tanah dan batuan, dan mengalir dibawah permukaan (*perkolasi*), untuk kemudian muncul kembali ke permukaan bumi sebagai mata air.

Namun demikian siklus hidrologi juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan iklim secara global. Maka secara lebih rinci lingkungan siklus hidrologi meliputi :

- ***Siklus Hidrologi Pendek***

Siklus ini biasa terjadi pada lingkungan samudera (*ocean environment*). Yaitu dimana evaporasi terjadi ditengah samudera luas, kemudian mengalami kondensasi, untuk kemudian terjadi *presipitasi* ke tempat semula ditengah samudera, tanpa mengalami *adveksi* ke daratan.

- ***Siklus Hidrologi Sedang***

Siklus ini umumnya terjadi di daratan yang berbatasan dengan laut, terutama pada lingkungan iklim tropis. Yaitu dimana uap air yang ter *kondensasi* diatas laut, oleh angin mengalami *adveksi* sehingga terbawa keatas daratan, untuk kemudian mengalami *presipitasi* diatas daratan sebagai curah hujan. Akhirnya mengalir diatas permukaan daratan menuju ke laut.

- ***Siklus Hidrologi Panjang***

Siklus ini terjadi pada lingkungan iklim subtropis yang memiliki musim dingin. Pada siklus panjang ini, pada musim dingin, butiran-butiran air yang ter *kondensasi* dari uap air, membeku membentuk kristal-kristal es, dan mengalami *presipitasi* sebagai hujan salju. Salju yang mengendap diatas permukaan bumi, akan membeku menjadi bongkah-bongkah es yang relatif diam tidak bergerak mengalir. Baru ketika musim dingin berakhir, bongkah-bongkah es tersebut mulai mencair dan bergerak mengalir.

7.4. Potensi Bencana Geo-Klimatologi

Dinamika *eksogen* dapat disebut sebagai proses penyeimbangan kembali permukaan bumi, atas ketidak seimbangan yang terbentuk akibat proses *endogen*. Yaitu melalui interaksinya dengan dinamika atmosfer yang menyelimutinya, sehingga dapat pula disebut sebagai proses *geo-klimatologi*.

Proses *geo-klimatologi* sendiri pada dasarnya adalah siklus alamiah yang berulang secara periodik, walaupun dengan perioda ulang yang bervariasi dan terkadang tak beraturan. Tak jarang pula berbagai siklus alamiah tersebut saling ber-interaksi, termasuk intervensi dari aktivitas manusia, sehingga menimbulkan kondisi yang ekstrem. Maka dalam keadaan seperti inilah bencana *geo-klimatologi* dapat terjadi, walaupun ber-angsur-angsur siklus alam akan menyeimbangkannya kembali.

Beberapa contoh dari bencana *geo-klimatologi* diantaranya adalah bencana banjir, kekeringan, hujan badai, *siklon tropis*, beserta dampak ikutannya seperti kebakaran hutan, kelaparan, wabah penyakit dan sebagainya.

Pada daerah-daerah ber iklim *tropis*, banjir berpotensi terjadi pada musim basah atau musim hujan, ketika curah hujan tinggi. Untuk Indonesia misalnya, yang merupakan daerah ber iklim tropis kepulauan yang dipengaruhi oleh angin *muson*, potensi banjir terjadi antara bulan Oktober-Februari ketika bertiup angin *muson* barat. Sedangkan masa kekeringan berpotensi terjadi pada bulan-bulan April sampai dengan Agustus, ketika bertiup angin *muson* tenggara. Namun pada daerah-daerah ber iklim *sub-tropis*, potensi banjir akan terjadi pada musim semi sampai dengan musim panas, yaitu ketika es dan salju mulai mencair dan mengairi sungai-sungai.

Pada posisi *Perihelion* ketika matahari berada pada titik atau jarak terdekat dengan bumi, bumi menerima intensitas radiasi matahari tertinggi, sehingga berakibat suhu menjadi lebih panas. Maka musim kemarau yang ekstrem, terutama pada daerah tropis, dapat menyebabkan kekeringan yang berkepanjangan, yang berpotensi memicu kebakaran hutan.

Banjir dalam berbagai kasus juga berpotensi memicu gerakan tanah atau tanah longsor, oleh karena daya erosinya yang tinggi. Sehingga potensi banjir seringkali dikaitkan pula dengan potensi tanah longsor.

8

BANJIR, SIKLON TROPIS & KEBAKARAN HUTAN

Proses meteorologi adalah proses yang terjadi pada lapisan atmosfer yang menyelimuti bumi, sebagai akibat pemanasan oleh radiasi matahari, dan dipengaruhi pula oleh rotasi bola bumi dan peredarannya mengelilingi matahari. Dampak dari proses-proses tersebut adalah terjadinya peredaran udara atau tiupan angin, dan perubahan musim diberbagai belahan bumi. Dinamika tiupan angin membawa serta pula uap air, yang kemudian diturunkan sebagai hujan, dan terkadang menimbulkan bencana banjir. Sementara itu, angin kering akan berdampak kepada kemarau berkepanjangan yang dapat memicu kebakaran hutan.

Dalam pengertian air yang mengalir, banjir juga dapat berarti penggenangan yang disebabkan oleh arus pasang laut, gelombang *tsunami*, dan badai *siklon* atau *siklon tropis*, walaupun secara umum banjir dikaitkan dengan curah hujan yang tinggi. Bagaimanapun, tidak semua air curahan hujan yang jatuh ke bumi mengalir dipermukaan bumi. Sebagian diantaranya meresap kebawah permukaan tanah sebagai air tanah, mengalir dalam tanah dan pada tempat-tempat tertentu kembali muncul ke permukaan tanah sebagai mata air. Maka, pembahasan mengenai banjir tentu tak terlepas dari pembahasan tentang siklus hidrologi.

Dampak penting lain yang diakibatkan oleh dinamika tiupan angin dan perubahan musim, adalah fenomena *siklon tropis*, atau dikenal sebagai angin puting beliung.

8.1. Banjir

Banjir adalah peristiwa yang terjadi ketika aliran air permukaan yang berlebihan merendam daratan. Sedangkan Uni Eropa mengartikan banjir sebagai perendaman sementara oleh air pada daratan yang biasanya tidak terendam air. Namun secara umum, banjir di-definisikan sebagai penggenangan air, yang diakibatkan oleh volume air disuatu badan air, seperti sungai atau danau yang meluap atau melimpah keluar, sehingga menggenangi daratan sekitarnya.

Faktor utama yang menentukan kejadian banjir adalah besarnya aliran air di permukaan, dimana banjir akan terjadi manakala aliran air permukaan tak tertampung oleh saluran yang ada, sehingga melimpas keluar saluran. Sedangkan aliran permukaan sendiri dipengaruhi oleh luasnya daerah tangkapan hujan (*catchment area*), intensitas curah hujan, dan koefisien limpasan (*Run-off Coefficient*).

Air yang mengalir dipermukaan tanah (*run-off*), disebut juga sebagai limpasan, umumnya merupakan bagian dari curah hujan yang jatuh kedalam daerah tangkapan hujan (*catchment area*) dipermukaan bumi, yang mengalir untuk kemudian bergabung membentuk suatu aliran sungai. Sementara sebagian lainnya meresap kedalam tanah membentuk air tanah. Maka besarnya debit aliran (Q) dari suatu sungai, pada dasarnya merupakan fungsi dari faktor-faktor intensitas curah hujan (i), luas dari daerah tangkapan hujan (A), dan persentase dari bagian air hujan yang mengalir dipermukaan, yang di notasikan sebagai koefisien limpasan (*run-off coefficient*).

Tabel 8.1. : Bencana banjir dunia yang menimbulkan korban besar

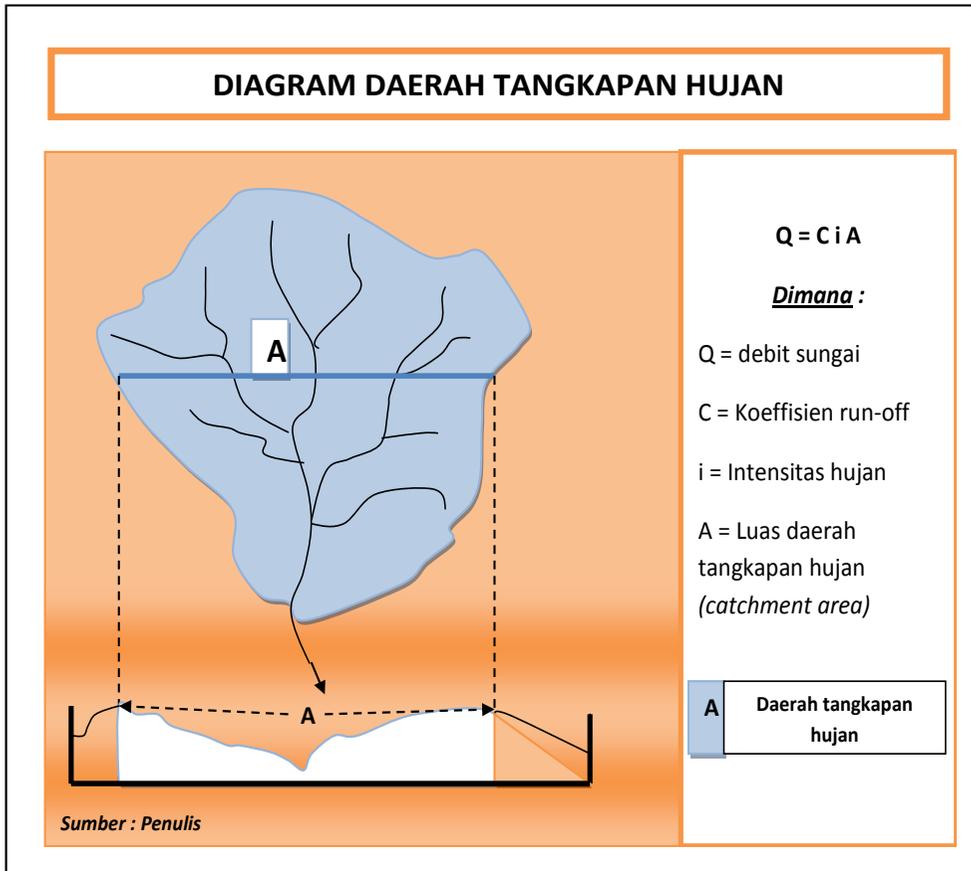
Kematian	Peristiwa	Letak	Tanggal
2.500.000– 3.700.000 ^[21]	Banjir Cina 1931	Cina	1931
900.000– 2.000.000	Banjir Sungai Kuning (Huang He) 1887	China	1887
500.000– 700.000	Banjir Sungai Kuning (Huang He) 1938	China	1938
235.000– 280.000	Tsunami Samudra Hindia	Indonesia	2004
231.000	Kegagalan Bendungan Banqiao akibat Taifun Nina . Sekitar 86.000 tewas karena banjir dan 145.000 lainnya karena penyakit akibat banjir.	Cina	1975
145.000	Banjir Sungai Yangtze 1935	Cina	1935
100.000+	Banjir St. Felix , banjir badai	Belanda	1530
100.000	Banjir Hanoi dan Delta Sungai Merah	Vietnam Utara	1971
100.000	Banjir Sungai Yangtze 1911	Cina	1911

Sumber : <https://id.wikipedia.org/wiki/Banjir>

8.1.1. Daerah Tangkapan Hujan (*Catchment Area*)

Daerah tangkapan hujan (*catchment area*) adalah suatu cekungan topografi di permukaan bumi, dengan punggung atau ketinggian-ketinggian lainnya, yang memisahkannya dari daerah tangkapan hujan disebelahnya.

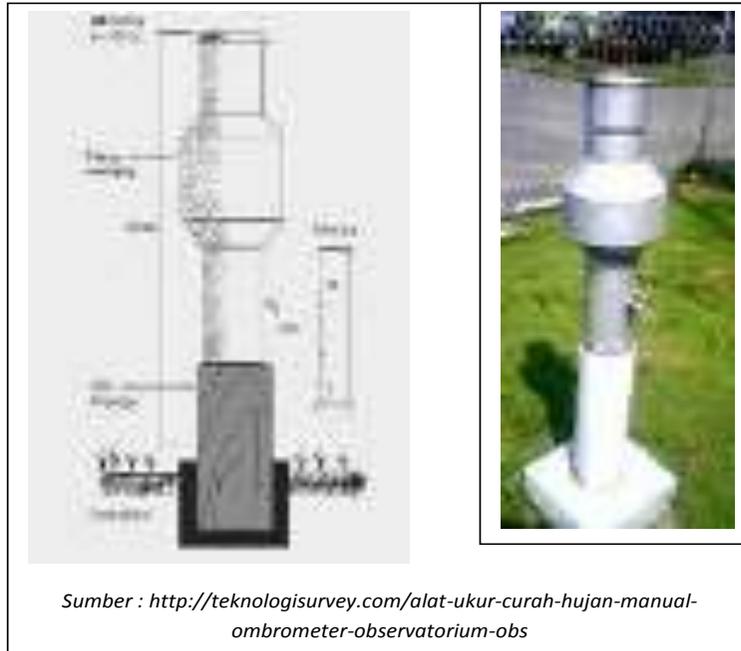
Seluruh curahan hujan yang jatuh kedalam daerah tangkapan hujan dan tidak meresap kedalam tanah, akan mengalir menuruni kemiringan menuju dasar cekungan, untuk kemudian bergabung membentuk aliran sungai. Maka, luas daerah tangkapan hujan akan menjadi faktor yang menentukan besarnya debit aliran dari suatu sungai, sehingga daerah tangkapan hujan sering pula diidentifikasi sebagai daerah pengaliran sungai (DPS). Yaitu, dimana semakin luas daerah tangkapan hujannya, yang berarti semakin luas pula daerah pengaliran sungainya, akan semakin besar pula debit aliran sungainya.



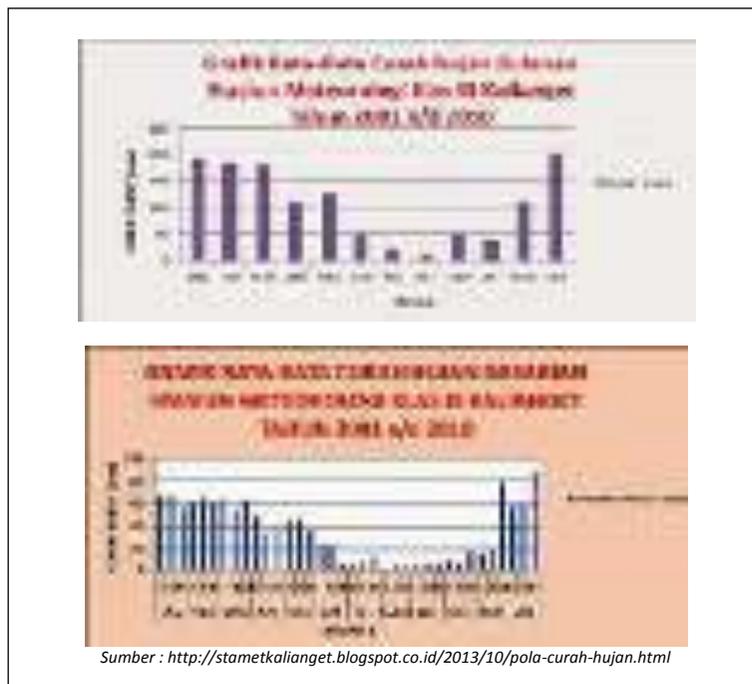
Gambar 8.1. : Diagram daerah tangkapan hujan (catchment area)

8.1.2. Intensitas Hujan

Intensitas curah hujan pada daerah tangkapan hujan merupakan salah satu faktor penting yang menentukan besarnya debit aliran suatu sungai. Oleh karena bagaimanapun, curah hujan merupakan pasokan utama aliran air pada suatu daerah aliran sungai, walaupun sebagian diantaranya ada pula yang meresap kedalam tanah. Intensitas curah hujan yang biasa di-notasikan dalam satuan milimeter (mm), adalah identifikasi yang menunjukkan ketebalan air hujan yang terkumpul pada suatu tempat.



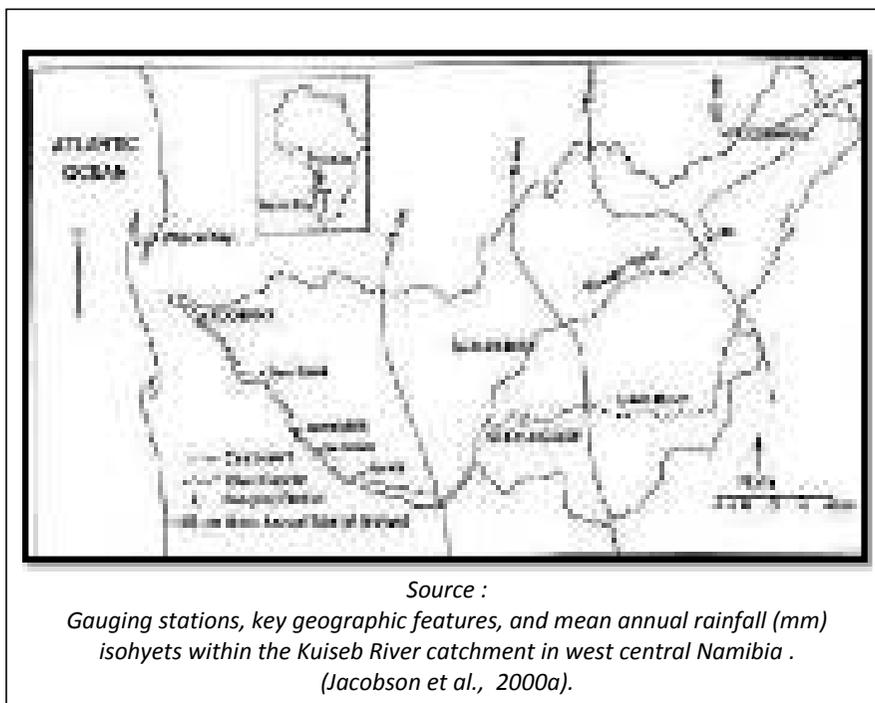
Gambar 8.2. : *Ombrometer* – alat pengukur curah hujan manual



Gambar 8.3. : Contoh pencatatan intensitas curah hujan rata-rata bulanan dan 10 harian, periode tahun 2001 – 2010, pada pos pencatatan Kaliyanget – Jawa Tengah

Alat untuk mengukur jumlah curah hujan yang turun ke permukaan tanah (per satuan luas) disebut dengan penakar hujan atau *ombrometer*. Alat penakar hujan ini, memiliki corong terbuka keatas dengan luas 100 cm² yang berfungsi menampung curahan hujan, yang mewakili suatu daerah tangkapan hujan dalam selang periode waktu tertentu. Tebal air hujan yang tertampung, diukur dengan gelas ukur, menunjukkan intensitas curah hujan pada selang periode tersebut. Secara kumulatif besar ketebalan air hujan tersebut dapat dijumlahkan, untuk mendapatkan nilai intensitas curah hujan harian, bulanan ataupun tahunan.

Namun intensitas curah hujan untuk suatu daerah tangkapan hujan, terutama yang sangat luas, umumnya tidak merata. Sehingga diperlukan sejumlah pos penakar curah hujan dalam suatu jaringan pengamatan intensitas curah hujan. Dari pencatatan intensitas curah hujan pada pos-pos penakar tersebut, maka dapat dibuat peta distribusi curah hujan dari suatu daerah tangkapan hujan yang disebut sebagai *Peta Isohyet*.



Gambar 8.4. : Contoh peta *Isohyet* tahunan, daerah tangkapan hujan sungai Kuiseb – Namimbia

Disamping bervariasi secara spatial horisontal, intensitas curah hujan juga bervariasi dengan waktu. Yaitu ada hari-hari dengan intensitas curah hujan yang tinggi, dan ada pula hari-hari dengan intensitas rendah, bahkan hari-hari tanpa curah hujan. Berdasarkan hal tersebut, maka curah hujan juga dikelompokkan menurut tingkat presipitasi sesaatnya sebagai berikut :

- Gerimis – tingkat presipitasi < 25 milimeter (0,98 inc) per jam
- Hujan sedang – tingkat presipitasi antara 25 milimeter (0,98 inc) - 76 milimeter (3,0 inc) per jam.
- Hujan deras – tingkat presipitasi > 76 milimeter (3,0 inc) per jam.

8.1.3. Koefisien Limpasan (*Run-off Coefficient*)

Tidak semua curahan hujan yang jatuh kepermukaan bumi pada daerah tangkapan hujan mengalir dipermukaan tanah. Sebagian daripadanya akan meresap kebawah tanah, mengalir sebagai aliran air tanah, dan pada tempat-tempat tertentu yang memungkinkan akan kembali muncul ke permukaan tanah sebagai mata air.

Koefisien limpasan (*run-off coefficient*) dalam hal ini adalah suatu nilai (berkisar antara 0 – 1), yang menunjukkan berapa bagian dari curah hujan yang melimpas atau mengalir dipermukaan tanah. Semakin besar nilai koefisien limpasan suatu daerah, berarti semakin besar pula bagian dari curah hujan yang mengalir di permukaan, dan semakin kecil bagian yang meresap kedalam tanah. Namun demikian, belum ada rumusan empiris yang menggambarkan hubungan antara berbagai kondisi permukaan tanah dengan nilai koefisien limpasannya.

Tabel 8.2. : Koefisien Limpasan untuk jenis2 permukaan lahan

Urut	Deskripsi Lahan / Karakteristik Permukaan	Koefisien C
1	Aspal	0,90 - 0,95
	<ul style="list-style-type: none"> • Perkerasan • Paving stone 	0,90 - 0,95
2	Permukaan lain	
	• rumput rumput	0,10 - 0,20
	• rumput rumput rumput	0,10 - 0,20
	• rumput rumput rumput	0,10 - 0,20
	• rumput rumput	0,10 - 0,20
3	tanah liat	
	<ul style="list-style-type: none"> • rumput • rumput 	0,10 - 0,20
4	Permukaan lain	
	<ul style="list-style-type: none"> • rumput rumput rumput • rumput rumput rumput 	0,10 - 0,20
5	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
6	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
7	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
8	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
9	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
10	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
11	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
12	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
13	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
14	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
15	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
16	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
17	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
18	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
19	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
20	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
21	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
22	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
23	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
24	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
25	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
26	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
27	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
28	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
29	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20
30	Aspal	0,90 - 0,95
	Permukaan lain (rumput rumput)	0,10 - 0,20

Sumber : McGuen, (1989) dalam Suripin (2003)

Secara kualitatif, permukaan tanah dengan kemiringan yang lebih curam akan mempunyai nilai koefisien limpasan lebih tinggi. Hal ini oleh karena air hujan yang jatuh di permukaan akan segera meluncur menuruni kemiringan oleh gaya gravitasi, sehingga kurang mendapat kesempatan untuk meresap kedalam tanah. Sebaliknya, permukaan tanah yang datar akan memberi waktu yang cukup bagi genangan air hujan untuk meresap kedalam tanah.

Penutupan lahan oleh vegetasi, sedikit banyak akan menahan luncuran air permukaan, sehingga tertahan untuk mendapat kesempatan meresap kedalam tanah, maka mempunyai nilai koefisien limpasan yang rendah oleh karena lebih banyak air yang akan meresap kedalam tanah. Sebaliknya dengan permukaan tanah terbuka yang memungkinkan curah hujan yang jatuh untuk mengalir bebas tanpa hambatan dipermukaan. Bahkan, benturan curah hujan dapat pula memicu erosi percik (*splash erosion*), yang menggerus dan membawa serta material-material tanah tersebut untuk dipindahkan.

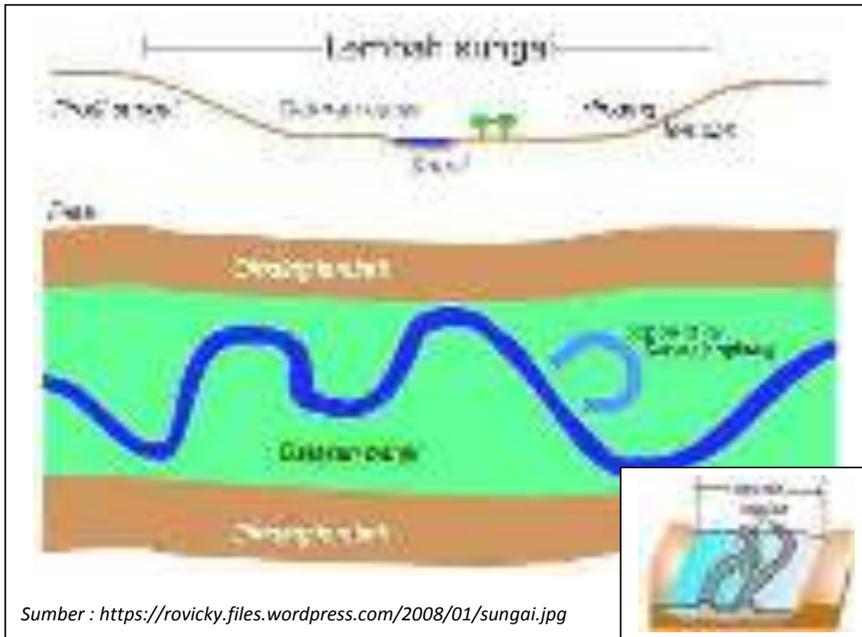
Maka besarnya koefisien limpasan tentu sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan tanah, baik berupa tingkat kemiringan topografi maupun lapisan penutup permukaannya. Maka setiap perubahan fisik pada kondisi permukaan tanah, tentu akan menyebabkan perubahan pada nilai koefisien limpasan, dan akan berdampak pula pada debit aliran air sungai-sungai yang terkait.

Campur tangan manusia dalam pengelolaan lahan, dalam hal ini dapat menjadi faktor yang mempengaruhi siklus hidrologi, yaitu dengan menyebabkan perubahan-perubahan pada nilai koefisien limpasan. Kegiatan pengelolaan lahan oleh manusia secara akumulatif, akan merubah konfigurasi lahan, baik secara topografis maupun pembukaan tutupan lahan, yang tentunya akan berpengaruh pada peningkatan nilai koefisien limpasan.

8.1.4. Pengertian Secara Teknis dan Faktor Penyebab Banjir

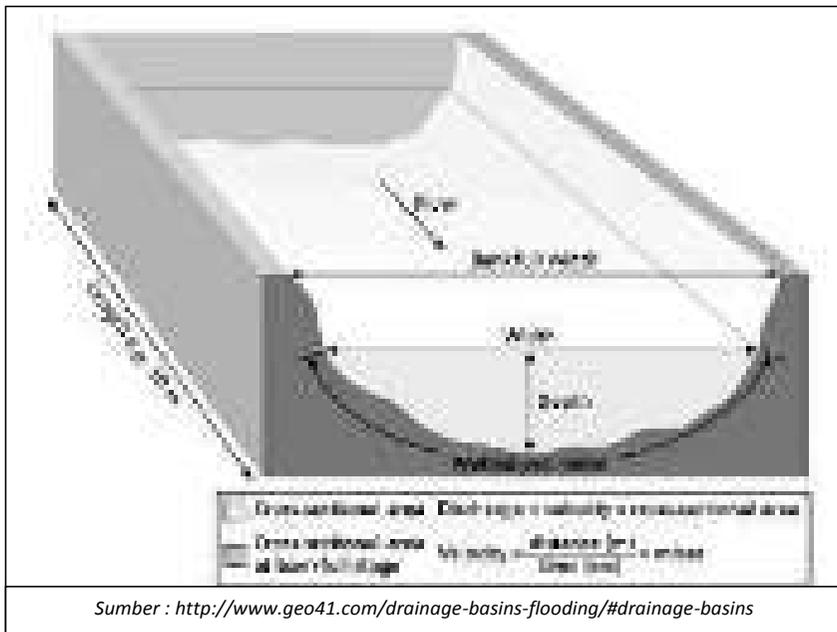
Secara umum bagian limpasan curah hujan yang turun dalam lingkup daerah tangkapan hujan akan mengalir oleh gaya gravitasi menuju tempat yang ber-elevasi lebih rendah. Ber-angsur-angsur titik-titik aliran air tersebut akan terkumpul, untuk kemudian membentuk alur sungai. Maka alur-alur sungai akan terbentuk secara alamiah, dengan ukuran penampang menyesuaikan dengan debit air limpasan yang terkumpul mengalirinya. Namun pada kondisi-kondisi kritis tertentu, ketika debit air limpasan curah hujan melampaui kapasitas alur sungainya, maka aliran air dalam alur sungai akan melimpas menggenangi dataran sekitarnya, dan disebut sebagai peristiwa banjir.

Banjir yang ber-ulang dalam jangka waktu yang lama, pada akhirnya membentuk dataran banjir (*flood plain*) alami disepanjang tepian alur sungai, yang dalam kepentingan praktis disebut sebagai bantaran sungai. Maka, pada dasarnya banjir merupakan peristiwa alam yang selalu berulang, namun dapat menjadi bencana manakala ada kepentingan manusia yang terganggu.



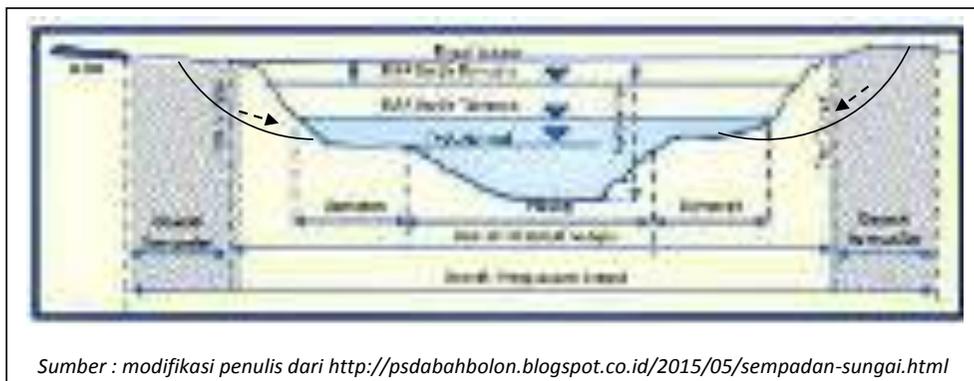
Gambar 8.5. : Diagram alur sungai dengan dataran banjir disekitarnya

8.1.5. Kapasitas Saluran dan Wilayah Pengelolaan Alur Sungai



Gambar 8.6. : Diagram yang menunjukkan kapasitas saluran alur sungai

Luas penampang melintang suatu alur sungai, pada dasarnya merupakan gambaran akan kemampuan alur sungai tersebut untuk mengalirkan sejumlah volume air pada kecepatan aliran tertentu. Atau secara teknis, debit aliran air yang melalui suatu saluran merupakan fungsi dari luas penampang yang terbasahi atau penampang basah dari penampang melintang alur tersebut. Ketika luas penampang basah dari aliran air melampaui penampang melintang alur sungai, maka saat itulah aliran sungai melimpah keluar dari alur sungainya, atau disebut sebagai banjir, dimana menunjukkan bahwa debit air yang mengalir telah melampaui batas maksimum kapasitas saluran alur sungainya.



Gambar 8.7. : Diagram zonasi teknis daerah pengelolaan sungai

Pengelolaan wilayah sungai seyogyanya tidak terbatas pada alur sungai, namun hendaknya juga meliputi daerah-daerah sekitarnya yang terpengaruh, baik pada kondisi normal maupun kondisi banjir. Maka secara teknis pengelolaan, alur sungai dapat dibagi dalam zona-zona sebagai berikut :

- **Alur sungai** atau *palung* adalah bagian sungai yang dialiri air secara rutin sepanjang tahun. Tinggi muka air normal tidak melampaui zona ini walaupun dapat ber-fluktuasi sepanjang tahun. Namun zona ini dapat berubah oleh sebab erosi ataupun sedimentasi.
- **Bantaran sungai**, disebut juga sebagai dataran banjir (*flood plain*), adalah dataran disepanjang tepian alur sungai. Dataran ini, yang dibatasi oleh tebing sungai, biasanya tergenang pada saat banjir rutin atau banjir tahunan. Walaupun banjir tahunan umumnya

jarang melampaui puncak tebing, namun bukan mustahil genangan banjir dapat mencapai puncak tebing pada banjir-banjir besar yang terjadi pada perioda ulang banjir yang panjang.

- *Daerah sempadan sungai*, pada dasarnya bukanlah daerah yang termasuk zona alur sungai. Namun demikian, daerah tersebut dapat terpengaruhi oleh banjir pada kondisi luar biasa (badai topan, banjir bandang, *tsunami* dsb), oleh karena letaknya yang berbatasan dengan tebing sungai. Erosi sungai pada saat banjir dapat saja menggerus tebing sungai, dan memicu terjadinya longsor pada daerah sempadan sungai ini.

Banjir terjadi ketika debit air yang melalui alur sungai melampaui kapasitas salurannya, sehingga melimpas menggenangi dataran banjir, atau bantaran sungai disekitarnya. Hal tersebut terjadi manakala ada pasokan air yang besar dari daerah tangkapan hujan, yaitu terjadi pada saat *curah hujan* yang tinggi.

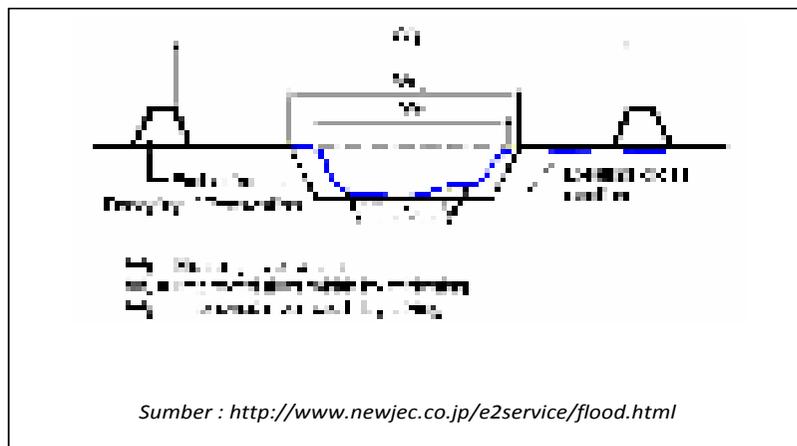
Nilai koefisien limpasan permukaan tanah pada daerah tangkapan hujan, adalah faktor penyebab dan pemicu terjadinya banjir. Nilai *koefisien limpasan* yang tinggi menyebabkan lebih banyak air hujan yang mengalir dipermukaan, yang akhirnya akan terakumulasi memasuki alur sungai pada daerah tangkapan hujan yang bersangkutan. Maka, perubahan-perubahan tata guna lahan pada permukaan tanah didaerah tangkapan hujan, akan dapat meningkatkan potensi banjir pada alur sungainya. Pembukaan lahan, pengupasan tanah ataupun penggundulan hutan pada daerah tangkapan hujan akan berakibat pada peningkatan nilai *koefisien limpasan*, sehingga akan lebih banyak air hujan yang mengalir di permukaan, dan akan lebih cepat mengalir mencapai alur sungai.

Faktor lain yang dapat memicu banjir, adalah dengan berkurangnya *kapasitas pengaliran air alur sungai*. Hal ini dapat disebabkan oleh pendangkalan sebagai akibat dari sedimentasi pada alur sungai, atau oleh sebab lainnya seperti penyempitan alur sungai, baik oleh peristiwa gerakan tanah maupun berbagai aktivitas manusia.

Bagaimanapun, intensitas curah hujan yang tinggi sebagai pemasok utama limpasan air penyebab banjir, adalah proses alamiah yang tak dapat atsu sulit untuk di-intervensi. Namun demikian, volume dan kecepatan air yang masuk kedalam alur sungai serta kapasitas alur sungainya adalah faktor penyebab banjir yang dapat dikendalikan sampai batas-batas tertentu.

Maka secara teknis, upaya antisipasi banjir pada dasarnya adalah upaya pengendalian limpasan (*run off*) dan upaya perbaikan/peningkatan kapasitas alur sungai.

- **Pengendalian limpasan (*run-off*)** adalah upaya preventif untuk mengurangi, atau setidaknya membatasi limpasan curah hujan yang mengalir dipermukaan. Hal ini dapat dilakukan dengan pengelolaan permukaan tanah pada daerah tangkapan hujan, sedemikian rupa sehingga akan lebih banyak air limpasan yang tertahan dan meresap kedalam tanah, yang secara teknis merupakan upaya untuk *menurunkan nilai koefisien limpasan (*run-off coefficient*)*, setidaknya mempertahankan agar tidak terjadi peningkatan yang signifikan. Secara makro, misalnya dilakukan dengan *penghijauan* atau konservasi hutan pada daerah tangkapan hujan, sedangkan secara mikro dapat juga dilakukan dengan membuat berbagai jenis *sumur resapan*, terutama pada wilayah-wilayah pemukiman, yang merupakan daerah yang sudah terlanjur terbuka untuk berbagai kegiatan kepentingan manusia.
- **Pemeliharaan dan perbaikan kapasitas alur sungai** adalah upaya penanggulangan, agar aliran air sungai tidak melimpas keluar dari alur sungai, yaitu dengan cara memperbesar kapasitas debit dari alur sungai. Secara teknis hal tersebut dapat dilakukan dengan memperbesar penampang alur sungai, dengan cara pengerukan dasar sungai, memperlebar alur sungai, atau bahkan dengan membuat tanggul (*dike*).



Gambar 8.8. : Berbagai metoda peningkatan kapasitas alur sungai

- **Banjir kanal** adalah suatu sistem penanggulangan banjir, dengan membangun jaringan saluran atau kanal, dengan tujuan memecahkan aliran air agar tidak ter-akumulasi pada saluran alur sungai utama. Sehingga beban debit air pada saluran tersebut, terutama pada musim hujan, berkurang dan tidak melimpas keluar dari alurnya, yang menyebabkan banjir.



Gambar 8.9. : Sistem jaringan kanal di Amsterdam, berfungsi sebagai *banjir kanal*.

- **Bendungan pengendali banjir (Flood control dam)** adalah upaya artifisial penanggulangan banjir, dengan cara membangun suatu waduk besar yang mampu menampung sementara sejumlah besar limpasan curah hujan. Prinsip kerja pengendalian banjir dari sistem ini adalah dengan menyediakan tempat penampungan besar atau waduk, yang berfungsi menampung limpasan air permukaan yang berlebihan pada saat musim dengan curah hujan tinggi, untuk kemudian dilepaskan kehilir dengan debit terkendali, disesuaikan dengan kapasitas alur sungai dihilir, sedemikian rupa sehingga tidak sampai melimpas keluar dari salurannya.

8.1.7. Catatan Peristiwa Bencana Banjir

Banjir Bandang Situ Gintung – Tangerang Selatan (2009).

Situ Gintung adalah sebuah danau di sebelah selatan Jakarta, termasuk kedalam wilayah kota Tangerang Selatan - Banten. Danau ini memiliki luas 31 hektar, dengan kapasitas untuk menampung air sebesar 2,1 juta meter kubik.

Situ Gintung adalah danau buatan, yang dibentuk dengan membangun bendungan setinggi 16 meter pada tahun 1932, yaitu berupa bendungan urugan tanah (*earth fill dam*). Bendungan tersebut dibangun sebagai upaya untuk meng-antisipasi banjir di Jakarta, disamping juga dimanfaatkan untuk pengairan. Situ Gintung ini termasuk dalam daerah aliran sungai Cisadane, yang berhulu di gunung Salak dan Pangrango sepanjang sekitar 80 km, serta bermuara di laut Jawa setelah melalui kali Pesanggrahan.

Sejak tahun 1970, Situ Gintung mulai dikembangkan sebagai obyek wisata lokal. Maka berangsur-angsur masyarakat mulai melupakan bahwa sejatinya Situ Gintung adalah waduk yang dibentuk dengan membangun bendungan urugan tanah (*earth fill dam*) setinggi 16 meter. Pemeliharaan yang seyogyanya dilakukan rutin sebagaimana standard pemeliharaan bagi bendungan besar mulai terabaikan. Mercu bendungan mulai dimanfaatkan sebagai jalanan umum. Yang berujung pada bobolnya bendungan pada tanggal 27 Maret 2009.



Sumber : https://www.researchgate.net/publication/299710118_Lessons_Learned_from_the_Recent_Natural_Disasters_in_Indonesia

Gambar 8.11. : Bendungan Situ Gintung yang bobol pada tanggal 27 Maret 2009

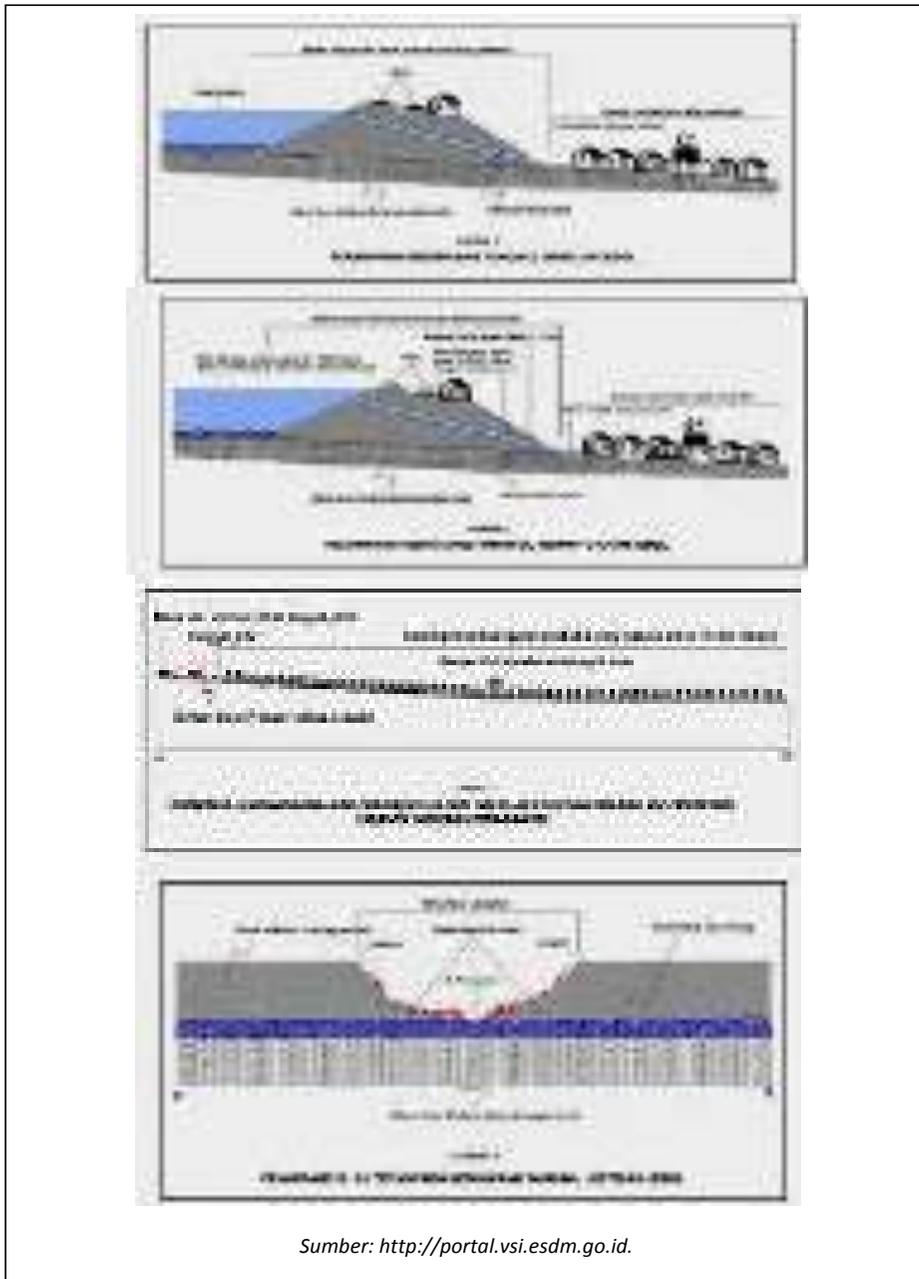
Dimulai dengan hujan deras yang melanda bagian selatan Jakarta pada pukul 16.00 tanggal 26 Maret 2009, sehingga air memenuhi waduk Situ Gintung. Tanda-tanda keruntuhan mulai terdengar, dengan suara gemuruh dari arah bendungan pada pukul 23.00. Akhirnya bendungan betul-betul bobol pada dini hari sekitar pukul 03.00 tanggal 27 Maret 2009, menumpahkan banjir bandang berupa 2,1 juta meter kubik air, yang seketika membanjiri pemukiman di hilir bendungan.



Gambar 8.12. : Peta banjir bandang Situ Gintung - Tangerang Selatan, 27 Maret 2009

Peristiwa bobolnya tubuh bendungan waduk Situ Gintung di Tangerang Selatan, pada tanggal 27 Maret 2009 di pagi hari, adalah salah satu contoh peristiwa banjir bandang yang terjadi sangat cepat, baik proses kejadiannya maupun proses surutnya. Peristiwa ini menimbulkan kerusakan korban yang cukup signifikan. Yaitu,

menurut laporan Satkorlak Penanggulangan Bencana Provinsi Banten, sampai dengan tanggal 28 Maret 2009 pukul 16.15, tercatat 82 orang meninggal, 103 orang hilang, 179 orang terluka dan 250 rumah mengalami kerusakan.



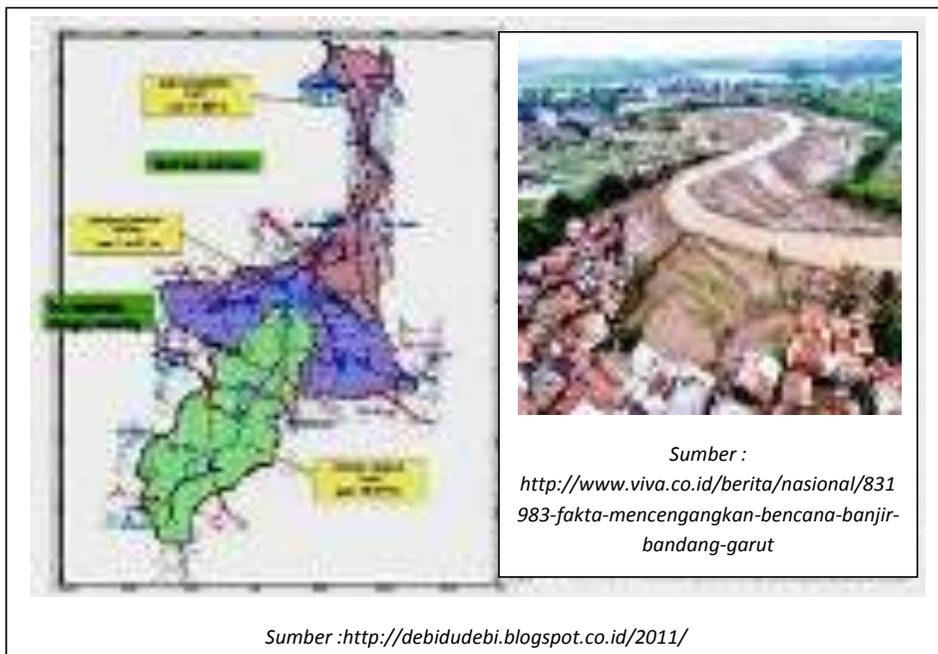
Sumber: <http://portal.vsi.esdm.go.id>.

Gambar 8.13. : Profil bendungan Gintung, sebelum dan sesudah bobol

Banjir Bandang Sungai Cimanuk - Garut (2016).

Malapetaka itu datang menjelang tengah malam sewaktu sebagian besar warga Garut-Jawa Barat sedang terlelap tidur. Pada Selasa malam 20 September 2016, banjir bandang sungai Cimanuk menerjang tujuh kecamatan di Garut dengan cepat, sehingga banyak masyarakat yang tak sempat menyelamatkan diri. Tercatat sekitar 2511 rumah rusak berat dan ringan, serta 100 rumah lenyap tersapu banjir bandang Garut, dan sebanyak 6361 orang pun harus diungsikan ke sejumlah lokasi pengungsian. Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), tercatat 34 orang meninggal, 19 orang hilang dan 35 orang terluka.

Banjir yang menerjang Garut seperti ini bukanlah yang pertama kali. Pada tahun 2015 banjir serupa pernah melanda Garut setinggi 5 meter, sementara alur sungai Cimanuk hanya mampu menampung ketinggian sampai 6 meter. Namun, hujan deras yang terjadi sejak Senin sore pukul 19.00 WIB tanggal 19 September 2016, telah menyebabkan aliran sungai Cimanuk yang berada disekitar Garut meluap, mengakibatkan banjir yang kali ini mencapai ketinggian 8 sampai 10 meter.

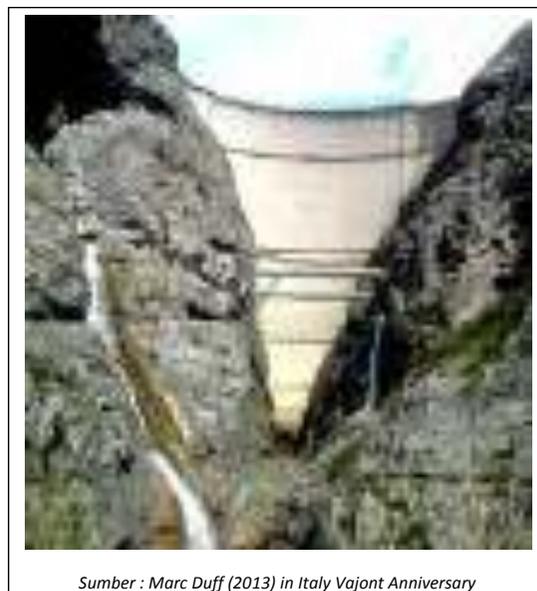


Gambar 8.14. : Peta daerah tangkapan hujan (*catchment area*) sungai Cimanuk dan banjir bandang Garut, 21 September 2016.

Banjir bandang aliran sungai Cimanuk didaerah Garut, adalah contoh luapan air sungai besar yang menyapu wilayah pemukiman dan berlangsung sangat cepat. Intensitas curah hujan yang tinggi pada bagian hulu sungai dengan daerah tangkapan hujan (*catchment area*) berbentuk sempit memanjang menyerupai bulu burung dengan relief terjal pegunungan, merupakan faktor pendukung alamiah utama penyebab terjadinya bencana banjir bandang, yaitu dimana curahan hujan akan cepat meluncur menuruni lereng dan ter-akumulasi pada alur sungai utamanya. Sementara itu, perubahan tata guna lahan yang merusak dan menyebabkan peningkatan nilai koefisien limpasan (*run-off coefficient*), berperan lebih mempercepat peristiwa tersebut.

Bencana Bendungan Vajont- Italia, 1963 (*Vajont Dam Disaster,1963*).

Bendungan Vajont (*Vajont Dam*), di sungai Vajont, Friuli-Venezia Giulia - Italia, adalah bendungan beton melengkung (*Concrete Arc Dam*) dengan tinggi 261,6 meter, merupakan bendungan tertinggi di dunia pada saat itu, selesai dibangun pada tahun 1959. Bendungan tersebut sebenarnya telah dibangun pada dekade sebelumnya, untuk memasok tenaga listrik dengan memanfaatkan potensi tenaga air ke kota-kota yang tumbuh di Italia Utara, namun pembangunannya terhenti pada tahun 1943, oleh karena pecahnya Perang Dunia II.

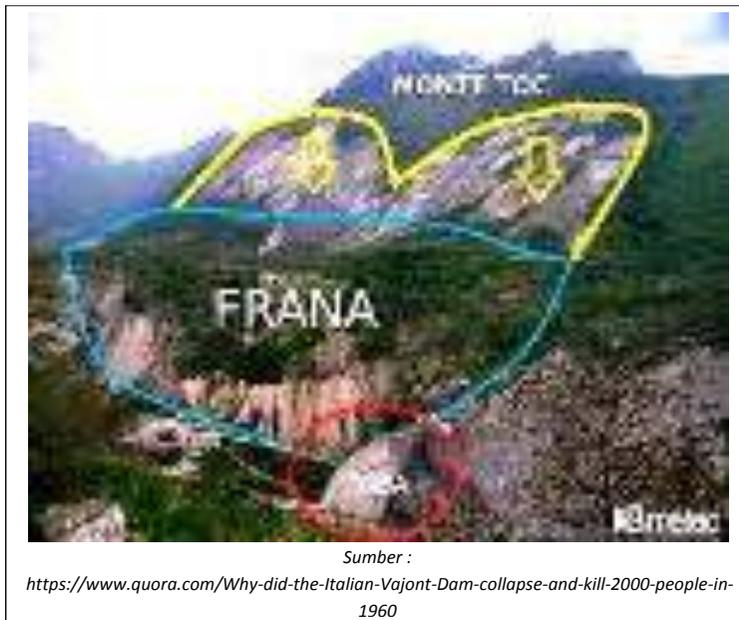


Gambar 8.15. : Bendungan Vajont (*Vajont Dam*) – Italia

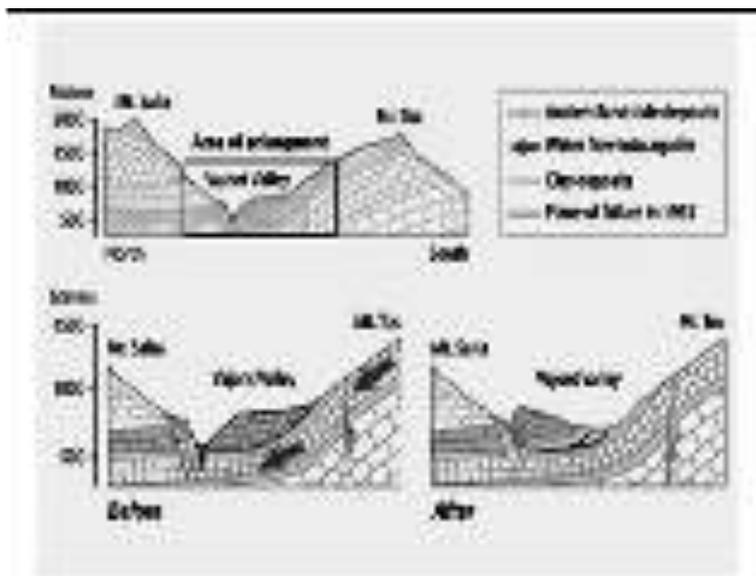
Meskipun mendapat tentangan dari penduduk lokal, terutama para penduduk di desa-desa komune Erto e Casso, pembangunannya dilanjutkan kembali pada tahun 1957, dibawah naungan monopoli penguasa lokal *SADE (Società Adriatica di Elettricità)*.

Sebenarnya selama proses pembangunan, telah teridentifikasi tanda-tanda bahwa lembah gunung di Pegunungan Alpen Selatan ini tidak stabil. Namun, meskipun dari tiga studi yang dilakukan secara terpisah, dimana ditemukan bahwa pada sisi Monte Toc yang akan menjadi tepi selatan waduk diindikasikan tidak stabil dan cenderung runtuh menuju lembah jika waduk terisi air, namun pembangunan tetap dilanjutkan. Selama pembangunanpun, jalan pada sisi selatan Monte Toc, telah menunjukkan tanda-tanda pergeseran dan retakan. Namun tiga kali uji pemboran tidak menemukan adanya lapisan tipis tanah lempung dalam lapisan batugamping, yang diperkirakan merupakan petunjuk adanya longsor kuno, dan pembangunanpun terus dilanjutkan. Lereng gunung ini sebelumnya selalu terhindar dari longsor melalui lapisan tanah lempung, oleh karena sebelum pengisian waduk Lago del Vajont, masa Batugamping mampu menyerap rembesan air kedalam tanah lempung. Namun setelah waduk terisi air dan muka waduk naik mencapai lapisan tanah lempung, maka mulai terjadi penjenuhan. Pada tahun pertama bendungan itu diisi air sampai kedalaman 180 m, sejumlah kecil bukit terlihat mulai bergeser 3,5 cm per hari. Pergeserannya semakin cepat seiring naiknya muka air waduk. Luas lahan yang merayap maju menuju lembah cukup besar, yaitu sekitar 1700 m panjang, 1000 m lebar dari lereng Monte Toc. Akhirnya, pada bulan November, 700.000 m³ bagian dari lereng bukit meluncur menuju waduk. Untuk ini maka muka air waduk diturunkan sebesar 25%, untuk menstabilkan bagian yang belum longsor. Namun hal ini hanya memperlambat pergeseran longsor, dan tidak dapat menghentikannya. Pada musim panas tahun 1962 dilakukan operasi kedua, dimana muka air waduk perlahan-lahan dinaikkan sampai ketinggian 235 m, dimana tingkat pergeseran tanah hanya sedikit meningkat. Pada tahun 1963 muka air waduk kembali dinaikkan sampai dengan 230 meter, dan pada sebagian besar musim panas pergeseran per-hari masih di bawah 1 cm. Maka muka air waduk kembali dinaikkan pada bulan Agustus, sampai ketinggian 245 m, dan pergeseran pun kembali meningkat mencapai 3,5 cm per-hari, dimana pergerakan tersebut terlalu besar untuk lereng gunung. Kecepatan pergeseran tanah terus meningkat, hingga pada 9 Oktober

mencapai mencapai 20 cm per-hari, maka longsor besar yang mematikanpun terjadi.



Gambar 8.16. : Longsor pada lereng Monte Toc menuju waduk Vajont



Sumber : Marc Duff (2013) in Italy Vajont Anniversary

Gambar 8.17. : Penampang waduk Vajont, sebelum dan sesudah longsor 1963



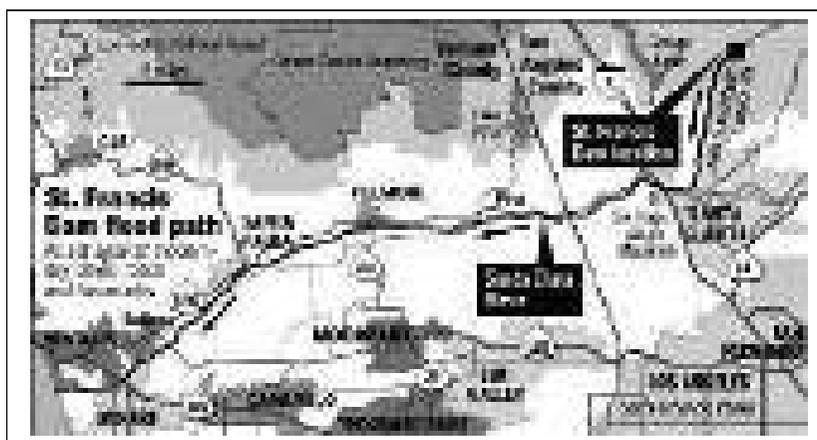
Sumber : Marc Duff (2013) in *Italy Vajont Anniversary*

Gambar 8.18. : Lokasi Bendungan Vajont dan daerah yang terdampak banjir bandang

Pada tanggal 9 Oktober 1963 malam hari, 270 juta meter kubik blok gunung runtuh kedalam waduk *Lago del Vajont* dengan kecepatan sekitar 110 km per-jam, memblokir waduk. Longsor tanah dan batu mendorong masa air dalam dua arah gelombang pada kedua sisi. Satu gelombang meluncur ke hulu menerjang sebuah hotel dimana 54 pekerja bendungan tinggal dan menewaskan semua orang di dalamnya. Gelombang hulu ini juga menerjang dan menghancurkan desa di Erto e Casso yang berada pada ketinggian 260 m di atas permukaan danau. Gelombang lainnya bergerak menuju hilir dan melewati bendungan, sehingga sejumlah 30 juta meter kubik air (sekitar 26 persen dari volume air waduk) melimpas melalui puncak bendungan (*overtopping*) yang tingginya sekitar 250 meter, menuruni lembah Vajont menuju lembah sungai Piave, walaupun tubuh bendungan itu sendiri tetap utuh. Pada jalur ini terdapat komune Longarone dan desa-desa tetangganya yaitu Pirago, Rivalta, Villanova, Codissago, dan Fae. Dalam beberapa menit, semuanya musnah oleh terjangan gelombang masa air raksasa yang menyerupai tsunami. Dari tujuh desa yang hancur, korban tewas mencapai sekitar 2000 orang (80% berasal dari Longarone), dan hampir semua bangunan tersapu bersih dari tempatnya, dan hanya meninggalkan lumpur, batu, dan puing-puing.

Meskipun dilanda gelombang besar dan *overtopping*, bendungan Vajont tetap kokoh berdiri. Namun bencana banjir bandang yang melanda desa-desa di hilir bendungan sebagai akibat limpasan masa air melampaui puncak bendungan tetap tak terhindarkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa pembangunan bendungan, tidak cukup hanya memperhitungkan kekuatan untuk keamanan tubuh bendungan itu sendiri saja. Bagaimanapun kenaikan permukaan air waduk tentu akan mempengaruhi stabilitas lereng disekitarnya, sehingga perlu diperhitungkan pula.

Keruntuhan Bendungan St Francis - USA, (1928).



Gambar 8.19. : Peta lokasi Bendungan St Francis

Bendungan St Francis di California-USA, dibangun pada sungai San Francisquito, antara lain untuk kepentingan pembangkitan tenaga listrik, pada tahun 1925. Bendungan ini merupakan bendungan gravitasi melengkung, dengan jari-jari 500 ft, tinggi 205 ft, tebal pada bagian puncaknya 16 ft dan 175 ft pada bagian dasarnya. Pengisian waduk dimulai pada tanggal 1 Maret 1926. Dengan diawali dengan bocoran menembus bendungan, terutama melalui bagian pondasinya, pada tanggal 12 Maret 1928 terjadi bencana keruntuhan bendungan St Francis, yang mengakibatkan banjir bandang setinggi 125 ft, yang melanda lembah pada bagian hilir bendungan, dan menelan korban lebih dari 236 jiwa.

Walaupun bendungan St Francis dibangun melintang memotong bidang sesar, namun selama pengisian waduk tidak dilaporkan adanya gempa yang mungkin menggerakkan sesar, dan juga tidak dijumpai tanda-tanda aktivitas sesar. Disamping itu, pondasi bendungan juga telah diperhitungkan cukup kuat untuk mendukung beban tubuh bendungan di atasnya. Penelitian terhadap bongkahan-bongkahan tubuh bendungan yang hancur dan terhanyutkan oleh air bahkan menunjukkan bahwa kualitas material tubuh bendungan mempunyai kualitas yang tinggi dan cukup kokoh.

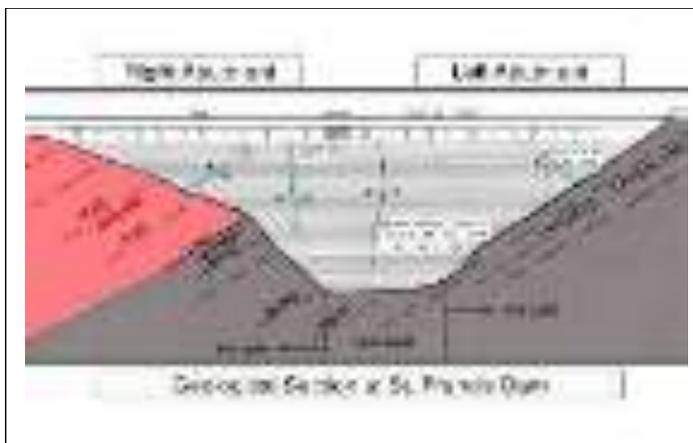
Dari hasil observasi geologis, ter-identifikasi bahwa lereng kiri lembah sungai San Francisquito dimana bendungan San Francis berdiri, merupakan tebing yang dibentuk oleh batuan Sekis Mika (*Mica Schist*). Sementara itu, tebing kanan lembah pada bagian bawahnya dibentuk juga oleh batuan Sekis Mika, sedangkan pada bagian atasnya dengan dibatasi oleh bidang diskontinuitas yang berupa bidang sesar, dibentuk oleh batuan Konglomerat bersisipan Batupasir dan batuan sedimen halus lainnya. Batuan Konglomerat tersebut, dalam keadaan kering merupakan batuan yang kokoh, namun rapuh dalam keadaan basah dan mempunyai sifat lulus air sehingga mudah untuk menyerap air. Maka, ketika waduk mulai diisi air dan mencapai elevasi batuan Konglomerat, genangan air waduk mulai membasahnya merembes kedalam batuan Konglomerat tersebut, dan mulai mengalir melalui bidang-bidang diskontinuitas didalamnya, termasuk yang membatasinya dengan batuan Sekis Mika. Rembesan air yang mengalir disepanjang bidang diskontinuitas tersebut menerobos bendungan ke arah hilir, sambil berangsur-angsur mengikis pondasi bendungan. Maka kedudukan pondasi bendungan mulai tergeser, regangan (*tension*) mulai dialami oleh tubuh bendungan sehingga menyebabkan terjadinya retakan, dan berakhir dengan bobolnya bendungan.

Dari hasil penelitian atas runtuhnya bendungan St Francis, kemungkinan yang paling dapat diterima adalah kegagalan pondasi untuk mendukung beban tubuh bendungan. Hal tersebut terjadi oleh karena kerapuhan batuan Konglomerat dalam keadaan basah, dan rembesan air melalui bidang-bidang diskontinuitas didalamnya, yang berangsur-angsur mengikis pondasi dibawah bendungan, sehingga kemampuan daya dukung pondasinya pun mengalami degradasi, dan berakhir dengan bobolnya tubuh bendungan.

Peristiwa runtuhnya bendungan St Francis inilah yang kemudian menjadi salah satu faktor pemicu kesadaran akan pentingnya pengetahuan geologi dalam bidang teknik konstruksi.



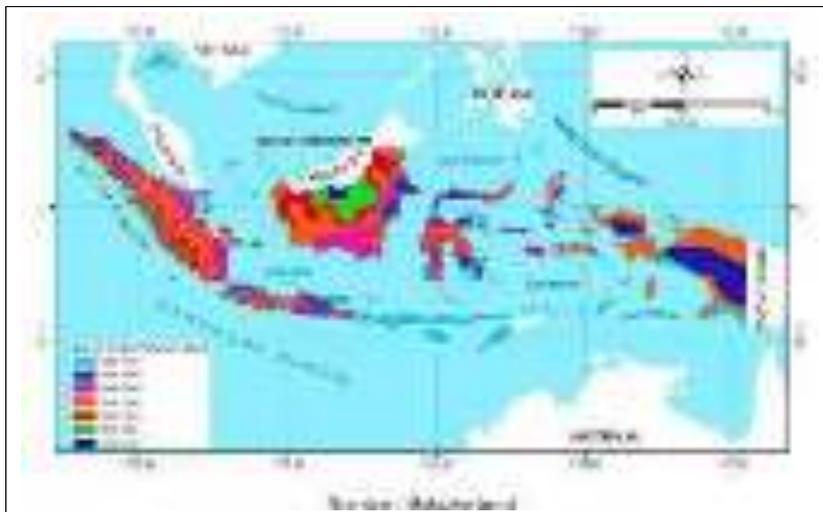
Gambar8.20. : Bendungan St Francis, sebelum dan sesudah keruntuhannya



Gambar 8.21. : Profil Geologi pada bendungan St Francis

8.1.8. Potensi Banjir di Indonesia

Posisi geografis yang berada diantara Garis Balik Utara ($23\frac{1}{2}^{\circ}$ LU) dan Garis Balik Selatan ($23\frac{1}{2}^{\circ}$ LS) menunjukkan bahwa posisi global kepulauan Indonesia berada pada zona iklim Tropis yang panas, dimana mendapat penyinaran matahari secara penuh sepanjang tahun. Sebagai wilayah yang berada di sekitar garis khatulistiwa, secara otomatis akan mengalami iklim tropis yang bersifat panas dan hanya memiliki dua musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan. Iklim tropis ini bertemperatur panas sehingga mengundang banyak curah hujan atau disebut sebagai Hujan Naik Tropika.

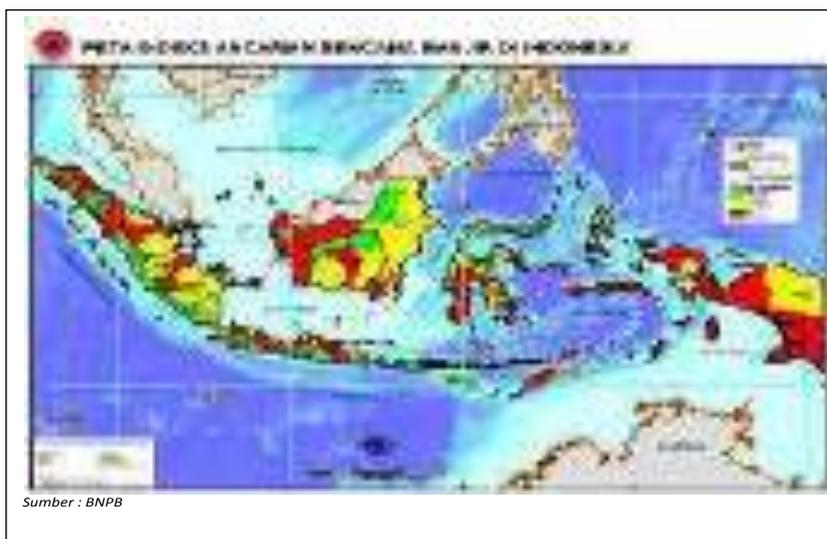


Gambar 8.22. : Peta Curah Hujan Tahunan kepulauan Indonesia

Berikut adalah karakteristik iklim tropis di Indonesia :

1. Suhu udara rata-rata tinggi, karena matahari selalu vertikal. Umumnya suhu udara berkisar diantara $20-23^{\circ}$ C, bahkan di beberapa tempat rata-rata suhu tahunannya mencapai 30° C.
2. Amplitudo suhu rata-rata tahunan relatif kecil, berkisar antara 1° C - 5° C, sedangkan amplitudo hariannya lebih besar.
3. Tekanan udara relatif rendah, dengan perubahan secara perlahan dan beraturan.
4. Curah Hujan tinggi, rata-rata sekitar 2500 mm/tahun, lebih tinggi dari daerah-daerah lain di dunia.

5. Di pengaruhi oleh pergerakan peredaran matahari yang menyebabkan peredaran pola angin, sehingga terdapat dua musim, yaitu musim hujan dan musim kemarau.
6. Di beberapa pulau besar seperti Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua terdapat gunung-gunung yang tinggi sehingga mempengaruhi variasi iklim pada wilayahnya masing-masing.
7. Sebagian besar daratan Indonesia dikelilingi oleh laut atau samudra, sehingga di Indonesia terdapat iklim laut yang lembab dan banyak mendatangkan hujan.



Gambar 8.23. : Peta potensi bencana banjir Indonesia (sumber : BNPB)

Kondisi dataran pantai dengan elevasi rendah mendekati atau bahkan lebih rendah dari elevasi muka air laut, merupakan faktor geografis yang menambah potensi banjir pada daerah sekitarnya. Kondisi ini dijumpai pada dataran pantai yang berhadapan dengan zona laut transgresi, seperti paparan Sunda (*Sundaland*) di Indonesia Barat, dan paparan Sahul (*Sahuland*) di Indonesia Timur. Maka dataran pantai timur Sumatera, pantai Utara Jawa, pantai barat dan selatan Kalimantan, serta dataran pantai selatan Papua, merupakan daerah-daerah yang secara umum ber-potensi banjir lebih tinggi.

Berdasarkan kondisi morfologis, penyebab banjir adalah relief bentang alam Indonesia yang ber-variasi, dan banyaknya sungai yang

mengalir diantaranya. Kerawanan banjir tersebut dapat menjadi lebih buruk dengan perubahan tata guna lahan pada daerah resapan air, yang meningkatkan nilai koefisien limpasan (*run-off coefficient*) sehingga memperbanyak air yang mengalir dipermukaan.

8.2. Siklon Tropis

Tabel 8.3. : Catatan bencana Siklon Tropis yang mengakibatkan korban besar.

The 35 Deadliest Tropical Cyclones in World History				
Rank	Name / Areas of Largest Loss	Year	Ocean Area	Deaths
1.	Great Bhola Cyclone , Bangladesh	1970 (Nov 12)	Bay of Bengal	300,000 - 500,000
2.	Hooghly River Cyclone , India and Bangladesh	1737	Bay of Bengal	300,000
3.	Haiphong Typhoon, Vietnam	1881	West Pacific	300,000
4.	Coringa, India	1839	Bay of Bengal	300,000
5.	Backerganj Cyclone, Bangladesh	1584	Bay of Bengal	200,000
6.	Great Backerganj Cyclone , Bangladesh	1876	Bay of Bengal	200,000
7.	Chittagong, Bangladesh	1897	Bay of Bengal	175,000
8.	Super Typhoon Nina , China	1975 (Aug 5)	West Pacific	171,000
9.	Cyclone 02B , Bangladesh	1991 (May 5)	Bay of Bengal	138,866
10.	Cyclone Nargis , Myanmar	2008 (May 3)	Bay of Bengal	138,366
11.	Swatlow, China	1922 (Jul 27)	West Pacific	100,000
12.	Great Bombay Cyclone, India	1882	Arabian Sea	100,000
13.	Hakata Bay Typhoon , Japan	1281	West Pacific	65,000
14.	Bangladesh	1942 (Oct 14)	Bay of Bengal	61,000
15.	India	1935	Bay of Bengal	60,000
16.	Calcutta, India	1864	Bay of Bengal	60,000
17.	Barisal, Bangladesh	1822	Bay of Bengal	50,000
18.	Sunderbans coast, Bangladesh	1699	Bay of Bengal	50,000
19.	India	1833	Bay of Bengal	50,000
20.	India	1854	Bay of Bengal	50,000
21.	Wenchou, China	1912 (Aug)	West Pacific	50,000
22.	Bengal Cyclone, Calcutta, India	1942	Bay of Bengal	40,000
23.	Bangladesh	1912	Bay of Bengal	40,000
24.	Bangladesh	1919	Bay of Bengal	40,000
25.	Canton, China	1862	West Pacific	37,000
26.	Bangladesh	1965 (May 11)	Bay of Bengal	36,000
27.	Backerganj (Barisal), Bangladesh	1767	Bay of Bengal	30,000
28.	Barisal, Bangladesh	1831	Bay of Bengal	22,000
29.	Great Hurricane , Lesser Antilles Islands	1780	Atlantic	22,000
30.	Chittagong, Bangladesh	1963 (May 28)	Bay of Bengal	22,000
31.	Great Coringa Cyclone, India	1789	Bay of Bengal	20,000
32.	Nagasaki Typhoon, Japan	1828	Western Pacific	15,000
33.	Urir, Bangladesh	1985 (May 28)	Bay of Bengal	15,000
34.	Tacloban, Philippines	November 1912	Western Pacific	15,000
35.	Devi Taluk, SE India	1977 (Nov 12)	Bay of Bengal	14,204

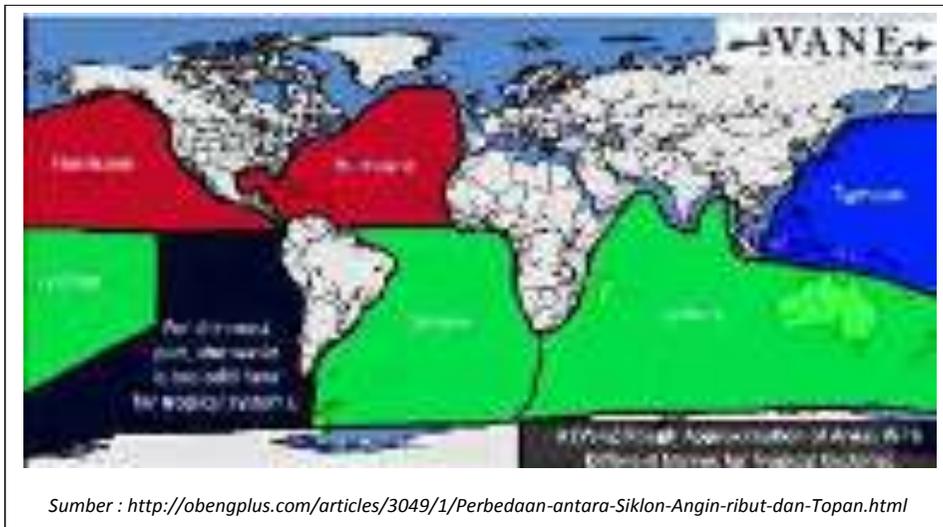
Death counts from large killer cyclones are highly uncertain, particularly for those before 1900. The above rankings are somewhat speculative. Information sources: [EM-DAT](#), the International Disaster Database; [Banglapedia](#), [Wikipedia](#), [Climate change impacts and adaptation assessment in Bangladesh](#)" by Anwar Ali, [the Philippine Star](#), and [Encyclopedia of Hurricanes, Typhoons, and Cyclones](#) (1999), by David Longshore

Source : <https://www.wunderground.com/hurricane/deadlyworld.asp>

Proses meteorologi adalah proses yang terjadi pada lapisan atmosfer yang menyelimuti bumi, sebagai akibat pemanasan oleh radiasi matahari, dan dipengaruhi pula oleh rotasi bola bumi dan peredarannya mengelilingi matahari.

Dampak dari proses-proses tersebut adalah terjadinya peredaran udara atau tiupan angin, dan perubahan musim diberbagai belahan bumi. Dinamika tiupan angin membawa serta pula uap air, yang kemudian diturunkan sebagai hujan, dan terkadang menimbulkan bencana banjir.

Dampak lain yang penting yang diakibatkan oleh dinamika tiupan angin dan perubahan musim, adalah fenomena siklon tropis, atau dikenal sebagai angin puting beliung.



Gambar 8.24. : Penamaan siklon tropis pada berbagai wilayah

Fenomena-fenomena yang sama seperti ini terjadi di berbagai tempat dengan penamaan yang berbeda. Seperti di wilayah Pasifik Barat dikenal sebagai *Typhoon*, di belahan bumi selatan disebut *Cyclone* dan di belahan bumi utara disebut *Hurricane*.

Siklon Tropis (*tropical cyclone*) merupakan istilah dalam meteorologi untuk suatu daerah bertekanan sangat rendah yang ditopang oleh angin yang berputar dengan kecepatan lebih dari 118 km/jam. Dilihat dari atas, siklon tropis tampak seperti pusaran awan yang bergerak dengan diameter ratusan kilometer. Bagian tengah

siklon tropis disebut mata, dengan diameter antara 10 hingga 100 kilometer dan menjulang dengan ketinggian mencapai 12 - 15 km. Pada bagian mata ini, keadaan cuacanya cerah dengan angin yang relatif tenang. Mata siklon tropis di kelilingi oleh dinding mata berupa angin yang bergerak spiral dari bawah ke atas dan dipenuhi awan-awan. Pada dinding mata ini keadaan cuaca sangat buruk dengan hujan lebat, badai guruh serta tiupan angin sangat kencang.



Gambar 8.25. : Diagram struktur siklon tropis



Gambar 8.26. : Siklon tropis di Amerika Serikat, dikenal sebagai *Tornado*

Siklon tropis terjadi diawali dengan adanya daerah bertekanan udara rendah ditengah samudera yang memicu pergerakan angin dari berbagai arah. Pertemuan angin dari arah yang berbeda inilah yang kemudian membentuk pusaran angin dengan kekuatan menghisap keatas yang sangat besar. Terbawa pula oleh pusaran angin tersebut, gumpalan awan dan uap-uap air diatas permukaan laut, yang ketika mencapai ketinggian ber-kondensasi membentuk titik-titik air, bahkan butiran-butiran es, yang kemudian jatuh ke bumi sebagai hujan. Meski kekuatan siklon tropis menurun ketika memasuki wilayah daratan, namun membawa serta pula kelembaban udara yang besar ke daratan yang dapat menimbulkan hujan badai, dan mengakibatkan banjir. Namun banjir disini tidak harus diakibatkan oleh meluapnya air sungai, akan tetapi dapat terjadi oleh karena pasokan air yang berlebihan, langsung dari curahan hujan yang terbawa oleh siklon tropis tersebut.

Tabel 8.4. : Daerah-daerah awal pertumbuhan siklon tropis

Nomor	Nama Daerah Pertumbuhan	Luasan Wilayah
1	Atlantik Utara	Samudra Atlantik Utara, Laut Karibia dan Teluk Meksiko
2	Pasifik Timur Laut	Amerika Utara hingga 180° BT
3	Pasifik Barat Laut	Sebelah Barat 180° BT, termasuk Laut Cina Selatan
4	Hindia Utara	Teluk Benggala dan Laut Arab
5	Hindia Selatan	Samudra Hindia Selatan sebelah Barat 100° BT
6	Hindia Tenggara / Australia	Bumi Belahan Selatan 100 - 142° BT
7	Pasifik Barat Daya / Australia	Bumi Belahan Selatan sebelah Timur 142° BT

Sumber : <http://meteo.bmkg.go.id/siklon/learn/01/id>

Pusaran angin siklon tropis yang berkecepatan tinggi, mempunyai daya hisap yang sangat besar, sehingga mampu untuk menarik bahkan mencabut berbagai benda termasuk tumbuhan besar yang berakar tunjang.

Peristiwa siklon tropis ini adalah merupakan suatu proses alam yang tak dapat dicegah. Pola pergerakan siklon tropis ini selalu berubah dari waktu ke waktu. Walaupun teknologi klimatologi telah mampu untuk meng-identifikasi arah pergerakannya, namun identifikasi secara lebih dini masih belum mampu dilakukan, sehingga hampir selalu menjadi bencana mematikan yang menimbulkan korban dalam jumlah besar.

8.3. Kebakaran Hutan

Api sebagai alat atau teknologi yang dikuasai manusia untuk mengelola lingkungan dan sumberdaya alam telah dikenal sejak jaman Paleolitikum (1 400 000 sd 700 000 tahun yang lalu). Sejak manusia mengenal dan menguasai teknologi api, maka api mulai digunakan untuk membuka hutan, meningkatkan kualitas lahan pengembalaan, memburu satwa liar, mengusir satwa liar, berkomunikasi sosial disekitar api unggun dan sebagainya.

Analisa terhadap arang dari tanah Kalimantan menunjukkan bahwa hutan telah terbakar secara berkala setidaknya sejak 17500 tahun yang lalu. Kebakaran besar kemungkinan telah terjadi secara alamiah selama periode iklim kering pada saat itu. Namun, manusia juga telah membakar hutan lebih dari 10 ribu tahun yang lalu untuk mempermudah perburuan dan membuka lahan pertanian. Catatan tertulis satu abad yang lalu dan sejarah lisan dari masyarakat yang tinggal di hutan membenarkan bahwa kebakaran hutan bukanlah hal yang baru, yaitu dimana penyebab utama terjadinya kebakaran hutan (99%) adalah aktivitas manusia, dan hanya sebagian kecil yang disebabkan oleh proses alam (< 1%).

Proses kebakaran alami dapat terjadi oleh karena sambaran petir, erupsi gunung api, terbakarnya singkapan batu bara dan tumpukan serasah kering oleh panas matahari yang ekstrem. Kebakaran hutan besar dapat pula terpicu oleh fenomena iklim *El-Nino*, seperti yang terjadi pada tahun 1987, 1991, 1994 dan 1997 (*Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup dan UNDP, 1998*).

Tabel 8.5. : Kebakaran Hutan di berbagai negara (2011 – 2015)

KEBAKARAN HUTAN DI BERBAGAI NEGARA DALAM SATUAN LUAS (HEKTARE)						
Negara	2011	2012	2013	2014	2015	Pertumbuhan
USA ¹	305.347	3.388.390	1.722.870	1.455.024	4.300.800	2.244.711
Rusia	1.830.232	1.985.300	1.418.968	2.738.200	2.871.360	2.312.299
Felgial	73.810	110.211	152.750	19.029	81.443	81.218
Egypt ²	702.361	706.171	52.080	48.771	103.700	307.438
Prancis	6.800	6.900	7.600	7.400	11.700	6.600
India	72.364	130.184	20.078	36.125	41.811	41.200
Yunani	20.344	80.504	46.029	30.668	60.443	40.207
Polandia	4.570	1.200	1.200	2.000	1.200	2.000
Denmark	340	420	1.380	14.000	294	1.070
Australia	1.300	-	1.000	16.100	21.800	200.417
Indonesia ³	2.112	9.200	4.974	16.278	261.800	67.518

Sumber : ¹ European Commission, 2011; ² ECU-NASA, National Center for Disaster and Information; ³ Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan

Sumber : <https://gapki.id/news/5403/mitos-6-16-kebakaran-hutan-di-indonesia-lebih-luas-dari-negara-negara-lain>

Pada tahun 1997-1998 ketika bencana *El-Nino* melanda, bumi kehilangan hutan seluas sekitar 25 juta hektar akibat kebakaran, sehingga berdampak langsung pada ekosistem global dengan naiknya emisi karbon dan hilangnya keanekaragaman hayati. Sehingga kebakaran hutan pada saat itu dianggap sebagai bencana lingkungan terbesar sepanjang abad. Kerugian yang diakibatkan mencapai US \$10 miliar, dihitung dari deforestasi, kehilangan keanekaragaman hayati dan pelepasan emisi karbon, dan belum mencakup kerugian sosial dan dampak ikutan lainnya. Indonesia sendiri kehilangan hutan akibat hangus terbakar sekitar 9,7 juta hektar dalam bencana tersebut.

8.3.1. Dampak Kebakaran Hutan

Akibat dari kebakaran hutan dalam skala luas dapat menimbulkan dampak negatif, baik secara langsung ataupun tak langsung.

Dampak merugikan yang langsung dialami, diantaranya adalah timbulnya korban jiwa atau cedera, kerusakan infrastruktur,

kehilangan properti, kerusakan lahan dan sebagainya. Asap yang ditimbulkan oleh kebakaran hutan berdampak langsung pada gangguan saluran pernapasan, oleh karena mengandung sejumlah gas dan partikel kimia yang mengganggu pernapasan seperti seperti sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), formaldehid, akrolein, benzen, nitrogen oksida (NO_x), ozon (O₃) dan sebagainya.

Sementara itu pada kasus kebakaran besar, tak jarang harus dilakukan evakuasi permukiman penduduk, yang berdampak tak langsung dengan hilangnya lingkungan sosial dan budaya setempat.

Disamping dampak langsung, berbagai dampak tak langsung dapat terjadi sebagai akibat dari kebakaran hutan, terutama dalam skala yang luas. Hilangnya hutan akibat terbakar, menimbulkan kerugian oleh karena hilangnya sumberdaya hutan yang memiliki nilai ekonomis dan keanekaragaman hayati. Termasuk kerugian ekonomis langsung yang berdampak pada mata pencaharian masyarakat yang tinggal dan mengandalkan mata pencahariannya dari hasil hutan.

Kebakaran hutan merupakan bencana ekologis bagi keanekaragaman hayati, akibat dari hilangnya sejumlah besar spesies tumbuhan dan plasma nutfah endemik, dan juga menyebabkan hilangnya habitat bagi satwa liar penghuni hutan. Kerusakan vegetasi menyebabkan hutan tidak dapat menjalankan fungsi ekologisnya secara maksimal. Pada hutan gambut, dimana lapisan tanah gambut yang kaya karbon dengan kedalamannya dapat mencapai 10 meter ikut terbakar, Karbon yang tersimpan dalam tanah hutan dan biomassa dilepaskan dengan mendadak, sehingga melepaskan sejumlah besar emisi karbon dan gas rumah kaca lain ke atmosfer. Pengaruh pelepasan emisi gas rumah kaca ini turut berperan memperburuk perubahan iklim dan meningkatkan suhu di permukaan bumi.

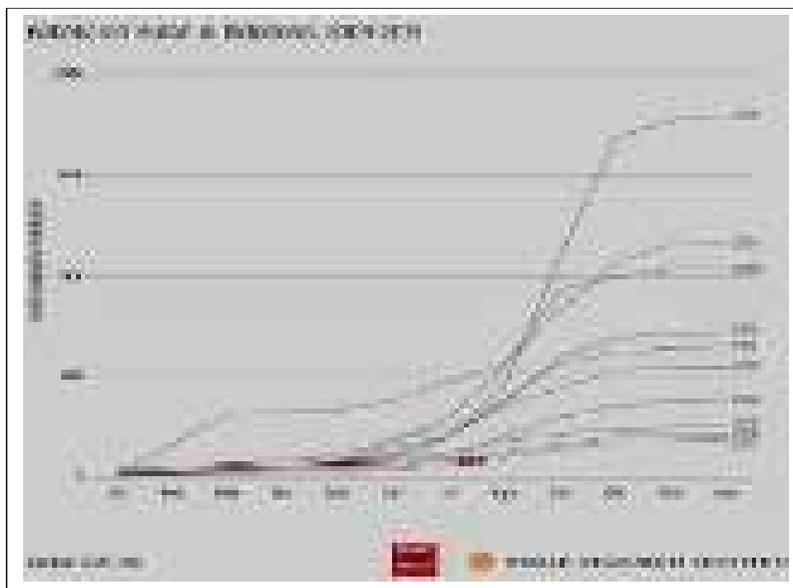
8.3.2. Berbagai Kasus Kebakaran Hutan

Walaupun daerah ber-iklim *tropis* merupakan merupakan wilayah yang mengalami intensitas radiasi matahari yang tinggi, namun bukan berarti daerah-daerah ber-iklim *sub-tropis* akan terbebas dari bencana kebakaran hutan. Berbagai laporan menunjukkan bahwa kebakaran hutan juga terjadi pada daerah ber-iklim *sub-tropis*.

Kebakaran hutan besar terjadi kembali pada tahun 2019 tidak hanya di Indonesia sebagai negara yang ber iklim *tropis*, namun juga terjadi pada berbagai tempat di dunia dalam waktu yang hampir bersamaan.



Gambar 8.27. : Peta sebaran titik api pada kebakaran hutan Indonesia tahun 2019



Gambar 8.28. : Grafik kecenderungan potensi kebakaran hutan di Indonesia

Kebakaran Hutan danau Swan - Alaska (2019).

Kebakaran lahan melanda danau Swan, di Semenanjung Kenai - Alaska sepanjang akhir Agustus hingga awal September 2019. Penyebaran api kebakaran hutan ini dipicu oleh kondisi atmosfer yang hangat dan kering, pada musim panas yang terjadi di daerah tersebut. Kebakaran hutan dan lahan yang sudah terjadi sejak tanggal 5 Juni 2019, diduga diakibatkan oleh sambaran petir yang mengenai pepohonan di daerah Danau Swan. Kobaran api tersebut merupakan peristiwa kebakaran terbesar di Alaska, yang menurut catatan tanggal 25 Agustus 2019, meliputi lahan seluas 161 000 hektar (*accuweather.com*).

Kebakaran Hutan Siberia - Rusia (2019).



Sumber : <https://www.liputan6.com/global/read/4057596/selain-amazon-dan-ri-kebakaran-hutan-juga-terjadi-di-7-wilayah-dunia-ini>

Gambar 8.29. : Ilustrasi kebakaran 3 juta hektar hutan di Siberia (AP via TASS)

Sekitar 3 juta hektar lahan di wilayah pusat dan timur Rusia terbakar sejak akhir Juli 2019 (*The Guardian*, 1/8/2019). Kebakaran yang berkecamuk di hamparan luas Siberia selama berhari-hari, menyelimuti banyak kota dengan asap hitam. Asap pekat telah mempengaruhi pemukiman kecil serta kota-kota di Siberia Barat, wilayah Altai, dan juga dataran tinggi Ural seperti Chelyabinsk dan Yekaterinburg, dan menimbulkan gangguan jadwal penerbangan. Kebakaran dipicu oleh badai petir pada suhu yang melebihi 30⁰ C, dan meluas akibat tiupan angin kencang. Kebakaran musim panas adalah hal biasa di Rusia, namun yang terjadi melampaui kebiasaan, dan

menyebar lebih jauh dari biasanya. Menurut perwakilan Greenpeace setempat, hampir 12 juta hektar hutan telah terbakar, dan berpotensi meningkatkan kadar CO₂ di udara secara signifikan, serta mengurangi kapasitas kemampuan hutan untuk menyerapnya dalam jangka panjang. Para pemerhati lingkungan telah memperingatkan bahwa skala kobaran api yang terjadi, dapat mempercepat pemanasan global, selain dari efek langsungnya terhadap kesehatan penduduk.

Kebakaran Hutan kepulauan Canary - Spanyol.



Sumber : <https://www.liputan6.com/global/read/4057596/selain-amazon-dan-ri-kebakaran-hutan-juga-terjadi-di-7-wilayah-dunia-ini>

Gambar 8.30. : Ilustrasi kebakaran hutan Kep Canary (AFP Photo)

Kebakaran hutan terjadi di Kepulauan Canary-Spanyol pada membuat 19 Agustus 2019, memaksa evakuasi lebih dari 8.000 orang penduduk. Kobaran api berpacu melintasi hutan kering menuju *Taman Alam Tamadaba*, yang dianggap sebagai salah satu permata di *Grand Canaria*, sebuah pulau vulkanik pegunungan di kepulauan Samudra Atlantik disebelah barat laut Afrika (*USA Today*). Suhu musim panas di pulau itu Senin diperkirakan mencapai 36°C, dan angin kencang yang meniupkan bara api ke udara menimbulkan kebakaran sekunder. Kebakaran hutan memang biasa terjadi di Eropa Selatan selama musim panas yang kering, namun perubahan kebiasaan dan gaya hidup telah membuat hutan menjadi lebih rentan, sehingga kebakaran yang terjadi menjadi jauh lebih buruk. Upaya

penanggulangan kebakaran hutan mengalami kesulitan, oleh karena kondisi pulau yang terjal, ber gunung-gunung dan jurang yang dalam, sehingga sulit untuk dicapai.

Kebakaran Hutan Johor Malaysia (2019).

Kebakaran hutan terjadi di Johor-Malaysia, pada 25 Agustus 2019 (*Bername*). Dipicu oleh cuaca kering kemarau dan hembusan angin kencang, menyebabkan kebakaran hutan tersebut menyebar ke wilayah seluas 98 hektar. Sementara itu Malaysia juga sedang mengalami dampak asap, yang disebabkan oleh kebakaran hutan di Indon.e dampaksia, sehingga terjadi akumulasi.

Kebakaran Hutan Greenland - Denmark (2019).



Sumber : <https://www.liputan6.com/global/read/4057596/selain-amazon-dan-ri-kebakaran-hutan-juga-terjadi-di-7-wilayah-dunia-ini>

Gambar 8.31. : Ilustrasi Kebakaran Hutan Greenland - Denmark (iStockphoto)

Greenland, wilayah teritorial Denmark di Arktika, dilanda rangkaian kebakaran hutan pada pertengahan Agustus 2019. Api berkobar sejak awal Juli 2019, dan sempat meluas ke wilayah berpenduduk (*Bloomberg*). Dikuatirkan, apabila tidak diatasi, kebakaran selama musim dingin ini akan menyebabkan kerusakan serius pada ekosistem Greenland, dan menimbulkan pencairan es tambahan di daerah yang sudah terkena dampak pemanasan global. Menurut laporan Pusat Data Salju & Es Nasional Amerika Serikat

(NSIDC), pada bulan Juni, area luas yang setara dengan sekitar 80 miliar ton lapisan es di Greenland telah menghilang selama 10 hari pada bulan itu.

Kebakaran Hutan California-Amerika Serikat (2018-2019).

Tahun 2018 adalah salah satu periode terburuk dalam sejarah California, dimana kebakaran hutan melanda hampir sebagian besar kawasan alam negara bagian AS itu. Kebakaran kembali terjadi pada tahun 2019 walau tidak dalam skala masif seperti sebelumnya, yaitu melanda Hutan Nasional Plumas di California Utara (*The Sacramento Bee-Sabtu 7 September 2019*). Api yang berkobar pada 2000 hektar areal hutan pagi hari, oleh tiupan angin kencang dengan cepat berkembang meluas membakar lebih dari 17000 hektar pada malam hari, bahkan membakar 24040 hektar hutan pada pagi berikutnya. Kebakaran hutan juga meletus di daerah pedesaan lainnya di California Utara, termasuk di wilayah Danau dan Butte.



Sumber : <https://www.liputan6.com/global/read/4057596/selain-amazon-dan-ri-kebakaran-hutan-juga-terjadi-di-7-wilayah-dunia-ini>

Gambar 8.32. : Pohon-pohon terbakar oleh api dalam kebakaran hutan yang dijuluki Carr Fire di Whiskeytown, California, Jumat (28/7) yang telah menghancurkan 1900 hektare lahan.

(JOSH EDELSON/ AFP)

Kebakaran Hutan Queensland-Australia (2019).



Sumber : <https://www.liputan6.com/global/read/4057596/selain-amazon-dan-ri-kebakaran-hutan-juga-terjadi-di-7-wilayah-dunia-ini>

Gambar 8.33. :Ilustrasi kebakaran hutan dan lahan di Australia selama musim kemarau, lazim dikenal sebagai fenomena Bushfire (Rob Griffith / AFP PHOTO)

Api membakar kawasan taman wisata *Binna Burra Lodge* di pedalaman Gold Coast. Bencana kebakaran hutan yang lazim disebut sebagai *bushfire* di Australia ini, dilaporkan masih berlangsung hingga Minggu 8 September 2019 pagi, dan mengakibatkan tingkat kerusakan yang ekstrem pada *Resort Binna Burra* yang terdaftar sebagai cagar budaya alam yang berdiri sejak tahun 1930-an (*ABC Australia, Minggu-8/9/2019*). Kondisi ini sangat mirip dengan yang terjadi Queensland Tengah pada bulan November 2018.

Sebelumnya, kebakaran hutan juga diperkirakan telah terjadi di Central Highlands dan Coalfields, Wide Bay, Burnett serta pantai tenggara Australia. Diperkirakan pula berikutnya kebakaran ekstrem akan terjadi di Maranoa dan Warrego, serta distrik Darling Downs dan Granite Belt.

9

GERAKAN TANAH

Lahan adalah bagian permukaan bumi berupa daratan, yang terdiri dari berbagai jenis masa batuan dan tanah, dimana berbagai vegetasi dan konstruksi buatan manusia maupun hewan berada diatas dan didalamnya. Secara alamiah lahan akan selalu berubah, baik oleh proses alam maupun *artifisial* buatan manusia. Dan secara alamiah pula akan selalu bereaksi menyesuaikan diri atas perubahan yang terjadi, untuk mencapai keseimbangannya kembali. Ketika kecepatan proses penyesuaian dirinya berubah, sehingga mengganggu kepentingan manusia, maka sering disebutkan bahwa lahan tersebut berada dalam kondisi tidak stabil. Lahan dapat berbentuk dataran landai, cekungan-cekungan lembah atau lereng-lereng landai maupun terjal dipermukaan bumi. Namun proses pelapukan dan erosi menghancurkan bagian-bagian yang menonjol dipermukaan bumi, untuk kemudian memindahkan material rombakannya, untuk mengisi bagian lain dipermukaan bumi yang cekung.

Gerakan tanah (*mass movement*) adalah suatu peristiwa alam dimana masa tanah atau bebatuan bergerak menurun kemiringan lereng oleh sebab gaya gravitasi. Sering pula disebut dalam istilah yang lebih umum sebagai *tanah longsor (landslide)*. Sedangkan dari cara bergeraknyapun ber-macam macam pula. Seperti menggelincir (*sliding*), nendatan (*slumping*), roboh (*toppling*), runtuh atau jatuh (*falling*), merayap (*creeping*), atau mengalir (*flowing*). Demikian pula halnya dengan material yang terkait, dapat berupa masa tanah (*soil*), masa batuan (*rock*), atau bahan-bahan rombakan lainnya (*debris*). Namun demikian, peristiwa tersebut menunjukkan bahwa kondisi lahan berada dalam keadaan tidak stabil, dan sedang bergerak menuju kestabilannya.

9.1. Jenis-Jenis Gerakan Tanah

Varnes (1978), mencoba mengklasifikasikan gerakan tanah berdasarkan kepada jenis gerakannya dan masa material yang mengalami gerakan. Berdasarkan jenis gerakannya, gerakan tanah meliputi jatuhnya (*fall*), roboh (*topple*), longsor (*slide*) yang terdiri dari longsor rotasi (*rotational slide*) dan longsor translasi (*translational slide*), pergeseran lateral (*lateral spread*), aliran (*flow*), dan campuran (*complex*) yang merupakan kombinasi dari berbagai jenis gerakan. Sedangkan masa material yang bergerak meliputi batuan dasar (*bedrock*) dan tanah (*engineering soil*). Untuk material tanah diklasifikasikan lagi menjadi bahan rombakan (*debris*) yang umumnya berbutir kasar, dan tanah (*earth*) yang umumnya berbutir halus.

Sementara itu Departemen Pekerjaan Umum (1990) mendefinisikan gerakan tanah sebagai proses perpindahan suatu masa tanah dengan arah tegak, mendatar atau miring, dari kedudukan semula karena pengaruh gravitasi, air tanah, atau adanya beban dari luar.

Tabel 9.1. : Klasifikasi Tanah Longsor (*Landslides*) – Varnes, 1978.

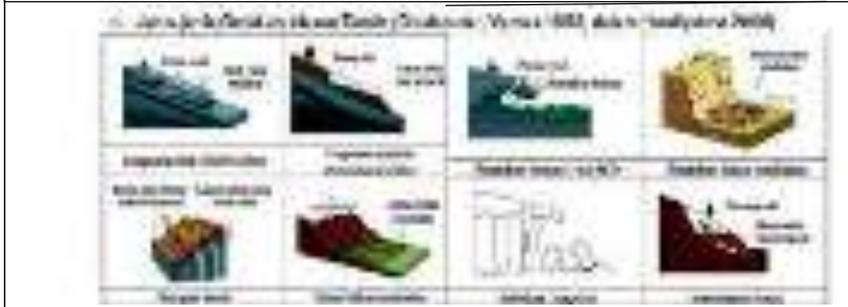
TYPE OF MOVEMENT		MATERIAL	TYPE OF MATERIAL	
			Rotational Slide	Translational Slide
FALL	Topple	Bedrock	Bedrock	Bedrock
	Rockfall	Bedrock	Bedrock	Bedrock
SLIDE	Rotational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
	Translational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
FLOW	Rotational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
	Translational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
SPREAD	Rotational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
	Translational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
DEBRIS	Rotational	Bedrock	Bedrock	Bedrock
	Translational	Bedrock	Bedrock	Bedrock

Sumber :
Types of landslides. Abbreviated version of Varnes' classification of slope movements (Varnes, 1978).

Gaya gravitasi adalah penggerak utama tanah longsor, namun faktor-faktor penyebabnya adalah keseimbangan antara gaya pendorong dengan gaya penahan, dimana longsor akan terjadi manakala besarnya gaya pendorong melampaui gaya penahannya. Beban material adalah gaya pendorong gerakan tanah, sedangkan kekuatan geser (*shear strength*) pada bidang gelincir batuan, adalah gaya penahannya.

Jenis2 Gerakan Tanah

Departemen Pekerjaan Umum (1990) mendefinisikan gerakan tanah sebagai proses perpindahan suatu massa tanah dengan arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukan semula karena pengaruh gravitasi, air tanah, atau adanya beban dari luar.



Sumber : Cruden & Varnes (1992) dalam Hardiyatmo (2006)

Gambar 9.1. : Klasifikasi Tanah Longsor atau Gerakan Tanah (Cruden & Varnes, 1992)

Ada berbagai macam model gerakan tanah, sesuai klasifikasi, yaitu :

- **Longsoran Blok (Block Slides)**, yaitu dimana suatu blok batuan menggelincir melalui bidang gelincir berupa bidang rata, yang biasanya merupakan bidang perlapisan yang miring kearah lereng. Peristiwanya dapat dipicu oleh gempa bumi, timbulnya retakan2 terbuka, dan atau infiltrasi air permukaan.



**BLOCK SLIDES BY EARTHQUAKE, MARCH 4, 1977
EASTERN CARPANTHIAN, BUCHAREST-ROMANIA**

Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardiyatmo (2006)

Gambar 9.2. : Longsoran Blok (Block Slide)

- **Longsoran Translasi (*Translational Slides*)**, secara umum sama dengan *longsor blok*, namun yang bergerak menggelincir dalam hal ini adalah masa tanah (*soil*) dan material rombakan (*debris*), yang relatif belum terkonsolidasi. Sehingga longsor dapat terjadi dalam gerakan yang cepat dan melibatkan sejumlah besar material. Bidang gelincirnya pun dapat berupa bidang perlapisan, atau dapat juga berupa bidang batas pelapukan, atau bidang batas antara batuan dengan material rombakannya yang belum terkonsolidasi. Secara umum kondisi seperti demikian, lebih rentan terhadap longsor.



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.3. : Longsoran Translasi (*Translational Slides*)

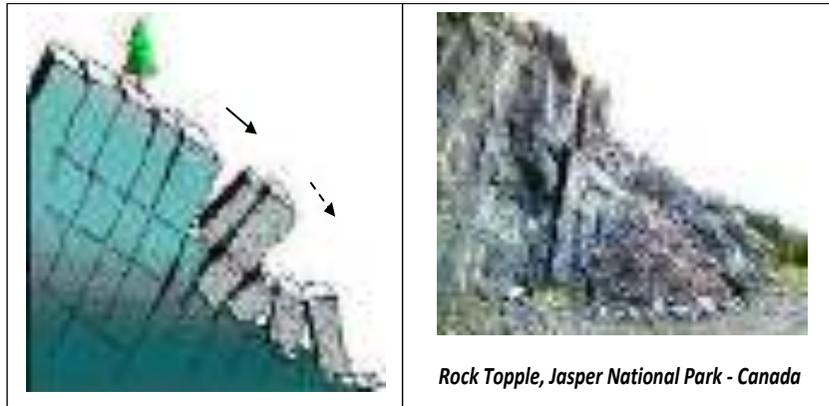
- **Nendatan (*Slump*)**, adalah longsor pada masa tanah (*soil*) atau material rombakan (*debris*) dengan bidang gelincir melingkar, sehingga disebut juga sebagai *rotational slides*. Dapat terjadi pada masa tanah atau material rombakan yang tebal pada lereng-lereng yang terjal.



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.4. : Nendatan (*Slump*)

- **Robohan (*Topple*)**, adalah suatu gerakan roboh terguling, pada masa batuan. Terjadi pada masa batuan dengan bidang retak miring curam berlawanan dengan kemiringan lereng. Dorongan pada retakan batuan, akan mendorong rebah kolom-kolom batuan. Biasanya gerak roboh ini berlanjut dengan jatuhnya bongkah-bongkah batuan (*rock fall*).



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.5. : Robohan pada batuan (*Rock Topple*)

- **Runtuhan Batu (*Rock Fall*)**, terjadi pada lereng-lereng batuan yang terjal, akibat hilangnya tumpuan pada bagian bawahnya, baik oleh erosi maupun penggalian atau pengupasan lereng. Terutama terjadi pada bebatuan yang mempunyai struktur retakan tegak.



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.6. : Runtuhan Batu (*Rock Fall*)

- **Runtuhan Bahan Rombakan (*Debris Fall*)**, pada dasarnya terjadi melalui proses yang sama dengan runtuh batu. Hanya saja yang mengalami keruntuhan dan berjatuh adalah material rombakan atau *debris*. Yaitu berupa tanah pelapukan disertai fragmen-fragmen batuan lapuk yang terlepas dari batuan induknya. Maka timbunan material rombakan tersebut sering dijumpai teronggok pada kaki lereng yang terjal, sebagai timbunan yang disebut sebagai *talus*, atau *scree slope*.



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.7. : Runtuhan Bahan Rombakan (*Debris Fall*)

- **Rayapan Tanah (*Soil Creep*)**, merupakan pergerakan masa tanah pelapukan atau material bahan rombakan, dengan bidang batas antara tanah pelapukan dengan tanah padat atau batuan dasarnya sebagai bidang gelincirnya. Tanah padat atau batuan dasar yang kedap air, seperti halnya lempung, merupakan bidang gelincir yang potensial untuk menggerakkan rayapan. Rembesan air pada bidang batas tersebut merupakan pelicin atau pelumas yang memicu pergerakan rayapan. Maka faktor air juga merupakan pemicu, dimana gerakan rayapan akan lebih aktif pada musim penghujan, dan dapat berhenti pada musim kemarau. Rayapan tanah ini dapat bergerak menuruni lereng yang cukup landai.



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.8. : Rayapan Tanah (*Soil Creep*)

Rayapan tanah merupakan gerakan masa tanah yang sangat lambat, sehingga tak teramati oleh mata. Namun tanda-tanda pergerakan tersebut dapat diidentifikasi dari jejak-jejaknya yang masih dapat dilihat. Tiang-tiang pagar atau bahkan pepohonan yang miring, menunjukkan ada gaya yang mendorongnya secara perlahan. Sementara itu pada bagian atas lereng, retakan-retakan pada permukaan tanah dengan disertai jejak-jejak pergeseran menunjukkan adanya tanda-tanda pergerakan.

- **Aliran Bahan Rombakan (*Debris /Earth Flow*)**, pada dasarnya sama dengan rayapan tanah, namun mempunyai kecepatan bergerak yang lebih tinggi, serta melibatkan sejumlah besar bahan rombakan. Curah hujan yang tinggi dan material bahan rombakan yang belum terkonsolidasi, menyebabkan terjadinya pembuburan (*liquefaction*). Maka timbunan material bahan rombakan berubah menjadi lumpur, dan mengalir menuruni lereng dengan mengikis dan menghanyutkan berbagai material sampai bongkah-bongkah batuan disepanjang jalur yang dilaluinya.



Sumber :Cruden & Varnes (1992) dalam Hardyatmo (2006)

Gambar 9.9. : Aliran Bahan Rombakan (*Debris/Earth Flow*)

Daerah disekitar gunung api aktif, secara umum merupakan daerah potensial untuk terjadinya aliran bahan rombakan ini. Material-material vulkanik yang tertimbun pada lereng-lereng kerucut gunung api, merupakan material yang belum terkonsolidasi, sehingga rentan untuk longsor. Curah hujan yang tinggi pada musim penghujan dapat melumpurkan material-material tersebut, sehingga mengalir deras menuruni lereng sebagai aliran lumpur. Aliran lumpur vulkanik ini secara umum dikenal sebagai *lahar dingin*. Sedangkan di Sumatera Barat dikenal sebagai *galodo*.

9.2. Mekanisme Longsor (*Landslide*) Pada Lereng Tanah

Suatu masa tanah dapat tetap bertahan tidak runtuh meski berada dalam timbunan yang memiliki kemiringan lereng. Hal tersebut dapat terjadi oleh karena kekuatan geser tanah (*shear strength*) yang dibentuk oleh butiran-butiran tanah yang saling mengunci (*interlocking*), yang secara keteknisan di-identifikasikan dalam nilai sudut geser dalam, dan adanya ikatan kohesi diantara butiran-butirannya.

Keruntuhan pada suatu lereng masa tanah, terjadi manakala kemiringan lereng atau pembebanannya telah melampaui kekuatan gesernya. Keruntuhan atau longsor (*slide*) pada masa tanah dapat terjadi secara translasi melalui bidang gelincir yang datar, atau secara rotasi melalui bidang gelincir melingkar.

Sebagai ilustrasi, digambarkan suatu masa tanah berada diatas bidang rata miring dengan kemiringan α . Maka masa tanah tersebut akan mengalami gaya geser menuruni bidang miring :

Gaya Geser (τ') :

$$\tau' = W \sin \alpha$$

Gaya geser tersebut akan mengalami perlawanan dari ketahanan geser (*shear strength*) :

Ketahanan Geser (τ) :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \Phi$$

$$\tau = W \cos \alpha \operatorname{tg} \Phi$$

Maka masa tanah akan menggelincir apabila gaya gesernya melampaui ketahanan geser yang dimiliki oleh bidang miring. Perbandingan antara ketahanan geser dengan gaya geser secara keteknisan disebut sebagai faktor keamanan (FK). Yaitu, dimana masa tanah akan menggelincir secara translasi (*translational slide*), apabila faktor keamanannya kurang dari 1 ($FK < 1$).

Faktor Keamanan (FK) :

$$FK = \tau' / \tau$$

$$FK = W \sin \alpha / W \cos \alpha \operatorname{tg} \Phi$$

$$FK = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \Phi$$

Maka nilai $F = 1$, disebut juga sebagai batas keseimbangan pada bidang gelincir.

Kondisi Pada Batas Keseimbangan :

$$\tau' = \tau$$

$$F = 1$$

$$\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \Phi = 1$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \Phi$$

$$\alpha = \Phi$$

Batas keseimbangan tersebut terjadi bila sudut kemiringan bidang gelincir (α) sama dengan sudut geser dalamnya (Φ). Dengan kata lain sudut geser dalam (Φ) merupakan batas kemiringan maksimum dari lereng tanah yang non-kohefif, untuk tetap bertahan tidak longsor.

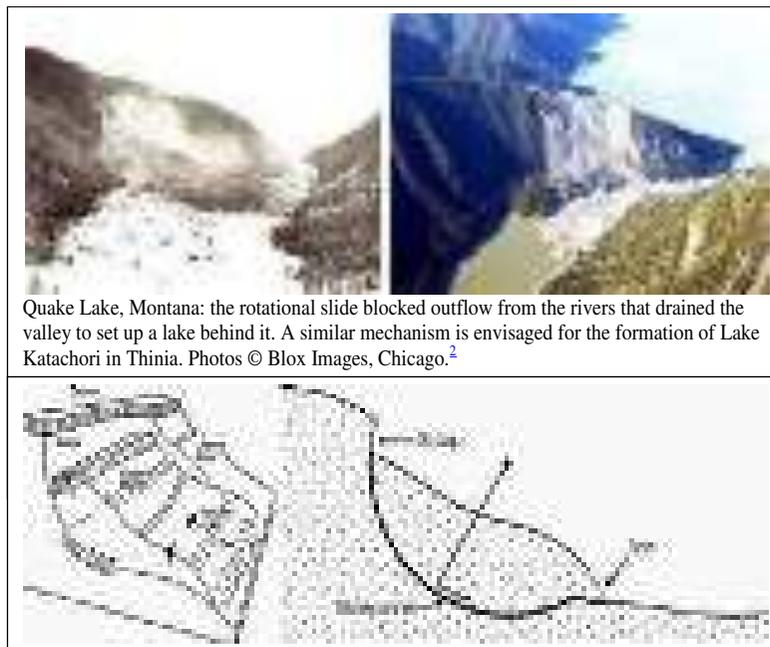
Namun demikian kondisi fisik bidang gelincir juga berpengaruh pada ketahanan gesernya. Dimana ikatan kohesi pada bidang gelincir

(c) akan meningkatkan ketahanan gesernya, sedangkan infiltrasi air tanah akan menimbulkan tekanan air pori yang akan mengurangi ketahanan gesernya, sehingga :

- Ketahanan geser dengan adanya kohesi menjadi : $\tau = c + \sigma \tan \Phi$
- Ketahanan geser dengan adanya tekanan air pori menjadi : $\tau = (\sigma - u) \tan \Phi$
- Ketahanan geser dengan adanya kohesi dan tekanan air pori menjadi : $\tau = c + (\sigma - u) \tan \Phi$

9.2.2. Mekanisme Longsoran Rotasi

Longsoran rotasi adalah suatu pergerakan masa tanah menggelincir melalui bidang gelincir berupa busur lingkaran. Terjadi pada masa tanah yang cukup tebal tanpa ada bidang diskontinuitas yang berfungsi sebagai bidang gelincir, atau bidang gelincir bukan merupakan bagian terlemah pada masa tanah. Maka masa tanah menggelincir oleh karena beban gaya penggeraknya telah melampaui kekuatan geser (*shear strength*) masa tanah tersebut.



Sumber : Photo@Blox Image, Chicago

Gambar 9.12. : Longsoran tanah rotasi

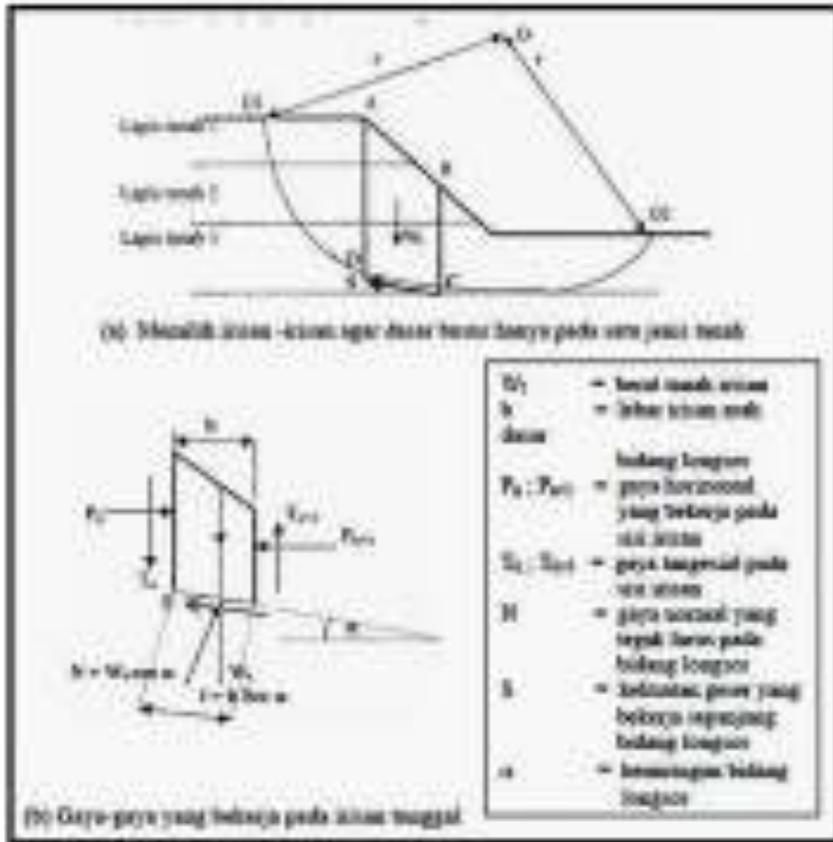
Metode analisis kestabilan lereng terhadap longsor rotasi ini secara garis besar dapat dibagi menjadi dua cara, yaitu cara pengamatan visual, dan cara komputasi.

Cara pengamatan visual adalah cara dengan mengamati langsung di lapangan dengan membandingkan kondisi lereng yang bergerak atau diperkirakan akan bergerak dan yang tidak, dengan berdasarkan pengalaman lapangan. Namun cara ini kurang teliti oleh karena sangat tergantung pada kompetensi dan pengalaman pengamatnya. Cara ini dipakai bila tidak ada resiko longsor pada saat pengamatan. Sehingga cara ini lebih merupakan pemetaan potensi gerakan tanah pada suatu daerah secara kualitatif.

Cara komputasi dilakukan dengan melakukan perhitungan berdasarkan parameter sifat-sifat fisik dan keteknisan tanah. Pada dasarnya kunci utama analisa gerakan tanah adalah pada perhitungan ketahanan geser tanah, pada kondisi-kondisi (*Bowles, 1989*) :

- (a) Tak terdrainase,
- (b) Efektif untuk beberapa kasus pembebanan,
- (c) Meningkatkan sejalan peningkatan konsolidasi sejalan dengan waktu atau dengan kedalaman,
- (d) Berkurang dengan meningkatnya kejenuhan air (sejalan dengan waktu) atau terbentuknya tekanan pori yang berlebih atau terjadi peningkatan air tanah.

Perhitungan stabilitas lereng dengan Metoda Fellenius



Gambar 9.13. : Gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan pada metoda *Fellenius*

Metode analisis kestabilan lereng yang paling umum adalah metode irisan yang dicetuskan oleh *Fellenius* (1939). Metode ini digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng yang tersusun dari masa tanah, dan bidang gelincirnya berbentuk busur.

Metode *Fellenius* dapat digunakan pada lereng-lereng dengan kondisi isotropis, non isotropis dan berlapis-lapis. Masa tanah yang bergerak diandaikan terdiri dari atas beberapa elemen vertikal. Lebar elemen dapat diambil tidak sama dan sedemikian sehingga lengkung busur di dasar elemen dapat dianggap garis lurus. Berat total tanah/batuan pada suatu elemen (W_n) termasuk beban Iuar yang bekerja pada permukaan lereng (W_t), diuraikan dalam komponen tegak lurus dan tangensial pada dasar elemen. Dengan cara ini, pengaruh gaya T dan E yang bekerja disamping elemen diabaikan.

Faktor keamanan dalam hal ini adalah perbandingan momen penahan longsor dengan penyebab longsor, dengan perhitungan sebagai berikut :

Momen tahanan geser (M_{penahan}) pada bidang longsor adalah :

$$M_{\text{penahan}} = R \cdot r$$

Dimana :

R = gaya geser

r = jari-jari bidang longsor

Tahanan geser (R) pada dasar tiap elemen adalah :

$$R = S \cdot b = r (c' + W_t \cos \sigma \tan \phi')$$

$$\sigma = \frac{W_t \cos \alpha}{b}$$

Momen penahan (M_{penahan}) yang ada sebesar :

$$M_{\text{penahan}} = r (c'b + W_t \cos \alpha \tan \phi')$$

Komponen tangensial W_t , bekerja sebagai penyebab longsor yang menimbulkan momen penyebab (M_{penyebab}) sebesar :

$$M_{\text{penyebab}} = (W_t \sin \alpha) \cdot r$$

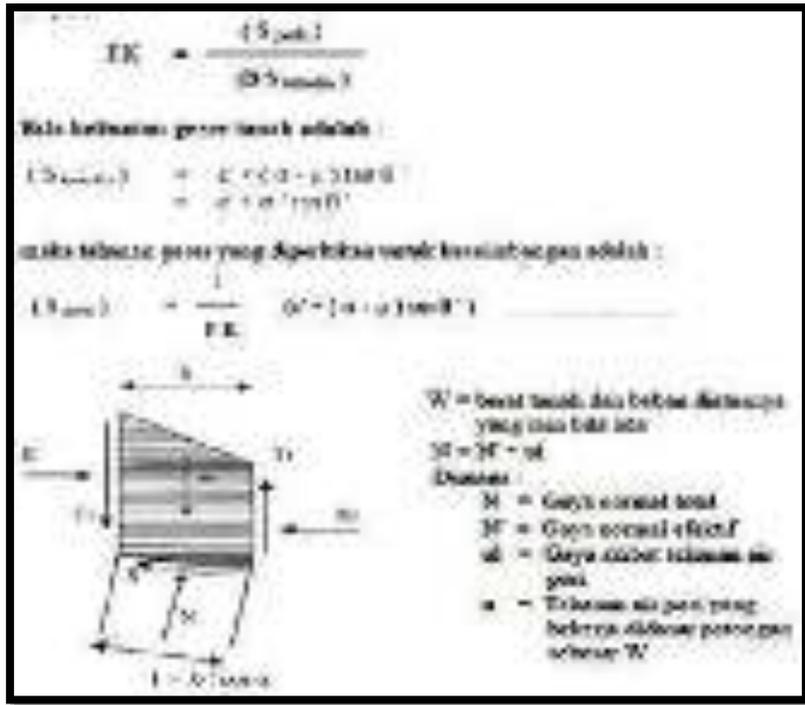
Maka nilai Faktor Keamanan (FK) dari lereng menjadi :

$$FK = \frac{\sum (c'b + W_t \cos \alpha \tan \phi')}{\sum W_t \sin \alpha}$$

Jika lereng terendam air atau jika muka air tanah diatas kaki lereng, maka tekanan air pori akan bekerja pada dasar elemen yang berada dibawah muka air. Dalam hal ini tahanan geser harus diperhitungkan yang efektif sedangkan gaya penyebabnya tetap diperhitungkan secara total, sehingga rumus menjadi :

$$FK = \frac{\sum (c'b + (W_t \cos \alpha - u b) \tan \phi')}{\sum W_t \sin \alpha}$$

Perhitungan stabilitas lereng dengan Metoda Bishop



Gambar 9.14. : Sistem gaya pada suatu elemen menurut *Bishop*

Cara analisa yang dibuat oleh *A.W. Bishop (1955)* menggunakan cara elemen dimana gaya yang bekerja pada tiap elemen ditunjukkan pada seperti pada gambar 5.14. Persyaratan keseimbangan diterapkan pada elemen yang membentuk lereng tersebut, dimana Faktor Keamanan terhadap longsor didefinisikan sebagai perbandingan kekuatan geser maksimum yang dimiliki tanah di bidang longsor (S_{tersedia}) dengan tahanan geser yang diperlukan untuk keseimbangan (S_{perlu}).

Metode ini pada dasarnya sama dengan yang lainnya, namun dengan memperhitungkan gaya-gaya antar irisan yang ada. Metode *Bishop* mengasumsikan bidang longsor berbentuk busur lingkaran, maka yang pertama yang harus diketahui adalah geometri lereng, titik pusat busur lingkaran bidang luncur, serta letak rekahan. Untuk menentukan titik pusat busur lingkaran bidang luncur dan letak rekahan pada longsor busur dipergunakan grafik. Metode *Bishop* yang disederhanakan merupakan metode populer dalam analisa

stabilitas lereng, oleh karena perhitungannya yang sederhana, cepat dan memberikan hasil perhitungan faktor keamanan yang cukup teliti. Metode ini sesuai digunakan untuk pencarian otomatis bidang longsor kritis yang berbentuk busur lingkaran, yaitu dengan mencari faktor keamanan minimum. Dalam metode *Bishop*, komponen-komponen gaya (horizontal dan vertikal) diperhitungkan dengan memperhatikan keseimbangan momen dari masing-masing potongan. Metode ini dapat digunakan untuk menganalisa tegangan efektif.

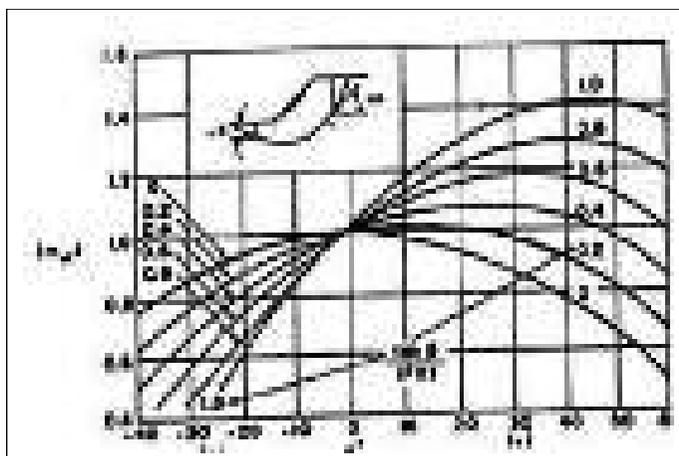
Faktor keamanan busur beraturan radius :

$$FK = \frac{\sum (c' + (c - \mu) \tan \alpha)}{\sum W \sin \alpha}$$

Harga $m.a$ dapat ditentukan dari tabel. Cara penyelesaiannya dilakukan dengan coba ulang (*trial and errors*) harga faktor keamanan FK di ruas kiri persamaan faktor keamanan diatas, dengan menggunakan tabel untuk mempercepat perhitungan. Perhitungan Faktor keamanan dengan cara ini menjadi tidak sesuai atau terlalu besar, apabila sudut negatif pada lereng paling bawah mendekati 30° . Kondisi ini dapat terjadi apabila lingkaran longsornya sangat dalam, atau titik pusat rotasi berada dekat dengan puncak lereng.

Faktor keamanan yang didapat dari perhitungan cara *Bishop* ini lebih besar dari yang didapat dengan cara *Fellenius*.

Tabel 9.2. : Harga $m.a$ untuk persamaan Bishop

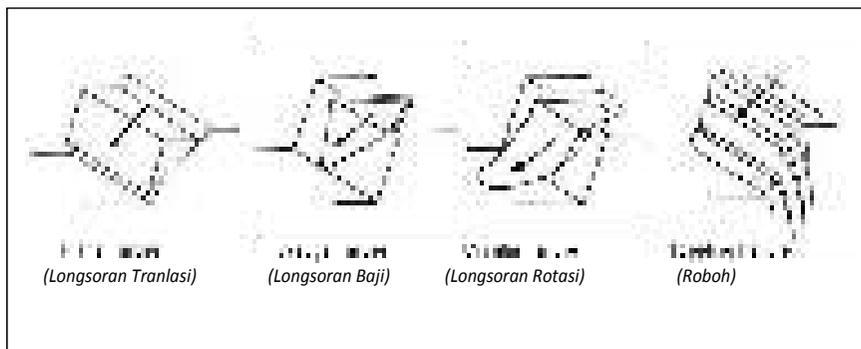


9.3. Keruntuhan Lereng Batuan

Secara umum, batuan terbentuk dari butiran-butiran mineral ataupun fragmen-fragmen batuan yang telah ada sebelumnya, yang terikat satu dengan lainnya baik oleh sementasi, kompaksi maupun kristalisasi. Ikatan diantara butiran-butiran penyusun batuan tersebut membentuk ikatan kohesi yang kuat, sehingga membentuk masa batuan yang kokoh dengan kekuatan yang relatif tinggi (*compressive strength, tension strength, shear strength*) dibandingkan dengan tanah, walaupun proses pelapukan dapat mengurangnya sehingga mendekati kekuatan tanah.

Kekuatan masa batuan, secara umum sangat dipengaruhi oleh keberadaan bidang diskontinuitas didalamnya, sehingga dalam banyak hal kekuatan masa batuan, seperti halnya stabilitas lereng batuan baik berupa lereng-lereng alam maupun lereng-lereng galian, sangat dikendalikan oleh keberadaan bidang-bidang diskontinuitas tersebut. Maka dalam meng-analisa stabilitas suatu lereng batuan, identifikasi bidang diskontinuitas selalu menjadi prioritas utama yang menjadi fokus pembahasan, terutama yang terkait dengan posisi orientasi bidang-bidang diskontinuitas tersebut terhadap orientasi dan kemiringan bidang lereng.

9.3.1. Jenis Runtuhan Lereng Batuan



Sumber : Hoek & Bray (1981)

Gambar 9.15. : Model keruntuhan pada lereng batuan

Secara umum, keruntuhan pada lereng batuan dapat terjadi melalui mekanisme longsor (*slide*), atau robohan (*topple*) yang seringkali diikuti dengan jatuhnya (*fall*).

- **Longsor Batuan (*Rock Slide*)**

Longsor batuan adalah suatu proses dimana masa batuan pada suatu lereng menggelincir melalui bidang gelincir. Berdasarkan bidang gelincirnya, longsor batuan dapat meliputi :

- *Longsor Tranlasi (Plane Failure)*, yaitu dimana suatu masa batuan menggelincir melalui satu bidang datar, yang biasanya merupakan bidang diskontinuitas.
- *Longsor Baji (Wedge Failure)*, yaitu gelinciran masa batuan melalui dua bidang gelincir yang saling berpotongan, yang biasanya juga merupakan dua bidang diskontinuitas yang saling berpotongan.
- *Longsor Rotasi (Circular Failure)*, yaitu gelinciran masa batuan melalui bidang gelincir yang berupa busur lingkaran. Terjadi pada masa batuan yang telah mengalami pelapukan sangat kuat, dan atau mempunyai bidang-bidang diskontinuitas yang saling berpotongan dengan spasi sangat rapat, sehingga mempunyai sifat fisik dan keteknisan menyerupai tanah.

- **Robohan Batuan (*Rock Topple*)**

Robohan batuan adalah gerakan masa batuan yang berguling. Biasanya terjadi pada masa batuan dimana kumpulan bidang-bidang diskontinuitas dengan orientasi dan searah, sedemikian rupa sehingga membentuk struktur lembaran-lembaran atau kolom-kolom. Biasanya gerak roboh pada masa batuan ini diikuti dengan jatuhnya batuan (*rock fall*), dimana lembaran-lembaran atau kolom-kolom batuan yang berguling terpatahkan oleh karena telah melampaui kekuatan tariknya (*tension strength*), terlepas dari ikatan masa batumannya dan jatuh bebas oleh pengaruh gravitasi.

9.3.2. Potensi Runtuhan Batuan

Bidang diskontinuitas adalah faktor utama yang membangun potensi keruntuhan pada masa batuan, terutama apabila tidak ada ikatan kohesi diantara kedua sisi bidang diskontinuitas tersebut,

sehingga gaya gravitasi merupakan satu-satunya faktor penggerak. Maka, posisi orientasi dan kemiringan bidang diskontinuitas (ψ) terhadap posisi orientasi dan kemiringan lereng (α) merupakan faktor-faktor yang harus diperhitungkan dalam penilaian tingkat kestabilan lereng batuan, disamping sifat keteknisan berupa sudut geser dalam (Φ) dari bidang diskontinuitas tersebut.

Bidang-bidang diskontinuitas yang saling berpotongan, dapat membentuk blok-blok batuan yang diasumsikan terpisah atau berdiri sendiri. Maka bentuk blok-blok batuan terpisah tersebut merupakan faktor lain, yaitu faktor yang menentukan jenis keruntuhan lereng batuan yang berpotensi terjadi, apakah berupa gelinciran (*sliding*) atau robohan (*topple*). Faktor-faktor tersebut meliputi lebar dasar (b) dan tinggi (h) dari blok batuan.

Berdasarkan parameter-parameter tersebut diatas, maka potensi stabilitas lereng batuan dapat disimpulkan sebagai berikut :

Lereng Stabil

$$\alpha < \psi < \Phi ; b/h > tg \psi$$

Lereng berpotensi mengggelincir (*slide*)

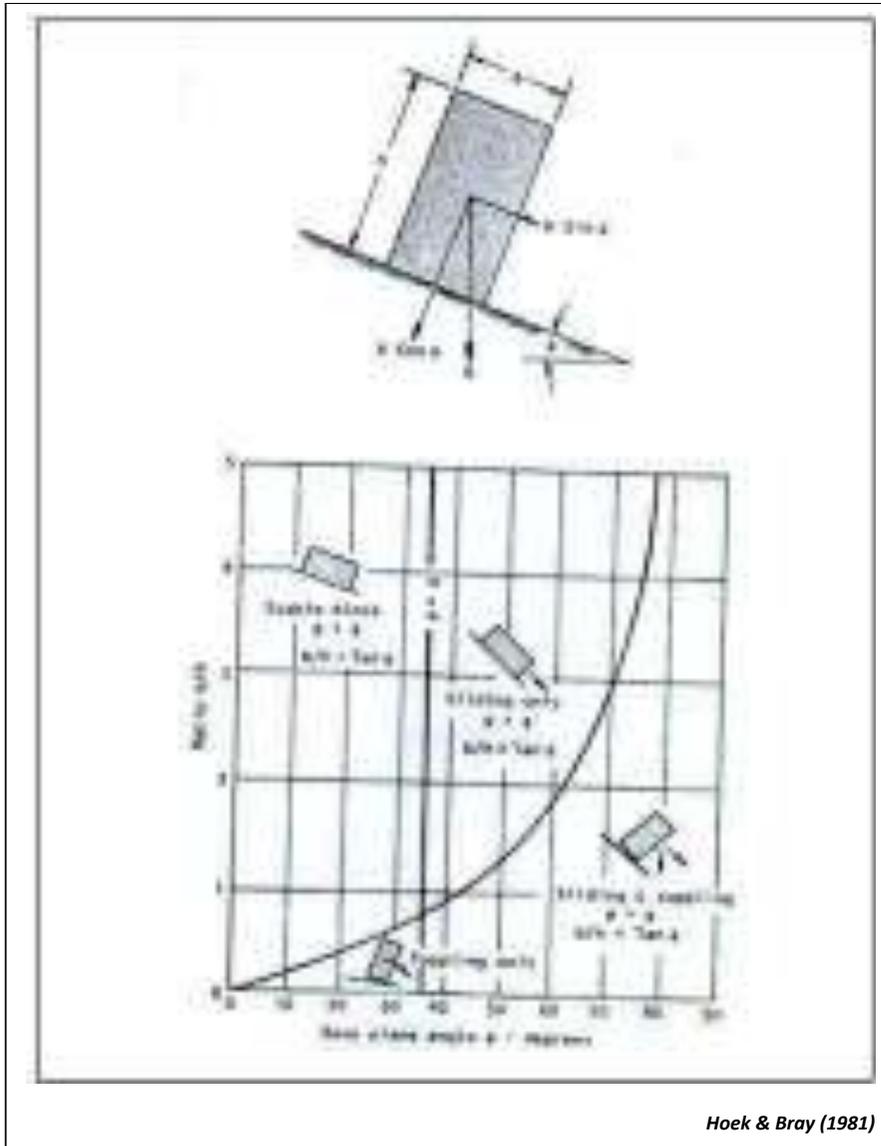
$$\alpha > \psi > \Phi ; b/h > tg \psi$$

Lereng berpotensi terguling (*topple*)

$$b/h < tg \psi$$

Lereng berpotensi menggelincir atau dan terguling (*slide & topple*)

$$\alpha > \psi > \Phi ; b/h < tg \psi$$



Sumber : Hoek & Bray (1981)

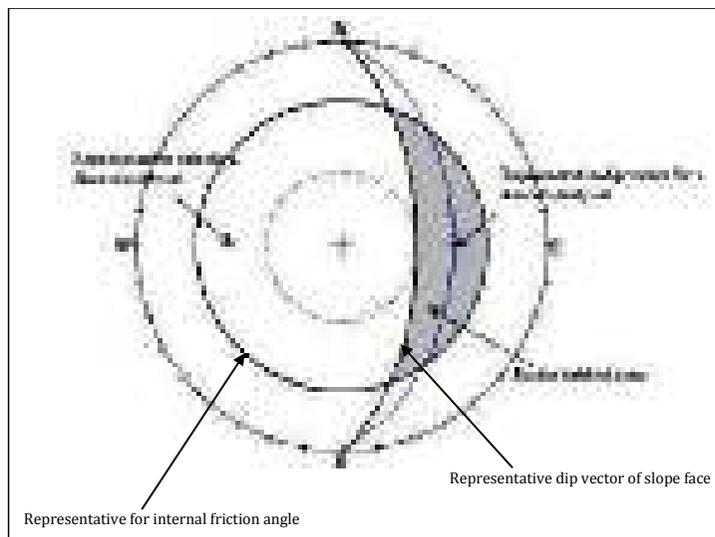
Gambar 9.16. : Diagram potensi keruntuhan pada lereng batuan

9.3.3. Identifikasi Potensi Keruntuhan Lereng Batuan

Oleh karena bidang diskontinuitas, bidang lereng dan sudut geser dalam merupakan faktor utama pengendali stabilitas lereng, maka ketiga unsur tersebutlah yang harus di-identifikasi untuk menilai tingkat kestabilan suatu lereng.

Salah satu metoda identifikasi secara grafis, adalah dengan memplot unsur-unsur tersebut kedalam *stereo net* (Hoek & Bray, 1981). Yaitu dengan menggambarkan sudut geser dalam bidang diskontinuitas dalam bentuk lingkaran (*representative for internal friction angle*) dengan jari-jari sesuai dengan besaran sudut geser dalamnya. Sedangkan orientasi dan kemiringan lereng digambarkan dalam bentuk busur sesuai dengan jurus dan kemiringannya (*dip vector of slope face*). Maka bagian bidang dalam *stereo net* yang dibatasi oleh lingkaran sudut geser dalam (*representative of internal friction angle*) dan busur lingkaran bidang lereng (*dip vector of slope face*), adalah merupakan zona kritis (*critical zone*) yang berpotensi untuk longsor atau menggelincir (*slide*).

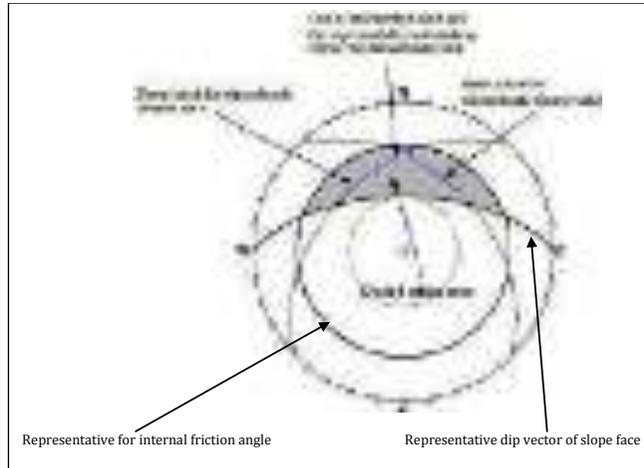
Longsor Translasi (*Plane Failure*), berpotensi untuk terjadi melalui bidang diskontinuitas, terutama bidang-bidang diskontinuitas utama yang dominan memotong lereng, yaitu apabila busur lingkaran sesuai jurus dan kemiringannya melalui zona kritis dalam *stereo net*.



Sumber : Hoek & Bray (1981)

Gambar 9.17. : Zona kritis longsor bidang (*plane failure*) dalam *stereo net*

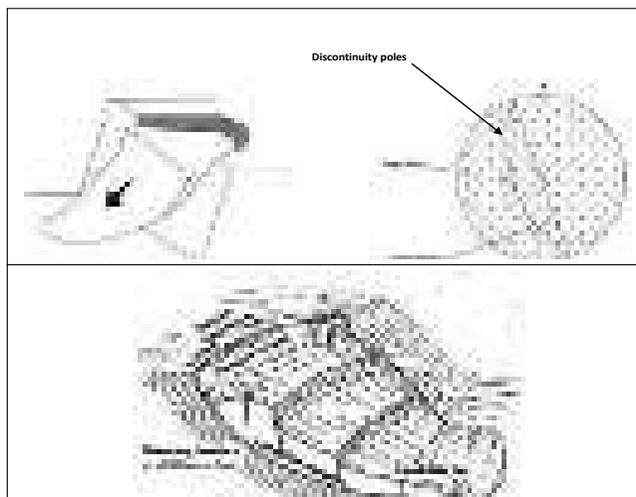
Longsor Baji (*Wedge Failure*), berpotensi terjadi manakala posisi perpotongan diantara busur bidang-bidang diskontinuitasnya berada didalam zona kritis.



Sumber : Hoek & Bray (1981)

Gambar 9.18. : Zona kritis longsoran baji (*wedge failure*) dalam *stereo net*

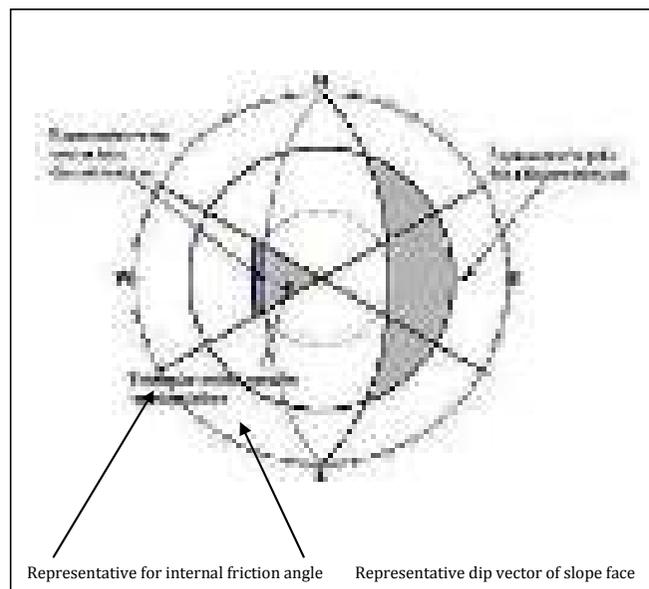
Longsor Rotasi (*Circular Failure*), dapat terjadi pada lereng batuan dimana bidang-bidang diskontinuitasnya sangat rapat, dengan orientasi *random*. Kondisi tersebut menjadikan masa batuan pembentuk lereng menjadi bersifat seperti tanah, terutama apabila infiltrasi air tanah sangat intensif, sehingga masa batuan terlapukkan dengan kuat. Perhitungan stabilitas lereng, dalam hal ini menggunakan analisa stabilitas lereng tanah.



Sumber : Hoek & Bray (1981)

Gambar 9.19. : Longsor rotasi (*circular failure*) pada lereng batuan dengan bidang diskontinuitas yang rapat

Robohan Batuan (*Rock Topple*), dapat terjadi pada lereng batuan, dimana bidang-bidang diskontinuitasnya membentuk lembaran-lembaran atau kolom-kolom dengan arah kemiringan berlawanan dan lebih tajam dari kemiringan lereng. Hal tersebut terjadi apabila jurus dari bidang diskontinuitas sejajar atau $\pm 30^\circ$ dari jurus bidang lereng. Zona kritis untuk robohan batuan, dalam hal ini akan berbentuk segitiga (*triangular critical zone for toppling failure*), dimana robohan batuan berpotensi terjadi, pada busur bidang-bidang diskontinuitas batuan yang melalui zona kritis tersebut.



Sumber : Hoek & Bray (1981)

Gambar 9.20. : Zona kritis robohan batuan (*rock topple*) dalam *stereo net*

9.4. Faktor Pemicu

Longsor pada lereng tanah atau batuan dikendalikan oleh besarnya gaya penggerak (τ') dan kekuatan tahanan geser pada bidang gelincirnya (τ). Yaitu manakala besarnya gaya penggerak melampaui kekuatan tahanan geser pada bidang gelincirnya. Maka faktor pemicu longsor atau keruntuhan pada lereng, secara umum adalah faktor-faktor yang menambah beban penggerak atau dan faktor-faktor yang mengurangi kekuatan geser yang menahannya.

Secara umum, besaran gaya penggerak dan kekuatan geser, mengikuti rumus sebagai berikut :

Gaya Penggerak :

$$\tau' = W \sin \psi$$

Kekuatan Tahanan Geser :

$$\tau = c + (\sigma - u) \operatorname{tg} \Phi$$

Dimana :

W = beban masa diatas bidang gelincir

c = kohesi pada bidang gelincir

ψ = kemiringan bidang gelincir

σ = tekanan normal pada bidang gelincir

u = tekanan air pori pada bidang gelincir

Φ = sudut geser dalam pada bidang gelincir

Berdasarkan perhitungan seperti pada rumus-rumus diatas, maka variabel-variabel keteknisan yang mempengaruhi stabilitas lereng adalah beban masa diatas bidang gelincir (W), tekanan normal pada bidang gelincir (σ), tekanan air pori pada bidang gelincir (u). Variabel-variabel tersebutlah yang dapat berubah, baik oleh proses alam maupun aktivitas buatan manusia, sehingga mengubah keseimbangan lereng.

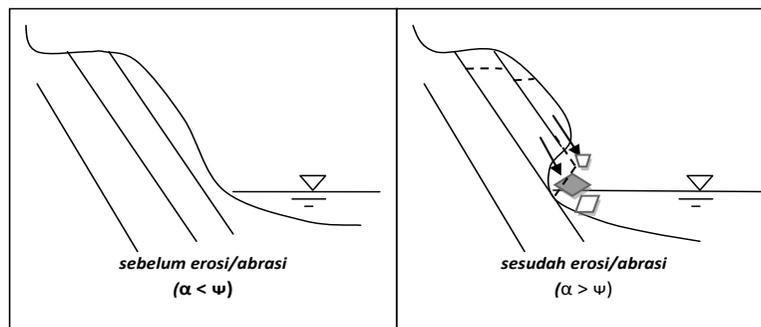
- **Infiltrasi air tanah.**

Rembesan air tanah akan membangun tekanan air pori (u), yang menimbulkan perlawanan terhadap tekanan normal (σ) pada bidang gelincir. Hal tersebut berdampak mengurangi kekuatan tahanan geser (*shear strength*) pada bidang gelincir. Maka dalam banyak kasus, gerakan tanah atau batuan sering terjadi pada saat musim hujan. Yaitu dimana air permukaan yang berasal dari curah hujan, merembes memasuki bidang gelincir dan membangun tekanan air pori (u). Bahkan apabila infiltrasi air tanah membanjiri pori-pori tanah yang belum terkonsolidasi dengan baik hingga jenuh, akan dapat menyebabkan terjadinya likuifaksi, dimana masa tanah berubah menjadi lumpur. Sementara itu, pembekuan air dalam retakan-retakan batuan pada daerah ber iklim dingin, akan dapat memperlebar retakan

tersebut, yang tentunya akan semakin mengurangi kekuatannya (*rock strength*).

- **Erosi / Abrasi.**

Erosi baik oleh air, angin ataupun es (*gletscher*), apabila mengikis bagian masa tanah / batuan yang berfungsi sebagai penahan, akan dapat mengganggu keseimbangan dan menyebabkan longsor. Termasuk disini juga aktivitas penggalian / pengupasan lereng oleh manusia, atau mungkin juga oleh hewan-hewan bawah tanah. Erosi oleh aliran air dipermukaan ataupun abrasi oleh ombak laut, secara ber-angsur angsur akan mengikis permukaan. Apabila hal tersebut terjadi pada bagian bawah atau kaki lereng, maka lambat laun akan mengurangi gaya penahan gerakan, dan membuat sudut kemiringan lereng (α) menjadi lebih terjal. Potensi ketidak stabilan akan terjadi manakala kemiringannya melampaui kemiringan bidang gelincir (ψ) yang ada. Sedemikian pula halnya dengan penajaman kemiringan secara *artificial*, misalnya dalam pengupasan lereng untuk berbagai kepentingan konstruksi.



Gambar 9.21. : Ilustrasi gerakan masa tanah/batuan yang dipicu oleh erosi/abrasi

- **Beban tambahan pada lereng.**

Beban tambahan pada lereng bagian atas (W) oleh berbagai kepentingan konstruksi, akan memberikan tambahan pada gaya penggerak ($w \sin \psi$), sehingga sehingga total gaya penggerak menjadi $(W+w) \sin \psi$. Namun pada saat yang bersamaan beban tambahan tersebut juga akan memberikan tambahan tekanan normal pada bidang gelincir sebesar $(w \cos \psi)$, sehingga total

kekuatan geser meningkat menjadi : $c + (W+w) \cos \psi \operatorname{tg} \Phi$. Maka potensi longsor akan terjadi manakala : $(W+w) \sin \psi > c + (W+w) \cos \psi \operatorname{tg} \Phi$. Yaitu dimana gaya penggeraknya melampaui kekuatan geser sebagai gaya penahannya.

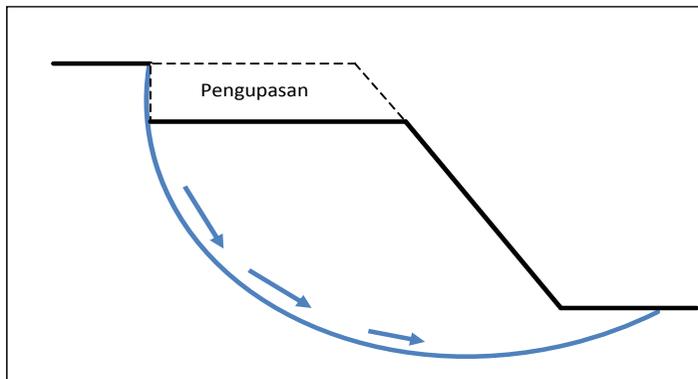
- **Percepatan gempa bumi.**

Getaran yang diakibatkan oleh gempa bumi ataupun *artificial* kegiatan manusia akan dapat menjadi beban dinamis, berupa tambahan pada percepatan gravitasi, yang dapat menjadi penambah gaya penggerak. Percepatan gempa bumi juga dapat memicu terjadinya likuifaksi.

9.5. Stabilisasi Lereng

Suatu lereng, baik batuan maupun tanah, akan tetap berada stabil dalam posisinya apabila besaran gaya penggerak tidak melampaui kekuatan gaya penahannya. Maka prinsip upaya stabilisasi lereng secara teknis, adalah mengurangi besarnya gaya penggerak, dan atau meningkatkan kekuatan gaya penahannya.

Pengupasan.



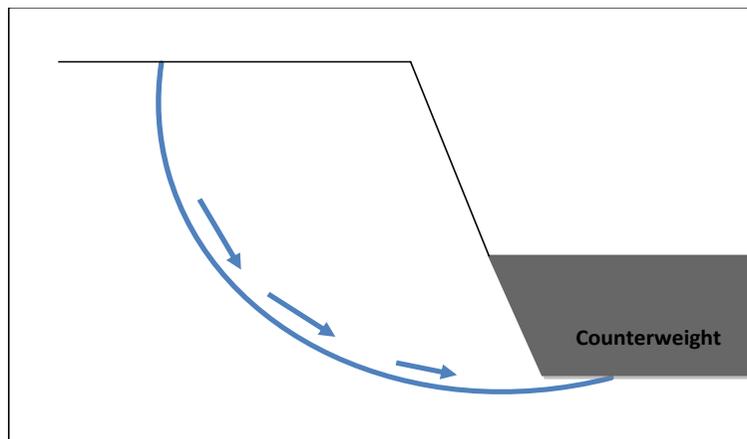
Gambar 9.22. : Stabilisasi lereng dengan pengupasan

Pengupasan adalah upaya stabilisasi lereng dengan mengurangi gaya penggerak, sehingga tidak sampai melampaui kekuatan gaya penahannya, yang biasanya dilakukan pada bagianpuncak dari lereng. Namun demikian, posisi bidang gelincir harus diketahui terlebih dahulu, sehingga pengupasan lereng dipastikan benar mengurangi

beban gaya penggerak. Pengupasan yang tidak sesuai dengan posisi bidang gelincir, dapat berakibat mengurangi kekuatan gaya penahannya, sehingga justru mengakibatkan runtuhnya lereng.

Pada kasus longoran translasi, pengupasan dapat dilakukan dengan pelandaian lereng, sehingga kemiringan lereng (α) menjadi lebih landai daripada kemiringan bidang diskontinuitas (ψ) yang merupakan bidang gelincir ($\alpha < \psi$).

Beban Perlawanan (*Counterweight*)

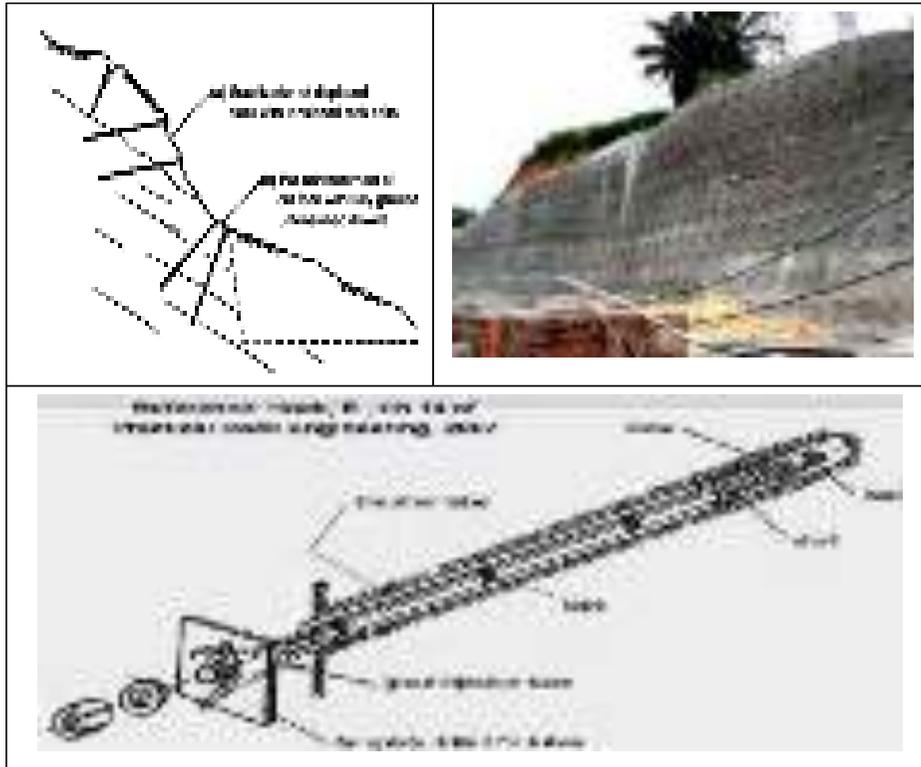


Gambar 9.23. : Stabilisasi lereng dengan beban perlawanan (*counterweight*)

Pemberian tambahan beban perlawanan (*counterweight*) adalah upaya stabilisasi lereng dengan menambah kekuatan gaya penahan. Yaitu dengan memberikan beban timbunan pada bagian kaki lereng, sebagai tambahan gaya penahan terhadap gerakan longoran. Beban timbunan tersebut harus cukup berat sehingga memberikan tambahan gaya perlawanan yang signifikan, dan juga harus ditempatkan pada posisi yang tepat agar tidak justru menambah beban gaya penggerak.

Metoda ini dapat juga dikombinasikan dengan cara stabilisasi pengupasan lereng, yaitu dengan memindahkan material kupasan dari bagian atas lereng, menjadi material timbunan beban perlawanan (*counterweight*) pada kaki lereng.

Penambatan Batuan.



Sumber : Hoek, E, Ch 14 of *Practical Rock Engineering*, 2007

Gambar 9.24. : Penambatan Batuan

Cara penambatan ini biasanya dilakukan pada lereng batuan. Yaitu dengan mengikat bagian lereng batuan yang berpotensi runtuh pada bagian masa batuan yang massif, dengan menggunakan paku batuan atau pun jangkar. Jenis-jenis penambatan batuan ini meliputi *Dowel*, *Rock Bolt*, dan *Rock Anchors*.

- *Dowel* berfungsi sebagaimana halnya paku, yang mengikat bagian-bagian masa batuan yang terpecah-pecah oleh bidang diskontinuitas. Umumnya berukuran pendek, sehingga hanya digunakan pada masa batuan dengan spasi diskontinuitas rapat.
- *Rock Bolt*, berukuran lebih panjang dengan bagian ujungnya berulir sehingga dapat terikat pada masa batuan, sedangkan bagian ujung luarnya dapat dikencangkan dengan baut.

- **Rock Anchor**, berukuran lebih panjang lagi dengan bagian ujungnya diikatkan kepada masa batuan yang massif dengan campuran beton (*concrete mix*). *Rock Anchor* ini dapat menggunakan batang besi baja ataupun kabel baja (*sling*) dengan pada bagian luarnya dikencangkan dengan baut.

Secara keteknisan, penambatan batuan ini berfungsi memperbesar tekanan normal pada bidang diskontinuitas (σ), sehingga memperbesar tahanan gesernya.

Drainase Air Tanah (*Subsurface Drainage*).



Gambar 9.25. : Sistem drainase air tanah (*subsurface drainage*)

Keberadaan air tanah adalah salah satu pemicu terjadinya longsoran pada lereng. Air tanah pada bidang gelincir dalam hal ini berperan membangun tekanan air pori (u) yang memberi perlawanan terhadap tekanan normal (σ) pada bidang gelincir, sehingga mengurangi kekuatan tahanan gesernya. Maka pengeringan atau drainase air tanah, dalam hal ini lebih merupakan upaya preventif untuk mencegah atau mengurangi kemungkinan terbangunnya tekanan air pori. Drainase air tanah dilakukan dengan memasukkan pipa-pipa berpori (*perforated pipes*) secara horizontal kedalam lereng. Maka air tanah akan merembes masuk kedalamnya dan mengalir keluar ke permukaan lereng, sehingga mencegah atau mengurangi terbangunnya tekanan air pori melalui rembesan air tanah pada bidang gelincir.

Stabilisasi Gabungan

Ada kalanya untuk kepentingan konstruksi tertentu, dan kondisi keteknisan stabilitas lereng yang kompleks, upaya-upaya pengupasan

9.6. Catatan Berbagai Bencana Gerakan Tanah Terburuk

9.6.1. Longsor Gunung Granier-Perancis, 1248 (*Mont Granier Landslide -1248*)

Peristiwa ini terjadi sudah sangat lama dan sangat kurang informasi teknis mengenai kejadian ini. Informasi dari para ahli sejarah menuturkan bahwa telah terjadi keruntuhan masa batugamping (*limestone*) gunung Granier, antara tanggal 24 - 25 November tahun 1248, yang diperkirakan menimbulkan korban jiwa lebih dari 1000 orang.

Namun berdasarkan jejak-jejak yang ditinggalkan, diduga jenis longsorannya adalah longoran translasi masa batuan (*translational rockslide*), yaitu berupa *block slide* atau *debris slide*. Hal tersebut dapat teramati dari bentuk bidang gelincir yang tersisa.



Photo: Wikimedia Commons/CC BY-SA 2.0 FR

Sumber : <https://www.ranker.com/list/worst-landslides-in-history/eric-vega>

Gambar 9.27. : Jejak bidang gelincir pada longsor Mt Granier-Perancis (1248)

9.6.2. Longsor Diexi-China, 1933 (*Diexi Landslides - 1933*)

Bencana tanah longsor terjadi di Diexi-China, pada tanggal 25 Agustus 1933, dipicu oleh gempa bumi besar dengan magnitudo 7,8 SR. Seluruh kota Diexi total hilang tenggelam, sementara berbagai desa disekitarnya mengalami kerusakan berat, dengan korban jiwa mencapai 9000 orang.



Photo: memes/Wikimedia Commons/GNU Free Documentation License

Sumber : <https://www.ranker.com/list/worst-landslides-in-history/eric-vega>

Gambar 9.28. : *Landslide-made lake Diexi*

Dalam peristiwa ini, material longsoran menimbun sungai lokal yang ada didaerah tersebut, sehingga membendungnya membentuk genangan danau, dimana seluruh kota Diexi beserta segala isinya tenggelam didalamnya. Sampai saat inipun danau yang terbentuk akibat tanah longsor tersebut (*landslide-made lake*) masih ada, beserta dengan kota Diexi didalamnya.

9.6.3. Longsor Batuan di Khait-Tajikistan, 1949 (*Khait Rockslide-1949*)

Dipicu oleh gempa bumi, pada tanggal 10 Juli 1949, terjadi longsoran besar sebagai akibat runtuhnya badan gunung diatas lembah Yarhich – Tajikistan. Material longsoran menimbun lembah dimana kota Khait dan kampung-kampung sekitarnya berada, beserta seluruh penghuninya, dengan korban jiwa diperkirakan mencapai 28000 orang.

Jenis longsoran yang terjadi adalah *rockslide*, yaitu berupa *debris slide* dimana sejumlah besar bongkah-bongkah batuan bercampur dengan tanah bahan rombakan, bergerak menggelincir dari lereng pegunungan, dan menimbun lembah Yarhich yang berada dibawahnya.



Photo: USGS/Wikimedia Commons/Public Domain

Sumber : <https://www.ranker.com/list/worst-landslides-in-history/eric-vega>

Gambar 9.29. : Jejak longsoran pada peristiwa gerakan tanah di lembah Yarhich (1949)

9.6.4. Longsor Yungay – Peru, 1970 (Yungay Landslide-1970)

Peristiwa ini terjadi pada tanggal 3 Mei 1970 di kota Yungay – Peru, menelan korban jiwa sejumlah sekitar 25000 orang. Peristiwa ini diakibatkan oleh gabungan 3 proses bencana alam yang terjadi berurutan pada waktu yang hampir bersamaan. Diawali dengan gempa bumi besar yang dikenal sebagai *Huascarán earthquake*, yang memicu terjadinya guguran salju (*avalanche*) lereng gunung Huascarán, dan diikuti dengan longsoran raksasa sejumlah besar masa yang terdiri dari bongkah-bongkah batuan dan tanah (*debris slide*), yang tercampur dengan gumpalan-gumpalan salju yang mencair sehingga mengalir seperti lumpur. Longsoran material-material tersebut menimbun seluruh kota Yungay beserta dengan 25000 orang penduduknya, dengan hanya menyisakan 350 orang yang selamat.

Saat ini, bekas kota Yungay hanya tersisa sebagai kuburan masal (*mass graveyard*), dengan tugu peringatan bagi korban tragedi bencana alam yang pernah terjadi.



Photo: Roba7400/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0

Sumber : <https://www.ranker.com/list/worst-landslides-in-history/eric-vega>

Gambar 9.30. : Kuburan masal Yungay (*Yungay mass graveyard*)

9.6.5. Longsor Armero – Colombia, 1985 (*Armero Tragedy – 1985*)

Peristiwa ini terjadi di kota Armero-Colombia, yang berpenduduk 29000 orang, pada tanggal 13 November 1985. Bencana tersebut dipicu oleh erupsi gunung *Nevado del Ruiz*, yang merupakan gunung api *stratovolcano* di Tolima-Colombia. Erupsi telah mencairkan timbunan salju (*glacier*) diatas puncak gunung tersebut, sehingga mengalir menuruni lereng sambil membawa serta bebatuan dan tanah disepanjang alirannya. Maka terjadilah aliran lumpur (*mudflow*) yang disebut juga sebagai *Lahar*, yang mengalir dengan kecepatan mencapai 20 ft/detik. Aliran lumpur (*mudflow*) ini membanjiri dengan cepat kota Armero beserta desa-desa disekelilingnya. mengakibatkan sekitar 20000 orang diantara penduduknya beserta ribuan lainnya dari desa-desa disekitarnya, tewas terimbun lumpur. Kedahsyatan peristiwa bencana ini kemudian dikenal sebagai *Armero Tragedy*, yang menelan korban jiwa sekitar 23000 orang.



Photo: USGS/Wikimedia Commons/Public Domain

Sumber : <https://www.ranker.com/list/worst-landslides-in-history/eric-vega>

Gambar 9.31. : Kota Armero yang terbanjiri aliran lumpur (*mudflow*)

9.6.6. Catatan Peristiwa Gerakan Tanah Dunia Abad 20

Catastrophic Landslides of the 20th Century - Worldwide

Source : USGS - <https://landslides.usgs.gov/learn/majorls.php>

Tabel 9.3. : Catatan peristiwa gerakan tanah besar dunia, pada abad-20

Year	Country (State/Province)	Name & type(s)	Triggering process	Vol. of material (m ³ except where noted)	Impact	Comments
1911	Tadzhik Rep. (Formerly USSR)	Usoy rock slide	Usoy earthquake M = 7.4	2.0 x 10 ⁹	Destroyed Usoy village; 54 killed; dammed Murgab River, impounding 65-km long still existing Lake Sarez	Casualties low because of sparse population
1919	Indonesia (Java)	Kalut lahars (Volcanic mudflows)	Eruption of Kalut volcano	185 km ²	5,110 killed; 104 villages destroyed or damaged	Draining of Crater Lake caused hot mud flows
1920	China (Ningxia)	Haiyuan landslides	Haiyuan earthquake	???	100,000 killed; many villages destroyed	675 large loess landslides created more than 40 lakes
1921	Kazakh Rep. (formerly USSR)	Alma-Ata debris flow	Snowmelt	???	500 killed	Debris flow in Valley of Alma-Atinka River
1933	China (Sichuan)	Deixi landslides	Deixi earthquake M = 7.5	>150 x 10 ⁶	6,800 killed by landslides; 2,500 drowned when landslide dam failed	Earthquake caused several major landslides; largest formed 255-m-high dam on Min River
1939	Japan (Hyogo)	Mount Rokko slides and mud flows	Heavy rain	???	505 dead/missing; 130,000 homes destroyed or badly damaged by mass movements and/or floods	Caused by major typhoon; 50-90% of impact of Japanese typhoons caused by mass movements
1949	Tadzhik Rep. (formerly USSR)	Khait rock slide	Khait earthquake M =	???	12,000 - 20,000 killed or missing; 33 villages	Began as rock slide; transformed into large loess

Year	Country (State/Province)	Name & type(s)	Triggering process	Vol. of material (m ³ except where noted)	Impact	Comments
			7.5		destroyed	and granite debris avalanche
1953	Japan (Wakayama)	Arita River slides and debris/mud flows	Heavy rain	???	460 dead/missing; 4,772 homes destroyed by mass movements/floods	Caused by major typhoon; 50-90% of impact of Japanese typhoons caused by mass movements
1953	Japan (Kyoto)	Minamiy-amashiro slides & debris/mud flows	Heavy rain	???	336 dead/missing; 5,122 homes destroyed or badly damaged by mass movements/floods	"
1958	Japan (Shizuoka)	Kanogawa slides and mud/debris flows	Heavy rain	???	1,094 dead/missing; 19,754 homes destroyed or badly damaged by mass movements/floods	"
1962	Peru (Ancash)	Nevados Huascaran debris avalanche	???	13 x 10 ⁶	4,000-5,000 killed; much of village of Ranrahirca destroyed	Major debris avalanche from Nevados Huascaran; average velocity 170 km/hour
1963	Italy (Friuli-venezia-Griulia)	Vaiont Reservoir Rockslide	???	250 x 10 ⁶	2,000 killed; city of Longarone badly damaged; total damages: US\$200 million (1963 \$)	High-velocity rock slide into Vaiont Reservoir caused 100-m waves to overtop Vaiont Dam
1964	United States (Alaska)	1964 Alaska landslides	Prince William Sound Earthquake M = 9.4	???	Estimated US\$280 million (1964 \$) damages	Major landslide damage in cities of Anchorage, Valdez, Whittier, Seward

Year	Country (State/Province)	Name & type(s)	Triggering process	Vol. of material (m ³ except where noted)	Impact	Comments
1965	China (Yunnan)	Rock slide	???	450 x 10 ⁶	Four villages; 444 dead	Occurred at “high speed”
1966	Brazil (Rio de Janeiro)	Rio de Janeiro slides, avalanches, debris/mud flows	Heavy rain	???	1,000 dead from landslides and floods	Many landslides in Rio de Janeiro and environs
1967	Brazil (Serra das Araras)	Serra das Araras slides, avalanches, debris/mud flows	Heavy rain	???	1,700 dead from landslides and floods	Many landslides in mountains SW of Rio de Janeiro
1970	Peru (Ancash)	Nevados Huascaran debris avalanche	Earthquake M = 7.7	30-50 x 10 ⁶	18,000 dead; town of Yungay destroyed; Ranrahirca partially destroyed	Debris avalanche from same peak as in 1962; attained average velocity of 280 km/hr.
1974	Peru (Huancavelica)	Mayunmarca rock slide-debris avalanche	Rainfall? River erosion?	1.6 x 10 ⁹	Mayunmarca village destroyed, 450 killed; failure of 150-m-high landslide dam caused major downstream flooding	Debris avalanche with average velocity of 140 km/hr. dammed Mantaro River
1980	United States (Washington)	Mount St. Helens rock slide-debris avalanche	Eruption of Mount St. Helens	2.8 x 10 ⁹	World 1s largest historic landslide; only 5-10 killed, but major destruction of homes, highways, etc.; major debris flow; deaths low because of evacuation	Evacuation saved lives; began as rock slide; deteriorated into 23-km-long debris avalanche with average velocity of 125 km/hr.; surface remobilized into 95-km-long debris flow

Year	Country (State/Province)	Name & type(s)	Triggering process	Vol. of material (m ³ except where noted)	Impact	Comments
1983	United States (Utah)	Thistle debris slide	Snowmelt & heavy rain	21 x 10 ⁶	Destroyed major railroad and highways; dammed Spanish Fork flooding town of Thistle; no deaths	Total losses: US\$600 million (1983 \$) – 50% direct losses, 50% indirect losses
1983	China (Gansu)	Saleshan landslide	???	35 x 10 ⁶	237 dead; buried four villages; filled two reservoirs	Loess landslide
1985	Colombia (Tolima)	Nevado del Ruiz debris flows	Eruption of Nevado del Ruiz	???	Four towns and villages destroyed; flow in valley of Lagunillas River killed more than 20,000 in city of Armero.	Death toll unnecessarily large because hazard warnings not passed to residents
1986	Papua, New Guinea (East New Britain)	Bairaman Rock slide-debris avalanche	Bairaman earthquake M = 7.1	200 x 10 ⁶	Village of Bairaman destroyed by debris flow from breached landslide dam; evacuation prevented casualties; huge effect on local landscape	Debris avalanche formed 210-m-high dam that impounded 50-million m ³ lake; dam failed, causing 100m-deep debris flow-flood downstream.
1987	Ecuador (Napó)	Reventador landslides	Reventador earthquakes M = 6.1 and 6.9	75-110 x 10 ⁶	1,000 killed; many kms of trans-Ecuadorian oil pipeline and highway destroyed; total losses: US\$ 1 billion (1987 \$)	Land sliding mainly in saturated, residual soils on steep slopes; thousands of thin slides remobilized into debris flows in tributary and main drainages.

Year	Country (State/Province)	Name & type(s)	Triggering process	Vol. of material (m ³ except where noted)	Impact	Comments
1994	Colombia (Cauca)	Paez landslides	Paez earthquake, M = 6.4	250 km ²	Several villages partially destroyed by landslides; 271 dead; 1,700 missing; 158 injured; 12,000 displaced.	Thousands of thin, residual-soil slides on steep slopes turned into damaging debris flows in tributary and main drainages.
1998	Honduras, Guatemala, Nicaragua, El Salvador	Hurricane Mitch <ul style="list-style-type: none"> • flooding • Landslides • debris-flows 	Hurricane Mitch		Approximately 10,000 people killed in the flooding and landslides, which occurred throughout the region. Casitas volcano in Nicaragua experienced large debris flows. Impossible to differentiate deaths from landslides from deaths due to flood	180-mile per hour winds affected Honduras primarily. Torrential rains occurred, at the rate of 4 inches per hour. Large landslides in Tegucigalpa and elsewhere.

9.7. Potensi Gerakan Tanah di Indonesia

Peluang gerakan tanah di Indonesia berpotensi untuk terjadi, oleh karena posisinya baik secara geologis maupun geografis, yang memungkinkan berbagai faktor pemicu gerakan tanah untuk bekerja.

- *Posisi geologis* wilayah Indonesia pada batas lempeng (*plate boundary*), dimana lempeng-lempeng tektonik saling ber-konvergensi secara aktif, mengakibatkan kegempaan yang tinggi. Gempa bumi yang sering terjadi tentunya merupakan salah satu pemicu gerakan tanah. Sementara itu deformasi kerak bumi, terutama pada daerah-daerah disekitar batas konvergensi, membentuk konfigurasi permukaan tanah yang terjal, dan membuka celah-celah retakan pada bebatuan yang memungkinkan infiltrasi air tanah, yang tentunya ber-potensi untuk memicu terjadinya gerakan tanah. Pada sisi lain, jajaran gunung api aktif disepanjang batas konvergensi, secara terus menerus menghasilkan timbunan material vulkanik pada disekitar kerucut-kerucutnya. Timbunan material vulkanik yang belum ter-konsolidasi tersebut, rentan untuk bergerak meluncur menuruni lereng, manakala terpicu oleh getaran gempa bumi atau oleh guyuran curah hujan yang tinggi.
- *Posisi geografis* Indonesia merupakan wilayah kepulauan yang berada disekitar khatulistiwa (*equator*), ber iklim tropis basah. Dengan intensitas curah hujan yang tinggi dan berlangsung hampir sepanjang tahun, membentuk siklus hidrologi yang intensif, termasuk sirkulasi air tanahnya. Sirkulasi air permukaan maupun air tanah yang berkesinambungan adalah salah satu faktor pemicu gerakan tanah. Aliran air permukaan dapat menyebabkan erosi dan likuifaksi, sementara infiltrasi air tanah akan melemahkan ikatan pada butiran-butiran tanah maupun celah-celah batuan, yang keduanya dapat berujung pada gerakan tanah.

Populasi yang penduduk yang padat, terutama pada daerah perkotaan, menyebabkan gerakan tanah berpotensi untuk menjadi bencana yang menimbulkan korban besar, baik jiwa, kerusakan infrastruktur ataupun kerugian materi lainnya.



Sumber : AP Photo / Dita Alangkara

Gambar 9.32. : Tanah longsor yang dipicu gempa di Padang Pariaman Oct. 3, 2009.



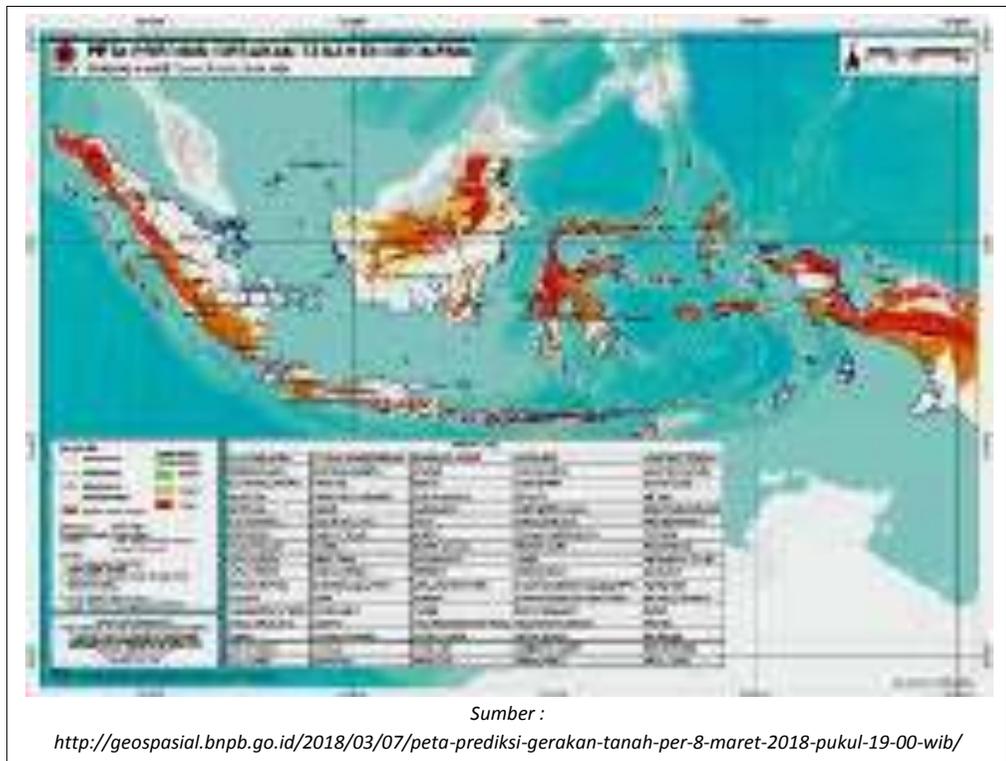
Tanah longsor menyapu dusun Jemblung, Banjarnegara, 12 Desember 2014
(Foto: VOA/Nurhadi)

Sumber :

<https://www.voaindonesia.com/a/satu-dusun-tertimbun-di-banjarnegara-jawa-tengah/2557623.html>

Gambar 9.33. : Tanah longsor dusun Jemblung-Banjarnegara (2014)

Bencana tanah longsor umumnya sering terjadi saat puncak musim hujan, dengan korban jiwa mencapai rata-rata mencapai 30 orang per-tahun. Sementara itu, peristiwa amblesan (*subsidence*) tanah akibat aktifitas manusia (ekstraksi air tanah yang berlebihan, pembangunan dan penggalian tambang bawah tanah) dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan, dan menyebabkan genangan air saat musim hujan di wilayah perkotaan, seperti di Jakarta dan Semarang. Peristiwa likuifaksi akibat getaran gempa dapat menimbulkan permasalahan pada ketersediaan air bersih, kerusakan bangunan, infrastruktur jalan dan jembatan, seperti yang terjadi pada gempa Bantul tahun 2006, gempa Padang tahun 2009 dan gempa Palu-Donggala (2018).



Gambar 9.34. : Peta Potensi Gerakan Tanah di Indonesia (sumber : BNPB)

10

INDUSTRIALISASI DAN BENCANA TEKNOLOGI

Industrialisasi merupakan suatu proses interaksi antara pengembangan teknologi, inovasi, spesialisasi produksi, dan perdagangan antarnegara, yang pada akhirnya bertujuan untuk meningkatkan pendapatan masyarakat, sehingga mendorong perubahan struktur ekonomi di banyak negara. Yaitu dari yang pada awalnya berbasis agraris menjadi berbasis industri. Industrialisasi bukanlah tujuan akhir dari pembangunan ekonomi, melainkan strategi yang ditempuh untuk mendukung proses pembangunan ekonomi guna meningkatkan pendapatan per kapita yang berkelanjutan.

“Industrialisasi merupakan suatu proses interaksi antara pengembangan teknologi, inovasi, spesialisasi produksi, dan perdagangan antara negara, yang pada akhirnya sejalan dengan meningkatnya pendapatan masyarakat mendorong perubahan struktur ekonomi di banyak negara dari yang terjadinya berbasis pertanian menjadi berbasis industri (*Dr. Tulus T.H. Tambunan*)”.

“Industrialisasi bukanlah merupakan tujuan akhir dari pembangunan ekonomi, tetapi merupakan salah satu strategi yang harus ditempuh untuk mendukung proses pembangunan ekonomi guna mencapai tingkat pendapatan per-kapita yang tinggi dan berkelanjutan (*Riedel, 1992*)”.

“Industrialisasi, dalam arti luas dipahami sebagai suatu proses yang tak terelakan, menuju masyarakat industrial untuk mengaktualisasikan segala potensi yang dimiliki suatu masyarakat dalam upayanya untuk mencapai kehidupan yang lebih baik dari waktu ke waktu. Industrialisasi bukan sekedar membangun wujud

fisik saja, tetapi juga membentuk masyarakat untuk siap menghadapi realitas baru (*Faisal Basri*)”.

Istilah industrilaisasi sendiri muncul pertama kali di Inggris pada pertengahan abad ke-18, yang dikenal dengan *Revolusi Industri*, yang diartikan sebagai proses yang bertujuan untuk meningkatkan perekonomian masyarakat, dengan memaksimalkan kinerja sebuah industri. Industrialisasi dapat dikatakan merupakan sebuah metode, dimana kinerja manusia dibantu dengan menggunakan alat-alat seperti mesin, dengan tujuan untuk meningkatkan produktivitas. Maka, bagaimanapun industrialisasi tak dapat dilepaskan dengan perkembangan dan inovasi teknologi.

Industrialisasi lambat laun juga telah merubah pola pikir manusia, dari pola pikir *holistik* menjadi *transeden*. Manusia tidak lagi memosisikan diri sebagai bagian dari alam lingkungannya, namun dengan kemampuan teknologinya alam lingkungan beserta kandungan sumberdayanya diposisikan sebagai obyek yang dapat dikelola dengan bebas, tanpa menyadari bahwa alam lingkungan cepat atau lambat akan bereaksi, berbalik menerjang manusia beserta segala kepentingannya. Maka perkembangan teknologi kemudian dapat berbalik justru menjadi bencana teknologi. Bahkan teknologi juga sengaja diciptakan untuk menimbulkan bencana.

10.1. Revolusi Industri

Revolusi Industri adalah suatu perubahan besar, secara cepat, dan radikal yang mempengaruhi kehidupan corak manusia. Walaupun istilah revolusi biasanya digunakan dalam perubahan politik atau sistem pemerintahan, namun Revolusi Industri di Inggris pada hakikatnya adalah perubahan dalam cara pembuatan barang, yang semula dikerjakan dengan tenaga manusia, kemudian digantikan dengan tenaga mesin. Dengan demikian, berbagai barang dapat diproduksi dengan jumlah besar dalam waktu yang lebih singkat.

Revolusi Industri pertama yang terjadi pada sekitar tahun 1750 – 1850, adalah merupakan periode dimana terjadi perubahan besar-besaran dalam berbagai bidang, seperti pertanian, manufaktur, pertambangan, transportasi, dan teknologi, serta memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan sosial, ekonomi, dan budaya

dunia. Revolusi Industri yang dimulai dari Britania Raya (Inggris), kemudian menyebar keseluruh Eropa Barat, Amerika Utara, Jepang, dan bahkan menyebar keseluruh dunia.

Tidak diketahui dengan pasti awal mula dari Revolusi Industri, namun *T.S. Ashton* memperkirakan disekitar tahun 1760 - 1830. Tidak diketahui pula batas pemisah yang jelas dengan Revolusi Industri II, yang berkembang pada sekitar tahun 1850, ketika kemajuan teknologi dan ekonomi mendapatkan momentum dengan perkembangan kapal tenaga-uap, rel kereta-api. Dan kemudian pada akhir abad tersebut, berlanjut dengan perkembangan mesin bakar dan mesin-mesin pembangkit tenaga listrik.

Awal mula penggunaan istilah "Revolusi Industri" ditemukan dalam surat oleh seorang utusan Perancis bernama *Louis-Guillaume Otto* pada tanggal 6 Juli 1799, dimana ia menuliskan bahwa Perancis telah memasuki era *industrialise*. Dalam buku terbitan tahun 1976 yang berjudul *Keywords : A Vocabulary of Culture and Society*, *Raymond Williams* menyatakan bahwa kata itu sebagai sebutan untuk istilah "industri". Istilah "Revolusi Industri" sendiri secara formal diperkenalkan oleh *Friedrich Engels* dan *Louis-Auguste Blanqui* pada pertengahan abad ke-19.

10.1.1. Latar Belakang dan Perkembangan Revolusi Industri

Faktor yang melatarbelakangi terjadinya Revolusi Industri adalah terjadinya revolusi dalam ilmu pengetahuan pada abad ke 16, dengan munculnya para ilmuwan seperti *Francis Bacon*, *René Descartes*, *Galileo Galilei*, serta adanya pengembangan riset dan penelitian dengan berdirinya berbagai lembaga riset seperti *The Royal Improving Knowledge*, *The Royal Society of England*, dan *The French Academy of Science*. Ada pula faktor internal seperti ketahanan politik dalam negeri, perkembangan kegiatan wiraswasta, serta wilayah jajahan Inggris yang luas dan kaya akan sumberdaya alam.

Revolusi Industri yang untuk pertama kalinya muncul di Inggris, dipicu oleh faktor-faktor sebagai berikut :

- Situasi politik yang stabil. Adanya Revolusi Agung pada tahun 1688 yang mengharuskan raja bersumpah setia kepada *Bill of Right* sehingga raja tunduk kepada undang-undang dan hanya menarik pajak atas persetujuan parlemen.

- Negara Inggris yang kaya akan bahan tambang, seperti batu bara, biji besi, timah, dan kaolin. Disamping itu industri kain wol, yang juga sangat menunjang industri tekstil.
- Adanya penemuan baru di bidang teknologi yang dapat mempermudah cara kerja dan meningkatkan hasil produksi, seperti peralatan pemintal, mesin tenun, mesin uap, dan sebagainya.
- Kemakmuran Inggris sebagai akibat majunya pelayaran dan perdagangan, sehingga mampu menyediakan modal besar untuk berbagai bidang usaha. Disamping itu, Inggris juga memiliki cadangan bahan mentah yang cukup, yang berasal dari wilayah jajahannya.
- Pemerintah memberikan perlindungan hukum terhadap hasil2 temuan baru (hak paten), sehingga mendorong kegiatan penelitian ilmiah. Terlebih setelah dibentuknya lembaga ilmiah *Royal Society for Improving Natural Knowledge*, yang merangsang perkembangan teknologi dan industri untuk lebih maju.
- Arus urbanisasi sebagai akibat Revolusi Agraria dipedesaan, mendorong pemerintah Inggris untuk membuka lapangan kerja industri yang lebih besar, untuk menampung kelebihan tenaga kerja tersebut.

Maka dimulailah periode Revolusi Industri pada akhir abad ke-18 di Inggris, dimana terjadi peralihan dari penggunaan tenaga kerja manusia dan hewan, digantikan oleh mesin2 industri yang berbasis manufaktur.

Periode awal dimulai dengan dilakukannya mekanisasi terhadap industri tekstil, pengembangan teknik pembuatan besi, dan peningkatan penggunaan batubara. Berikutnya ekspansi perdagangan turut berkembang dengan dibukanya terusan *Suez*, perbaikan jalan raya dan rel kereta api.

Penemuan teknologi baru, besar peranannya dalam proses industrialisasi oleh karena mempermudah dan mempercepat kinerja industri, melipat-gandakan hasil, dan menghemat biaya. Beberapa penemuan penting, diantaranya adalah :

- Kumparan terbang (*flying shuttle*) ciptaan *John Kay* (1733). Dengan alat ini proses pemintalan dapat berjalan lebih cepat.

- Mesin pemintal benang (*spinning jenny*) ciptaan *James Hargreaves* (1767) dan *Richard Arkwright* (1769), yang mampu melipat-gandakan hasil.
- Mesin tenun yang merupakan penyempurnaan dari kumparan terbang, ciptaan *Edmund Cartwright* (1785). Dengan alat ini hasilnya berlipat-ganda.
- *Cottongin*, alat pemisah biji kapas dari serabutnya ciptaan *Whitney* (1794). Dengan alat ini maka kebutuhan kapas bersih dalam jumlah besar dapat tercukupi.
- Cap silinder ciptaan *Thomas Bell* (1785). Dengan alat ini kain putih dapat dilukisi pola kembang 200 kali lebih cepat dibandingkan dengan pola cap balok dengan tenaga manusia.
- Mesin uap, ciptaan *James Watt* (1769). Dari mesin uap ini berkembang berbagai peralatan besar yang menakjubkan. Seperti lokomotif ciptaan *Richard Trevethick* (1804) yang kemudian disempurnakan oleh *George Stephenson* menjadi kereta api penumpang. Kapal perang yang digerakkan dengan mesin uap ciptaan *Robert Fulton* (1814).

Mesin uap merupakan inti dari Revolusi Industri sehingga *James Watt* sering dianggap sebagai Bapak Revolusi Industri I. Penemuan2 baru selanjutnya, yang semakin lengkap dan sempurna merupakan hasil Revolusi Industri II dan III, seperti mobil, pesawat terbang, industri kimia dan sebagainya.



Gambar 10.1. : Mesin uap karya *James Watt* (1769)

Revolusi Industri juga merupakan masa perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang menghasilkan temuan2 baru, seperti diantaranya :

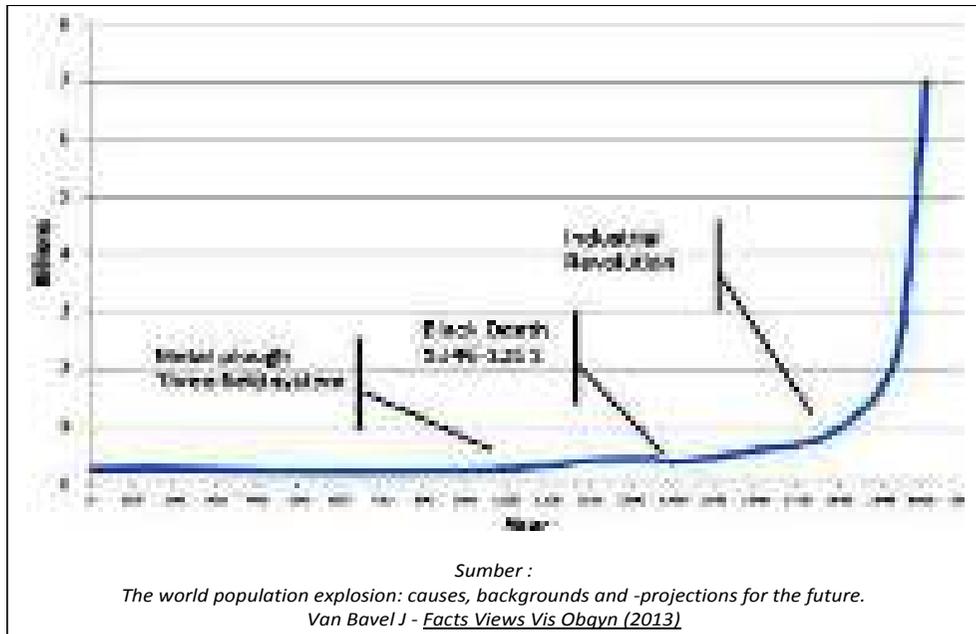
- Tahun 1750 : *Abraham Darby* menggunakan batubara (cokes) untuk melelehkan besi untuk mendapatkan nilai besi yang lebih sempurna.
- Tahun 1800 : *Alessandro Volta* penemu pertama baterai.
- Tahun 1802 : *Symington* menemukan kapal kincir.
- Tahun 1804 : *Richard Trevethick* membuat kapal uap.
- Tahun 1807 : *Robert Fulton* membuat kapal api yang menggunakan baling-baling sebagai penggerak kapal. Kapal itu diberi nama *Clermont* yang mengarungi Lautan Atlantik, berangkat dari Paris dan berlabuh di New York. Selanjutnya, *Robert Fulton* berhasil pula membuat kapal perang pertama (1814) digerakkan dengan mesin uap.
- Tahun 1832 : *Samuel Morse* membuat telegraf.
- Tahun 1872 : *Alexander Graham Bell* membuat pesawat telepon.
- Tahun 1887 : *Daimler* membuat mobil.
- Tahun 1903 : *Wilbur Wright* dan *Oroville Wright* membuat pesawat terbang.

10.1.2. Dampak Revolusi Industri

Industrialisasi telah menyebabkan peralihan dari perekonomian yang berbasis pertanian ke perekonomian yang berbasis manufaktur, sehingga menyebabkan terjadinya urbanisasi besar-besaran dari desa ke kota, yang pada akhirnya menyebabkan peningkatan populasi di kota-kota besar di Inggris.

Beberapa sejarawan abad ke-20 seperti *John Clapham* dan *Nicholas Crafts* berpendapat bahwa proses perubahan ekonomi dan sosial yang terjadi secara bertahap dan revolusi jangka panjang adalah sebuah ironi. Produk domestik bruto (PDB) per-kapita negara-negara di dunia meningkat setelah Revolusi Industri sehingga memunculkan *sistem ekonomi kapitalis modern*. Revolusi Industri ditandai dengan dimulainya era pertumbuhan pendapatan per-kapita, dan pertumbuhan ekonomi kapitalis. Maka, Revolusi Industri dapat

dianggap sebagai peristiwa paling penting yang pernah terjadi dalam sejarah kemanusiaan, sejak domestikasi hewan dan tumbuhan pada masa *Neolitikum*.



Gambar 10.2. : Pertumbuhan penduduk dunia sebelum dan sesudah Revolusi Industri

Revolusi Industri merupakan titik balik besar dalam sejarah dunia, dimana hampir setiap aspek kehidupan terpengaruh, khususnya dalam hal peningkatan pertumbuhan penduduk dan pendapatan rata-rata yang berkelanjutan, yang belum pernah terjadi sebelumnya. Selama dua abad setelah Revolusi Industri, rata-rata pendapatan per-kapita berbagai negara di dunia meningkat lebih dari enam kali lipat. Seperti yang dinyatakan oleh pemenang Hadiah Nobel, *Robert Emerson Lucas*, bahwa "Untuk pertama kalinya dalam sejarah, standar hidup rakyat biasa mengalami pertumbuhan yang berkelanjutan, dimana perilaku ekonomi yang seperti ini tidak pernah terjadi sebelumnya".

Revolusi Industri mengubah Inggris menjadi negara industri yang maju dan modern, dengan munculnya pusat-pusat industri, seperti *Lancashire, Manchester, Liverpool, dan Birmingham*.

Peta Pusat Industri dan Pertambangan Inggris



Sumber : <http://sejarahsalvia99.blogspot.co.id/2010/02/wujud-revolusi-industri.html>

Gambar 10.3. : Peta pusat2 industri & pertambangan di Inggris pasca Revolusi Industri

Seperti halnya revolusi yang lain, Revolusi Industri juga membawa dampak yang lebih luas dalam bidang ekonomi, sosial dan politik, baik di negeri Inggris sendiri maupun di negara2 lainnya.

Dampak Sosial-Ekonomi.

Berkembangnya industrialisasi menyebabkan berkembangnya kota-kota industri dan pusat-pusat keramaian baru. Kota dengan kegiatan industrinya yang menjanjikan kehidupan lebih layak sehingga memicu terjadinya urbanisasi, dimana banyak petani desa pergi ke kota untuk mendapatkan pekerjaan, yang mengakibatkan terabaikannya usaha kegiatan pertanian. Sementara itu dalam dunia industri, mulai terjadi segmentasi sosial, dengan terbentuknya kelompok status, golongan pekerja (buruh), dan golongan pengusaha (majikan) sebagai pemilik memiliki industri atau pabrik yang sering disebut sebagai kaum kapitalis, masing-masing dengan tingkat ekonomi dan status sosial yang berbeda. Perbedaan yang semakin

tajam, kemudian mulai memicu terjadinya konflik yang semakin keras pula. Sehingga pada tahun 1820-an terjadi huru-hara yang ditimbulkan oleh penduduk kota yang miskin dengan didukung oleh kaum buruh. Gerakan sosial yang menuntut perbaikan nasib rakyat dan buruh, kemudian melahirkan *Gerakan Sosialis* yang dimotivasi oleh pemikiran *Thomas Marus* yang menulis buku *Otopia*. Tokoh yang paling populer dalam pemikiran dan penggerak paham sosialis dalam hal ini adalah *Karl Marx* dengan bukunya *Das Kapital*.

Dampak Politik.

Dalam upaya memperjuangkan nasibnya kaum buruh terus menggalang persatuan. Dengan semakin kuatnya kedudukan kaum buruh di parlemen, mendorong dibentuknya suatu wadah perjuangan politik, yakni *Partai Buruh* yang berhaluan sosialis. Sementara itu golongan pengusaha umumnya bergabung dalam *Partai Liberal*. Demikian, maka terjadi polarisasi politik yang meluas ke seluruh dunia. Masyarakat dunia terpecah menjadi Blok Barat yang *Kapitalis*, dengan Blok Timur yang *Sosialis*. Namun demikian, bagaimanapun industrialisasi dengan tingkat produktivitas yang tinggi tetap memerlukan pasar. Maka timbulah *imperialisme modern*, yang bukan sekedar bertujuan kolonialisasi, namun lebih kepada perluasan daerah pemasaran hasil industri, mencari bahan mentah, penanaman modal yang surplus, dan tempat mendapatkan tenaga buruh yang murah, dimana dalam hal ini Inggris sebagai penggerak Revolusi Industri adalah pelopornya. Tak jarang hal tersebut memicu terjadinya perang, baik dalam upaya perebutan pengaruh diantara sesama negara imperialis, maupun antara negara imperialis dengan negara terjajah. Teknologi yang pada dasarnya ditujukan untuk kehidupan yang lebih baik, mulai dikembangkan untuk menciptakan senjata pemusnah yang kelak menjadi sumber penyebab bencana teknologi.

Dampak Lingkungan Global

Revolusi industri yang digerakkan oleh temuan-temuan baru dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkembang pesat, secara tidak langsung merubah pola pikir manusia, dari pola *holistik* berubah menjadi *transeden*. Yaitu, manusia tidak lagi memosisikan dirinya sebagai bagian dari lingkungan (*holistik*), namun memandang alam lingkungan sebagai obyek untuk di-

eksploitasi (*transeden*). Pada sisi lain mekanisasi industri, yang menggantikan tenaga manusia dengan tenaga mesin, memerlukan energi penggerak yang lebih besar, yang tak dapat dipenuhi dari sumber-sumber energi terbarukan (*renewable*) yang tersedia. Kebutuhan akan sumberdaya alam sebagai bahan baku industri pun semakin meningkat pula. Maka eksploitasi besar-besaran sumberdaya alam pun dimulai, tanpa menyadari bahwa sumberdaya alam juga mempunyai keterbatasan secara kuantitas, dan banyak yang bersifat tidak terbarukan (*non-renewable*). Maka kelak akan timbul masalah, manakala cadangan sumberdaya alam yang tersedia mulai menipis. Limbah industri pun, baik berupa limbah padat, cair maupun emisi gas, berangsur-angsur mulai terakumulasi, sehingga mencapai kadar yang membahayakan bagi lingkungan secara regional bahkan global.

10.2. Dampak Teknologi

Teknologi pada dasarnya dikembangkan untuk dapat menunjang kehidupan manusia yang lebih baik. Manusia dengan kelebihan daya nalarnya, telah berhasil menciptakan dan mengembangkan teknologi dalam berbagai bidang, yang memberikan kemudahan dalam melakukan berbagai kegiatannya. Seperti halnya teknologi transportasi yang telah memberikan kemudahan bagi manusia untuk berpindah tempat dengan cepat, teknologi komunikasi yang memudahkan manusia berhubungan untuk saling bertukar informasi, teknologi eksplorasi dan eksploitasi yang telah memudahkan manusia untuk mengelola dan memanfaatkan sumberdaya alam, dan banyak lagi yang lainnya.

Namun demikian, perkembangan teknologi juga memicu berkembangnya risiko teknologi, sebagai akibat dari kegagalan dalam penerapannya, oleh karena tidak semua orang memiliki kompetensi untuk itu, dan kegagalan dalam penerapan teknologi dapat berakibat bencana. Perkembangan teknologi juga dapat memancing lingkungan alam untuk bereaksi, oleh karena keseimbangan lingkungan yang terganggu. Dalam jangka panjang, ketidakseimbangan tersebut dapat berbalik menimbulkan bencana.

Perkembangan teknologi secara tak langsung telah memicu terjadinya persaingan di antara kelompok-kelompok manusia dalam

penguasaan sumberdaya alam, yang tak jarang berujung pada perang. Dalam keadaan seperti ini, teknologi justru sengaja dikembangkan untuk menciptakan bencana, untuk mengalahkan lawan-lawannya.

Secara umum, bencana teknologi terdiri dari :

- Bencana kegagalan teknologi.
- Bencana kesengajaan teknologi.

Namun sumber dari bencana teknologi, sejatinya adalah perubahan pola pikir manusia, dari pola *holistik* menjadi pola *transeden*.

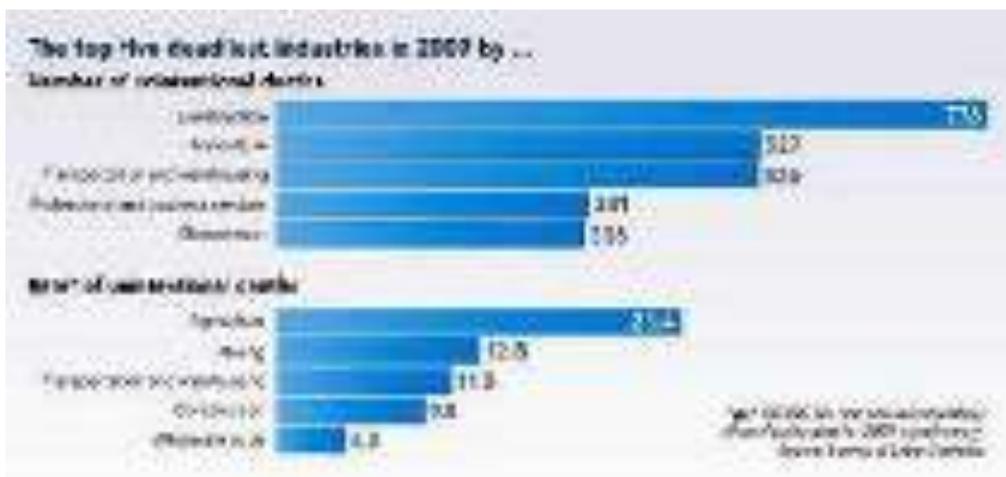
10.3. Bencana Kegagalan Teknologi

Perkembangan teknologi juga memicu berkembangnya risiko teknologi. Perkembangan teknologi seyogyanya diimbangi pula dengan pengembangan kompetensi dalam penerapannya. Bagaimanapun risiko kegagalan akan selalu tumbuh berkembang sejalan dengan perkembangan teknologi. Namun sayangnya kesadaran akan risiko kegagalan penerapan teknologi, seringkali terlambat disadari sehingga menimbulkan bencana. Bencana yang diakibatkan oleh kegagalan dalam menerapkan teknologi, dapat atau biasa juga disebut sebagai kecelakaan kerja, oleh karena kecelakaan kerjalah yang menyebabkan terjadinya bencana. Kecelakaan kerja dapat diakibatkan oleh kurang sempurnanya teknologi untuk diterapkan, atau kurang sispan untuk menerapkan teknologi, atau keduanya.

Kecelakaan kerja tidak hanya menimbulkan kerugian materi, namun juga dapat menimbulkan korban jiwa atau cedera. Menurut *De Reamer (1958)* dalam *National Safety Council (1985)*, kecelakaan didefinisikan sebagai suatu kejadian yang tidak terencana. Kecelakaan tidak hanya menyebabkan cedera atau korban jiwa, tetapi dapat juga menyebabkan kerusakan material dan peralatan yang ada, walaupun kecelakaan yang mengakibatkan cedera atau korban jiwa lebih mendapatkan perhatian. Kecelakaan kerja sendiri dipengaruhi oleh setidaknya 3 faktor, yaitu : faktor manusia (*human error*), faktor lingkungan kerja, dan faktor peralatan/perengkapan termasuk sistem manajemen.

- Faktor manusia (*human error*), yang menyebabkan terjadinya kecelakaan yang terjadi adalah kompetensi yang kurang memadai dalam penerapan teknologi, dan kecerobohan.
- Faktor lingkungan kerja, seperti kebisingan, penerangan dan suhu udara sering menyebabkan terganggunya komunikasi dan ketelitian kerja, sehingga berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja, disamping berbagai faktor lingkungan lainnya.
- Faktor peralatan/perengkapan termasuk sistem manajemen merupakan faktor yang berpotensi untuk memicu terjadinya kecelakaan kerja. Bagaimanapun teknologi maupun sistem manajemen tentu mempunyai keterbatasan, dan berpotensi untuk mengalami kegagalan. Maka penerapan teknologi maupun sistem manajemen, seyogyanya terus-menerus di evaluasi dan disempurnakan.

Di Amerika Serikat sebagai negara maju dengan tingkat kemajuan teknologi, termasuk tingkat pengamanan keselamatan kerjanya yang tinggi, kecelakaan kerja pada sektor industri masih juga terjadi. *US National Safety Council* (NSC) mempublikasikan data statistik dari *Bureau of Labor Statistics*, mengenai 5 bidang industri dengan tingkat kecelakaan kerja yang mengakibatkan korban jiwa terbesar pada tahun 2009, sebagai berikut :



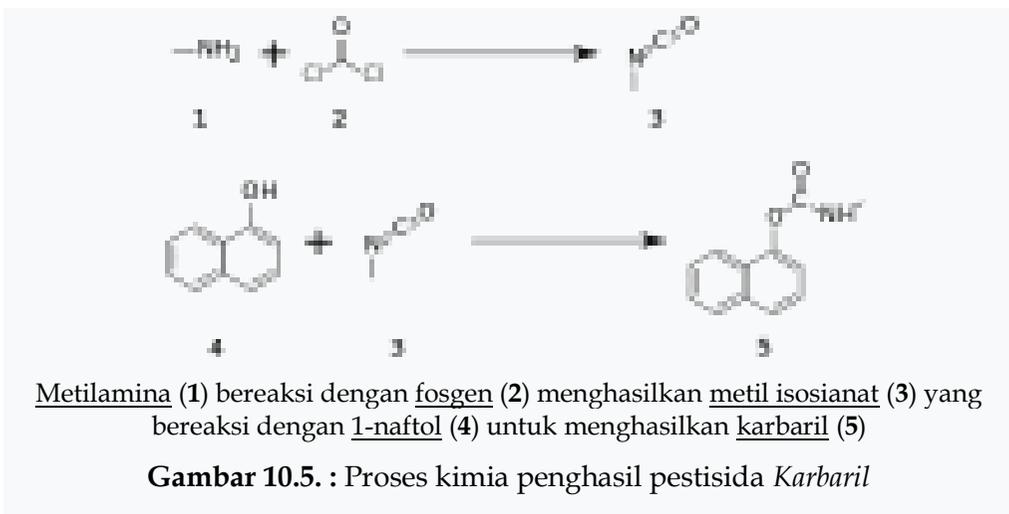
Sumber : <https://lorco.co.id/5industri/>

Gambar 10.4. Grafik korban jiwa kecelakaan kerja per sektor di Amerika Serikat, 2009

1. **Industri Konstruksi** dengan 776 korban jiwa akibat kecelakaan kerja.
2. **Industri Pertanian** dengan 527 korban jiwa akibat kecelakaan kerja.
3. **Industri Transportasi dan Pergudangan** dengan 526 korban jiwa akibat kecelakaan kerja.
4. **Industri Jasa Profesional dan Bisnis** dengan 341 korban jiwa akibat kecelakaan kerja.
5. **Industri Milik Pemerintah** dengan 336 korban jiwa akibat kecelakaan kerja.

10.3.1. Tragedi Bhopal (1984)

Tragedi Bhopal, disebut pula sebagai tragedi gas Bhopal, adalah insiden kebocoran gas pada malam hari tanggal 2-3 Desember 1984, yang terjadi di pabrik pestisida *Union Carbide India Limited (UCIL)* di Bhopal, Madhya Pradesh-India. Tragedi ini dianggap sebagai bencana industri terburuk di dunia, dimana lebih dari setengah juta orang terpapar gas *metil isosianat (MIC)* yang sangat beracun.



Tragedi terjadi pada larut malam saat para pekerja sedang membilas pipa dengan air bersih. Tanpa diketahui penyebabnya, air memasuki tangki gas *metil isosianat (MIC)*, gas yang digunakan dalam produksi pestisida. Namun air memicu reaksi kimia yang

menyebabkan peningkatan tekanan di dalam tangki, sehingga memaksa pekerja membuka tangki agar tidak meledak. Akan tetapi pembukaan tangki tersebut justru melepaskan sejumlah besar gas *metil isosianat (MIC)* yang mematikan ke udara dengan disertai berbagai gas lainnya, seperti *fosgen* dan *hidrogen sianida*. Sehingga mengakibatkan 5 ribu orang tewas seketika, disusul puluhan ribu orang bertahun-tahun pasca peristiwa tersebut.

Bocornya gas beracun dari pabrik kimia Union Carbide milik Amerika Serikat yang menewaskan lebih dari 20 ribu orang tersebut, merupakan bencana akibat kegagalan teknologi untuk meng-antisipasi kebocoran pada tangki gas *metil isosianat (MIC)*. Sehingga sekitar 30 metrik ton gas beracun *metil isosianat (MIC)* tersebar keluar dari tangki ke atmosfer dalam waktu 45 hingga 60 menit, dan meningkat menjadi 40 metrik ton dalam waktu dua jam. Dimana *metil isosianat (MIC)* dalam bentuk gas adalah produk antara dalam proses produksi *Karbaril*.

Gas-gas beracun tersebut tertiuap angin ke arah tenggara, menyebar hingga ke kota-kota kecil di sekitar pabrik, sehingga mengakibatkan ratusan ribu orang terpapar gas *metil isosianat (MIC)*, dan mengalami penyakit kronis jangka panjang akibat keracunan, yang juga berarti bencana lingkungan dalam jangka panjang.

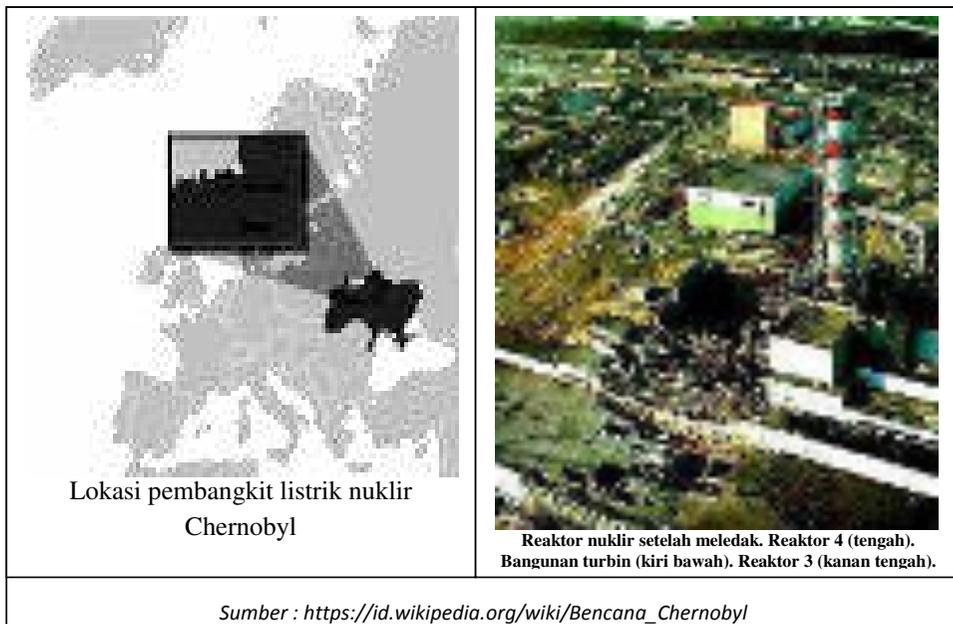


Gambar 10.6. : Korban langsung tragedi Bhopal (1984)

10.3.2. Bencana Chernobyl (1986)

Chernobyl adalah salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Uni Sovyet (Rusia), dekat kota Pripyat, tak jauh dari perbatasan administratif dengan Belarus dan Sungai Dnieper. Bencana terjadi ketika dilakukan pengujian sistem pada tanggal 26 April 1986 pada reaktor nomor 4 pembangkit Chernobyl, dimana terjadi lonjakan energi secara mendadak dan tak terduga. Lonjakan daya sangat tinggi terjadi ketika reaktor dicoba untuk dimatikan secara darurat, sehingga menyebabkan tangki reaktor pecah dengan diikuti serangkaian ledakan uap. Kejadian ini melepaskan moderator *neutron grafit* pada reaktor tersebut ke udara, sehingga menimbulkan nyala api. Kebakaran yang terjadi berlangsung seminggu penuh dengan melepaskan debu partikel radioaktif ke atmosfer secara luas, yang meliputi kota Pripyat. Debu radioaktif kemudian tersebar dari kawasan Uni Soviet hingga Eropa Barat, dimana sekitar 60% jatuh di wilayah Belarus.

Mengutip laman *world-nuclear.org*, Senin (18/5/2015), debu radioaktif yang dilepaskan 400 kali lebih banyak dibanding debu radioaktif pada bom atom Hiroshima, dan menyebabkan kontaminasi pada areal seluas 100 000 km².



Gambar 10.7. : Reaktor Nuklir *Chernobyl*

Otoritas Uni Soviet memberlakukan zona eksklusi dalam radius 10 km, dan melakukan evakuasi cepat 49000 orang penduduk beserta hewan mereka, terutama dari pusat populasi terbesar didekat reaktor, yaitu kota Pripyat. Namun evakuasi langsung setelah insiden tidak disarankan, oleh karena jalanan keluar kota dipenuhi dengan debu yang berisi partikel nuklir didalamnya, sedangkan kotanya sendiri cukup aman karena diuntungkan oleh arah angin. Oleh karena debu terus menerus menyebar, zona evakuasi diperluas menjadi 30 km seminggu setelah insiden, sehingga 68000 penduduk harus dievakuasi, termasuk dari kota Chernobyl. Survei dan deteksi zona ter-isolasi menyebutkan bahwa secara total terdapat sekitar 135000 orang pengungsi jangka panjang. Jumlah ini kemudian meningkat menjadi 350000 orang pada periode berikutnya, yaitu pada tahun 1986-2000.

Bencana meledaknya reaktor nuklir Chernobyl adalah peristiwa yang disebabkan oleh kesalahan manusia (*human error*). Yaitu berupa kegagalan teknologi dalam pengendalian reaksi *fisi* nuklir oleh berbagai sebab, sehingga mengakibatkan terjadinya reaksi *fisi* nuklir yang tak terkendali, dan menebarkan sejumlah besar radiasi nuklir secara berantai.

Penemuan *fisi* nuklir oleh ahli kimia Jerman *Otto Hahn* dan *Fritz Strassmann* (1938) dan penjelasan teorinya oleh *Lise Meitner* dan *Otto Frisch*, pada dasarnya menunjukkan kemampuan teknologi manusia untuk mempercepat proses peluruhan unsur-unsur radioaktif, sehingga akumulasi energi radiasi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan. Namun demikian, proses *fisi* nuklir adalah proses reaksi berantai, yang dapat menghasilkan pelepasan energi sangat besar. Maka *fisi* nuklir yang tak terkendali justru akan sangat membahayakan bagi manusia dan lingkungannya. Berbagai bencana lingkungan berkaitan dengan *fisi* nuklir, telah pernah terjadi, sebagai akibat kegagalan teknologi dalam mengendalikan proses tersebut oleh berbagai sebab.

Tabel 10.1. : Insiden instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir besar s/d 2009

<u>Insiden Pembangkit nuklir yang memakan biaya lebih dari 300 juta dolar AS, sampai 2009</u>			
<u>Tanggal</u>	<u>Lokasi</u>	<u>Deskripsi</u>	<u>Biaya (dalam juta dolar)</u>
7 Desember 1975	Greifswald, Jerman Timur	Kesalahan dibagian kelistrikan menyebabkan kebakaran yang merusak jalur kontrol dan 5 pompa pendingin utama	US \$443
22 Februari 1977	Jaslovské Bohunice, Cekoslowakia		US \$1,700
28 Maret 1979	Middletown, Pennsylvania, AS	Kebocoran sebagian inti nuklir dan rusaknya sistem pendingin,	US \$2,400
9 Maret 1985	Athens, Alabama, AS	Sistem instrumen mengalami malafungsi, sehingga mengganggu pengoperasian ketiga reaktor di Browns Ferry - reaktor dioperasikan kembali tahun 1991 untuk unit 2, 1995 untuk unit 3, dan 2007 untuk unit 1	US \$1,830
11 April 1986	Plymouth, Massachusetts, AS	Adanya masalah pada peralatan menyebabkan kematian darurat di Pembangkit listrik nuklir Pilgrim	US \$1,001
26 April 1986	Chernobyl, dekat kota Pripjat, Ukraina	Ledakan yao dan kebocoran menyebabkan 4.057 kematian (lihat Bencana Chernobyl) dan menyebabkan 300.000 orang dievakuasi di Belarusia, Rusia, dan Ukraina. Material radioaktif menyebar di seluruh Eropa.	US \$6,700
31 Maret 1987	Delta, Pennsylvania, AS	Malafungsi pada sistem pendinginan menyebabkan matinya unit 2 dan 3 di Peach Bottom	US \$400

Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Daya_nuklir

10.3.3. Keruntuhan Bendungan St Francis – California (1928)

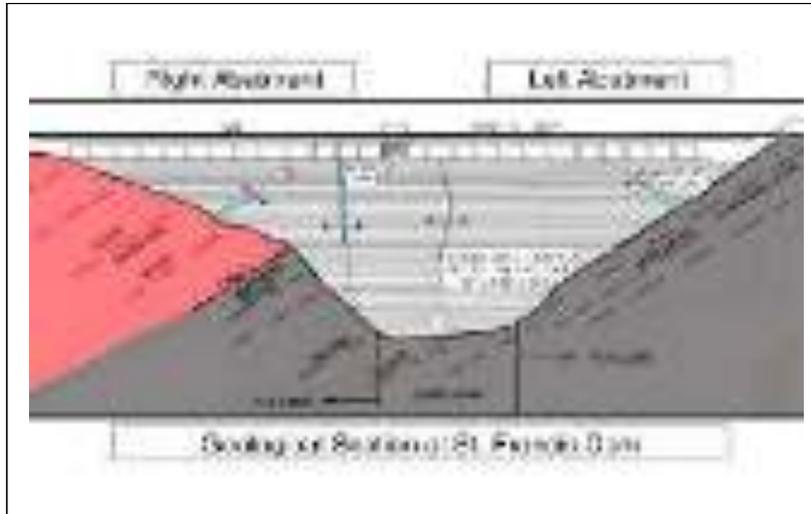


Gambar 10.8. : Peta lokasi Bendungan St Francis

Bendungan St Francis di California-USA, dibangun pada sungai San Francisquito, antara lain untuk kepentingan pembangkitan tenaga listrik, pada tahun 1925. Bendungan ini merupakan bendungan gravitasi melengkung, dengan jari2 500 ft, tinggi 205 ft, tebal pada bagian puncaknya 16 ft, sedangkan pada bagian dasarnya 175 ft.

Pengisian waduk dimulai pada tanggal 1 Maret 1926. Dengan diawali dengan bocoran menembus bendungan, terutama melalui bagian pondasinya, pada tanggal 12 Maret 1928 terjadi bencana runtuhnya bendungan St Francis tersebut. Yaitu berupa banjir bandang masa air setinggi 125 ft, yang melanda lembah pada bagian hilir bendungan. Bencana ini menelan korban lebih dari 236 jiwa.

Dari hasil observasi geologis, diketahui bahwa lereng kiri lembah sungai San Francisquito dimana bendungan San Francis dibangun, merupakan tebing yang dibentuk oleh batuan Sekis Mika (*Mica Schist*). Sementara itu, tebing kanan lembah pada bagian bawahnya dibentuk juga oleh batuan Sekis Mika, sedangkan pada bagian atasnya dengan dibatasi oleh bidang diskontinuitas yang berupa bidang sesar, dibentuk oleh batuan Konglomerat bersisipan Batupasir dan batuan sedimen halus lainnya. Batuan Konglomerat tersebut, dalam keadaan kering merupakan batuan yang kokoh, namun rapuh dalam keadaan basah dan mempunyai sifat lulus air, sehingga mudah untuk menyerap air. Sehingga ketika waduk mulai diisi air dan mencapai elevasi batuan Konglomerat, maka genangan air waduk mulai membasahinya, merembes kedalam batuan Konglomerat tersebut, dan mulai mengalir melalui bidang-bidang diskontinuitas didalamnya, termasuk yang membatasinya dengan batuan Sekis Mika. Rembesan air ini mengalir sepanjang bidang-bidang diskontinuitas tersebut, menerobos bendungan kehilir, sambil ber angsur-angsur mengikis pondasi bendungan.



Gambar 10.9. : Profil Geologi pada bendungan St Francis

Walaupun bendungan St Francis dibangun melintang memotong bidang sesar, selama pengisian waduk tidak dilaporkan adanya gempa yang mungkin menggerakkan sesar tersebut, dan juga tidak dijumpai tanda-tanda aktivitas sesar. Selain itu, pondasi bendungan juga telah diperhitungkan cukup kuat untuk mendukung beban tubuh bendungan di atasnya. Penelitian terhadap bongkahan-bongkahan tubuh bendungan yang hancur dan terhanyutkan oleh air bahkan menunjukkan bahwa bahan material yang digunakan mempunyai kualitas yang tinggi, sehingga cukup kokoh.

Dari hasil penelitian atas runtuhnya bendungan St Francis tersebut, kemungkinan yang paling dapat diterima adalah kegagalan pondasi untuk mendukung beban tubuh bendungan. Hal tersebut terjadi oleh karena kerapuhan batuan Konglomerat dalam keadaan basah, dan rembesan air melalui bidang-bidang diskontinuitas didalamnya, yang berangsur-angsur mengikis pondasi dibawah bendungan, sehingga kemampuan daya dukung pondasinya pun mengalami degradasi.

Peristiwa runtuhnya bendungan St Francis merupakan kegagalan teknologi pada saat itu, dalam memprediksi perilaku tanah pondasi setelah digengangi air. Peristiwa inilah yang kemudian menjadi salah satu faktor pemicu kesadaran akan pentingnya pengetahuan geologi dalam bidang teknik konstruksi.

Bagimanapun, bendungan dengan menyimpan sejumlah besar air waduk dibelakangnya, merupakan produk teknologi yang berpotensi menimbulkan bencana besar manakala mengalami kegagalan teknologi.

10.3.4. Banjir Bandang Bendungan Vajont (Vajont Dam) – Italia (1963)

Bendungan Vajont (*Vajont Dam*), di sungai Vajont, Friuli-Venezia Giulia – Italia, adalah bendungan beton melengkung (*Concrete Arc Dam*) dengan tinggi 261,6 meter, merupakan bendungan tertinggi di dunia pada saat itu, selesai dibangun pada tahun 1959. Bendungan tersebut sebenarnya telah dibangun pada dekade sebelumnya, untuk memasok tenaga listrik dengan memanfaatkan potensi tenaga air ke kota-kota yang tumbuh di Italia Utara, namun pembangunannya terhenti pada tahun 1943, oleh karena pecahnya Perang Dunia II.

Meskipun mendapat tentangan dari penduduk lokal, terutama para penduduk di desa-desa komune Erto e Casso, pembangunannya dilanjutkan kembali pada tahun 1957, dibawah naungan monopoli penguasa lokal *SADE (Società Adriatica di Eletticità)*.



Gambar 10.11. : Bendungan Vajont
(*Vajont Dam*) – Italia

Pada tanggal 9 Oktober 1963 malam hari, 270 juta meter kubik blok gunung runtuh kedalam waduk *Lago del Vajont* dengan kecepatan sekitar 110 km per jam, memblokir waduk. Longsoran tanah dan batu mendorong masa air dalam dua arah gelombang pada kedua sisi. Satu gelombang meluncur ke hulu menerjang sebuah hotel dimana 54 pekerja bendungan tinggal dan menewaskan semua orang di dalamnya. Gelombang hulu ini juga menerjang dan menghancurkan desa di Erto e Casso yang berada pada ketinggian 260 m di atas permukaan danau.



Gambar 10.12. : Lokasi Bendungan Vajont (*Vajont Dam*)

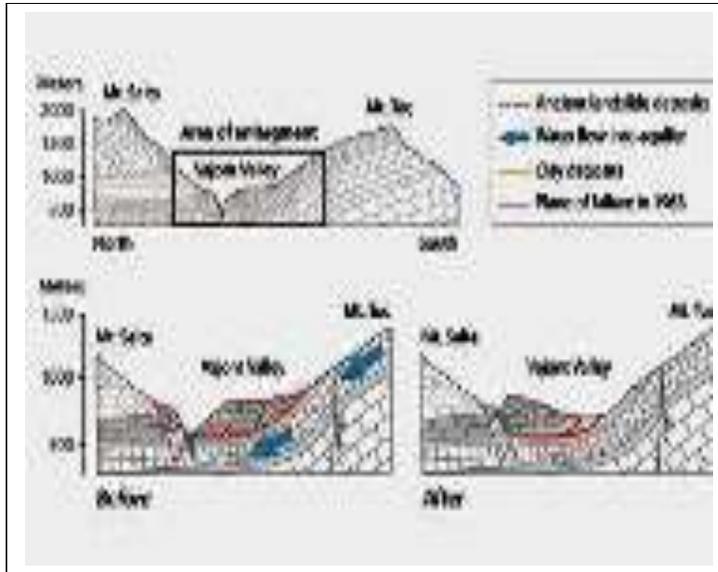
Gelombang lainnya bergerak menuju hilir dan melewati bendungan, sehingga sejumlah 30 juta meter kubik air (sekitar 26 persen dari volume air waduk) melimpas melalui puncak bendungan (*overtopping*) yang tingginya 250 meter, menuruni lembah Vajont menuju lembah sungai Piave, namun tubuh bendungan itu sendiri tetap utuh. Pada jalur ini terdapat komune Longarone dan desa-desa tetangganya yaitu Pirago, Rivalta, Villanova, Codissago, dan Fae. Dalam beberapa menit, semuanya dimusnahkan oleh gelombang masa air raksasa yang menyerupai tsunami. Dari tujuh desa yang hancur, korban tewas mencapai sekitar 2000 orang (80% berasal dari Longarone), dan hampir semua bangunan tersapu bersih dari tempatnya, dan hanya meninggalkan lumpur, batu, dan puing-puing.

Sebenarnya selama proses pembangunan, telah teridentifikasi tanda-tanda bahwa lembah gunung di Pegunungan Alpen Selatan ini tidak stabil. Namun, meskipun dari tiga studi yang dilakukan secara terpisah, dimana ditemukan bahwa pada sisi Monte Toc yang akan menjadi tepi selatan waduk, diindikasikan tidak stabil dan cenderung runtuh menuju lembah jika waduk terisi air, SADE tetap melanjutkan pembangunan. Selama pembangunanpun, jalan pada sisi selatan

Monte Toc, telah terlihat adanya pergeseran dan retakan pada tanah. Tiga kali uji pemboran semuanya gagal menemukan adanya lapisan tipis tanah lempung dalam lapisan Batugamping yang menduduki puncak gunung, dimana lapisan ini merupakan indikasi adanya longsor kuno sebelumnya, dan pembangunan terus dilanjutkan. Disepanjang lapisan tanah lempung inilah lapisan permukaan diatasnya akhirnya meluncur dari muka menuju waduk yang baru terbentuk.

Lereng gunung ini sebelumnya selalu terhindar dari longsor melalui lapisan tanah lempung. Hal ini oleh karena sebelum pengisian waduk Lago del Vajont, masa Batugamping mampu menyerap rembesan air kedalam tanah lempung. Namun setelah waduk terisi air dan muka waduk naik mencapai lapisan tanah lempung, maka terjadi penjenuhan.

Pada tahun pertama bendungan itu diisi air sampai kedalaman 180 m, sejumlah kecil bukit terlihat mulai bergeser 3,5 cm per hari. Pergeserannya semakin cepat seiring naiknya muka air waduk. Luas lahan yang merayap maju menuju lembah cukup besar, yaitu sekitar 1700 m panjang, 1000 m lebar dari lereng Monte Toc. Akhirnya, pada bulan November, 700.000 m³ bagian dari lereng bukit meluncur menuju waduk. Untuk ini maka muka air waduk diturunkan sebesar 25%, untuk menstabilkan bagian yang belum longsor. Namun hal ini hanya memperlambat pergeseran dan longsor, akan tetapi tidak dapat menghentikannya. Pada musim panas tahun 1962 dilakukanlah operasi kedua, dimana muka air waduk perlahan-lahan dinaikkan sampai ketinggian 235 m, dimana tingkat pergeseran tanah hanya sedikit meningkat. Pada tahun 1963 muka air waduk kembali dinaikkan sampai dengan 230 meter, dan untuk sebagian besar musim panas pergeseran per hari masih di bawah 1 cm. Muka air waduk kembali dinaikkan pada bulan Agustus, sampai ketinggian 245 m, dan pergeseran pun kembali meningkat ke 3,5 cm per hari. Pergerakan tersebut terlalu besar untuk lereng gunung tersebut. Kecepatan pergeseran tanah terus meningkat, hingga pada 9 Oktober tingkat pergeseran tanah mencapai 20 cm per hari, maka longsoran besar yang mematikanpun terjadi.



Gambaran 10.13. : Penampang waduk Vajont, sebelum dan sesudah longsor 1963

Meskipun dilanda gelombang besar, bendungan Vajont tetap kokoh berdiri. Namun bencana banjir bandang yang melanda desa-desa di hilir bendungan, sebagai akibat limpasan masa air melampaui puncak bendungan, tetap tak terhindarkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa pembangunan bendungan, tidak boleh hanya memperhitungkan kekuatan untuk keamanan tubuh bendungannya saja. Bagaimanapun, kenaikan permukaan air waduk tentu akan mempengaruhi stabilitas lereng disekitarnya, sehingga perlu diperhitungkan juga.

10.4. Bencana Kesengajaan Teknologi

Perkembangan teknologi secara tak langsung telah memicu terjadinya persaingan diantara kelompok-kelompok manusia dalam perebutan pengaruh dan penguasaan sumberdaya alam, yang tak jarang berujung pada perang. Dalam keadaan seperti ini, teknologi justru sengaja dikembangkan untuk menciptakan bencana, untuk mengalahkan lawan-lawannya.

Berbagai temuan teknologi yang pada awalnya ditujukan untuk mempermudah kehidupan manusia, per lahan-lahan di modifikasi menjadi teknologi peralatan perang dan persenjataan untuk menimbulkan bencana. Kapal uap karya *Robert Fulton* bernama *Clermont* yang berhasil mengarungi samudera Atlantik dari Paris ke New York, di modifikasi menjadi kapal perang ber tenaga uap (1814). Demikian pula halnya dengan pesawat terbang hasil temuan *Wilbur Wright* dan *Orville Wright* (1903) dikembangkan dari alat transportasi menjadi pesawat tempur. *Igor Sikorsky* misalnya, merupakan orang yang pertama kali mengembangkan helikopter, yang ditujukan untuk kepentingan militer.

Teknologi persenjataan mengalami perkembangan pesat dari waktu ke waktu, dengan daya hancur yang semakin meningkat. Bom yang pada tahun 1912 berbentuk granat tangan sederhana, berkembang menjadi senjata yang dijatuhkan dari udara.

Dunia kemudian mengenal *Robert Goddard* (Amerika Serikat), *Konstantin Tsiolkovsky* (Rusia) dan *Wernher von Braun* (Jerman) sebagai perintis teknologi roket. Dimana pada tahun 1957 Rusia berhasil meluncurkan wahana ruang angkasa *Sputnik*, sementara itu Amerika Serikat dengan dukungan *von Braun* mengembangkan roket *Saturnus V*. Namun teknologi roket kemudian justru berkembang lebih lanjut menjadi peluru kendali pelontar bahan peledak, yang merupakan elemen kunci dalam sistem pertahanan strategis negara-negara maju. Peluru kendali sebagai wahana pelontaran hulu ledak, bahkan dilengkapi dengan elemen-elemen pemusnah masal seperti nuklir, kimia maupun biologi.

Pada tanggal 2 Agustus 1939, *Albert Einstein* menulis surat kepada presiden Amerika Serikat *Franklin Roosevelt*, menginformasikan bahwa NAZI-Jerman sedang berupaya memurnikan *uranium*, yang diduga dipersiapkan untuk pembuatan bom atom berkekuatan besar. Merespon hal tersebut, maka Amerika Serikat kemudian menggelar proyek rahasia yang disebut *Proyek Manhattan*, yang berujung dengan dijatuhkannya bom atom di Hiroshima dan Nagasaki.

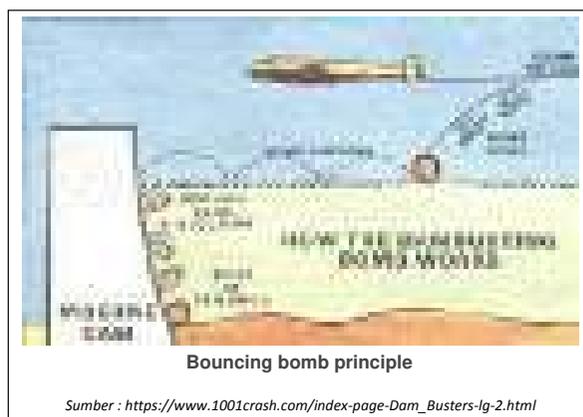
Teknologi persenjataan terus mengalami perkembangan, baik berupa senjata darat, udara, senjata nuklir, senjata laser, senjata kimia, senjata biologi dan sebagainya, dengan efek merusak yang semakin meningkat besar.

10.4.1. Operasi Chastise (Dambuster - 1943)

Operasi Chastise adalah nama sandi dari salah satu serangan angkatan udara Inggris (RAF) dalam Perang Dunia II yang ditujukan kepada Jerman sebagai lawannya. *Operasi Chastise* merupakan serangan terhadap bendungan-bendungan di Jerman, sehingga disebut juga sebagai *Operasi Dambuster*, yang dilakukan pada tanggal 16-17 Mei 1943 oleh Skuadron 617 Royal Air Force (RAF).

Dambuster ditujukan untuk menghancurkan sejumlah bendungan/waduk pembangkit tenaga listrik, yang menjadi sumber energi bagi perekonomian Jerman, dan sumber energi bagi industri berat, seperti pabrik baja, yang saat itu sedang aktif memproduksi persenjataan berat dan berbagai industri militer lainnya. Bendungan/waduk pembangkit tenaga listrik itu sendiri pada dasarnya bukanlah fasilitas militer yang boleh dijadikan sasaran dalam perang. Bendungan/waduk pembangkit tenaga listrik tersebut adalah prasarana perekonomian non-militer.

Operasi ini dipersiapkan secara khusus selama berbulan-bulan secara seksama dan rahasia. Dengan menggunakan bom ber teknologi canggih pada saat itu, yaitu bom memantul yang khusus diciptakan oleh teknisi pesawat terbang Dr Barnes Wallis. Suatu teknologi dan strategi yang sengaja dikembangkan untuk menimbulkan kerusakan besar atau bencana.



Gambar 10.14. : Prinsip kerja bom memantul dalam *Dambuster* (Dr Barnes Wallis)

Operasi ini dilakukan dengan menggunakan skuadron pilihan, dengan pesawat pembom *Avro Lancaster* yang sudah di-modifikasi secara khusus. Skuadron yang bertugas untuk melancarkan *Operation*

Chastise adalah 617 Skuadron 617 RAF dyang menginduk pada No 5 Group no 5, yang saat itu dipimpin oleh *Commander in Chief Bomber Command, Air Marshal Sir Arthur Harris*. Sedangkan tugas untuk menghancurkan waduk-waduk Jerman dipimpin oleh *Wing Commander Letnan Penerbang Guy Gibson*.

Misi pemboman dimulai pada tanggal 16 Mei 1943 malam, oleh Skuadron 617 dibagi menjadi tiga formasi. Formasi pertama terdiri dari sembilan pesawat pembom *Lancaster* menyerang bendungan *Mohne* dan *Edersee*. Formasi kedua dengan lima pesawat terbang bertugas menyerang bendungan *Sorpe*. Sementara formasi ketiga menjadi cadangan yang terbang pada 17 Mei dini hari. Formasi ketiga ini bertugas membantu menghancurkan ketiga bendungan utama atau tiga sasaran yang lebih kecil yaitu *Lister, Ennepe, dan Diemel*.

Dengan menggunakan teknik “bom memantul” yang khusus dikembangkan ini, bendungan *Möhne* dan *Edersee* berhasil diruntuhkan sehingga 330 juta ton air yang tumpah dan mengakibatkan banjir menggenangi kawasan lembah Ruhr dan sejumlah desa di lembah Eder. Namun, bendungan *Sorpe* hanya mengalami kerusakan kecil. Dua pembangkit listrik tenaga air hancur dan beberapa lainnya rusak. Pabrik-pabrik dan tambang juga rusak dan hancur, diperkirakan menimbulkan korban jiwa 1600 orang warga sipil.



Gambar 10.15. : Kerusakan dam Eder akibat *Operasi Chastise*

Dalam operasi ini, delapan pesawat pembom *Lancaster* jatuh tertembak, 53 personel RAF tewas, dan tiga lainnya menjadi tawanan Jerman. Namun secara militer *Operasi Chastise* dinyatakan gagal, oleh karena penyerangan gagal menghancurkan bendungan *Sorpe*. Selain itu, meski dua bendungan besarnya berhasil dihancurkan, dampak terhadap industri pendukung perang Jerman dinilai sangat minim. Selain itu, pasokan air bersih untuk wilayah lembah *Ruhr* dapat segera diperbaiki dan sudah kembali normal hanya dalam waktu enam pekan.

10.4.2. Proyek Manhattan

Proyek Manhattan atau yang memiliki nama formal *Manhattan Engineering District*, adalah proyek riset dan pengembangan pada masa Perang Dunia II, yang di tujukan untuk pengembangan senjata nuklir.

Proyek Manhattan adalah proyek yang dikenal menghasilkan bom atom yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki untuk mengakhiri Perang Dunia II. Hal ini menorehkan sejarah kelam dalam dunia teknologi, oleh karena menghasilkan senjata pemusnah masal, berupa bom atom pertama di dunia. Proyek ini terkenal sangat berbahaya, merupakan proyek pengembangan senjata pemusnah masal, yang bahkan menyebabkan kematian beberapa ilmuwan yang terlibat didalamnya.

Proyek ini tersebar pada lebih dari 30 tempat riset dan produksi yang berbeda, namun sebagian besar dilaksanakan pada tiga tempat rahasia, yaitu *Los Alamos*, *Alamogordo-New Mexico*, dan *Oak Ridge-Tennessee*.



Gambar 10.16. : Lokasi *Proyek Manhattan*

Proyek Manhattan menghasilkan rancangan, produksi, dan peledakan dari tiga bom atom pada tahun 1945. Yang pertama, menggunakan plutonium dibuat di *Hanford*, diuji pada tanggal 16 Juli di Situs *Trinity* dekat *Alamogordo-New Mexico*, yang merupakan tes nuklir pertama di dunia. Yang kedua, bom uranium disebut *Little Boy* diledakkan pada tanggal 6 Agustus di kota Hiroshima-Jepang. Yang ketiga, bom plutonium disebut *Fat Man*, diledakkan pada tanggal 9 Agustus di atas kota Nagasaki-Jepang

Bom Hiroshima, *Little Boy*, dibuat dari Uranium-235, isotop uranium yang jarang sehingga harus dipisahkan terlebih dahulu secara fisik dari isotop uranium-238 yang lebih umum. Pemisahan sebagian besar dilakukan dengan difusi gas uranium heksafluorida (UF_6), namun dapat juga dengan cara lain, seperti difusi termal, dan metode kalutron, dengan menggunakan asas pemisahan magnetik spektrometer masa. Sebagian besar kerja pemisahan ini dilakukan di *Oak Ridge*. Bom uranium menggunakan mekanisme "pistol" untuk mengumpulkan massa kritis U-235, dimana satu masa U-235 (*the bullet*) ditembaki, sehingga menimbulkan masa kritis U-235 dan menghasilkan ledakan besar. Sedangkan bom yang digunakan dalam uji pertama di *Trinity Site-New Mexico*, dan juga dalam pemboman Nagasaki (*Fat Man*), terbuat dari Plutonium-239, dengan menggunakan alat yang disebut sebagai *implosion*.

Pemboman dengan menggunakan bom atom direncanakan oleh Amerika Serikat dan sekutu untuk mengakhiri Perang Dunia II. Kota Hiroshima dan Nagasaki dipilih sebagai sasaran oleh karena keduanya merupakan pusat industri di Jepang.

Bom yang diberi nama *Little Boy* dilepaskan pukul 08:15 (waktu setempat) di Hiroshima pada tanggal 6 Agustus 1945. *Little Boy* yang mengangkut kurang lebih 64 kg (141 lb) uranium-235 memerlukan 44,4 detik untuk jatuh dari ketinggian jelajah 31000 feet (9400 m) menuju ketinggian ledakan 1900 feet (580 m) di atas kota. *Enola Gay*, pesawat terbang pengangkut bom tersebut, kemudian terbang menghindar sejauh 115 mil (185 km) untuk menghindari terjangan gelombang kejut yang dihasilkan ledakan. Sekitar 70-80 ribu orang menjadi korban ledakan bom tersebut, yang merupakan 30 % dari penduduk Hiroshima.

Bom yang diberi nama *Fat Man* dilepaskan diatas Nagasaki pada pukul 11:01 (waktu setempat). Bom *Fat Man* yang mengandung inti plutonium berbobot 64 kg (141 lb) dijatuhkan di lembah industri Nagasaki, meledak 47 detik kemudian pada ketinggian 1.650 ± 33 ft (503 ± 10 m) di atas lapangan tenis, separuh jalan antara Pabrik Baja dan Senjata Mitsubishi di selatan dan Arsenal Nagasaki di utara. Namun ledakan bom tersebut dibatasi oleh Lembah Urakami, dan sebagian besar kota terlindungi oleh lembah-lembah di sekitarnya. Ledakan bom ini setara dengan 21 ± 2 kt ($87,9 \pm 8,4$ TJ) dan menghasilkan panas bersuhu 3900 °C (7050 °F) serta angin kencang berkecepatan 1005 km/h (624 mph).

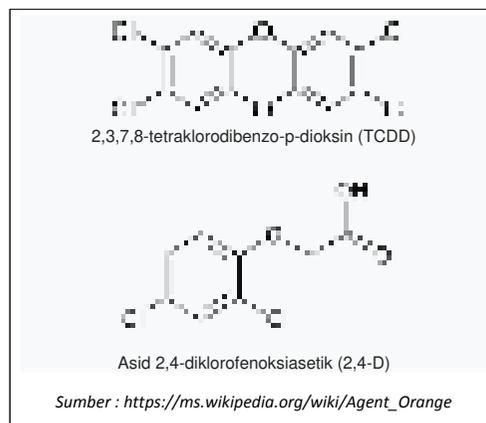
Ledakan bom atom pada dasarnya adalah reaksi *fisi* nuklir tanpa kendali, yang sengaja didisain tanpa kendali agar diperoleh efek merusak yang besar. Namun yang barangkali yang tidak terduga pada saat itu, adalah bahwa ter-identifikasi reaksi *fisi* nuklir berantai yang terjadi masih terus berlanjut pasca ledakan bom atom. Maka pada musim semi 1948, *Atomic Bomb Casualty Commission (ABCC)* yang kemudian menjadi *Radiation Effects Research Foundation (RERF)*, didirikan oleh presiden *Truman* pada *National Academy of Sciences - National Research Council* dengan tujuan melakukan penyelidikan mengenai dampak radiasi terhadap penyintas di Hiroshima dan Nagasaki. Hasil identifikasi RERF menunjukkan sekitar 1900 korban tewas akibat kanker dapat ditelusuri penyebabnya sebagai efek dari bom atom. Sementara itu kajian epidemiologi oleh RERF menyatakan

bahwa sejak tahun 1950 sampai 2000, ter-identifikasi adanya 46% dari sampel 200 penderita leukemia, dan 11% dari sampel 1700 penderita kanker padat yang meninggal di kalangan penyintas bom yang diakibatkan oleh radiasi.

10.4.3. Agen Oranye

Agan Oranya adalah sebutan untuk sejenis *herbisida* yang dikembangkan pada tahun 1940an oleh tim-tim independen di Inggris dan Amerika Serikat, untuk mengendalikan tanaman-tanaman berdaun lebar. Agen-agen fenoksi ini bekerja dengan cara meniru hormon pertumbuhan tanaman *indoleacetic acid (IAA)*, yang apabila disemprotkan kepada tanaman-tanaman berdaun lebar akan merangsang pertumbuhan yang cepat dan tidak terkendali, sehingga pada akhirnya akan merontokkan daun-daunnya. Apabila disemprotkan pada tanaman-tanaman seperti gandum atau jagung, akan secara selektif mematikan hanya tanaman-tanaman berdaun lebar, sedangkan tanaman lainnya relatif tidak terpengaruh. Herbisida ini yang pertama kali diperkenalkan pada tahun 1946, dipergunakan secara luas dalam bidang pertanian pada pertengahan tahun 1950an. Yaitu pertama kali diperkenalkan pada ladang-ladang pertanian di Aguadilla-Puerto Rico.

Dinamakan *Agan Oranye* oleh karena kemasannya dalam bentuk tong-tong bergaris-garis oranye berukuran 55 galon. Yang berisi campuran dari dua herbisida fenoksi dengan komposisi 1:1, yaitu *2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid* dengan *2,4-dichlorophenoxyacetic acid* dalam bentuk *ester*.

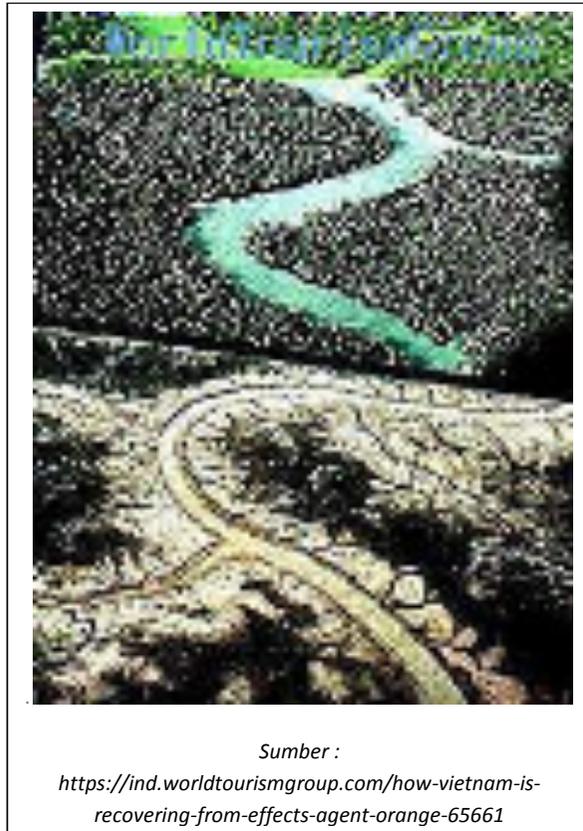


Gambar 10.17. : Komposisi kimia *Agan Oranye*

Agen Oranye atau disebut juga sebagai *Super Oranye*, digunakan oleh Militer Amerika Serikat dalam peperangan herbisida (*herbicidal warfare*) pada Perang Vietnam. Yaitu dimana pada perang tersebut, sejumlah herbisida termasuk *Agen Oranye* digunakan untuk menghancurkan produksi bahan pangan dan pepohonan yang dijadikan sebagai tempat persembunyian lawan. *Agen Oranye* yang digunakan dari tahun 1961 hingga 1971, adalah yang paling berbahaya diantara berbagai jenis herbisida lainnya (*disebut herbisida pelangi*). Degradasi *Agen Oranye* (juga Agen Ungu, Merah Jambu, dan Hijau) melepaskan dioxin yang membahayakan kesehatan bagi mereka yang terpapar. Dimana hasil tуди tentang penduduk yang terpapar dioxin, menunjukkan peningkatan risiko berbagai tipe kanker dan cacat genetik. Bukan hanya penduduk Vietnam sebagai pihak lawan yang terkena dampak dioxin *Agen Oranye*, namun juga tentara di pihak Amerika Serikat, seperti yang dialami oleh berbagai veteran Perang Vietnam.



Gambar 10.18. : Operasi penyemprotan *Agen Oranye* di Vietnam (1971)



Gambar 10.19. : Dampak *Agen Oranye*, sebelum dan sesudah penyemprotan

Lebih dari 3.100.000 hektar hutan dan lahan tanaman di Vietnam ditelanjangi dan sangat terkontaminasi dengan herbisida mematikan. Sementara itu penghutanan kembali terkendala oleh masalah keberadaan dioksin (TCDD) yang telah mengendap lama di tanah sehingga menyebabkan kontaminasi pada rantai makanan. Habitat ratusan spesies burung dan mamalia rusak selama kampanye penyemprotan antara tahun 1961-1971, yang berakibat hilangnya keanekaragaman hayati yang serius.

Pada masa Darurat Tanah Melayu (1948-1960), Inggris merupakan negara pertama yang menggunakan racun dan perangsang untuk memusnahkan semak-semak, pohon dan tumbuh-tumbuhan yang menjadi tempat persembunyian pemberontak. Namun ternyata

juga menyasar tanaman pangan, seperti dilaporkan oleh *E.K. Woodford* dari *Unit Eksperimen Pertanian Majelis Penyelidikan Pertanian Kerajaan U.K* dan *H.G.H. Kearns* dari *Universitas Bristol*.

Pada bulan September 2000, Perhimpunan Veteran Amerika Serikat mengakui bahwa *Agen Oranye* juga dipergunakan di Korea pada akhir tahun 1960-an. Tentara Republik Korea dilaporkan telah menyempotkannya disepanjang garis bebas militer (DMZ) dengan Korea Utara. Departemen Urusan Veteran juga telah mengakui bahwa *Agen Oranye* dipergunakan didalam negeri oleh pasukan-pasukan Amerika Serikat, maupun di Kanada pada masa yang sama.

Agen Oranye yang pada awalnya dikembangkan untuk kepentingan pertanian, dikemudian hari di-modifikasi menjadi senjata perang, yang menimbulkan dampak bencana teknologi yang mematikan, baik bagi manusia maupun lingkungan.

11

TEKNOLOGI PERANG

Jean Pictet sebagaimana yang dikutip oleh *Mochtar Kusumaatmadja*, menyatakan bahwa suatu kenyataan yang menyedihkan selama 3400 tahun sejarah tertulis, umat manusia hanya mengenal 250 tahun masa perdamaian. Perang menjadi salah satu bentuk perwujudan dari naluri untuk mempertahankan diri yang dianggap baik dalam pergaulan antar manusia maupun antar bangsa. Selama 5600 tahun terakhir manusia telah menggelar 14 600 perang. Hal ini menandakan bahwa konflik bersenjata atau perang telah ada dan terjadi ribuan tahun yang lalu, meskipun berbeda dalam situasi dan derajatnya dengan konflik bersenjata pada masa kini.

Perang adalah sebuah aksi fisik dan non fisik, yang dalam arti sempit adalah kondisi permusuhan dengan menggunakan kekerasan, antara dua atau lebih kelompok manusia untuk melakukan dominasi pada obyek yang dipersengketakan. Perang purba mempunyai makna sebagai pertikaian bersenjata, namun pada era modern lebih mengarah pada superioritas teknologi dan industri. Hal ini tercermin dari doktrin angkatan perang "*Barang siapa menguasai ketinggian maka menguasai dunia*", dimana penguasaan atas ketinggian diartikan sebagaim penguasaan teknologi.

Perang modern tak dapat dipisahkan dengan perkembangan teknologi, dimana teknologi peralatan perang berkembang pesat, dengan daya merusak yang semakin besar. Maka tak dapat dibantah, bahwa perang adalah *bencana teknologi* terbesar, yang merupakan produk dari *kesengajaan teknologi*.

11.1. Teknologi Perang Masa Lampau

Perang diantara kelompok-kelompok manusia telah terjadi sejak awal peradabannya. Maka teknologi perangpun berkembang sejak

awal peradaban bersama dengan perkembangan teknologi lainnya. Dapat dikatakan bahwa teknologi perang berkembang sejalan dengan usia peradaban manusia itu sendiri.

Berbagai teknologi peralatan perang telah dikembangkan oleh manusia, sejak awal peradabannya, baik untuk kepentingan mempertahankan diri maupun untuk kepentingan menaklukkan lawan. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut :

- **Bubuk Mesiu (Gun Powder)**

Bubuk mesiu ditemukan pada tahun 142 M di Cina secara tidak sengaja. Yaitu ketika para ahli kimia Cina, pada saat itu sedang berupaya membuat obat untuk memperpanjang umur, yang ditemukan justru suatu bubuk yang dapat menambahkan unsur ledakan pada api. Pada awalnya, bubuk mesiu tersebut dimanfaatkan untuk membuat kembang api, namun dengan menggunakan bambu dapat meluncurkan panah api sampai sejauh 300 meter. Panah api inilah yang kemudian dikembangkan pemanfaatannya sebagai senjata untuk berperang, yang merupakan awal dari periode penggunaan senjata api. Periode senjata api ini terus berkembang, sehingga bubuk mesiu sebagai pelontar mulai mendominasi penggunaan meriam-meriam di Eropa dan Asia pada abad ke 11. Dapat dikatakan pada saat itulah dimulainya perubahan teknologi senjata, dari senjata tradisional menjadi senjata modern.



Sumber : <http://fourriverscharter.org>

Sumber : <http://dewantara.id/2017/06/05/10-senjata-kuno-paling-dahsyat/>

Gambar 11.1. : Ilustrasi awal penggunaan bubuk mesiu untuk peluncuran panah api

- **Api Yunani (Greek Fire)**

Prinsip kerja dari Api Yunani adalah dengan menyemburkan api kepada lawan. Penggunaan teknologi ini sesungguhnya telah dirintis oleh bangsa Assyiria, namun kerajaan Byzantium lah yang dikenal menggunakannya dalam perang, yaitu dalam perangnya melawan tentara Arab Muslim, pada abad 9 – 10 M, dengan cara menyemburkannya pada kapal-kapal perang lawan. Belum diketahui dengan jelas, apa bahan-bahan yang digunakan dalam Api Yunani ini, namun para ahli memperkirakan terdiri dari racikan belerang, minyak dan aspal. Pada awalnya api dikemas dalam wadah tanah liat, yang ketika dilontarkan dan pecah akan menimbulkan percikan atau ledakan api. Senjata penyembur api yang kemudian telah disempurnakan ini, sehingga dapat menjalar di air, setidaknya meliputi 3 komponen, yaitu komponen peracik api, komponen penyembur api dan operator senjata.



Gambar 11.2. : Ilustrasi senjata penyembur Api Yunani

- **Busur Campuran (Composite Bow)**

Busur campuran pada dasarnya adalah busur panah biasa yang telah dikembangkan sedemikian rupa, akan tetapi tetap ringan untuk dibawa. Busur campuran menggunakan bahan dasar tanduk, kayu dan otot, sehingga lebih bertenaga dan mudah digunakan oleh seorang tentara berkuda. Teknologi ini pertama kali digunakan oleh pasukan Romawi pada tahun 53 M, dalam

perangnya melawan kerajaan Panthian. Namun pengguna busur ini yang dikenal luas adalah bangsa Mongol pada sekitar tahun 518 M. Senjata panah denganteknologi busur campuran ini menjadi andalan tentara Mongol dibawah pimpinan Atila Hun sampai Khubilai Khan yang sangat kuat pada masa itu. Pasukan bersenjata busur campuran inilah yang selama kiprahnya, bertanggung jawab atas sejumlah sekitar 40 000 korban jiwa



Gambar 11.3. : Replika senjata Busur Campuran (*Composite Bow*)

- **Busur Silang Beruntun dari Cina (Chinese Repeating Cross-Bow)**

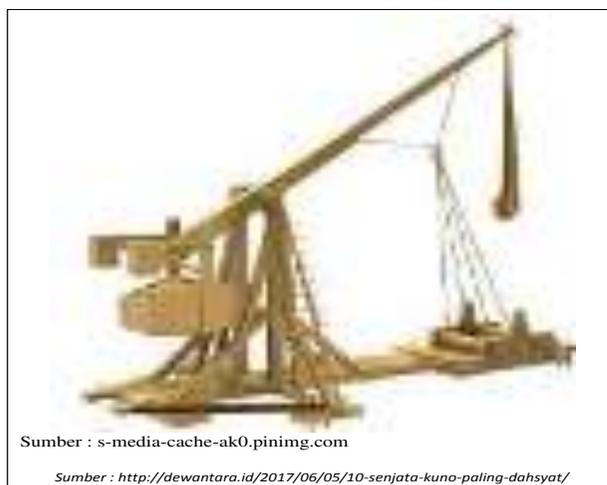
Teknologi senjata Busur Silang Beruntun dikembangkan di Cina pada masa 3 kerajaan, dan digunakan dalam perang pada sekitar abad ke 3 M. Teknologi Busur Silang Beruntun dikembangkan dari senjata panah konvensional, namun di modifikasi sedemikian rupa dimana dapat menampung sejumlah anak panah sekaligus yang terhubung langsung ke busur panah sebagai pelontarnya. Alat ini dapat melontarkan 10 batang anak panah secara beruntun dalam waktu 15 detik. Kelebihan Busur Silang Beruntun ini adalah, dapat dioperasikan oleh seorang tentara, yaitu dengan satu tangan memegang busur, sedangkan tangan lainnya memompa busur secara terus menerus. Senjata ini beroperasi seperti halnya senapan mesin modern.



Gambar 11.4. : Replika senjata Busur Silang Beruntun

- **Trebuset**

Trebuset merupakan alat pelontar batu sebagai peluru, dengan prinsip lentingan menyerupai ketapel. Dengan prinsip ayunan seperti ketapel, Trebuset melontarkan batu besar dengan kuat menuju sasaran musuh. Trebuset dalam sejarah pertama kali dipergunakan oleh tentara Cina dibawah Kaisar Qing pada sekitar 617 M, dimana pada saat itu pasukan Cina memiliki 300 unit Trebuset, dan digunakan juga oleh kerajaan Mongol pada abad ke 13. Teknologi Trebuset kemudian menyebar ke Eropa pada abad pertengahan, mengalami modifikasi dan pengembangan, dikenal dengan nama Catapult (asal kata ketapel ?), dan digunakan oleh kerajaan Byzantium pada tahun 578 M.



Gambar 11.5. : Replika Trebuset

- **Ballista Roma**

Ballista adalah teknologi persenjataan yang merupakan modifikasi dari Trebuset. Ukuran Ballista lebih kecil, sehingga dapat dibawa dengan menggunakan kereta kuda. Teknologi, ini di-adopsi dan di-modifikasi oleh Republik Roma dari teknologi militer Yunani pada sekitar tahun 146 M, sehingga disebut Ballista Roma. Alexander dari Roma mengembangkan torsi dari Ballista sedemikian rupa, sehingga lebih kecil dan lebih mudah untuk diangkut. Dengan modifikasi tersebut, Ballista Roma menjadi lebih mobile dan lebih akurat, dengan jarak tembak yang dapat disesuaikan dengan kondisi lapangan. Ballista Roma dapat mencapai jarak 400 m dan mampu menembus baju besi tentara lawan.



Sumber: en.wikipedia.org

Sumber :<http://dewantara.id/2017/06/05/10-senjata-kuno-paling-dahsyat/>

Gambar 11.6. : Ilustrasi senjata Ballista Roma

- **Caltrop**

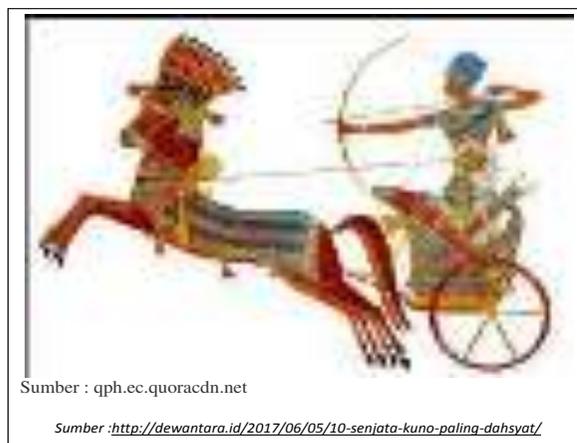
Caltrop merupakan senjata perangkap, terbuat dari besi tajam yang disebar di atas tanah, dengan maksud untuk jebak melukai lawan. Caltrop berupa besi tajam dengan empat kaki membentuk sudut, sedemikian rupa sehingga akan selalu ada bagian batang besi tajam yang mengarah ke atas, dengan maksud untuk melukai siapapun yang menginjaknya. Bahkan pasukan gajah *The Great Alexander* pun pernah terperangkap Caltrop, sehingga menimbulkan kepanikan yang menghambat pergerakan pasukannya. Caltrop ini yang kemudian berkembang menjadi teknologi ranjau dalam perang modern, dengan modifikasi dimasukkannya bahan peledak.



Gambar 11.7. : Caltrop

- **Kereta Perang Mesir (Egypt Chariot)**

Kereta perang (*Chariot*) pada awalnya merupakan alat transportasi, namun dikembangkan menjadi kendaraan perang. Kereta yang ditarik oleh kuda ini mengangkut 2 orang, yaitu seorang sebagai pengendali kereta dan yang lainnya sebagai tentara yang siap sengan senjatanya, melengkapi pasukan Kavaleri berkuda yang dapat bergerak dengan cepat. Pada masa lampau (1274 M), pasukan dengan 5000-6000 Kereta Perang Kerajaan Mesir dibawah Raja Ramses II, pernah berhadapan dengan lawan, pasukan dari Kerajaan Het dibawah Raja Muatalli II. Kelak kereta perang ini dikembangkan menjadi kendaraan tempur modern, yaitu dalam berbagai bentuk Tank



Gambar 11.8. Ilustrasi Kereta Perang Mesir (Egypt Chariot)

- **Teknologi Persenjataan Archimedes**

Archimedes dari *Syracuse* (287 SM - 212 SM) adalah ahli matematika, fisika, filsuf dan sekaligus juga insinyur Yunani. Ia bukanlah teknisi pertempuran, namun karya-karya ilmiah dan teknologinya meng-inspirasi pembuatan mesin-mesin perang pada jamannya. Setidaknya ada 3 jenis persenjataan canggih pada jamannya, yang tercipta dari hasil temuannya, yaitu *Katapel Mekanis*, *Cakar Archimedes*, dan *Sinar Penghancur*.

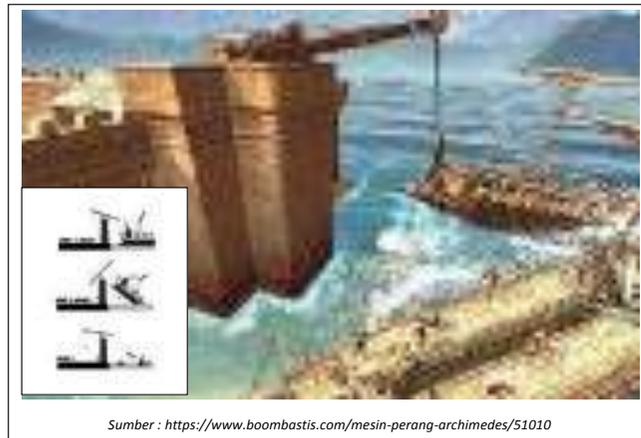
- *Katapel Mekanis* secara umum mempunyai mekanisme seperti katapel biasa, namun namun dengan diimplementasikannya hukum-hukum Archimedes, menjadikan *Katapel Mekanis* mempunyai daya yang berlipat ganda.



Gambar 11.9. : Ilustrasi Katapel Mekanis *Archimedes*

- *Cakar Archimedes* berbentuk seperti katrol yang dirangkai dengan tambahan tali besar serta baja berbentuk cakar besar di bagian ujung. Mekanisme kerja alat perang ini adalah dengan dilontarkan menuju sasaran dengan menggunakan mekanisme katapel. Bandul cakar pada bagian ujung akan merobek sasaran kapal musuh sehingga tenggelam. Alat ini juga berfungsi menarik kapal musuh, untuk diangkat tinggi dan kemudian dijatuhkan. Senjata ini pernah digunakan dalam *Perang Punic* (214 SM), sebagai pertahanan benteng

laut kota Syracuse-Sicilia, ketika menghadapi serangan armada laut Romawi. Dengan cara ini, serangan malam hari armada Romawi dapat ditangkal, dengan meninggalkan banyak korban kapal tenggelam.



Gambar 11.10. : Ilustrasi dan mekanisme kerja *Cakar Archimedes*

- *Sinar Penghancur Archimedes* dioperasikan dengan mengandalkan cermin dan sinar matahari. Mekanismenya adalah dengan memantulkan sinar matahari menggunakan cermin cekung besar, dan mengarahkannya kepada sasaran. Panas yang dihasilkan dari pantulan sinar matahari ini mampu membakar sasaran lawan, dan juga telah terbukti berhasil membakar kapal-kapal dari armada Romawi.



Gambar 11.11. : Ilustrasi mekanisme kerja *Sinar Penghancur Archimedes*

11.2. Teknologi Perang Masa Kini

Perubahan signifikan dari teknologi perang masa kini dibandingkan dengan masa lampau adalah penggunaan bubuk mesiu menggantikan teknologi pelontar mekanis. Bubuk mesiu yang ditemukan di Cina pada tahun 142 M, dikembangkan lebih lanjut menjadi bahan peledak senjata api pelontar proyektil. Berbagai jenis senjata api, baik berupa senjata genggam maupun meriam, berkembang pesat dengan daya tembus dan jangkauan jarak yang semakin meningkat.

Teknologi bahan peledak yang dimulai dengan ditemukannya bubuk mesiu, berkembang lebih jauh menjadi senjata pemusnah masal. Dimulai dengan bom sederhana sejenis granat tangan, berkembang menjadi bom yang dijatuhkan dari pesawat terbang, dan bom berpeluncur yang mempunyai jangkauan jauh. Teknologi roket semakin meningkatkan jarak jangkauan yang dapat dicapai. Sementara itu, daya hancur dari senjata pemusnah masal semakin meningkat pesat dengan ditemukannya teknologi nuklir, senjata kimia dan senjata biologi.

Perubahan lainnya yang signifikan terjadi pada sarana transportasi militer di darat, yang sebelumnya menggunakan tenaga hewan, digantikan dengan kendaraan-kendaraan bermotor. Sedangkan dilaut, armada perang kapal-kapal layar digantikan dengan armada kapal bertenaga mesin, yang digerakan dengan bahan bakar batubara, minyak bahkan nuklir. Di udara, pesawat-pesawat terbang yang semakin meningkat kecepatan dan daya angkutnya, bukan hanya digunakan untuk mengangkut personel militer, namun juga dikembangkan menjadi pesawat pembom dan pesawat penyerang bersenjata.

11.2.1. Perkembangan Teknologi Senjata Api

Penggunaan senjata api berawal dari ditemukannya bubuk mesiu di Cina. Bubuk mesiu sendiri awalnya dibuat dari campuran belerang, batubara (arang), dan potassium nitrat.

Meriam menjadi senjata api pertama yang menggunakan bubuk mesiu sebagai bahan untuk menembakkannya. Sebuah bukti yang menjelaskan pemakaian senjata api pertama terjadi pada pertempuran

di Seville (1247), namun bukti lain menunjukkan pemakaian bubuk mesiu pertama mengacu pada meriam yang dibuat oleh *Berthold Schwarz* (1313), dari Jerman.

Pada abad 15 sampai dengan abad 18, teknologi senjata api telah menyebar ke segenap pelosok dunia seperti Jepang, Korea, Timur Tengah, sampai Eropa. Di Eropa, berbagai jenis senjata api berkembang pesat, seperti senjata *arquebus* (*senapan kopak*), *musket* (*senapan lantak*), *falconet* (*meriam ringan*), *shotgun*, dan banyak lagi lainnya, walaupun dengan berbagai kesulitan dalam pengoperasiannya dan tingkat akurasinya yang rendah. Misalnya, senjata jenis *arquebus* dan *musket* telah digunakan pada pertempuran Nagashino (1575) di Jepang. Senjata *musket* telah digunakan pada masa Dinasti Ottoman di Turki. Sementara itu Tentara Hitam Hungaria pada masa raja *Matthias Corvius* (1458-1490) telah menggunakan *arquebus* sebagai senjata.

Setelah ditemukannya meriam, dikenal penggunaan senjata api dalam bentuk yang lebih kecil dan praktis, yaitu pistol yang konon berasal dari nama kota di Italia *Pistoia*, yang menjadi tempat pembuatan pistol pada abad ke-15. *Samuel Colt*, seorang ilmuwan Amerika Serikat, kemudian berhasil membuat pistol otomatis yang dikenal dengan nama *Colt Paterson*. *Horace Smith & Daniel Wesson* (1857) mengembangkan *Pistol Revolver* yang dapat menggunakan peluru tabor. Kemudian *John M. Browning* (1897) berhasil membuat pistol yang dapat diisi 8 peluru, dan dapat ditembakkan secara beruntun.



Pada masa modern sekitar awal sampai pertengahan abad 20, teknologi senjata api berkembang sangat pesat, dengan ditemukannya sistem senjata laras panjang *rifle*, yang menggantikan peran *musket*. *Rifle* adalah senjata laras panjang yang dirancang untuk digunakan di bahu, berjarak tembak jauh, menggunakan peluru berputar dan berujung tajam, sehingga berdaya tembus besar. *Rifle* terus berkembang dari awalnya yang hanya dapat menembakan satu peluru dalam sekali menarik pelatuk, berkembang menjadi *assault rifle* yang dapat menembakkan beberapa peluru ber turut-turut dalam sekali menarik pelatuk. Beberapa jenis *rifle* yang disebut sebagai *sniper rifle*, juga dilengkapi dengan teropong untuk membidik sasaran lebih tepat.

Senapan mesin adalah senjata api tertanam maupun portabel, yang memiliki kemampuan menembak otomatis secara penuh. Senapan mesin ini menembakkan rentetan sejumlah besar peluru, dari sabuk amunisi (*belt fed*) atau magazen berkapasitas besar. Senapan mesin yang mulai dikembangkan pada akhir abad ke-19, sebagian besar adalah *belt-fed* yang dapat menembak dari 500 sampai 1000 putaran per-menit dan akan terus menembak selama pemicunya ditahan atau sampai pasokan amunisi habis.



Gambar 11.13. : *Gatling Gun*

Pengenalan senjata api pada akhir abad pertengahan memunculkan upaya untuk merancang senjata yang dapat menembak lebih dari satu tembakan tanpa mengisi ulang. Maka pada tahun 1718 di London, *James Puckle* mematenkan senapan mesin hasil karyanya, yang kemudian benar-benar diproduksi.

Namun *Richard Jordan Gatling* dari Amerika Serikat dianggap sebagai pelopor pembuatan senapan mesin pertama di dunia dengan karyanya yang dinamakan *Gatling Gun*. Keganasan senjata pembunuh ini telah teruji pada perang saudara Amerika abad ke-18.

Pada tahun 1880, penemuan bubuk tanpa asap memungkinkan untuk mengubah senapan mesin yang dipegang oleh tangan menjadi senjata yang benar-benar otomatis. *Hiram Stevens Maxim* dari Amerika

Serikat adalah penemu pertama yang menggabungkan efek ini dalam desain senjata. Temuan senapan mesin *Maxim (1884)* ini dengan cepat diikuti oleh yang lainnya, seperti *Hotchkiss, Lewis, Browning, Madsen, Mauser*, dan sebagainya. Senapan-senapan mesin inilah yang kemudian men-dominasi Perang Dunia I.

11.2.2. Bom dan Bahan Peledak

Bom adalah alat yang menghasilkan ledakan yang mengeluarkan energi besar dalam rentang waktu singkat. Kata bom berasal dari bahasa Yunani $\beta\acute{o}\mu\beta\omicron\varsigma$ (*bombos*), sebuah istilah yang meniru suara ledakan 'bom' dalam bahasa tersebut. Ledakan yang dihasilkan bom dapat menyebabkan kehancuran dan kerusakan terhadap benda mati dan benda hidup disekitarnya, yang diakibatkan oleh pergerakan tekanan udara dan pergerakan fragmen-fragmen peledak yang terdapat di dalam bom, maupun serpihan fragmen benda-benda disekitarnya. Bom telah digunakan sejak lama, baik dalam peperangan konvensional maupun non-konvensional. Cara penggunaannya pun semakin berkembang, dari granat tangan yang dilemparkan secara manual, jebakan ranjau, granat berpelontar sampai dengan hulu ledak yang diluncurkan dengan roket.

Penggunaan bom sebagai senjata, bagaimanapun tak dapat dipisahkan dengan perkembangan teknologi bahan peledak, yang diawali dengan ditemukannya bubuk mesiu di Cina. Bubuk mesiu bahan peledak yang pada awalnya hanya dimanfaatkan sebagai pelontar proyektil peluru, dikembangkan menjadi hulu ledak yang menghancurkan. Demikian pula halnya dengan komposisi kimianya, semakin dikembangkan untuk menghasilkan daya ledak yang semakin kuat.

- ***Black Powder*** adalah bahan peledak yang pertama dikenal, yang telah ditemukan sejak lama. Bahkan pada abad ke-17 telah mulai digunakan untuk memecahkan batu-batuan dalam pertambangan di Eropa, yang kemudian berkembang pesat untuk digunakan dalam pembuatan konstruksi bangunan. Bahan peledak ini juga yang pertama digunakan sebagai *propellant* pelontar peluru dan senjata lainnya. Tahun 1802, group *Du Pont* mendirikan pabrik bahan peledak jenis *Black Powder*. Namun oleh karena sifat sensitifnya terhadap percikan panas dan api,

sehingga sulit dalam penanganannya, maka penggunaan bahan peledak *Black Powder* dibatasi hanya untuk kepentingan militer.

- **Nitrogliserin** yang juga dikenal sebagai *trinitrogliserin* dan *gliseril trinitrat* atau *1,2,3-trinitroksipropana*, adalah larutan yang mudah meledak, berminyak, tak berwarna dan berat. *Nitrogliserin* adalah bahan peledak praktis dengan kekuatan melebihi serbuk mesiu. Diintesis pertama kali oleh ahli kimia Italia *Ascanio Sobrero (1847)*, yang bekerja pada *Théophile-Jules Pelouze - Universitas Turin*, dan awalnya disebut sebagai *pirogliserin*. *Nitrogliserin* memiliki kelebihan dibandingkan dengan bahan peledak berdaya ledak tinggi lainnya, yaitu tidak menghasilkan asap yang kasat mata. Oleh karena itu, bahan ini dapat digunakan sebagai bahan aktif dalam formulasi bermacam "serbuk nirasap". *Nitrogliserin* digunakan sebagai bahan peledak untuk kepentingan konstruksi, demolisi, dan industri pertambangan. Namun sejak tahun 1880an, *nitrogliserin* dimanfaatkan dalam bidang militer sebagai bahan aktif propelan militer untuk digunakan dalam senjata api sebagai bahan pendorong padat, seperti *cordite* dan *ballistite*. *Nitrogliserin* diproduksi dalam jumlah besar selama Perang Dunia I dan II sebagai propelan untuk kepentingan militer dan pekerjaan rekayasa militer (*military engineering*). *HM Factory-Gretna*, pabrik propelan terbesar di Inggris misalnya, selama Perang Dunia I memproduksi sekitar 812 ton *Cordite RDB* per-pekan. Angkatan Laut Kerajaan Inggris (*Royal Navy*) memiliki pabrik sendiri *Royal Navy Cordite Factory, Holton Heath* di Dorset-Inggris. Sebuah pabrik *cordite* besar juga dibangun di Kanada selama Perang Dunia I. Pabrik *Cordite Canadian Explosives Limited* di Nobel-Ontario, yang dirancang untuk menghasilkan 1.500.000 lb (680 ton) *cordite* per-bulan, memerlukan sekitar 286 ton *nitrogliserin* per-bulan.
- **Dinamit** adalah peledak berdasarkan potensi ledakan dari *Nitrogliserin*, ditemukan secara tidak sengaja oleh ahli kimia Swedia *Alfred Bernhard Nobel*. Ia menemukan bahwa *Nitrogliserin* dapat diserap oleh *kieselguhr*, tanah silika berpori, sehingga campuran yang dihasilkan lebih aman dan dapat dikendalikan. Campuran itu kemudian dinamai "dinamit", berasal dari bahasa Yunani "dynamis" yang berarti "kekuatan" dan mendapatkan

hak patennya di Inggris pada 1867 dan Amerika Serikat setahun berikutnya.

- **TNT (Trinitrotoluene)** adalah singkatan dari senyawa kimia dengan nama IUPAC *2,4,6-Trinitrotoluene* dengan rumus kimia $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$. Senyawa kimia berwarna kuning pucat berbentuk padat pada suhu normal, dan akan mencair pada suhu $81^\circ C$. TNT mengandung senyawa karbon, nitrogen, dan oksigen yang jika terbakar akan menghasilkan senyawa gas yang stabil (CO, NO₂, dan CO₂) dan energi. Selain itu TNT juga memiliki kecepatan detonasi (kecepatan gelombang kejut yang dihasilkan sesaat setelah ledakan) sebesar 6.490 m/s, sehingga sesuai untuk difungsikan sebagai bahan peledak. Senyawa ini pertama kali ditemukan oleh ahli kimia Jerman, *Julius Wilbrand (1863)*, sebagai bahan pembuatan cat berwarna kuning. Namun potensi TNT sebagai bahan peledak baru dikenal setelah ahli kimia Jerman, *Carl Hausseman (1891)* menemukan potensinya sebagai bahan peledak. TNT sebagai peledak marak digunakan saat Perang Dunia I tahun 1902, khususnya sebagai hulu ledak artileri penyerang kapal Inggris, dimana karakteristik TNT yang tidak sensitif menjadikan peluru artileri memiliki bersifat *armor piercing*, yaitu baru meledak setelah menembus baja pelindung. Berikutnya TNT dikembangkan menjadi berbagai jenis turunannya, seperti *Amatex*, *Amatol*, *Baratol*, dan sebagainya. Pada masa Perang Dunia II, senyawa turunan *Amatol* yang diperoleh dengan mencampur *Amonium Nitrat* banyak digunakan, dengan daya ledak setara dengan TNT. Berbagai turunan TNT lainnya juga banyak digunakan sebagai bahan peledak dengan kekuatan yang lebih rendah. Misalnya *Minol* yang merupakan turunan dari *Amatol* setelah ditambahkan alumunium bubuk, dan sering digunakan sebagai bahan peledak dalam pertambangan. Selanjutnya daya ledak TNT menjadi standar bagi daya ledak senyawa lainnya, dengan metode penentuan dikenal sebagai *TNT Equivalent*, yang artinya energi yang dilepaskan pada suatu ledakan dibandingkan dengan 4.184 Joule energi dari ledakan 1 gram TNT. Misalnya, ledakan bom nuklir Hiroshima dengan daya ledak setara 15 ribu Ton TNT, berarti melepaskan sekitar 63 Tera Joule energi ($63.000.000.000.000/63 \times 10^{12}$ Joule).

- ANFO (amoniun nitrat fuel oil) mulai diperkenalkan di Amerika Serikat pada tahun 1956. Di Eropa, ANFO digunakan secara meluas sebagai bahan peledak sejak tahun 1980. Penggunaan bahan peledak ANFO dinilai lebih aman oleh karena tidak sensitif terhadap peluru. Namun oleh karena sensitifitasnya terhadap udara dan air, ANFO memerlukan teknik kemasan khusus. Penyempurnaan atas kekurangan ANFO adalah dengan ditemukannya bahan peledak jenis *Watergel* yang terdiri atas *ammonium nitrat*, air, *gelling agent*, dan *sensitizer* yang tahan terhadap air dan udara lembab, namun tetap mengacu pada *nitroglycerine based*.

11.2.3. Bom Nuklir dan Senjata Pemusnah Masal

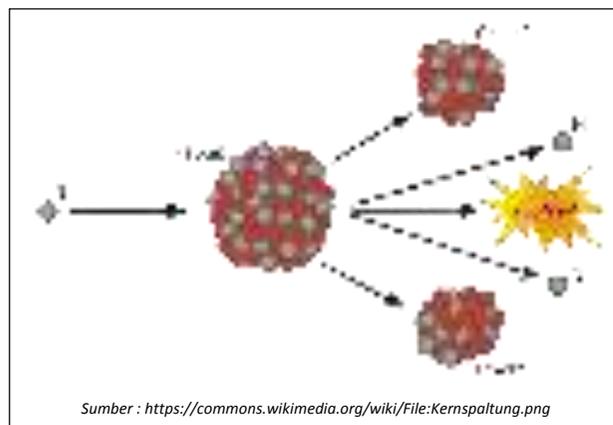
Senjata pemusnah masal adalah senjata yang dirancang untuk menimbulkan efek merusak dan korban jiwa dalam skala besar, bukan hanya menargetkan sasaran militer namun juga berbagai sasaran non-militer termasuk masyarakat sipil. Bentuk konvensional dari senjata pemusnah masal ini adalah bom dengan berbagai variasinya, mulai dari granat tangan, granat berpelontar sampai dengan proyektil hulu ledak yang diluncurkan dengan roket.

Kemampuan daya hancur dari hulu ledak semakin meningkat dengan perkembangan teknologi, bahkan berbagai penelitian dan percobaan sengaja dilakukan untuk meningkatkan daya ledaknya. Temuan-temuan dalam bidang nuklir dan bio-kimia, yang pada awalnya ditujukan untuk kemajuan ilmu pengetahuan, sengaja disimpangkan untuk menghasilkan media penyebab bencana.

- Bom Nuklir

Pemanfaatan energi nuklir sebagai sumber energi dimulai pada awal abad ke-20, ketika diketahui bahwa unsur-unsur radioaktif seperti *radium*, dapat menghasilkan energi yang sangat besar. Berawal dari teori relativitas khusus yang diperkenalkan oleh *Albert Einstein (1905)*, yang kemudian berkembang menjadi teori ekuivalensi masa-energi. Yaitu ketika suatu materi bergerak dalam kecepatan mendekati kecepatan cahaya, maka materi tersebut akan kehilangan massanya, berubah menjadi energi sebesar $E=mc^2$.

Didalam inti atom tersimpan energi nuklir yang luar biasa besarnya. Energi nuklir tersebut hanya dapat dikeluarkan melalui proses khusus yang berbeda dengan pembakaran kimia biasa yang umumnya dikenal, seperti pembakaran kayu, minyak ataupun batubara. Besarnya energi yang tersimpan (E) didalam inti atom adalah seperti yang dirumuskan dalam teori ekivalensi masa-energi ($E=mc^2$, dimana m =massa bahan dalam kg, c =kecepatan cahaya sebesar 3×10^8 m/s). Energi nuklir tersebut berasal dari berkurangnya sebagian massa dari inti atom, yang berubah menjadi energi dalam bentuk panas. Proses tersebut merupakan proses reaksi nuklir, yang dapat terjadi melalui pembelahan inti atom (*fisi*) atau penggabungan inti atom (*fusi*).



Gambar 11.14. : Contoh reaksi nuklir berupa *fisi* atom Uranium, menghasilkan pelepasan energi sebesar 200 MeV

Pada tahun 1932, *James Chadwick* menemukan *neutron* yang merupakan bagian dari inti atom. Pada tahun 1934, dalam eksperimen *neutron* nya, *Frédéric* dan *Irène Joliot-Curie* menemukan cara radioaktivitas induksi, yang dapat membuat unsur buatan seperti halnya *radium*, sehingga harganya menjadi lebih murah daripada *radium* alam. Masih pada dekade 1930an, metoda radioaktivitas induksi ini terus disempurnakan efektifitasnya oleh *Enrico Fermi*. Percobaan yang terus dilakukannya menghasilkan temuan unsur baru yang dinamakan *hesperium*. Pada tahun 1938, ahli kimia Jerman *Otto Hahn* dan *Fritz Strassmann*, bersama dengan fisikawan Austria *Lise Meitner* dan *Otto Robert Frisch*, melakukan eksperimen lebih

lanjut, yang menghasilkan temuan bahwa *neutron* dapat membelah inti atom uranium menjadi 2 bagian, dimana proses ini kemudian dinamakan sebagai *fisi*. Peneliti selanjutnya seperti *Leó Szilárd*, kemudian menemukan bahwa dalam reaksi *fisi* nuklir yang melepaskan *neutron* tambahan, dapat menghasilkan suatu rantai reaksi nuklir yang stabil.

Reaktor nuklir pertama dibuat di Amerika Serikat pada akhir tahun 1942, yang kemudian dikenal sebagai *Chicago Pile-1*. Proyek ini kemudian menjadi bagian dari *Proyek Manhattan*, yang memproduksi *uranium* yang diperkaya, dan membangun reaktor besar yang memproduksi *plutonium*. Proyek inilah yang kemudian menghasilkan bom atom yang dijatuhkan dikota Hiroshahima dan Nagasaki pada akhir Perang Dunia II.



The uranium gun-type atomic bomb dropped on Hiroshima was called Little Boy (bottom),and Nagasaki was nuked by a plutonium implosion-type bomb called Fat Man (top)

Sumber :

<https://economictimes.indiatimes.com/news/international/world-news/a-look-at-first-ever-use-of-nuclear-weapons-in-wartime/articleshow/53467662.cms>

Gambar 11.15. : Bom Atom yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki

Pasca Perang Dunia II pengembangan energi nuklir terus berlanjut di Amerika Serikat, Kanada, Inggris, dan Uni Soviet pada akhir 1940-an dan awal 1950-an. Organisasi pertama didunia yang mengembangkan pemanfaatan energi nuklir adalah Angkatan Laut Amerika Serikat, dimana energi nuklir dimanfaatkan untuk menggerakkan kapal selam dan kapal induknya. Kapal selam pertama bertenaga nuklir, *USS Nautilus (SSN-571)*, diluncurkan pertama kali pada bulan Desember 1954.

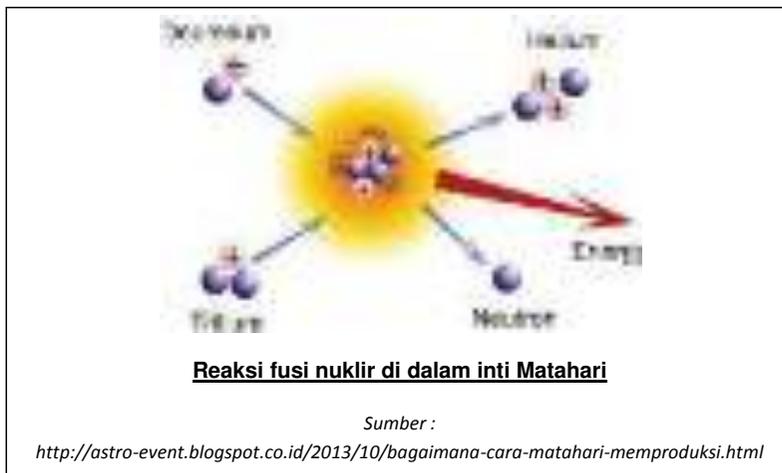
Fakta bahwa ledakan bom atom telah menimbulkan bencana besar, tidak menyurutkan minat untuk mengembangkannya. Teknologi persenjataan nuklir terus dikembangkan dengan daya hancur yang semakin meningkat. Penguasaan teknologi dan kepemilikan senjata nuklir, bahkan telah menjadi faktor yang memperkuat posisi tawar (*bargaining power*) dalam interaksi politik diantara berbagai negara. Maka, teknologi dan kepemilikan senjata nuklir semakin diminati oleh banyak negara, sehingga semakin banyak negara yang memiliki senjata pemusnah masal ini.

- **Bom Hidrogen**

Pada tahun 1941, sebelum bom atom pertama lahir, ilmuwan *Enrico Fermi* telah berpendapat bahwa *fusi nuklir* dapat menghasilkan ledakan yang lebih dahsyat. Maka, berikutnya *Edward Teller* mengembangkan *bom hidrogen* yang merupakan implementasi dari reaksi *fusi nuklir*, sehingga kemudian dikenal sebagai *Bapak Bom Hidrogen*. *Edward Teller* menyelesaikan studi pada jurusan Teknik Kimia Universitas Karlsruhe-Jerman, memperoleh gelar Ph D dalam ilmu fisika dibawah bimbingan *Werner Heisenberg* dari Universitas Leipzig, dengan disertasi yang membahas tentang mekanika kuantum dan ion molekul hidrogen. *Edward Teller* bekerja sebagai ahli fisika di Los Alamos Scientific Laboratory selama Perang Dunia II dan juga membantu pembentukan laboratorium yang diarahkannya selama lebih dari dua tahun pada tahun 1950-an, kemudian menjadi asisten direktur fisika sampai pensiun pada tahun 1977. *Bom Hidrogen* yang pada awalnya disebut *Bom Thermonuklir*, adalah bom yang

memanfaatkan energi dari reaksi *fisi nuklir* utama untuk memadatkan dan memicu reaksi *fusi nuklir*, sehingga menghasilkan ledakan yang lebih dahsyat. *Bom Thermonuklir* ini terinspirasi dari reaksi *fusi nuklir* pada isotop hidrogen yang terjadi pada inti matahari, sehingga kemudian disebut *Bom Hidrogen* atau *H-bomb*. Perbedaan mendasar *Bom Hidrogen* dan bom atom adalah pada proses detonasinya. Kekuatan ledak Bom atom merupakan hasil dari pelepasan energi yang tiba-tiba saat proses fisi inti unsur radioaktif seperti uranium atau plutonium. Sedangkan detonasi *Bom Hidrogen* diawali dengan tahapan detonasi *fisi nuklir* yang menghasilkan ledakan yang menghasilkan panas jutaan derajat, sehingga tersedia cukup banyak energi untuk proses *fusi nuklir* pada tahapan berikutnya.

Perbedaan mendasar *Bom Hidrogen* dan bom atom adalah pada proses detonasinya. Kekuatan ledak Bom atom merupakan hasil dari pelepasan energi yang tiba-tiba saat proses fisi inti unsur radioaktif seperti uranium atau plutonium. Sedangkan detonasi *Bom Hidrogen* diawali dengan tahapan detonasi *fisi nuklir* yang menghasilkan ledakan yang menghasilkan panas jutaan derajat, sehingga tersedia cukup banyak energi untuk proses *fusi nuklir* pada tahapan berikutnya.



Gambar 11.16.. : Reaksi nuklir fusi isotop Hidrogen (*Deuterium* dan *Tritium*) di matahari, membentuk atom *Helium* dengan melepaskan energi sebesar 3.2 MeV

produk-produk sampingan atau bahan bakar sisa dari bom. Zat-zat tersebut terus memancarkan radioaktif berbahaya dalam proses peluruhannya.

Walaupun *Bom Hidrogen* belum pernah digunakan dalam perang yang sesungguhnya, selain Amerika Serikat, negara lain seperti Inggris, Perancis, Israel, Pakistan, India, Rusia, dan Cina terkonfirmasi telah melakukan uji coba *Bom Hidrogen*. Catatan terakhir, bahkan Israel melakukan uji coba pada 1970-an. Sedangkan Rusia terakhir kali melakukan uji coba *Bom Hidrogen* pada tahun 1991 dan Inggris setahun berikutnya. Perancis, Pakistan, dan Cina tercatat melakukan hal sama pada tahun 1996. Sedangkan India terakhir kali melakukan uji coba pada tahun 1998. Korea Utara diduga merupakan negara baru yang juga telah melakukan uji coba *Bom Hidrogen*. Maka penguasaan akan senjata pemusnah masal yang dahsyat ini sudah semakin menyebar di dunia, sehingga berpotensi menimbulkan bencana teknologi yang besar.

- **Tsar Bomba**

Tsar Bomba (Царь-бомба) yang berarti *Kaisar Dari Segala Bom* adalah bom nuklir yang diciptakan oleh Uni Soviet pada proyek "Иван" (*Ivan*). Bom ini dirancang oleh Yulii Borisovich Khariton, Andrei Sakharov, Victor Adamsky, Yuri Babayev, Yuri Smirnov, Yuri Trutnev, dan Fred Strois, mengacu pada teknologi *Bom Hidrogen*. Pembuatan bom membutuhkan waktu 15 minggu dan diuji coba pada tanggal 30 Oktober 1961, di sekitar pulau *Novaya Zemlya-Laut Arktik*. *Tsar Bomba* yang memiliki berat 27 ton dan diangkut dengan pesawat TU-95 yang merupakan pesawat pembom terbesar pada saat itu. *Tsar Bomba* diledakkan pada pukul 11:32 waktu setempat, pada tanggal 30 Oktober 1961 disekitar *Mityushikha Bay (Sukhoy Nos Zona C)*. Bom ini di desain untuk meledak pada ketinggian 4 kilometer dari permukaan tanah atau 4,2 kilometer dari permukaan laut dengan menggunakan sistem sensor barometrik. Ketinggian pelepasan bom adalah 34500 feet, dan saat meledak berdaya ledak 50 Megaton TNT. Awalnya *Tsar Bomba* direncanakan berdaya ledak sebesar 100 Megaton TNT, namun dibatalkan oleh karena akan berdampak luas pada Atmosfer.

Bangunan di desa *Severny*, 55km dari lokasi uji coba ikut hancur. Seorang partisipan yang ikut dalam uji coba melihat cahaya yang sangat cerah meskipun sudah menggunakan kacamata hitam. Efek gelombang panas yang diakibatkan bahkan terasa sampai jarak 270 kilometer, sedangkan gelombang kejutnya (*shock wave*) terasa pada jarak 7000 kilometer.

Ledakan bom nuklir dengan nama resmi *AN602* tersebut, menciptakan jamur api setinggi 64 kilometer dan terlihat pada jarak 2000 km. Pulau *Novaya Zemlya* menjadi rata karena bebatuan mencair, begitu pula kota *Severny* yang berjarak 55 km dari pusat ledakan, yang sudah dikosongkan. Tak hanya itu, dilaporkan banyak jendela kaca gedung yang pecah pada lokasi yang berjarak 900 km dari lokasi peledakan, di Norwegia dan Finlandia. Selain itu, *Ionisasi* dari hasil peledakan tersebut menyebabkan gangguan radio komunikasi selama beberapa jam.



Gambar 11.18. : Replika *Tsar Bomba*

- *Senjata Kimia*

Senjata kimia adalah senjata yang memanfaatkan sifat racun senyawa kimia untuk membunuh, melukai, atau melumpuhkan lawan. Penggunaan senjata kimia berbeda dengan senjata konvensional dan senjata nuklir, yaitu dimana efek merusak utama dari senjata kimia bukanlah disebabkan oleh daya ledaknya.

Menurut Konvensi Senjata Kimia (*Chemical Weapons Convention*), segala zat kimia beracun dari manapun asalnya, dapat dianggap sebagai senjata kimia apabila digunakan sebagai senjata, kecuali jika digunakan untuk tujuan yang tidak dilarang. Senjata kimia termasuk dalam senjata pemusnah masal, oleh karena dengan mudah dapat menyebar luas dalam bentuk gas, cair ataupun padat, dan dapat dengan mudah menyerang sasaran yang dimaksudkan. Agen kimia ini merupakan amunisi mematikan oleh karena sangat mudah menguap. Diantaranya yang berbahaya adalah agen saraf (*GA, GB, GD, dan VX*) dan agen *vesicant (blister)*, yang meliputi formulasi *belerang mustard (H, HT, dan HD)*, yang berbentuk cairan pada suhu kamar normal, namun berubah menjadi gas ketika dilepaskan. Efek dari *gas mustard*, dan *gas fosgen* lainnya, yang pernah digunakan dalam Perang Dunia I, adalah menyebabkan luka bakar paru-paru, kebutaan, kematian dan cacat.

Nazi-Jerman dalam Perang Dunia II menggunakan agen darah komersial *Hidrogen Sianida* bernama *Zyclon B*, untuk melakukan *genosida* bagi tawanan-tawanannya didalam kamar gas yang besar. Dalam sejarah, ada banyak jenis senjata kimia yang pernah diciptakan, namun beberapa saja diantaranya yang dianggap sangat berbahaya. Berikut adalah beberapa senjata kimia yang diketahui paling berbahaya, dimana beberapa diantaranya pernah diuji cobakan dalam perang.

- **Gas VX** adalah senyawa belerang organik, di-klasifikasikan sebagai gas saraf oleh karena mempengaruhi sistem transmisi saraf korbannya. *Gas VX* dalam bentuk dasarnya tak berbau dan tak memiliki rasa. Bentuk senyawa VX adalah berupa cairan berminyak berwarna coklat. Gas VX dikembangkan di Inggris pada 1950-an dan sangat mematikan. Gejala orang yang terpapar *gas VX* biasanya mengalami kejang-kejang dan dada terasa sesak. Korban *gas VX* biasanya tewas akibat tak bisa bernafas dan gagal jantung.
- **Gas Sarin** dikenal dengan nama GB, merupakan gas saraf yang tak stabil tetapi sangat mematikan. Satu tetes *Sarin* cukup untuk menewaskan seorang manusia dewasa dalam waktu sangat cepat. *Gas Sarin* tak berwarna dan tak berbau

jika dilepaskan dalam suhu kamar. Gas ini menguap cepat saat berada dalam lingkungan yang panas. Setelah dilepas, *gas Sarin* akan menyebar dengan cepat dan memberikan ancaman yang cepat walau tak berlangsung lama. Gejala orang yang terpapar *gas Sarin* adalah sakit kepala, diikuti kelumpuhan bertahap dan kematian. Sarin dikembangkan di Jerman pada tahun 1938 saat para ilmuwan sedang mencoba membuat pestisida.

- *Gas Mustard* dikenal dengan nama mustard belerang, diambil dari baunya yang mirip aroma bawang putih busuk. Gas ini termasuk senyawa yang dapat membuat kulit melepuh, dan biasanya mempengaruhi mata, saluran pernapasan, dan kulit. Dampak gas ini sangat perlahan dan menyakitkan. Jika terhirup, korban akan mengalami bersin-bersin, suara serak, batuk darah, sakit perut, dan muntah-muntah. Namun *gas Mustard* ini tidak selalu mengakibatkan kematian. Pada saat digunakan dalam Perang Dunia I, *gas mustard* hanya menyebabkan kematian 5 persen korbannya. Meski demikian, *gas Mustard* menjadi senjata kimia yang paling banyak digunakan termasuk dalam dua Perang Dunia, perang saudara Yaman, dan perang Iran-Irak.
- *Phosgene* sering disebut-sebut sebagai senjata kimia yang paling mematikan, oleh karena tak berbau, tak berwarna, dan dapat mudah membaur dengan udara sekitarnya, dan yang terutama adalah sifat beracunnya yang sangat mematikan. *Phosgene* bekerja dengan merusak paru-paru korban hingga pada akhirnya meninggal. *Phosgene* pertama kali digunakan dengan cara dicampur dengan gas klorin pada tanggal 19 Desember 1915, ketika Jerman menjatuhkan 88 ton gas ini ke pasukan Inggris, sehingga mengakibatkan 120 orang tewas dan 1069 lainnya terluka. Selama digunakan dalam Perang Dunia I, dari seluruh korban senjata kimia, 80 persennya diakibatkan gas *phosgene* ini. Gas ini tak mudah terbakar dan mudah menguap yang menjadikannya tidak stabil. Namun kepadatannya yang tiga kali lebih padat dari udara membuat *phosgene* dapat melayang rendah dan sesuai untuk digunakan dalam perang parit.

- *Chlorine* sesungguhnya adalah salah satu bahan kimia yang bermanfaat, biasa dipakai sebagai pestisida, bahan detergen, pembunuh bakteri dan lain sebagainya. Namun demikian, dalam kemasan berbeda *Chlorine* dapat menjadi senjata pembunuh yang mematikan. Dalam bentuk gas yang disebarakan akan meracuni paru-paru sehingga dapat menyebabkan kematian. Meski gas ini kurang mematikan dibanding senjata kimia lainnya, potensi bahaya gas *Chlorin* adalah bahwa gas *Chlorin* mudah dibuat, mudah diperoleh dan mudah disamarkan.

Senjata kimia, walaupun tak se-mematikan senjata nuklir, menyimpan potensi bencana teknologi untuk masa depan. Perkembangan teknologi ilmu kimia, kemudahan proses pembuatan, kemudahan memperoleh bahan baku, menyebabkan senjata kimia berpeluang untuk berkembang meningkat pesat, baik secara kuantitas maupun kualitasnya.

- *Senjata Biologi* adalah senjata yang menggunakan *patogen* (bakteri, virus atau organisme penyebab penyakit lainnya) sebagai alat pembunuh, melukai, atau melumpuhkan lawan. Senjata biologi tidak hanya berupa organisme *patogen*, tetapi juga dapat mencakup *toksin* berbahaya dari berbagai organisme tertentu.

Penggunaan senjata biologi telah ada sejak tahun 400 SM, ketika bangsa Iran Kuno (*Scythians*) menggunakan panah yang dicelupkan ke dalam feces (kotoran) dan mayat makhluk hidup yang telah membusuk. Hal serupa juga dilakukan oleh bangsa Roma dengan mencelupkan pedangnya ke dalam pupuk dan sisa hewan yang telah membusuk. Peristiwa penting lainnya dalam sejarah kuno tentang penggunaan senjata biologi, terjadi ketika bangsa Mongol mengusir bangsa Genoa dari kota Kaffa di laut Hitam, dengan memanfaatkan mayat-mayat manusia yang ter-infeksi wabah pes, sehingga menimbulkan "kematian hitam" (*black death*) di wilayah Eropa.

Pada tahun 1754-1760, dalam perang antara bangsa Inggris dengan bangsa Indian, digunakan virus cacar. Yaitu dengan memberikan selimut bekas penderita cacar kepada bangsa Indian.

Pada Perang Dunia I, Jerman menggunakan bakteri *Burkholdelia* dan *Bacillus anthracis* untuk meng-infeksi ternak dan kuda tentara lawan.

Pada tahun 1932-1935, Jepang mengembangkan program pembuatan senjata biologi di Cina yang dinamakan Unit-731. Sebanyak 3000 ilmuwan Jepang terlibat bekerja untuk melakukan penelitian terhadap berbagai agen biologi yang berpotensi menjadi senjata biologi, seperti kolera, pes, dan penyakit seksual yang menular. Eksperimen yang menggunakan tahanan Cina yang mengakibatkan kematian ± 10000 tahanan pada saat itu. Berikutnya, berbagai negara seperti Amerika Serikat dan Uni Sovyet juga berupaya mengembangkan senjata biologi.

Biaya pembuatan senjata biologi relatif murah dibandingkan senjata penghancur lainnya, dengan peralatan dan bahan yang dibutuhkan untuk pertumbuhan agen biologi cukup sederhana, dan waktu yang diperlukan dalam pembuatannya pun relatif lebih pendek. Hal ini juga ditunjang dengan perkembangan dalam ilmu Bio-teknologi, khususnya *sekayasa genetika*, sehingga menyebabkan senjata biologi berpotensi menjadi sumber bencana di masa depan.

Tabel 11.1. : Berbagai organisme *patogen* bahan pembuat senjata biologi

- | | |
|--|---|
| • Bacillus anthracis (Antrax) | • Salmonella typhi (Tifus) |
| • Brucella sp. (Brucellosis) | • Variola (Cacar atau variola) |
| • Chlamydia psittaci (Psittacosis) | • Vibrio cholerae (Kolera) |
| • Coxiella burnetii (Demam Q) | • Virus Ebola |
| • Escherichia coli | • Virus Marburg |
| • O157:H7 (Gastroenteritis) | • Virus demam lembah Rift atau <i>Rift Valley Fever Virus</i> |
| • Shigella (Shigellosis) | • Virus alfa (ensefalitis) |
| • Francisella tularensis (Tularemia) | • Virus demam kuning atau <i>yellow fever virus</i> |
| • Burkholderia mallei (Glanders) | • dan lain-lain. ^[5] |
| • Burkholderia pseudomallei (Melioidosis) | |

Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Senjata_biologi



Bom E120, salah satu senjata biologi yang berisi 0.1 kg agen biologi cair dan dikembangkan pada tahun 1960-an.

Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Senjata_biologi

Gambar 11.19. : Contoh senjata biologi dalam bentuk bom.

12

PERANG DARI MASA KE MASA

Manusia pada dasarnya adalah makhluk sosial yang saling bekerja sama dalam upaya mencapai tujuannya. Untuk itulah maka manusia berkelompok membentuk suatu komunitas, yang berujung pada terbentuknya sebuah negara. Negara pada hakekatnya bertujuan melindungi, meningkatkan kesejahteraan, dan menjaga keamanan warganya terhadap ancaman dari luar maupun dari dalam negeri. Namun kelompok yang berbeda, tidak selalu mempunyai kriteria dan pandangan yang sama atas hal-hal tersebut. Maka disinilah konflik antar kelompok atau negara akan dapat terjadi, dan berpotensi memicu perang.

Naluri berperang atau sifat haus perang bersumber dari sifat umum manusia sebagai makhluk hidup. Teori *Darwinisme Sosial Internasional* menyebutkan bahwa manusia sebagai makhluk biologis, berkembang dan maju melalui persaingan, dimana hanya yang kuat yang akan bertahan, sedangkan yang lemah akan tersisih. Maka perang adalah salah satu bentuk aktualisasi untuk memenangkan persaingan secara kelompok. Dimana dalam hal ber negara, nasionalisme merupakan identitas kelompok secara kolektif secara emosional.

Pada awalnya, perang adalah bentuk dari persaingan untuk penguasaan sumberdaya alam, yang berkembang menjadi kolonisasi. Namun dengan semakin berkembangnya sistem ekonomi, terutama sejak revolusi industri, perang juga merupakan upaya penguasaan pasar. Bagaimanapun, industrialisasi dan peningkatan produktivitas memerlukan pangsa pasar.

Polarisasi politik pasca revolusi industri, terutama setelah usainya Perang Dunia II, secara tak langsung memecah negara-negara di dunia menjadi blok *Kapitalis* yang kemudian disebut *Blok Barat*, dan

blok *Sosialis* sebagai *Blok Timur*, turut berperan menambah potensi konflik masyarakat dunia. Ketegangan dalam suasana perang dingin ini memang belum sampai pecah menjadi perang besar terbuka antar kedua kelompok tersebut, walaupun beberapa percikan perang dalam skala lokal yang lebih sempit sudah mulai terjadi. Potensi konflik yang berpotensi memicu terjadinya perang telah mengalami pergeseran, dari motivasi penguasaan sumberdaya alam dan ekspansi wilayah, menjadi penguasaan ekonomi dan pasar, dan berkembang lebih lanjut menjadi potensi konflik ideologi.

Sejalan dengan perkembangan teknologi, teknologi peralatan perangpun berkembang pesat. Perlahan-lahan teknologi perang mulai menggeser posisi sumberdaya manusia sebagai pemeran utama dalam perang. Keterampilan individu personel militer mulai tergantikan dengan keterampilan oleh teknologi militer. Sehingga, pada perang modern, kepemilikan dan penguasaan teknologi peralatan perang, lebih menjadi faktor dominan yang menentukan hasil akhir suatu perang.

Pada era peperangan kuno (*Ancient War*) senjata memang sudah dikenal. Namun persenjataan yang digunakan masih berbasis manual, dimana para pihak yang berperang berhadapan langsung *face to face*. Tombak yang pada awalnya merupakan senjata berburu, merupakan senjata perang awal yang pertama kali dikenal. Maka jumlah dan keterampilan olah senjata manual individu, masih menjadi faktor penentu hasil akhir suatu perang.

Peralatan perang berkembang dengan ditemukannya teknologi pelontar mekanis, seperti *Panah*, *Catapult*, *Trebuset* dan *Ballista*. Maka perang berhadapan langsung *face to face* mulai digantikan dengan perang berjarak yang mengandalkan teknologi pelontar. Bahkan mulai digunakan pula pelontar ber api, seperti panah-panah api (*flaming arrow*), *catapult* dan *trebuset* ber api, yang mulai memperlihatkan dampak perusakan masal. Perang berjarak ini semakin meningkat dengan ditemukannya bubuk mesiu, yang mampu memberikan efek hancur dan daya lontar lebih jauh.

Pada *Abad Pertengahan* (*Medieval Age*), meskipun berbagai peralatan perang mekanis masih digunakan, bubuk mesiu mulai dimanfaatkan dan dikembangkan sebagai teknologi senjata pelontar, sehingga jarak pertempuranpun semakin memanjang. Pada tahun

1355, *Berthold Schwarz* dari Jerman membangun senjata yang disebut sebagai *Meriam Eropa (European Cannon)*. Sementara itu *Petard*, sejenis bom kecil yang digunakan untuk meledakkan dinding-dinding ataupun gerbang pertahanan kastil pasukan musuh mulai lebih dikembangkan. *Petard* yang merupakan pengembangan dari senjata yang menggunakan bubuk mesiu, merupakan konsep awal dari pembuatan bom. Maka peran teknologi persenjataan semakin menggantikan keterampilan manual individu dalam perang.

Pada era industrial sejak Revolusi Industri, peran senjata api telah semakin jauh menggantikan senjata berpelontar mekanis. Senapan (*rifle*) yang diciptakan *B Tyler Henry (1860)* diproduksi secara massal dan menjadi andalan dalam perang sipil atau perang saudara di Amerika, nyaris sepenuhnya menggantikan senjata-senjata berpelontar mekanis.

Pada *Era Perang Dunia* yang dimulai dengan Perang dunia I (1914-1918), penggunaan senjata api semakin berkembang luas, praktis telah menggantikan penggunaan seluruh senjata berpelontar mekanis seperti *panah, catapult* ataupun *ballista*. Senjata api berbasis bubuk mesiu (*gunpowder*), baik sebagai senapan maupun bom peledak, menjadi standard persenjataan bagi para pihak yang berperang. Disamping itu, kendaraan perang bermesin juga telah menggantikan peran kereta-kereta perang ber kuda. *Tank* pertama kali digunakan sebagai alat perang pada tahun 1917 oleh Inggris. Dimana *Tank* pada awalnya merupakan kombinasi dari berbagai teknologi abad 19, yaitu merupakan kombinasi dari *The Cartepilar Track (Richard Edgeworth, 1770)*, *Internal Combustion Engine (Nikolaus August, 1885)*, *Motor-War Car (Frederric Simms, 1889)*. Balon terbang *Zeppelin* buatan Jerman, mulai dimanfaatkan sebagai pesawat angkut perang maupun pembom, walaupun akhirnya ditarik tidak dipergunakan lagi oleh karena kurang efektif. Pesawat bersayap tetap, pertama digunakan untuk kepentingan militer oleh Italia di Libya pada tanggal 23 Oktober 1911 dalam perang Italia-Turki. Yaitu untuk keperluan mata-mata, dan dilanjutkan pada tahun berikutnya untuk penjatuhan granat dan pembuatan foto udara. Pesawat terbang pembom strategis diciptakan oleh Jerman dan Inggris, dan senjata anti pesawat kemudian dikembangkan. Sementara itu perang kapal selam dalam skala terbatas telah terjadi di samudera Atlantik. Pada sisi lain, senjata

kimia mulai digunakan dalam konflik ini, dimana gas yang digunakan adalah, gas *Chlorine*, *Mustard*, dan *Phosgene*.

Pada Perang Dunia II (1939-1945), penggunaan pesawat terbang tempur semakin intensif dan meluas, seperti yang ditunjukkan dalam serangan udara Jepang ke *Pearl Harbour*. Hal tersebut diimbangi pula dengan pengembangan pertahanan udara radar anti pesawat. Perkembangan aspek pertempuran laut semakin meluas dengan mulai dioperasikannya Kapal Induk dan Kapal Selam secara masif. Dan yang terutama adalah dijatuhkannya bom atom untuk pertama kali di Hiroshima dan Nagasaki, yang mengakhiri Perang Dunia II.

Dampak dari kedua Perang Dunia yang nyata, adalah semakin tajamnya persaingan antara *Blok Barat* dengan *Blok Timur*, sehingga dimulailah era *Perang Dingin*. Dinamakan *Perang Dingin* oleh karena kedua belah pihak tidak pernah terlibat dalam aksi militer secara langsung, Namun *Perang Dingin* mengakibatkan peningkatan ketegangan yang meletup menjadi berbagai konflik militer regional, seperti Blokade Berlin (1948-1949), Perang Korea (1950-1953), Krisis Terusan Suez (1956), Krisis Peluru Kendali Kuba (1962), Perang Vietnam (1959-1975), Perang Afganistan (1979-1989), dan sebagainya.

Potensi bencana besar dari *Perang Dingin* adalah kepemilikan dan upaya pengembangan senjata pemusnah massanya, seperti senjata nuklir, oleh masing-masing pihak. Untuk mengimbangi *Proyek Manhattan*, Uni Sovyet sebagai negara *Blok Timur*, melakukan uji peledakan bom atom pada tahun 1949. Hal tersebut diimbangi oleh Amerika Serikat pada tahun 1952. Keberhasilan Uni Sovyet membuat roket yang dapat digunakan sebagai *ICBM (intercontinental ballistic missile)* pada tahun 1957, diikuti oleh Amerika Serikat dari *Blok Barat* setahun berikutnya, berlanjut dengan bom Hidrogen oleh Uni Sovyet. Persaingan atau perlombaan tersebut terus berlangsung sampai tahun 1960an. Sementara itu, negara-negara lain dari kedua kubu, juga mulai mengembangkan senjata bom atom.

Memasuki tahun 1970an mulai dikembangkan sistem *MIRV (multiple independently-targeted reentry vehicle)*, yaitu peluru kendali yang dapat membawa banyak hulu ledak, dan masing-masing dapat diarahkan kepada sasaran yang berbeda. Amerika Serikat memiliki *MX* atau *Peacekeeper*, sedangkan Uni Sovyet memiliki *SS-18*.

Perlombaan senjata terus meningkat memasuki tahun 1980an, dengan *bom neutron - bom hidrogen* kecil yang dirancang untuk dapat membunuh orang dengan radiasi tanpa menghancurkan bangunan ataupun kendaraan-kendaraan yang mengangkutnya. Disamping itu, juga mulai dikembangkan peluru kendali penjelajah yang dapat meluncur sejauh ribuan kilometer, rendah diatas pepohonan, sehingga tidak terlacak oleh radar. Penemuan mutakhir ini secara populer disebut sebagai senjata Perang Bintang (*Star Wars*).

Sedemikian itulah perkembangan senjata yang digunakan oleh manusia dari masa ke masa. Dari jamannya manusia menggunakan senjata tombak dan panah, ber-inovasi menciptakan senjata berteknologi semakin tinggi seperti, dan akan terus berkembang meningkatkan potensi bencana teknologi.

12.1. Perang Kuno (*Perang Punisia*)

Perang kuno dalam hal ini adalah perang yang tercatat sejak awal sejarah tertulis sampai dengan jaman tersebut dianggap berakhir. Tak ada batasan pasti tentang jaman kuno, namun di Eropa dan Timur Dekat, akhir jaman kuno seringkali disamakan dengan Kejatuhan Romawi pada tahun 476 M, yaitu peperangan Kekaisaran Romawi Timur di perbatasan Asia Baratdaya dan Afrika Utara, dan permulaan penaklukan Muslim pada abad ke-7. Di Tiongkok, jaman kuno dianggap berakhir dengan peningkatan peran para prajurit yang dibutuhkan untuk menghadapi serangan dari utara pada abad ke-5, dan awal dinasti Tang pada tahun 618. Di India, jaman kuno berakhir dengan keruntuhan Kekaisaran Gupta (abad ke-6) dan permulaan penaklukan Muslim pada abad ke-8.

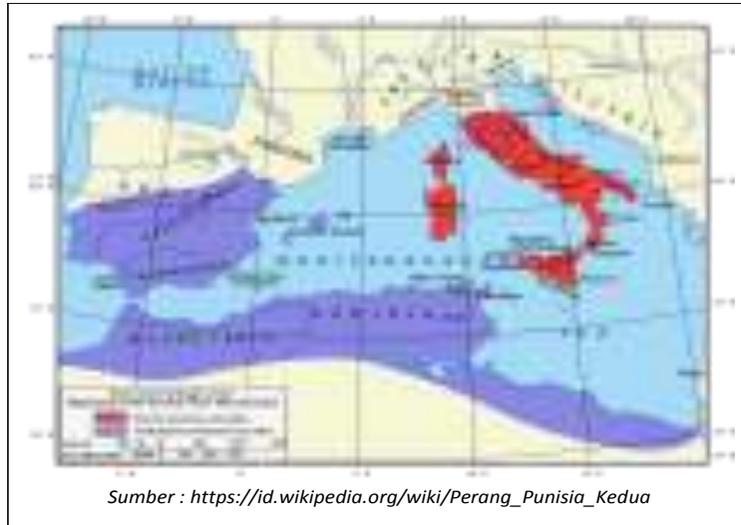
Perang Punisia sejauh ini dianggap sebagai peperangan terbesar pada jaman kuno. Yaitu peperangan antara *Romawi* dengan *Khartago* pada tahun 264 SM sampai dengan tahun 146 SM, dimana *Punisia* sendiri berasal dari kata *Punici*, atau bangsa *Fenisia* dalam bahasa Latin. *Perang Punisia* terjadi sebanyak tiga kali, yaitu *Perang Punisia Pertama* (264 SM - 241 SM), *Perang Punisia Kedua* (218 SM - 202 SM), dan *Perang Punisia ketiga* (149 SM - 146 SM). Perang yang konon menimbulkan ratusan ribu korban prajurit ini terjadi dilandasi ambisi ekspansi *Republik Romawi* yang telah menguasai semenanjung Italia disebelah selatan sungai Po, untuk memperluas wilayahnya,

sehingga berhadapan dengan bangsa *Khartago*. Sedangkan sampai dengan tahun 264 SM, *Khartago* adalah kota pelabuhan besar yang terletak di pantai Tunisia sejak didirikan oleh bangsa *Fenisia* pada pertengahan abad ke-9 SM. *Khartago* merupakan negara-kota yang kuat di Mediterania Barat, dimana hanya *Republik Romawi* yang dapat menyaingi kekuasaan, kekayaan dan populasinya.



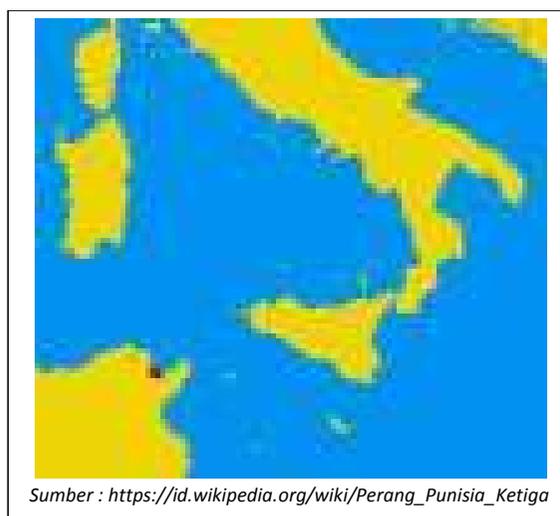
Gambar 12.1. : Wilayah pengaruh *Romawi* dan *Khartago* sebelum *Perang Punisia I*

Pada *Perang Punisia Pertama* (264 SM – 241 SM) pertempuran terjadi di daratan (Sisilia dan Afrika), dan di laut Mediterania. Perang yang berlangsung sengit ini berakhir dengan kemenangan *Republik Romawi* yang berhasil menaklukan Sisilia dalam Pertempuran Kepulauan Aegates. *Khartago* juga mengalami krisis politik dan militer, sehingga *Romawi* juga berhasil merebut Sardinia dan Korsika.



Gambar 12.2. : Wilayah pengaruh Romawi dan Khartago setelah Perang Punisia I

Perang *Punisia Kedua* (218 SM - 202 SM) dimulai oleh *Khartago*. Dimana pasukan *Khartago* yang dipimpin oleh Hannibal menyeberangi Laut Mediterania, menyusuri semenanjung Iberia, dan berhasil menaklukkannya untuk meluaskan wilayah kekuasaannya. Namun pertempuran dengan pasukan *Romawi* yang dipimpin oleh *Scipio*, dengan bantuan dari *Numidia* yang terjadi di Zama kembali dimenangkan oleh *Romawi*, sehingga hanya menyisakan kota *Khartago*.



Gambar 12.2. : Wilayah kekuasaan Romawi setelah Perang Punisia II

Perang Punisia Ketiga (149 SM - 146 SM) terjadi dengan penyerangan Romawi langsung ke jantung Kota *Khartago*. Republik Romawi pada akhirnya berhasil menghancurkan Kota *Khartago*, sekaligus menghapuskan *Kekaisaran Khartago*, dimana hampir semua penduduk *Khartago* dijual sebagai budak.

12.2. Perang Abad Pertengahan (Perang 100 Tahun, Inggris - Perancis)

Pengertian *Abad Pertengahan* dalam sejarah Eropa adalah periode yang berlangsung dari abad ke-5 M sampai abad ke-15 M, dimulai sejak runtuhnya *Kekaisaran Romawi Barat*, dan berlanjut sampai dengan dimulainya *Abad Pembaharuan* dan *Penjelajahan* di Eropa. Secara tradisional sejarah dunia Barat terbagi menjadi tiga kurun waktu, yaitu *Abad Kuno*, *Abad Pertengahan*, dan *Jaman Modern*. Sehingga dapat dikatakan *Abad Pertengahan* adalah peralihan dari *Abad Kuno* ke *Jaman Modern*.

Berbagai peperangan besar di Eropa terjadi terutama pada akhir *Abad Pertengahan*, memasuki *Jaman Modern*. Yaitu meliputi perang-perang :

- 1096 - 1291, Perang Salib.
- 1296 - 1328, Perang Kemerdekaan Skotlandia Pertama.
- 1321 - 1322, Perang Kexholms antara Sweden dan Novgorod berakhir dengan Perjanjian Nöteborg (*Treaty of Nöteborg*) pada 1323.
- 1332 - 1333, Perang Kemerdekaan Scotland Kedua.
- 1337 - 1453, Perang Seratus Tahun.
- 1341 - 1364, Perang Waris Breton.
- 1420 - 1436, Perang Hussite.
- 1453 - Perang, Romawi-Turki.
- 1454 - 1466. Perang Tigabelas Tahun antara Poland dan Ordo Teutonik, yang berakhir dengan hancurnya ordo Teutonic.
- 1455 - 1485, Perang Mawar.
- 1474 - 1477, Perang Burgundia.
- 1478 - Perang antara Principality of Moscow dan Republik Novgorod.

Salah satu diantaranya, yang merupakan perang yang berlangsung lama, adalah *Perang 100 Tahun (1337-1453)* antara Inggris dengan Perancis. Perang yang telah menelan korban jiwa 3,5 juta orang ini, salah satu bagian akhirnya adalah *Perang Lancastrian (1415-1453)*.

Perang Seratus Tahun adalah konflik bersenjata selama 116 tahun, dari tahun 1337 sampai dengan tahun 1453, antara Kerajaan Inggris dengan Perancis. Yaitu pada masa lima raja Inggris dan lima raja Perancis (*Valois*). Pecahnya perang dipicu oleh meningkatnya ketegangan antara raja-raja Perancis dengan raja-raja Inggris, terkait dengan wilayah-wilayah *Gascogne, Flandria, dan Skotlandia*. Bermula dari kebangkitan kembali semangat Inggris pasca turun tahtanya raja *Edward II*, yang dinilai sangat lemah dalam memimpin, digantikan oleh putranya yang mendapat gelar *Edward III*, yang dikenal sebagai raja yang tangguh dan cakap di medan perang, yang mendapat dukungan dari kaum bangsawan.

Misi pertama yang dilakukan oleh kerajaan Inggris dibawah pemerintahan *Edward III* adalah melakukan ekspansi ke wilayah Skotlandia pada tahun 1333. Serangkaian serangan yang dilakukan oleh Inggris berhasil menguasai Skotlandia, walaupun kemudian Skotlandia berhasil melepaskan diri dari Inggris, oleh karena lebih cenderung bergabung dengan Perancis yang lebih kaya dan makmur.

Fokus utama kerajaan Inggris adalah menguasai daratan Perancis yang sedang mengalami kekosongan kekuasaan setelah berakhirnya kepemimpinan keluarga *Capet*, dengan melakukan klaim atas wilayah Perancis pada tahun 1338. Namun konflik antara Inggris dan Perancis, sesungguhnya telah terjadi jauh sebelumnya, dimana berbagai konflik telah sering terjadi baik dalam skala kecil maupun skala besar. Dalam bidang ekonomi misalnya, konflik telah terjadi dalam bentuk persaingan yang sangat ketat antara para pedagang Inggris dan pedagang Perancis, dimana Pemerintah Perancis melakukan intervensi dalam urusan perdagangan wol di daerah *Flanders*, yang merugikan para pedagang Inggris. Saling bajak kapal dagang, terjadi antara pelaut Inggris dengan pelaut Perancis.

Meskipun perang ini berlangsung sepanjang masa kekuasaan lima raja Inggris dan lima raja Perancis (*Valois*), namun bukanlah merupakan peperangan yang terus-menerus, melainkan merupakan

rangkaian konflik yang terkadang dipisahkan oleh masa gencatan senjata yang panjang.

Perang ini, walaupun berlangsung lama dan menimbulkan banyak korban jiwa, namun sesungguhnya lebih merupakan perang saudara antara keluarga bangsawan *Anglo-Saxon* (Inggris) dengan bangsawan *Normandy* (Perancis), dimana diantara keduanya sesungguhnya memiliki keterkaitan keluarga selama berabad-abad. Hal signifikan dalam perang ini adalah, penggunaan strategi dan teknik berperang (termasuk teknologi senjata) yang baru, menggantikan peran para *Kesatria medan perang* yang dominan pada perang-perang sebelumnya.

12.3. Perang Dunia

Perang Dunia adalah peristiwa perang pada jaman modern, pada awal abad 20. Perang ini bukan sekedar konflik antara dua negara, namun konflik antara dua kelompok negara. Terjadi dua kali, masing-masing dengan melibatkan kelompok-kelompok negara yang berbeda, yaitu Perang Dunia I (1914-1918) dan Perang Dunia II (1939-1945).

12.3.1. Perang Dunia I (1914 – 1919)

Perang ini terjadi di Eropa, dengan melibatkan banyak negara, yang terbagi dalam dua kelompok kekuatan yang saling ber konflik, yaitu *Aliansi Sentral (Central Powers)*, dan *Aliansi Sekutu (Allied Powers)*. Perang ini, disamping melibatkan pasukan tempur (militer), juga melibatkan warga sipil, sehingga disebut juga sebagai *Total War*.

Pecahnya perang ini pada dasarnya disebabkan oleh rivalitas diantara negara-negara Eropa, dimana *Otto von Bismarck* pada tahun 1870 memprakarsai pembentukan suatu aliansi diantara beberapa negara. Sehingga terbentuk polarisasi negara-negara Eropa, yang pada tahun 1914 terdiri dari *Aliansi Sentral* yang meliputi Jerman, Austro-Hongaria, Italia (yang kemudian menarik diri), Bulgaria serta Turki Utsmani yang bergabung tahun 2015, dan *Aliansi Sekutu* yang meliputi Inggris, Perancis, Rusia dan Italia yang kemudian bergabung pada tahun 2015.



Gambar 12.3. : Negara-negara yang terlibat Perang Dunia I

Salah satu latar belakang penting yang memicu pecahnya *Perang Dunia I* adalah berkembangnya *Krisis Balkan*. Yaitu keinginan Austro-Hongaria sebagai salah satu negara dari kelompok *Aliansi Sentral*, untuk menguasai wilayah Balkan. Namun hal yang sama juga diinginkan oleh Rusia sebagai salah satu negara dari kelompok *Aliansi Sekutu*, dimana penduduk Balkan, yang terdiri dari warga Serbia, Kroasia dan lainnya lebih memilih Rusia. Akhirnya, pecahnya *Perang Dunia I* terpicu oleh terbunuhnya *Pangeran Franz Ferdinand*, seorang pewaris tahta Austro-Hongaria, oleh *Gavrilo Princip* pada tanggal 28 Juni 1914 dalam kunjungannya ke Sarajevo, yang kemudian diikuti dengan keputusan Austro-Hongaria untuk menyerang Serbia.

Perang Dunia I merupakan salah satu perang terbesar yang menghancurkan dalam sejarah manusia. Hampir sepuluh juta serdadu tewas dalam pertempuran yang memakan waktu relatif sangat singkat (5 tahun), suatu jumlah yang jauh melampaui korban jiwa militer pada seluruh perang selama seratus tahun sebelumnya. Walaupun jumlah

korban yang tepat sulit diketahui, diperkirakan korban luka dalam pertempuran mencapai 21 juta orang. Bahkan tanggal 1 Juli 1916 merupakan hari dengan jumlah korban jiwa terbesar, yaitu ketika Angkatan Darat Inggris kehilangan lebih dari 57 000 korban jiwa dalam pertempuran di Somme.

Secara keseluruhan, Jerman dan Rusia menderita jumlah korban jiwa militer tertinggi, masing-masingnya diperkirakan sebesar 1 773 700 dan 1 700 000 jiwa. Sedangkan Perancis kehilangan enam belas persen dari pasukan yang dikerahkannya. Walaupun tidak ada badan resmi yang melakukan penghitungan secara saksama atas korban jiwa warga sipil selama tahun-tahun peperangan, namun diperkirakan telah jatuh korban sekitar 13 juta jiwa non-kombatan, baik sebagai akibat langsung ataupun tak langsung dari pertempuran.

Kerugian besar yang ditanggung para pihak yang terlibat konflik, diantaranya disebabkan oleh teknologi persenjataan baru, seperti senapan mesin, meriam, berbagai jenis bom dan digunakannya gas beracun, serta sebagai akibat dari kegagalan pimpinan militer untuk menyesuaikan strategi dan taktik tempur terhadap teknologi peperangan yang semakin meningkat tersebut. Hal ini semakin diperparah menjelang akhir masa peperangan, dengan berjangkitnya wabah *Flu Spanyol*, yang merupakan epidemi influenza paling mematikan pada saat itu. Sementara itu jutaan orang menjadi pengungsi di Eropa dan Asia Kecil sebagai akibat konflik tersebut. Kerugian harta-benda dan industri yang sangat besar dialami, terutama oleh Perancis dan Belgia, yang merupakan lokasi medan pertempuran terbesar.

Bergabungnya Amerika Serikat, meskipun bukan negara Eropa, kedalam *Aliansi Sekutu* pada tahun 1917, memberikan dampak pada keseimbangan medan perang. Dimana dominasi *Aliansi Sentral* perlahan-lahan mulai diambil alih oleh *Aliansi Sekutu*. Sehingga Bulgaria pada akhirnya menyetujui gencatan senjata pada tanggal 30 September 1918, disusul Turki Utsmani 31 Oktober 1918, Austro-Hongaria 3 November 1918, dan akhirnya Jerman juga menandatangani gencatan senjata pada tanggal 11 November 1918, yang mengakhiri seluruh *Perang Dunia I*.

Konferensi Perdamaian Paris pada tanggal 1 Januari 1919, digelar untuk menyusun rencana tindak lanjut penghentian perang secara

total, yang salah satu hasilnya adalah pembentukan *Liga Bangsa Bangsa*.

Perjanjian Versailles pada tanggal 7 Mei 1919 adalah implementasi dari penghentian formal dari *Perang Dunia I*, yang di tandatangi oleh Jerman pada tanggal 28 Juni 1919, Austria 10 September 1919, Bulgaria 27 November 1919, dan Turki Utsmani 10 Agustus 1920. Dengan ditandatanganinya perjanjian ini, maka usai sudah perang besar yang telah berjalan selama 5 tahun, beserta segala dampaknya.

12.3.2. Perang Dunia II (1939 - 1945)

Perang Dunia II adalah perang global yang berlangsung dari tahun 1939 sampai dengan tahun 1945. Perang ini melibatkan banyak sekali negara di dunia, termasuk semua kekuatan besar yang membentuk dua aliansi militer yang saling bertentangan, yaitu *Blok Sekutu* dan *Blok Poros*. Perang ini merupakan perang terluas dalam sejarah dimana seluruh kemampuan ekonomi, industri, dan ilmiah diberdayakan untuk keperluan perang, sehingga menghapus perbedaan antara sumberdaya sipil dan militer. Dengan korban jiwa mencapai 50 sampai 70 juta jiwa, termasuk pembunuhan *holocaust* dan akibat penggunaan senjata nuklir, menjadikan perang ini merupakan konflik paling mematikan sepanjang sejarah umat manusia.

Perang Dunia II tak dapat dipisahkan dari *Perang Dunia I* yang terjadi sebelumnya, yang telah menimbulkan perubahan besar pada peta politik di Eropa. Terutama Jerman, sebagai negara utama dari *Aliansi Sentral* pada *Perang Dunia I*, yang merasa tidak puas oleh karena sesuai *Perjanjian Versailles (1919)* harus kehilangan 13% teritorial negaranya, serta seluruh wilayah koloninya di luar Jerman. Sementara itu negara-negara baru terbentuk dengan runtuhnya Austro-Hongaria dan Kesultanan Turki Utsmani, salah satunya adalah Uni Sovyet yang berhaluan komunis, yang menggantikan Kekaisaran Rusia.

Di Jerman, Partai Nazi yang dipimpin *Adolf Hitler* berupaya mendirikan pemerintahan fasis. *Adolf Hitler*, yang gagal dalam upayanya menggulingkan pemerintahan Jerman pada tahun 1923, akhirnya berhasil menjadi Kanselir Jerman pada tahun 1933, kemudian melakukan revisi orde baru yang radikal dan memulai kampanye persenjataan kembali. *Hitler* menolak *Perjanjian Versailles*

dan Locarno dengan melakukan re-militerisasi Rhineland pada bulan Maret 1936.

Blok Poros tumbuh dari upaya diplomatik Jerman, Italia dan Jepang untuk mengamankan kepentingan ekspansionis mereka pada pertengahan tahun 1930-an. Berawal dari perjanjian yang ditandatangani oleh Jerman dan Italia pada tahun 1936, dimana Benito Mussolini, pemimpin Italia waktu itu, menyatakan pada tanggal 1 November 1936 bahwa semua negara-negara Eropa akan mulai berputar pada poros Roma-Berlin, sehingga tercipta istilah Axis atau Poros. Secara bersamaan, langkah kedua dilakukan melalui penandatanganan Pakta Anti-Komintern pada bulan November 1936, yang merupakan perjanjian anti-komunis antara Jerman dan Jepang, dimana Italia bergabung dengan pakta ini pada tahun 1937. Berikutnya Poros Roma-Berlin berkembang menjadi aliansi militer pada tahun 1939 melalui Pakta Baja, dengan Pakta Tripartit (1940) yang mengarah kepada integrasi tujuan militer antara Jerman, Italia dan Jepang. Hungaria bergabung dengan Blok Poros pada tanggal 20 November 1940, disusul Rumania pada tanggal 23 November 1940, kemudian Slovakia pada tanggal 24 November, Bulgaria pada tanggal 1 Maret 1941 dan Yugoslavia pada tanggal 25 Maret 1941.



Gambar 12.4. : Negara-negara yang terlibat dalam Perang Dunia II

Seperti yang disepakati secara umum, *Perang Dunia II* diawali dengan invasi Jerman ke Polandia pada tanggal 1 September 1939, diikuti dengan pernyataan perang Inggris dan Perancis terhadap Jerman 2 hari kemudian. Namun pendapat lain menyatakan, bahwa perang sesungguhnya telah dimulai dengan pendudukan Jepang atas Manchuria pada tanggal 7 Juli 1937. Sedangkan tanggal lainnya yang sering juga dipakai sebagai awal *Perang Dunia II*, adalah invasi Italia ke Abisinia pada tanggal 3 Oktober 1935. Berikutnya Jerman menyerbu Prancis, Belgia, Belanda, dan Luksemburg secara blitzkrieg pada tanggal 10 Mei 1940.

Pernyataan perang Inggris dan Perancis disambut oleh Italia, sebagai negara sahabat Jerman, dengan pernyataan perang pada bulan Juni 1940. Maka dengan segera perang menyebar ke seluruh kawasan Eropa. Dan pasukan gabungan Italia dan Jerman mampu menaklukkan pasukan Perancis tanggal 22 Juni 1940.

Di Asia Timur, serangan terhadap pangkalan militer Amerika Serikat *Pearl Harbor* di Hawaii, dilakukan oleh Angkatan Laut Jepang pada hari Minggu pagi, 7 Desember 1941 dianggap sebagai awal dari *Perang Dunia II* di *front timur*, meskipun beberapa invasi Jepang sesungguhnya telah dilakukan sebelumnya. Serangan ini setidaknya melibatkan 353 pesawat tempur, pesawat pembom, dan pesawat torpedo Angkatan Laut Jepang, yang berhasil menenggelamkan 3 kapal penjelajah, 3 kapal perusak, 1 kapal latihan anti pesawat udara, dan 1 kapal penyebar ranjau milik Amerika Serikat. Serangan ini juga mengakibatkan 188 pesawat terbang Amerika Serikat rusak atau hancur, serta mengakibatkan 2403 korban jiwa dan 1178 korban luka. Setelah peristiwa ini, Jepang baru menyatakan perang terhadap Amerika Serikat, dan memulai kampanye militernya di Asia-Pasifik Raya. Serangan ini mengawali keterlibatan Amerika Serikat dalam *Perang Dunia II* di *front timur*, yang disebut juga sebagai *Perang Pasifik*.

Blok Sekutu merupakan kelompok negara dalam *Perang Dunia II* yang berlawanan dengan *Blok Poros*. Pada awalnya blok ini terdiri dari negara-negara di Eropa yang mengalami invasi dari negara-negara *Blok Poros*. Namun sejak penyerangan Jepang ke Pearl Harbor, Amerika Serikat beserta banyak negara lainnya bergabung kedalam *Blok Sekutu*.

Tabel 12.1. : Negara-negara *Blok Sekutu* sebelum penyerangan Pearl Harbor

No	Negara	Tanggal bergabung	Alasan/penyebab bergabung dengan blok sekutu
1	Polandia	1 September 1939	Penyerangan Jerman Nazi terhadap Polandia
2	Prancis	3 september 1939	Penyerangan Jerman Nazi terhadap Polandia
3	Inggris	3 September 1939	Penyerangan Jerman Nazi terhadap Polandia
4	Norwegia	8 April 1940	
5	Belgia	10 Mei 1940	Penyerangan Jerman Nazi terhadap Belgia
6	Luksemburg	10 Mei 1940	Penyerangan Jerman Nazi terhadap Luksemburg
7	Belanda	10 Mei 1940	Penyerangan Jerman Nazi terhadap Belanda
8	Yunani	28 Oktober 1940	Penyerbuan Italia ke Yunani
9	Yugoslavia	6 April 1941	Penyerbuan Poros ke Yugoslavia
10	Uni Soviet	22 Juni 1941	Invasi Jerman Nazi terhadap USSR

Sumber : <https://worldbattlepedia.wordpress.com/2018/02/03/blok-sekutu-perang-dunia-ii/>

Bergabungnya Amerika Serikat kedalam *Blok Sekutu*, berangsur-angsur menggeser dominasi *Blok Poros* di medan perang *front barat*, dan Jepang di *front timur*.

Di *front barat* Amerika Serikat bergabung dengan *Blok Sekutu* dalam operasi *Overlord* atau *Normandia*, untuk membebaskan Perancis, pada tanggal 6 Juni 1944. Tentara Amerika Serikat mendesak kearah Berlin dari arah barat, ketika tentara Sovyet dibawah Marsekal Zhukov mendesak dari arah timur pada tanggal 16 April 1945. Sehingga pada tanggal 25 April 1945 tentara ke 12 pimpinan Jenderal Bradley dan pasukan Soviet pimpinan Marsekal Konevs bertemu di Torgau- Elbe.

Akhirnya, pada tanggal 2 Mei, akhirnya pasukan Jerman di Berlin menyerah. Berikutnya, tanggal 7 Mei 1945, di markas besar Jenderal Dwight D. Eisenhower di Reims, Perancis, delegasi Jerman menyetujui penyerahan tanpa syarat, dan Dönitz pengganti Adolf Hitler, menyampaikan pesan perletakan senjata pada tanggal 8 Mei pukul 23:00. Proses tersebut diulang di Berlin dihadapan Marsekal Zhukov, dan pada malam hari menjelang tanggal 9 Mei, dokumen

penyerahan Jerman ditandantangani. Maka *Perang Dunia II* di *front barat* Eropa berakhir, setelah menimbulkan lebih dari 60 juta korban jiwa.

Di *front timur*, pada tanggal 6 Agustus 1945, Bomber B-29 Enola Gay milik Amerika Serikat, yang dipiloti oleh Kolonel Paul Tibbets Jr, menjatuhkan bom atom (*Little Boy*) diatas kota Hiroshima, yang dengan cepat menghancurkan kota tersebut. Dua hari berikutnya pada tanggal 8 Agustus 1945, Uni Soviet menyatakan perang terhadap Jepang, dan melancarkan serangan besar terhadap Manchuria yang diduduki Jepang, dalam Operasi Badai Agustus. Tanggal 9 Agustus 1945, pesawat Bomber B-29 Superfortress Bock's Car milik Amerika Serikat yang dipiloti oleh Mayor Charles Sweeney, kembali menjatuhkan bom atom (*Fat Man*) diatas kota Nagasaki, yang mengakibatkan puluhan hingga jutaan korban jiwa dan menghancurkan kota tersebut dengan cepat. Akibatnya, Jepang mengalami kelumpuhan secara militer, dan mulai menarik pasukannya dari negara-negara yang dikuasainya, termasuk Indonesia. Jepang akhirnya menyerah tanpa syarat kepada *Blok Sekutu* pada tanggal 14 Agustus 1945, dan menandatangani surat pernyataan menyerah pada tanggal 2 September 1945 di atas kapal USS Missouri di Teluk Tokyo.

Akhir *Perang Dunia II* ditandai dengan menyerahnya Jepang dan Jerman kepada *Blok Sekutu*. Namun demikian, beberapa hal penting perlu dicatat pada akhir perang ini :

- *Perang Dunia II* menunjukkan ketidak efektifan organisasi *Liga Bangsa Bangsa*, dalam menjalankan fungsi menjaga perdamaian dunia.
- *Holocaust*, terjadi pembantaian besar-besaran manusia, yang dilakukan oleh Jerman terhadap para tahanan di berbagai kamp konsentrasi.
- Untuk pertama kalinya dalam perang ini, digunakan senjata pemusnah masal berupa bom atom.
- Akhir *Perang Dunia II* merupakan titik awal dari dimulainya *Perang Dingin*. Yaitu konflik antara kelompok negara-negara berhaluan sosialis-komunis dengan kapitalis-liberal, yang telah ada sebelumnya namun mereda selama perang.

12.4. Perang Dingin

Selepas *Perang Dunia II* yang berakhir pada tahun 1945, hubungan Amerika Serikat dan Uni Soviet merenggang, dimana keduanya tidak lagi bersekutu oleh karena perbedaan kepentingan. Amerika Serikat mencoba membangun kembali negeri-negeri yang hancur akibat perang dengan ideologi dan ekonomi *liberal-kapitalistik*. Sedangkan Uni Soviet berusaha memperluas pengaruh *komunisme* ke seluruh dunia. Beragam cara ditempuh keduanya, antara lain dengan bantuan ekonomi dan propaganda politik, dengan tujuan beroleh kekuatan dari banyak negara untuk mengukuhkan keadikuasaannya.

Keduanya terlibat konflik meski tak secara terbuka, yang dikenal dengan *Perang Dingin*. Dalam *The Age of Containment*, David Rees menyebut istilah ini kali pertama diajukan *Bernard Mannes Baruch* (1870-1965), penasihat Presiden Amerika Harry Truman pada tanggal 16 April 1947. Dihadapan *House of Representatives* di South Carolina-Amerika Serikat, *Baruch* mengatakan “Hari ini kita berada di tengah *Perang Dingin*. Musuh kita (*Soviet-Komunisme*) dapat ditemukan baik diluar maupun didalam negeri”. Pernyataan tersebut kemudian dimuat dalam koran *New York Herald Tribune*, yang kemudian mempopulerkannya pada bulan September 1947

Perang Dingin (bahasa Inggris: *Cold War*, bahasa Rusia: *холодная война́*, *kholodnaya voyna*, 1947-1991) adalah sebutan bagi suatu periode dimana terjadi ketegangan politik dan militer antara Dunia Barat, yang dipimpin oleh Amerika Serikat, yang kemudian disebut *Blok Barat*, dengan Dunia Komunis, yang dipimpin oleh Uni Soviet beserta negara-negara satelitnya, yang kemudian disebut *Blok Timur*. Peristiwa ini dimulai ketika *Blok Sekutu* mengalahkan Jerman pada Perang Dunia II, dimana kemudian Amerika Serikat dan Uni Soviet menjadi dua negara adidaya dengan perbedaan ideologi, ekonomi, dan militer yang besar.

Proses pemulihan pasca *Perang Dunia II* di Eropa yang difasilitasi Amerika Serikat melalui *Marshall Plan*, ditandingi Uni Soviet dengan membentuk *COMECON* bersama sekutu Timurnya. Dalam bidang militer, Amerika Serikat membentuk aliansi militer NATO pada tahun 1949, sedangkan Uni Soviet juga membentuk *Pakta Warsawa* pada tahun 1955.

Walaupun kedua belah pihak tidak pernah terlibat dalam aksi militer secara langsung, namun masing-masing pihak memiliki dan mengembangkan senjata nuklir yang dapat menyebabkan kehancuran besar. Kedua belah pihak berkompetisi melalui koalisi militer, penyebaran ideologi, perlombaan senjata nuklir, dan persaingan teknologi tinggi lainnya seperti penjelajahan ruang angkasa, termasuk persaingan dalam berbagai perang proksi. Hal tersebut meningkatkan ketegangan yang tinggi, yang meletup menjadi berbagai konflik regional, seperti Blokade Berlin (1948-1949), Perang Korea (1950-1953), Krisis Terusan Suez (1956), Perang Vietnam (1959-1975), dan sebagainya.



Gambar 12.5. : Negara Blok Barat dan Blok Timur pada masa Perang Dingin di Eropa

Pada pertengahan 1980-an, Presiden Soviet *Mikhail Gorbachev*, memperkenalkan kebijakan *perestroika* (rekonstruksi, reorganisasi) dan *glasnost* (keterbukaan). Kebijakan tersebut berdampak pada gelombang revolusi damai negara-negara satelit Uni Sovyet, yang berakhir dengan bubarnya negara Uni Sovyet pada tahun 1991. Peristiwa ini oleh banyak kalangan dianggap sebagai berakhirnya *Perang Dingin*, walaupun awal mulainya *Perang Dingin* pun tidak pernah diketahui dengan pasti. Namun hal tersebut belum berarti berakhirnya konflik, oleh karena bagaimanapun masih ada negara-negara yang masih mempertahankan ideologi *sosialis-komunis* nya, seperti China, Vietnam, dan Korea Utara.

12.4.1. Perlombaan Senjata

Pengalaman dalam *Perang Dunia I* dan *Perang Dunia II*, bagaimanapun telah mengajarkan bahwa posisi tawar (*bargaining power*) dalam percaturan politik dunia, tidak lagi hanya ditentukan oleh penguasaan sumberdaya alam, ekonomi ataupun geografis, namun ditentukan pula oleh penguasaan teknologi, khususnya teknologi persenjataan. Hal tersebut sangat disadari oleh kedua blok yang bersaing pasca *Perang Dunia II*, sehingga masing-masing berupaya untuk meningkatkan penguasaan teknologi kesenjataannya.

Keberhasilan *Proyek Manhattan* yang menjatuhkan bom atom di Hiroshima dan Nagasaki, kemudian memicu berbagai pihak yang bersengketa untuk meningkatkan penguasaan teknologi persenjataannya, terutama senjata nuklir. Untuk mengimbangi *Proyek Manhattan*, Uni Sovyet sebagai negara *Blok Timur*, melakukan uji peledakan bom atom pada tahun 1949, yang kemudian diimbangi oleh Amerika Serikat dari *Blok Barat* pada tahun 1952.

Tabel 12.2. : Daftar negara-negara yang memiliki senjata nuklir.

Negara-negara yang memiliki senjata nuklir		
Negara	Hulu ledak aktif/total*	Tahun pertama uji coba
 Amerika Serikat	5.735/9.960 ^[2]	1945 (" <i>Trinity</i> ")
 Rusia (bekas Uni Soviet)	5.830/16.000 ^[3]	1949 (" <i>RDS-1</i> ")
 Inggris	<200 ^[4]	1952 (" <i>Hurricane</i> ")
 Perancis	350 ^[5]	1960 (" <i>Gerboise Bleue</i> ")
 China	130 ^[6]	1964 (" <i>596</i> ")
 India	40-50 ^[7]	1974 (" <i>Smiling Buddha</i> ")
 Pakistan	30-52 ^[8]	1998 (" <i>Chagai-I</i> ")
 Korea Utara	1-10 ^[9]	2006 ^[10]
Negara-negara yang dipercayai memiliki senjata nuklir		
 Israel	75-200 ^[11]	tidak ada atau 1979

Sumber : https://id.wikipedia.org/wiki/Daftar_negara_dengan_senjata_nuklir

Pengembangan senjata nuklir kemudian juga dilakukan oleh berbagai negara dari kedua belah blok yang bersaing. Tercatat Inggris, Perancis, China, India, Pakistan, bahkan Korea Utara dan Israel, pernah melakukan uji coba peledakan bom nuklir.

Keberhasilan Uni Sovyet membuat roket yang dapat digunakan sebagai pelontar *ICBM* (*intercontinental ballistic missile*) pada tahun 1957, diikuti oleh Amerika Serikat dari *Blok Barat* setahun berikutnya, dan berlanjut dengan pengujian bom Hidrogen oleh Uni Sovyet. *Bom Hidrogen* adalah bentuk pengembangan lebih lanjut dari senjata nuklir, dimana Amerika Serikat dan beberapa negara lainnya, seperti Inggris, Perancis, Israel, Pakistan, India, Rusia, dan Cina terkonfirmasi pernah melakukan uji coba. Catatan terakhir, Israel melakukan uji coba pada 1970-an, sedangkan Rusia diketahui terakhir kali melakukan uji coba *Bom Hidrogen* pada tahun 1991 dan Inggris pada tahun berikutnya.

Sementara itu Perancis, Pakistan, dan Cina tercatat melakukan hal sama pada tahun 1996, sedangkan India terakhir kali melakukan uji coba pada tahun 1998. Bahkan Korea Utara diduga juga telah melakukan uji coba *Bom Hidrogen*, sehingga berpotensi menimbulkan bencana teknologi yang besar.

Tsar Bomba (Царь-бомба) yang berarti *Kaisar Dari Segala Bom* adalah bom nuklir yang berdaya ledak 50 Megaton TNT, diciptakan oleh Uni Soviet pada proyek "*Иван*" (*Ivan*), dan di uji coba pada tanggal 30 Oktober 1961, di sekitar pulau *Novaya Zemlya- Laut Arktik*, disekitar *Mityushikha Bay (Sukhoy Nos Zona C)*. Pada sisi lain, keberhasilan Uni Soviet membuat roket yang dapat digunakan sebagai pelontar *ICBM (intercontinental ballistic missile)* pada tahun 1957, diikuti oleh Amerika Serikat dari *Blok Barat* setahun berikutnya.

Sistem *MIRV (multiple independently-targeted reentry vehicle)*, peluru kendali yang dapat membawa banyak hulu ledak, dan masing-masing dapat diarahkan kepada sasaran yang berbeda, dikembangkan pada tahun 1970an, dimana Amerika Serikat memilikinya dengan nama *MX* atau *Peacekeeper*, sedangkan *Uni Soviet* memilikinya dengan nama *SS-18*.

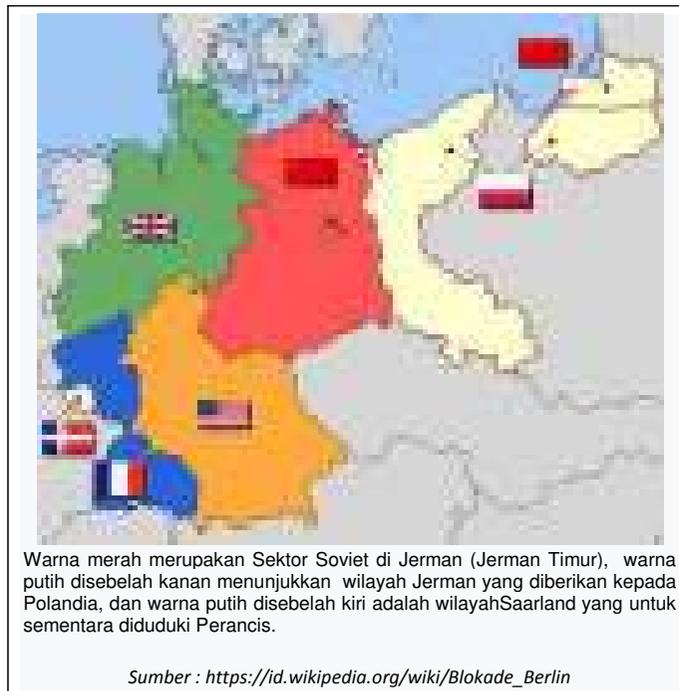
12.4.2. Blokade Berlin (24 Juni 1948 – 12 Mei 1949)

Perjanjian Postdam atau *Konferensi Potsdam* merupakan perjanjian yang dibuat dalam pertemuan antara Amerika Serikat, Inggris, dan Uni Soviet di Potsdam-Jerman, pada tanggal 17 Juli sampai dengan 2 Agustus 1945. Perjanjian ini merupakan simbol berakhirnya *Perang Dunia II*, yang telah berlangsung dari tahun 1939 sampai 1945.

Dalam *Perjanjian Postdam* tersebut, ditetapkan beberapa hal sebagai berikut :

- Wilayah Jerman dibagi menjadi empat wilayah pendudukan.
- Jerman Timur diduduki oleh Uni Soviet.
- Jerman Barat diduduki oleh Amerika Serikat, Inggris dan Perancis.
- Kota Berlin yang berada di wilayah pendudukan Uni Soviet, dibagi menjadi Berlin Barat yang dikuasai oleh Amerika Serikat, Inggris dan Perancis, dan Berlin Timur yang dikuasai oleh Uni Soviet.

- Danzig, wilayah disebelah timur sungai Oder, dan Niese, diserahkan kepada Polandia.



Gambar 12.6. : Pembagian wilayah Jerman berdasarkan *Perjanjian Postdam (1945)*

Perjanjian Postdam dapat dianggap sebagai titik awal peralihan, dari konflik *Blok Sekutu vs Blok Poros* pada *Perang Dunia II*, menjadi konflik *Blok Barat vs Blok Timur* pada masa *Perang Dingin*. Yaitu ketika Uni Sovyet sebagai bagian dari *Blok Timur* melakukan blokade terhadap Berlin Barat yang dikuasakan kepada *Blok Barat* pada tanggal 24 Juni 1948, dengan dalih untuk memaksa Sekutu Barat memberi izin Uni Sovyet, untuk memasok kebutuhan bahan pokok Berlin Barat, sehingga Uni Sovyet dapat secara penuh mengendalikan seluruh kota Berlin. Dan sebagai reaksi atas diberlakukannya reformasi ekonomi, dan ditetapkannya *Deutsche Mark* sebagai mata uang baru di Jerman Barat oleh Sekutu Barat (Amerika Serikat, Inggris dan Perancis). Yaitu dengan memutuskan semua hubungan rel kereta api, air, dan jalan darat menuju Berlin Barat, sehingga menjadikannya sebagai krisis internasional besar pertama pada masa *Perang Dingin*.

Sebagai tanggapan, Sekutu Barat menyelenggarakan operasi *Jembatan Udara* ke Berlin Barat, untuk memasok berbagai kebutuhan pokok bagi penduduk Berlin Barat. Angkatan Udara Inggris (*Royal Air Force*), dan Angkatan Udara Negara Persemakmuran lainnya serta Angkatan Udara Amerika Serikat (*United States Air Force*) dikerahkan untuk menunjang operasi ini. Termasuk mengoperasikan 3 bandar udara di Berlin Barat, yaitu *Tegel* di Sektor Perancis, *Gatow* di Sektor Britania, dan *Tempelhof* di Sektor Amerika Serikat. Hal tersebut telah menjadikan blokade Uni Sovyet menjadi tidak efektif, sehingga akhirnya dihentikan pada tanggal 12 Mei 1949.

Namun diakhirinya blokade bukan berarti berakhirnya konflik. Pada tanggal 13 Agustus 1961, pemerintah Jerman Timur yang berada dibawah kendali Uni Sovyet, membangun *Tembok Berlin*, berupa tembok beton setinggi 4 meter sepanjang 155 km, yang memisahkan kawasan Berlin Barat dengan Berlin Timur, sehingga memutuskan akses komunikasi penduduk di kedua belah bagian.



Gambar 12.7. : Peta Tembok Berlin

Namun pada tahun 1989 terjadi perubahan politik radikal di kawasan *Blok Timur*, dimana pengaruh politik *sosialis-komunis* Uni Sovyet mulai menyusut, sehingga perbatasan Berlin pun mulai dibuka pada tanggal 9 November 1989, berlanjut dengan diruntuhkannya

Tembok Berlin pada tanggal 13 Januari 1990. Dan akhirnya, Jerman Barat dan Jerman Timur melakukan *re-unifikasi*, kembali menjadi satu negara pada tanggal 3 Oktober 1990.

12.4.3. Perang Korea (1950 - 1953)

Korea adalah jazirah di Asia Timur yang berbatasan dengan China. Kekaisaran Jepang menguasai Kekaisaran Korea (1897-1910) yang saat itu dipimpin oleh Kaisar Gojong, setelah mengalahkan Dinasti Qing dari China pada Perang China-Jepang Pertama (1894-1896). Kemudian setelah mengalahkan Kekaisaran Rusia pada perang Rusia-Jepang (1905), Jepang menjadikan semenanjung Korea sebagai wilayah protektoratnya melalui *Perjanjian Eulsa* (1905), dilanjutkan dengan meng-aneksasinya melalui Perjanjian Aneksasi Jepang-Korea (1910). Maka, sejak tahun 1910 sampai dengan 1945, Korea berada di bawah kendali Kekaisaran Jepang. Namun banyak kaum nasionalis dan intelektual Korea yang melarikan diri, yang diantaranya membentuk Pemerintahan Korea dalam pengasingan di Shanghai pada tahun 1919, dipimpin oleh *Syngman Rhee*.



Gambar 12.8. : Pembagian semenanjung Korea berdasarkan *Konferensi Postdam*

Kekalahan Jepang dalam *Perang Dunia II* pada tahun 1945 menyebabkan semenanjung Korea lepas dari kekuasaan Jepang, dan dikuasai oleh *Aliansi Sekutu*, yang terdiri dari Amerika Serikat dan Uni Soviet. Pada *Konferensi Potsdam (Juli – Agustus 1945)*, tanpa melibatkan pihak Korea, *Aliansi Sekutu* secara sepihak memutuskan untuk membagi semenanjung Korea menjadi 2 bagian. Kedua bagian tersebut dibatasi oleh garis 38^o LU, dimana Uni Soviet menguasai bagian utara, sedangkan Amerika Serikat pada bagian selatannya.

Korea Selatan mengumumkan secara resmi konstitusi politik nasional pada tanggal 17 Juli 1948, dan menetapkan *Syngman Rhee* sebagai presiden pada tanggal 20 Juli 1948. Dilanjutkan dengan mendirikan Republik Korea Selatan pada tanggal 15 Agustus 1948. Sementara pada zona pendudukan utara, Uni Soviet mendirikan pemerintahan Korea Utara yang dipimpin oleh *Kim Il-sung*. Maka dimulailah ketegangan antara kedua belah pihak, karena Korea Utara dengan dukungan Uni Soviet menganut ideologi *sosialis-komunis (Blok Timur)*, sedangkan Korea Selatan dengan dukungan Amerika Serikat ber ideologi *kapitalis-liberal (Blok Barat)*.

Ketegangan politik tersebut, meletus menjadi peperangan yang dimulai dengan invasi Tentara Korea Utara menyeberangi garis perbatasan 38^o LU, dengan dibantu tembakan artileri pada hari Minggu pagi tanggal 25 Juni 1950. Invasi ini segera mendapat respon dari Dewan Keamanan PBB yang mengecamnya dengan suara bulat melalui Resolusi No 82 DK PBB, yang dilanjutkan dengan Resolusi No 83 DK PBB pada tanggal 27 Juni 1950, yang merekomendasikan negara anggota PBB untuk memberikan bantuan militer kepada Republik Korea.

Perang Korea (bahasa Korea : 한국전쟁) adalah konflik antara Korea Utara dan Korea Selatan yang terjadi sejak 25 Juni 1950 sampai dengan 27 Juli 1953. Perang ini juga disebut sebagai *perang yang dimandatkan (proxy war)* antara Amerika Serikat bersama sekutu PBBnya, dengan Republik Rakyat Tiongkok bekerja sama dengan Uni Soviet, walau sesungguhnya adalah perang antara Korea Utara dan Korea Selatan.

Di Korea Selatan perang ini disebut sebagai Perang 6-2-5 (*yuk-i-o jeonjaeng*), mengacu pada tanggal dimulainya perang yaitu 25 Juni. Sedangkan di Korea Utara, perang ini secara resmi disebut sebagai *choguk haebang chönjaeng* (perang pembebasan tanah air), atau

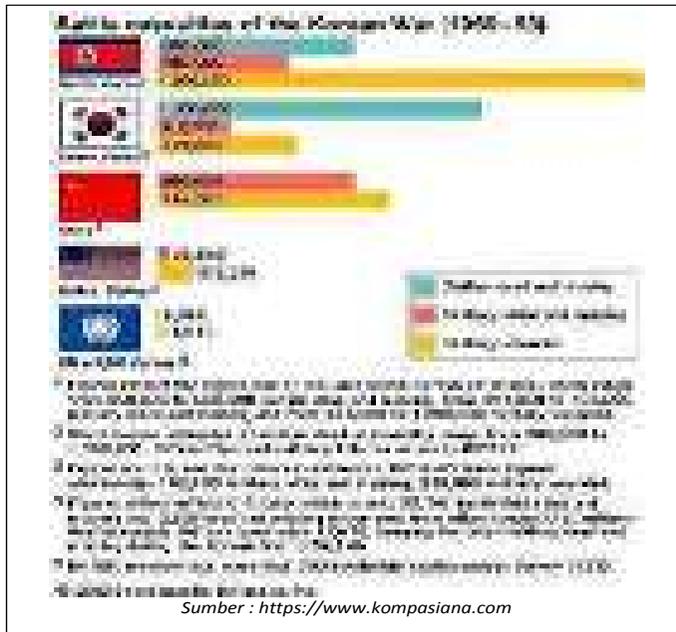
juga disebut *Chosŏn chŏnjaeng* (Perang *Joseon*, dimana *Joseon* adalah sebutan Korea Utara untuk tanah Korea). Sekutu utama Korea Selatan adalah Amerika Serikat, Kanada, Australia, dan Inggris, serta berbagai negara yang mengirimkan tentaranya atas nama PBB. Sedangkan sekutu Korea Utara adalah Republik Rakyat China yang menyediakan bantuan berupa kekuatan militer, dan Uni Soviet yang menyediakan penasihat perang, pilot pesawat, dan juga persenjataan untuk pasukan China dan Korea Utara.

Keterlibatan Amerika Serikat secara langsung dalam *Perang Korea* dimulai pada tanggal 5 Juli 1950, ketika *Task Force Smith* menyerang Korea Utara di Osan. Berikutnya pada tanggal 1 Oktober 1950, pasukan PBB berhasil mendesak tentara Korea Utara ke utara, melewati garis batas 38^o LU, sementara Angkatan Darat Amerika Serikat bersama dengan tentara Korea Selatan menyerang ke bagian Barat dan berhasil merebut Pyongyang, ibu kota Korea Utara, pada tanggal 19 Oktober 1950.

Setelah menghadapi dua pertempuran kecil pada tanggal 25 Oktober 1950, tentara China terlibat dalam pertempuran besar pertama dengan Amerika pada tanggal 1 November 1950, dimana tentara China mengepung dan menyerang pasukan PBB dalam Pertempuran Unsan. Sementara itu pada akhir November 1950, tentara China menyerang dan berhasil mengalahkan beberapa divisi tentara Korea Selatan dan tentara PBB di sepanjang Sungai Chongchon. Tentara China juga berhasil mendesak pasukan PBB dari timurlaut Korea Utara, hingga melewati perbatasan 38^oLU. Bahkan tentara China dan Korea Utara berhasil menguasai Seoul, ibukota Korea Selatan, pada tanggal 4 Januari 1951, meskipun kemudian mundur oleh karena kehabisan logistik.

Sejumlah besar korban yang berjatuh pada akhirnya mendesak kedua belah pihak yang bersengketa mengupayakan gencatan senjata. Perundingan gencatan senjata dimulai tanggal 10 Juli 1951 di Kaesong-Korea Utara bagian selatan, yang berlangsung alot selama dua tahun, dan kemudian berlanjut di Panmunjon di wilayah perbatasan antara kedua Korea. Akhirnya pada tanggal 27 Juli 1953, proposal gencatan senjata yang diajukan oleh India disetujui oleh Korea Utara, China, dan tentara PBB, dengan batas pada garis paralel 38^o LU. Dimana dalam persetujuan tersebut para pihak yang terlibat sepakat membentuk *Zona Demiliterisasi Korea*.

Tabel 12.3. : Jumlah korban *Perang Korea* selama 1950-1953.



Walaupun sejumlah besar korban telah berjatuhan dikedua belah pihak, namun kesepakatan gencatan senjata tak kunjung dilanjutkan dengan perdamaian, sehingga status kedua Korea masih berada dalam kondisi perang. Perang terbuka memang tak pernah terjadi lagi, namun perang psikologis masih terus berjalan dalam bentuk berbagai provokasi. Korea Utara ber kali-kali melakukan provokasi dengan melakukan pengujian senjata nuklir, dan peluncuran peluru kendali balistik. Sementara itu Korea Selatan membalasnya dengan melakukan latihan perang bersama Amerika Serikat dan sekutunya.

12.4.4. Perang Vietnam (1954 – 1975)

Perang Vietnam merupakan perang yang meletus mulai dari 1955 hingga 1975 di Vietnam. Perang ini merupakan salah satu letupan konflik ideologi *Perang Dingin* antara dua blok ideologi, yaitu *Blok Barat (kapitalis-liberal)* dengan *Blok Timur (sosialis-komunis)*, yang di-representasikan oleh Republik Vietnam atau Vietnam Selatan (*Blok Barat*) melawan Republik Demokratik Vietnam atau Vietnam Utara (*Blok Timur*). Vietnam Selatan didukung oleh negara-negara *Blok Barat* seperti Amerika Serikat, Thailand, Australia, Filipina, Selandia Baru dan berbagai negara barat, sedangkan Vietnam Utara didukung oleh

negara-negara *Blok Timur* seperti Uni Soviet, Mongolia, Kuba, Korea Utara, Republik Rakyat Cina dan beberapa negara anggota *Blok Timur* lainnya.

Perang Vietnam di latar belakang pembagian Vietnam menjadi Vietnam Selatan dan Vietnam Utara dalam *Konferensi Jenewa (1954)*, dimana Vietnam Selatan diselenggarakan oleh Negara Vietnam, sedangkan Vietnam Utara diselenggarakan oleh *Viet Minh*, yang dipimpin oleh tokoh pergerakan nasional dari Vietnam, *Ho Chi Minh*.



Gambar 12.9. : Pembagian Vietnam menjadi Vietnam Utara dan Vietnam Selatan

Namun *Viet Minh* dibawah pimpinan *Ho Chi Minh* menolak hasil *Konferensi Jenewa*, dan menginginkan Vietnam tetap menjadi satu negara. Keinginan ini didukung oleh negara-negara *Blok Timur*, yaitu Uni Sovyet dan China, sedangkan Amerika Serikat sebagai negara *Blok Barat*, berupaya mempertahankan Vietnam Selatan oleh karena tak ingin kepentingan ideologinya terganggu.

Tak diketahui dengan pasti kapan *Perang Vietnam* dimulai, namun diam-diam pasukan gerilya Vietnam Utara (*Vietkong*) telah mulai melakukan infiltrasi ke wilayah Vietnam Selatan dan melakukan proganda. Hal ini sulit untuk di-identifikasi oleh pasukan Amerika Serikat, oleh karena secara etnis mereka sama dengan penduduk Vietnam Selatan.

Vietkong diam-diam membangun jalur terowongan bawah tanah dan berbagai jebakan ranjau di wilayah Vietnam Selatan. *Terowongan Cu Chi* misalnya, dapat digunakan untuk tempat istirahat, ruang perawatan, penyimpanan senjata dan persembunyian. Terowongan ini cukup kompleks, namun fasilitasnya setara dengan barak militer. Terowongan ini juga berguna mengontrol lokasi tempur, memberi bantuan dengan cepat serta bergerak bebas dan susah untuk dideteksi. Lintasan pasokan logistik tentara *Vietkong* yang berada di garis depan, dibuat melalui jalur hutan lebat dan pegunungan di perbatasan Laos dan Kamboja yang sukar dideteksi, bahkan dapat menjangkau wilayah Vietnam Selatan, dikenal sebagai *Jejak Ho Chi Minh (Ho Chi Minh Trail)*. Namun demikian insiden antara kedua belah pihak masih terbatas pada perang gerilya, belum berkembang menjadi perang terbuka.

Untuk menghadapi taktik perang gerilya, Amerika Serikat menggelar program *Perang Herbisida*, dengan tujuan mematikan tanaman-tanaman hutan yang merupakan tempat persembunyian pasukan *Vietkong*, yang dinamakan sebagai *Operation Ranch Hand*. Antara tahun 1962-1971 pesawat angkatan udara Amerika Serikat telah menebarkan 18,2 juta galon herbisida berupa *Orange Agent*, untuk disemprotkan ke belantara hutan Vietnam. *Orange Agent* adalah herbisida yang mengandung *picloram* dan *asam cacodylic*, yaitu sejenis senyawa arsenik yang dapat menimbulkan efek kekeringan cepat pada dedaunan, namun juga membunuh fauna yang hidup di dalamnya. Belakangan Pemerintah Vietnam mengklaim bahwa 400 000 orang terbunuh atau cacat sebagai akibat efek samping *Orange Agent*, dan 500 000 anak-anak dilahirkan.

Serangan Tet (Tet Offensive - 30 Januari 1968) adalah perang terbuka pertama dalam serial *Perang Vietnam*, dimana terjadi penyerangan terbuka oleh batalyon Pasukan Bersenjata Pembebasan Rakyat (PLAF) atau *Vietkong* terhadap Tentara Republik Vietnam (ARVN) dari Vietnam Selatan dan pasukan Amerika Serikat di Saigon. Operasi ini disebut *Serangan Tet* oleh karena dilakukan bertepatan dengan malam 30 Januari - 31 Januari 1968, yang merupakan *Tết Nguyên Đán* (Tahun Baru Imlek). Serangan itu dilakukan dalam operasi-operasi militer sporadis yang berlangsung hingga tahun 1969, dan berhasil menduduki kedutaan besar Amerika Serikat di Saigon selama beberapa saat, walaupun kemudian dapat dipukul mundur.

Sejak *Serangan Tet* pada bulan Januari 1968, militer Amerika Serikat membentuk unit khusus yaitu *Task Force Baker (TFB)* yang beroperasi di beberapa desa di Provinsi Quang Ngai, yang ditengarai sebagai tempat mundurnya pasukan *Vietkong*. Pada tanggal 15 Maret 1968, *TFB* melakukan operasi penyerangan dan pembantaian di Desa My Lai, yang merupakan basis perjuangan Vietnam sejak era pendudukan Perancis. Namun peristiwa pembantaian My Lai akhirnya terbuka setelah *Seymour Hersh* membuat beberapa tulisan di *Dispatch News Service* pada bulan November 1969, yang memicu gelombang protes dan dalam negeri Amerika Serikat.

Perundingan damai di upayakan antara Amerika Serikat bersama Vietnam Selatan dengan Vietnam Utara, melalui Perundingan Paris pada tahun 1972. Namun mengalami kebuntuan, dengan adanya serangan mendadak *Vietkong* pada tanggal 3 April 1972, yang nyaris merebut kota Saigon. Hal ini dibalas dengan operasi pemboman Vietnam Utara oleh Amerika Serikat.

Kegagalan negosiasi damai pada tanggal 13 Desember 1972, kembali berlanjut dengan operasi pemboman. Sejumlah pesawat tempur B-52 dan jet tempur Amerika Serikat menjatuhkan lebih dari 20 ribu ton bom di Hanoi dan Haiphong, dimana Amerika Serikat kehilangan 15 unit pesawat tempur B-52 dan 11 unit pesawat lainnya selama serangan tersebut. Vietnam Utara mengklaim lebih dari 1.600 orang warga sipil tewas akibat gempuran tersebut. Pengeboman berlangsung hingga 29 Desember 1972, sehingga Vietnam Utara akhirnya sepakat untuk melanjutkan negosiasi damai. Beberapa pekan kemudian, Perjanjian Damai Paris ditandatangani pada tahun 1973, dan Amerika Serikat mulai melaksanakan program Vietnamisasi, yaitu menyerahkan seluruh tanggungjawab pertahanan negara kepada militer Vietnam Selatan. Dan *Perang Vietnam* pun mulai memasuki tahap akhir.

Selanjutnya tentara Vietnam Utara terus bergerak maju menuju Saigon sampai jarak kurang dari lima kilometer, sehingga akhirnya Presiden Vietnam Selatan, *Duong Van Minh*, menyerah tanpa syarat kepada Vietnam Utara pada tanggal 30 April 1975. Maka berakhirilah *Perang Vietnam* yang telah berlangsung selama dua puluh tahun, dengan diikuti *exodus* ribuan penduduk Vietnam Selatan ke berbagai negara. Selanjutnya pasukan Vietnam Utara mengubah nama Saigon menjadi *Ho Chi Minh City*, yang menandai bersatunya kembali dua

negara Vietnam, yang dikenal dengan nama *Republik Sosialis Vietnam* atau *Republik Rakyat Vietnam*.

Perang ini telah menguras ekonomi Amerika Serikat, diperkirakan mencapai 761 milyar US Dollar, dengan biaya tak terduga malah mencapai 1,4 trilyun US Dollar. Disamping itu, korban jiwa dan luka di kedua belah pihak mencapai jutaan Seperti yang ditaksir oleh Rudolph Joseph Rummel, profesor ilmu politik dari Universitas Indiana, Universitas Yale, dan Universitas Hawaii. Sedangkan dampak lingkungan yang diakibatkannya masih berlanjut ber tahun-tahun setelah usainya perang.

Tabel 12.4. : Perkiraan korban jiwa selama *Perang Vietnam (1954-1975)*

Kematian dalam Perang Vietnam (1954–75) per R.J Rummel (kecuali jika dinyatakan lain) [7]				
	Estimasi kematian yang rendah	Perkiraan tengah kematian	Estimasi kematian yang tinggi	Catatan dan komentar
Militer Vietnam dan Vietnam Utara tewas dalam perang sipil	533.000	1.062.000	1.489.000	termasuk sekitar 50.000 / 65.000 / 70.000 warga sipil yang terbunuh oleh pengeboman / penembakan AS / SVN [8]
Vietnam Selatan / AS / Korea Selatan perang militer dan perang sipil mati	429.000	741.000	1.119.000	termasuk 360.000 / 391/ 720.000 warga sipil [9]
Democide oleh Vietnam Utara / Viet Cong	131.000	214.000	302.000	25.000 / 50.000 / 75.000 terbunuh di Vietnam Utara, 106.000 / 164.000 / 227.000 terbunuh di Vietnam Selatan
Democide oleh Vietnam Selatan	57.000	89.000	284.000	Democide adalah pembunuhan orang oleh atau atas perintah pemerintah.
Democide oleh Amerika Serikat	4.000	6.000	10.000	Democide adalah pembunuhan orang oleh atau atas perintah pemerintah.
Democide oleh Korea Selatan	3.000	3.000	3.000	Rummel tidak memberikan estimasi menengah atau tinggi.
Subtotal Vietnam	1.156.000	2.115.000	3.207.000	
Orang Kamboja	273.000	273.000	273.000	Rummel memperkirakan 212.000 terbunuh oleh Khmer Merah (1967–1975), 60.000 terbunuh oleh AS dan 1.000 terbunuh oleh Vietnam Selatan (1967–1973). Tidak ada perkiraan yang diberikan untuk kematian yang disebabkan oleh Viet Cong / Vietnam Utara (1954-75). [10]
Laos	28.000	62.000	115.000	Sumber: [4]
Total kematian akibat perang: Vietnam, Kamboja, dan Laos (1954–75)	1.450.000	2.450.000	3.595.000	

Sumber : https://en.m.wikipedia.org/wiki/Vietnam_War_casualties

12.5. Perdamaian dan Upaya Peredaan Konflik

Tak dapat dipungkiri bahwa perang adalah *Bencana Teknologi*, yang secara spesifik merupakan *Bencana Kesengajaan Teknologi* terbesar bagi manusia, yang dalam perjalanan sejarah kehidupan manusia telah mengakibatkan korban yang sangat besar. Bahkan *Jean Pictet* sebagaimana dikutip oleh *Mochtar Kusumaatmadja*, menyatakan bahwa selama 3400 tahun sejarah tertulis, manusia hanya mengenal 250 tahun masa tanpa perang.

Dapat dikatakan bahwa perang adalah bentuk bencana ciptaan manusia sendiri, sehingga secara teknis seharusnya mudah untuk dihindari atau dicegah. Namun sesuai dengan teori *Darwinisme Sosial Internasional*, yang menyebutkan bahwa manusia sebagai makhluk biologis berkembang dan maju melalui persaingan, maka perang adalah salah satu bentuk aktualisasi untuk memenangkan persaingan secara kelompok. Maka masalah perang bukanlah sekedar masalah teknis, namun juga terkait dengan faktor *psyco-sosiologis* yang penyelesaiannya perlu dilakukan secara kolektif.

Menyadari akan besarnya bencana yang ditimbulkan oleh perang, maka berbagai kelompok atau negara sampai pada pemikiran akan perlunya upaya pencegahan perang dan peredaan ketegangan secara kolektif. Untuk ini, berbagai lembaga internasional dibentuk sebagai upaya perdamaian, dan pembatasan senjata pemusnah masal.

- ***Liga Bangsa-Bangsa (LBB)*** adalah sebuah organisasi internasional yang didirikan pasca *Perang Dunia I*, dalam *Konferensi Perdamaian Paris (1919)*, atas inisiatif Presiden Amerika Serikat, *Woodrow Wilson*, walaupun Amerika Serikat sendiri tidak bergabung dengan organisasi ini. Fungsi utama LBB meliputi perlucutan senjata, pencegahan perang melalui keamanan kolektif, penyelesaian perselisihan antar negara melalui negosiasi dan diplomasi, serta upaya perbaikan kesejahteraan hidup global. Sejumlah 42 negara bergabung menjadi anggota LBB pada awal didirikannya, dan 21 negara bergabung kemudian. LBB yang tidak mempunyai angkatan bersenjata dan bergantung kepada kekuatan internasional untuk menegakkan kepatuhan atas resolusi-resolusinya, meskipun pada awalnya menunjukkan keberhasilan, namun gagal mencegah berbagai konflik yang terjadi pada tahun 1930-an, yang berujung pada pecahnya *Perang*

Dunia II. Maka akhirnya pada tanggal 18 April 1945, LBB resmi dibubarkan dan digantikan dengan *Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB)*.

- *Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB)* adalah organisasi internasional yang didirikan pada tanggal 24 Oktober 1945 untuk mendorong kerjasama internasional. Badan ini merupakan pengganti *Liga Bangsa-Bangsa (LBB)*, yang didirikan pasca *Perang Dunia II* untuk mencegah terjadinya konflik serupa. Pada awal didirikan PBB beranggotakan 51 negara, yang kemudian berkembang menjadi 193 negara anggota, dengan beberapa organisasi internasional dan antar negara di fasilitasi sebagai pengamat permanen, termasuk negara bukan anggota (*non-member states*) seperti Palestina dan Vatikan.

Tujuan utama PBB adalah :

- Menjaga perdamaian dan keamanan dunia
- Memajukan dan mendorong hubungan persaudaraan antarbangsa melalui penghormatan hak asasi manusia.
- Membina kerjasama internasional dalam pembangunan bidang ekonomi, sosial, budaya, dan lingkungan.
- Menjadi pusat penyalarsan segala tindakan bersama terhadap negara yang membahayakan perdamaian dunia.
- Menyediakan bantuan kemanusiaan apabila terjadi kelaparan, bencana alam, dan konflik bersenjata.

PBB mulai beroperasi dengan menyelenggarakan Sidang Umum yang pertama pada tanggal 10 Januari 1946 di *Church House-London*, dengan dihadiri oleh perwakilan dari 51 negara anggota.

Dewan Keamanan adalah salah satu organ PBB yang ditugaskan untuk menjaga perdamaian, dan keamanan antar negara, yang memiliki kekuatan untuk membuat keputusan yang mengikat. Keputusan *Dewan Keamanan* kemudian dikenal sebagai *Resolusi Dewan Keamanan PBB*. *Dewan Keamanan* terdiri dari 15 negara anggota, yaitu 5 anggota tetap (China, Perancis, Rusia, Inggris, dan Amerika Serikat), dan 10 anggota tidak tetap, dimana 5 anggota tetap tersebut mempunyai *hak veto* terhadap resolusi

substantif namun tidak prosedural. Sedangkan 10 anggota tidak tetap dipilih oleh Majelis Umum PBB secara regional, untuk masa kerja 2 tahun.

Misi PBB dalam menjaga perdamaian dunia pada awalnya sulit dijalankan, sebagai dampak konflik *Perang Dingin* antara Amerika Serikat (*Blok Barat*) dan Uni Soviet (*Blok Timur*). Namun bagaimanapun, PBB telah ikut berpartisipasi dalam operasi militer pada *Perang Korea*, dan operasi perdamaian PBB di Kongo, serta menyetujui pendirian negara Israel pada tahun 1947. Keanggotaan organisasi ini berkembang pesat setelah periode de-kolonisasi pada tahun 1960-an. Dan pada tahun 1970-an anggaran untuk program pembangunan ekonomi dan sosial, bahkan jauh melampaui anggaran untuk pemeliharaan perdamaian.

- *Perjanjian Non-Proliferasi Nuklir (NPT-NonProliferation Treaty)* adalah merupakan suatu perjanjian yang ditandatangani pada tanggal 1 Juli 1968, yang membatasi kepemilikan senjata nuklir. Perjanjian ini meliputi tiga pokok utama, yaitu non-proliferasi, perlucutan, dan hak menggunakan teknologi nuklir untuk kepentingan damai. Sebagian besar negara berdaulat menyepakati perjanjian ini, walaupun dua diantara tujuh negara yang pemilik senjata nuklir dan satu negara yang diduga memiliki senjata nuklir belum meratifikasi perjanjian ini. Perjanjian yang diusulkan oleh Irlandia dan pertama kali ditandatangani oleh Finlandia ini, pada tanggal 11 Mei 1995 di New York disepakati oleh lebih dari 170 negara, untuk dilanjutkan tanpa batas waktu dan tanpa syarat. Sejak mulai diberlakukan pada tahun 1970, terdapat 191 negara penandatanganan *NPT*, yang terdiri dari dua kategori, yaitu negara-negara nuklir (*NWS-Nuclear Weapon States*) dan negara-negara non-nuklir (*NNWS-Non-Nuclear Weapon States*).

NPT pada dasarnya merupakan komitmen dari kelima negara *NWS* untuk mewujudkan *general and complete disarmament*, dan komitmen negara-negara *NNWS* untuk tidak mengembangkan atau memperoleh senjata nuklir. Disamping itu, *NPT* juga menegaskan komitmennya untuk melindungi hak seluruh negara untuk mengembangkan nuklir bagi tujuan damai.

- *Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA-International Atomic Energy Agency)*, adalah sebuah organisasi independen yang didirikan pada tanggal 29 Juli 1957, dengan tujuan mempromosikan penggunaan energi nuklir untuk kepentingan damai, serta menolak penggunaannya untuk kepentingan militer, berkedudukan di Wina-Austria, dan beranggotakan 137 negara.

Pada tahun 1981–1997, *IAEA* dipimpin oleh Hans Blix, yang kemudian digantikan oleh Mohamed El-Baradei pada tahun 1997–2009. Selanjutnya, mulai tanggal 2 Juli 2009, Yukiya Amano dari Jepang terpilih menjabat Ketua *IAEA*, dan mulai menjabat pada bulan Desember 2009. Prestasi *IAEA* diakui dengan diterimanya Penghargaan Nobel Perdamaian pada tanggal 7 Oktober 2005, yaitu atas keberhasilannya membatasi penyebaran tenaga nuklir.

- *Organisasi Pelarangan Senjata Kimia (OPCW- Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons)* adalah organisasi antar-pemerintah yang bergerak dalam upaya pelarangan penggunaan, pengembangan, produksi, penimbunan, dan pemindahan senjata kimia berskala besar, yang bermarkas di Den Haag-Belanda. Konvensi Senjata Kimia (*CWC-Chemical Weapons Convention*) adalah traktat pengendalian senjata kimia, yang melarang produksi, penimbunan, dan penggunaan senjata kimia dan prekursornya. Namun untuk produksi yang sangat terbatas, untuk penelitian, pengobatan, kefarmasian, atau alasan protektif tetap diizinkan. Kewajiban utama negara anggota dibawah konvensi ini adalah untuk menjalankan pelarangan, seperti pemusnahan semua senjata kimia yang ada saat ini, dimana semua aktivitas pemusnahannya harus berlangsung dibawah verifikasi *OPCW*. Konvensi ini juga memiliki ketentuan untuk melakukan evaluasi sistematis dari fasilitas produksi zat kimia, seperti investigasi dugaan penggunaan dan produksi senjata kimia, termasuk berdasarkan laporan intelijen negara anggota lainnya. Sampai dengan bulan Januari 2018, lebih dari 96% penimbunan senjata kimia yang dilaporkan dunia telah dimusnahkan.

13

BIOSFER & DINAMIKA LINGKUNGAN

Bumi sejauh ini dianggap sebagai satu-satunya planet dalam sistem tata surya, yang dapat menjadi tempat bagi kehidupan untuk berkembang dengan baik. Yaitu dengan adanya udara untuk bernafas, air untuk di-konsumsi, temperatur yang sesuai, dan jarak yang cukup ideal dari matahari sebagai pusat tata surya, yang mecegahnya dari radiasi yang berlebihan.

Proses-proses alam di bumi adalah bagian dari berbagai proses alam yang berulang secara periodik serta ber-interaksi satu dengan lainnya, sehingga bumi beserta segala proses-proses yang terkait dengannya, pada dasarnya adalah bagian dari siklus alam semesta. Dimana berbagai siklus berjalan dan ber-interaksi satu dengan lainnya, dapat berputar semakin cepat, melambat, atau kadang terputus. Pada lingkungan seperti itulah manusia beserta makhluk hidup lainnya, termasuk tumbuhan dan hewan, hidup dan berkembang biak, yaitu dalam zona yang disebut sebagai *Biosfer*.

Tentang *Biosfer* sendiri, banyak definisi dan pendapat yang dikemukakan oleh para ahli, diantaranya adalah :

- *Eduard Sues*, seorang ahli geologi, menyatakan bahwa biosfer merupakan sebuah tempat yang ada pada permukaan bumi dimana disana terdapat kehidupan berdiam.
- *James Lovelock* berpendapat biosfer adalah organisme hidup, yang disebut dengan hipotesa gaia. Hipotesa gaia men-deskripsikan tentang bagaimana faktor abiotik serta biotik dapat berinteraksi dalam suatu lingkungan.
- *Jhon Wiley* berpendapat biosfer adalah zona planet bumi dimana disana terdapat kehidupan yang terjadi secara alami, diperluas dari lapisan bumi dengan atmosfer yang lebih rendah.

- *Vladimir Wanouich Veinadsky* berpendapat biosfer ialah suatu sistem terbuka dan juga sudah berkembang sejak dimulainya awal sejarah bumi.
- *Michael Allaby* berpendapat bahwa pengertian biosfer merupakan bagian lingkungan hidup sebuah organisme yang ditemukan serta mereka ber-interaksi dengan membentuk sistem kelompok yang efektif dan stabil guna keseluruhan ekosistem di planet Bumi.

Secara umum, *Biosfer* dapat di-definisikan sebagai bagian dari permukaan bumi, yang menjadi habitat hidup berbagai makhluk hidup, untuk ber-adaptasi terhadap siklus-siklus alam yang mempengaruhinya, dan juga membentuk siklus-siklusnya sendiri. Manusia, sebagai salah satu makhluk hidup didalam habitat *Biosfer*, juga ber-adaptasi terhadap lingkungannya. Namun dengan kelebihan akal pikirannya, manusia dapat mengelola sumberdaya alam yang tersedia, bahkan juga mampu meng-intervensi siklus-siklus alam untuk kepentingannya sampai batas tertentu, mempercepat, memperlambat atau bahkan memutuskannya. Namun proses alam akan selalu dapat memulainya kembali, atau membentuk siklus-siklus yang baru.

Mahluk hidup sebagai penghuni *Biosfer* berkembang mengikuti dinamika yang terjadi pada unsur-unsur lingkungan lainnya seperti lithosfer, hidrosfer ataupun atmosfer. Mahluk hidup secara alamiah ber-adaptasi, bahkan ber-evolusi, menyesuaikan dengan perkembangan lingkungan sekitarnya. Namun manusia, sebagai bagian dari makhluk hidup di bumi, ber-adaptasi secara aktif terhadap lingkungannya, bahkan sampai batas tertentu turut serta mempengaruhi perubahan lingkungan.

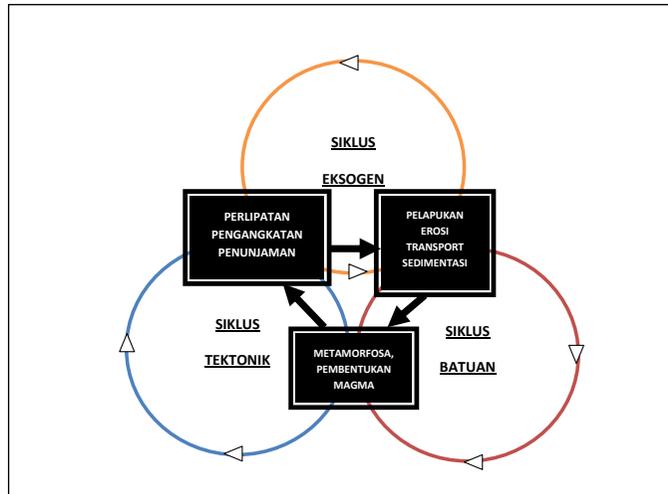
Lingkungan atau lingkungan hidup yang merupakan habitat hidup makhluk hidup, terutama manusia, adalah bagian dari alam. Alam yang selalu berubah secara dinamis oleh proses alam akan selalu diikuti oleh lingkungan yang berubah secara dinamis pula. Maka, perubahan pada lingkungan adalah suatu keniscayaan, yang berdampak pula pada kehidupan makhluk hidup yang ada didalam habitatnya. Perubahan yang menguntungkan manusia disebut sebagai dampak positif, sedangkan perubahan yang merugikan disebut sebagai dampak negatif. *Dampak lingkungan* dapat disebabkan oleh

proses alam secara murni, namun dapat pula disebabkan oleh intervensi kegiatan manusia, biasanya di-definisikan untuk dampak yang bersifat negatif.

Proses dampak lingkungan dapat terjadi secara berangsur-angsur, namun dapat pula terjadi secara cepat dan mendadak. Apabila proses dampak lingkungan terjadi secara cepat dan mendadak, serta menimbulkan korban atau kerugian besar bagi manusia, biasanya disebut sebagai *bencana lingkungan*. Sedangkan apabila terjadi secara berangsur-angsur dalam waktu yang lama dan menimbulkan kerugian yang signifikan, yang disebut sebagai *dampak lingkungan*.

13.1. Mengenal Siklus Alam

Roman muka bumi yang ber-gunung gunung, ber-lembah lembah, dataran dan morfologi dasar laut yang ber-aneka rupa, adalah bentukan kombinasi antara proses-proses *endogen* dan proses-proses *eksogen*. Proses tektonik yang digerakkan oleh gaya-gaya *endogen* merombak permukaan bumi menjadi ber-gunung gunung, ber-lembah lembah curam, dengan parit-parit dasar laut yang dalam serta berbagai bentuk bentang alam lainnya. Namun proses erosi memindahkan material material yang ter-desintegrasi dan mengendapkannya kembali mengisi cekungan-cekungan di muka bumi, digerakkan oleh gaya gaya *eksogen*, sehingga meratakan dan menyeimbangkannya kembali. Proses proses tersebut berjalan terus menerus, dan selalu berulang membentuk suatu siklus roman muka bumi. Maka roman muka bumi selalu berubah, dan selalu ada proses alam yang berusaha menyeimbangkannya kembali. Dalam hal ini siklus roman muka bumi terbentuk oleh sebab adanya interaksi diantara siklus tektonik dengan siklus batuan, tentunya dengan ditunjang oleh siklus-siklus lainnya yang terjadi pada selimut atmosfer.



Gambar 13.1. : Diagram interaksi Siklus Tektonik, Siklus Eksogen dan Siklus Batuan, yang menggerakkan Siklus Roman Muka Bumi

Energi kosmik yang berasal dari luar bumi, terutama energi matahari, adalah sumber energi penggerak proses *eksogen*. Energi matahari adalah penggerak *siklus hidrologi*, pemicu desintegrasi bebatuan, dan penggerak peredaran udara di atmosfer. Maka, posisi matahari terhadap permukaan bumi dalam hal ini menjadi faktor penting terhadap terjadinya proses-proses *eksogen*.

13.1.1. Peredaran Matahari

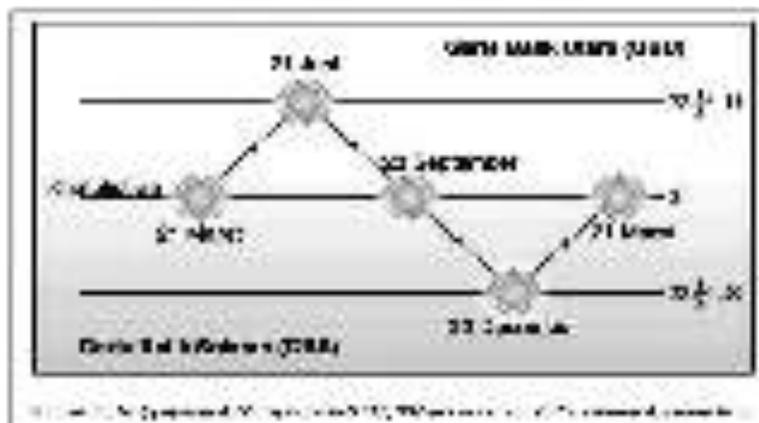
Bumi ber-rotasi pada porosnya dan beredar mengitari matahari dengan poros rotasi tidak selalu tegak lurus terhadap garis edarnya. Disamping itu, orbit lintasan edar bumipun tidak bulat, namun memiliki eksentrisitas yang berubah-ubah secara periodik mengikuti *Siklus Milanković*. Maka intensitas penyinaran matahari ke permukaan bumipun tidak tetap, namun berubah secara periodik. Perubahan inilah yang turut berperan menggerakkan proses-proses *eksogen*.

Rotasi bumi pada porosnya menyebabkan terjadinya pergantian siang dan malam. Intensitas penyinaran matahari terjadi pada siang hari namun tidak pada malam hari, menyebabkan perbedaan pemanasan pada permukaan bumi. Fluktuasi temperatur bumi pada siang dan malam yang berulang terus menerus, tentu berdampak kepada pelapukan sehingga mengakibatkan terjadinya desintegrasi bebatuan.

Perbedaan intensitas pemanasan juga mempengaruhi pergerakan udara di atmosfer. Daratan yang merupakan masa padat akan lebih cepat terpanaskan apabila terpanaskan oleh sinar matahari pada siang hari, namun lebih cepat mendingin pada malam hari ketika penyinaran matahari menghilang. Sebaliknya dengan lautan, yang lebih lambat memanas pada siang hari, namun lambat pula mendingin pada malam hari. Kondisi tersebut memicu terjadinya angin laut dari laut kearah daratan pada pagi hari, dan angin darat dari daratan kearah laut pada sore hari menjelang malam. Hal seperti ini terjadi terutama pada wilayah kepulauan, sehingga sering dimanfaatkan oleh para nelayan tradisional, yaitu dengan berangkat melaut pada sore hari dan kembali ke darat pada pagi hari.

Rotasi bumi juga berpengaruh pada organisme dipermukaan bumi yaitu pada tumbuhan, dimana proses *fotosintesa* terjadi pada siang hari, sedangkan *metabolisme* tumbuhan lebih terjadi pada malam hari.

Peredaran atau pergerakan posisi matahari terhadap permukaan bumi secara periodik selalu bergeser diantara Garis Balik Utara (GBU - $23\frac{1}{2}^{\circ}$ Lintang Utara) dan Garis Balik Selatan (GBS - $23\frac{1}{2}^{\circ}$ Lintang Selatan). Maka pada daerah-daerah yang ber iklim sub-tropis akan mengalami musim dingin secara periodik. Yaitu musim dingin pada belahan bumi utara ketika posisi matahari berada pada belahan bumi selatan, dan musim dingin pada belahan bumi selatan ketika posisi matahari berada pada belahan bumi utara.

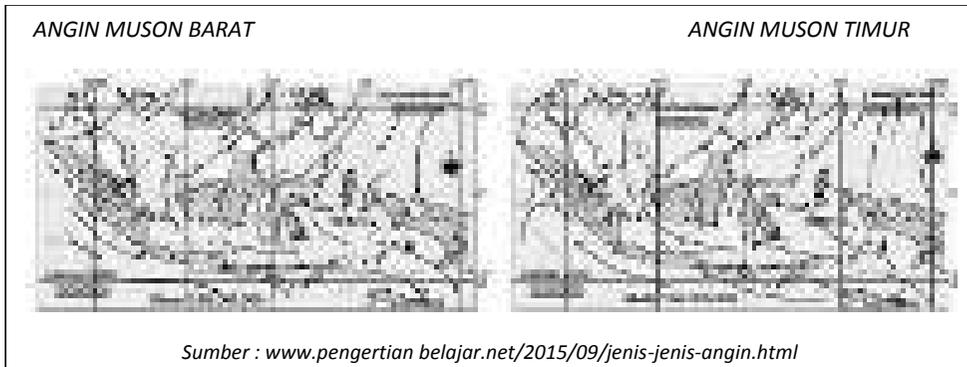


Gambar 13.2. : Diagram siklus peredaran posisi matahari terhadap permukaan bumi

Hal tersebut bagaimanapun tentu mempengaruhi peredaran air. Oleh karena pembekuan air menjadi es pada musim dingin, akan memperlambat atau bahkan menghentikan aliran air permukaan (*run-off*), sehingga kinerjanya pun terpengaruh pula (erosi, transport, sedimentasi). Air permukaan baru kembali mengalir cepat pada musim panas, ketika es mencair kembali, demikian seterusnya siklus tersebut berjalan sepanjang tahun. Sementara itu, siklus yang berbeda terjadi pada daerah ber-iklim tropis yang mengalami penyinaran matahari sepanjang tahun. Maka air permukaan (*run-off*) akan tetap mengalir secara fluktuatif sepanjang tahun, walaupun terkadang dapat pula mengering tanpa aliran pada musim kering yang luar biasa.

Pergeseran posisi matahari terhadap permukaan bumi, juga mempengaruhi pergerakan udara atau angin secara periodik musiman, yaitu yang disebut dengan angin *muson*. Kata *muson* berasal dari kata dalam bahasa Arab (*mosem*) yang berarti musim. Angin *muson* biasanya merujuk pada perubahan musiman arah angin di sepanjang pesisir samudera Hindia, khususnya di laut Arab yang bertiup dari baratdaya di India dan wilayah-wilayah sekitarnya untuk setengah tahun, dan dari timurlaut untuk setengah tahun berikutnya. Angin *muson* adalah angin yang berhembus dan berubah arah setiap enam bulan sekali. Angin ini terjadi oleh karena adanya perbedaan pemanasan bumi antara belahan bumi utara dan belahan bumi selatan. Maka setiap enam bulan sekali akan terjadi perubahan musim seiring dengan perubahan arah berembusnya angin *muson*.

Secara geografis Indonesia terletak diantara dua benua, yaitu Asia dan Australia. Sehingga perbedaan tekanan udara pada kedua benua itulah yang mengakibatkan terjadinya perubahan arah angin *muson*. Angin *muson* yang berasal dari Asia disebut *angin muson barat*, dan yang berasal dari Australia disebut *angin muson timur*.



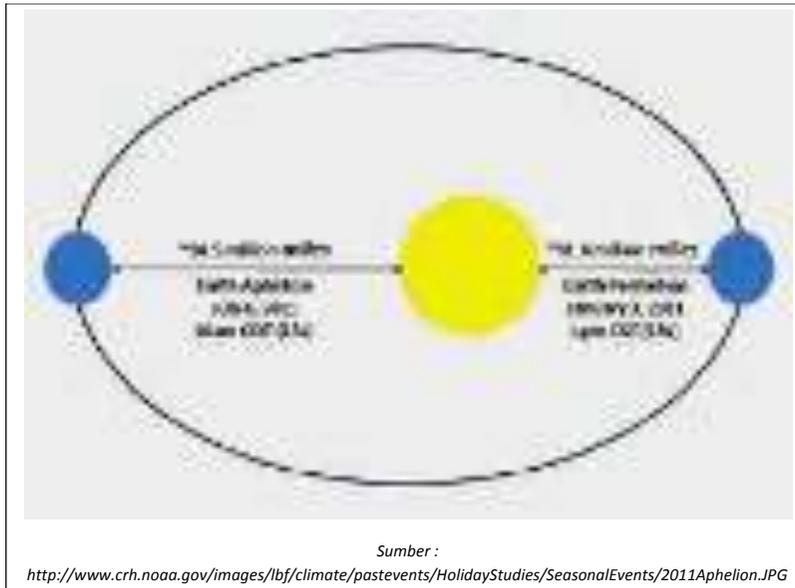
Gambar 13.3. : Pergerakan *Angin Muson* di kepulauan Indonesia

Angin muson barat terjadi antara bulan Oktober - Februari. Hal ini oleh karena pada 23 September sampai dengan 21 Maret, posisi matahari berada di belahan bumi selatan sampai dengan garis lintang $23\frac{1}{2}^{\circ}$ LS (pada 22 Desember). Posisi matahari tersebut menyebabkan intensitas penyinaran matahari di benua Australia lebih tinggi daripada di Benua Asia, sehingga temperatur udara di Australia menjadi maksimum dan di Asia minimum. Dengan demikian tekanan udara di Asia menjadi lebih tinggi daripada di Australia, maka bertiuplah angin *muson* dari arah benua Asia menuju Australia melalui kepulauan Indonesia. Angin ini bergerak melalui Samudera Hindia dan Samudera Pasifik yang luas, dan membawa serta sejumlah besar uap air. Maka, pada masa tersebut musim hujan terjadi pada sebagian besar wilayah Indonesia.

Angin muson timur disebut juga *angin muson tenggara* yang bertiup antara bulan April sampai dengan Agustus. Hal ini oleh karena posisi matahari pada 21 Maret sampai dengan 23 September berada pada belahan bumi utara sampai dengan lintang $23\frac{1}{2}^{\circ}$ LU (pada 21 Juni), sehingga intensitas penyinaran matahari di Benua Asia lebih tinggi daripada di Benua Australia, sehingga tekanan udara di Benua Asia lebih rendah daripada di Australia. Maka bertiuplah angin *muson* dari Australia menuju Asia. Angin ini melewati padang stepa dan sabana (padang rumput) yang luas, dan lautan yang sempit, sehingga tidak cukup banyak uap air yang terbawa. Maka, pada saat itu sebagian besar wilayah kepulauan Indonesia mengalami musim kemarau yang kering.

13.1.2. Siklus Milankovitch

Orbit garis edar bumi mengitari matahari (eksentrisitas) tidak berbentuk bulat namun elips, sehingga menyebabkan ada masa-masa dimana jarak bumi terhadap matahari berada pada posisi terdekat (*Perihelion*) dan terjauh (*Aphelion*).



Gambar 13.4. : Contoh posisi *Aphelion* dan *Perihelion* tahun 2011

Namun eksentrisitas orbit bumipun berubah pula secara periodik dengan siklus bervariasi selama 19 000 - 23 000 tahun, sehingga dapat ber-dampak merubah waktu *Perihelion* yang biasa jatuh pada bulan Januari, dan *Aphelion* yang biasa jatuh pada bulan Juli. Hal tersebut akan dapat mengakibatkan peningkatan kontras musim pada salah satu belahan bumi dan penurunan kontras musim pada belahan bumi lainnya.

Sebagai contoh pada saat posisi bumi sangat dekat dengan matahari (*Perihelion*), maka pada saat musim dingin pada bumi belahan utara, musim dingin menjadi lebih panas. Dan demikian pula sebaliknya, ketika bumi berada pada posisi terjauh dari matahari (*Aphelion*) maka musim dingin menjadi lebih dingin. Maka musim panas ataupun musim dingin yang ekstrem dapat terjadi berulang pada perioda yang sangat panjang, mengikuti siklus eksentrisitas orbital dan pergeseran arah rotasi bumi.

Siklus Milankovitch adalah suatu teori yang memberikan penjelasan mengenai variasi siklus pergerakan yang dialami bumi selama 100 000 dan 400 000 tahun, berdasarkan hipotesis yang diajukan oleh *geophysicist* dan *astronomer* Serbia, *Milutin Milankovitch* (1920s).

Dalam teorinya, *Milankovitch* memaparkan tiga hal yang dialami bumi, sehingga menghasilkan perubahan iklim yang diakibatkan oleh perbedaan intensitas radiasi matahari pada permukaannya, yaitu :

- ***Eksentrisitas (Eccentricity)***, yaitu perubahan bentuk dari orbit imajiner bumi dalam peredarannya mengelilingi matahari. Bentuk orbit bumi tidak bulat, akan tetapi memiliki nilai eksentrisitas, yaitu tidak bulat sempurna namun sedikit lebih elips.

Nilai eksentrisitas suatu orbit berada diantara 0 (bulat sempurna) hingga 1 (parabola yang tidak memiliki ujung). Saat ini nilai eksentrisitas bumi adalah 0,0167, sementara ribuan tahun yang ber-nilai 0.0034 sampai dengan 0.058. Nilai eksentrisitas tersebut terus berubah membentuk suatu siklus yang bervariasi dalam 413.000 tahun. Seandainya bumi merupakan satu-satunya planet dalam sistem tata surya matahari, maka nilai eksentrisitasnya tidak akan terlalu ber-variasi dan lebih lambat berubah dalam kurun waktu yang sangat lama. Namun oleh pengaruh gravitasi *Jupiter* dan *Saturnus*, perubahan nilai eksentrisitas bumi menjadi lebih cepat.

Akibat dari bentuk eksentrisitas orbit bumi, maka timbul istilah *perihelion* dan *aphelion*. *Perihelion* posisi ketika matahari berada pada titik atau jarak terdekat dengan bumi, dimana bumi menerima radiasi matahari tertinggi, sehingga berakibat suhu menjadi lebih panas. *Aphelion* adalah posisi ketika matahari berada pada jarak terjauh dari bumi, sehingga suhu mengalami penurunan, oleh karena bumi mengalami tingkat radiasi matahari ter-rendah.

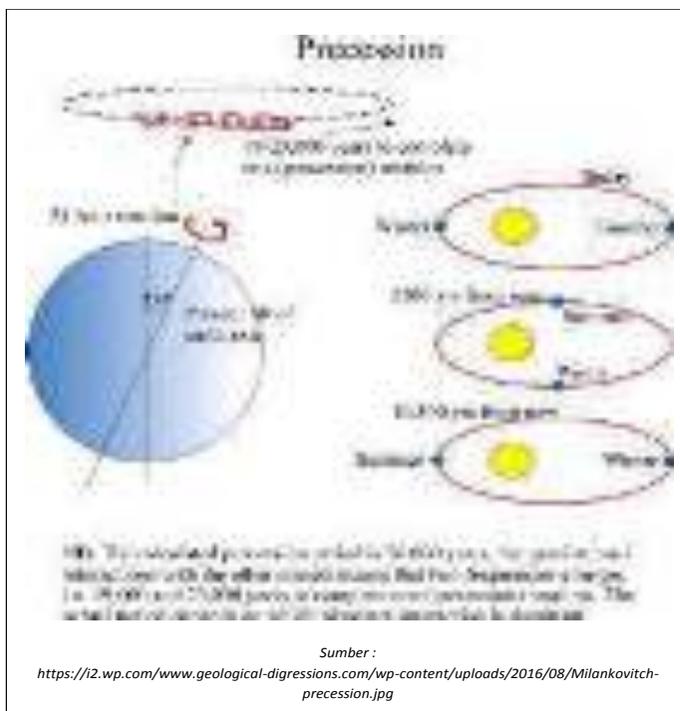
- ***Obliquitas (Obliquity)***, yaitu kemiringan bumi ketika berotasi. Kemiringan tersebut ber-variasi dalam kurun waktu 40.000 tahun, dan bergeser diantara $22,1^{\circ}$ sampai dengan $24,5^{\circ}$. Apabila kemiringan bumi bertambah maka musim panas akan menjadi lebih panas dan musim dingin akan menjadi lebih dingin.

Sebaliknya, apabila terjadi pengurangan kemiringan, maka musim panas akan menjadi lebih dingin dan musim dingin akan menjadi lebih panas. Pada saat ini kemiringan bumi berada pada kondisi berkurang, yaitu pada posisi $23,4^{\circ}$ dan sedang bergerak menuju nilai minimum yaitu $22,1^{\circ}$, sehingga suhu bumi terasa menjadi semakin panas.

- **Presisi (Precession)**, yaitu perubahan arah rotasi oleh karena bergesernya sumbu bumi. Siklus ini bervariasi selama 19.000-23.000 tahun. Matahari dan bulan sangat berpengaruh terhadap perubahan ini. Dampak perubahan arah rotasi bumi ini dapat merubah tanggal *perihelion* yang biasa jatuh pada bulan Januari dan *aphelion* yang biasa jatuh pada bulan Juli. Hal ini akan meningkatkan kontras musim pada salah satu belahan bumi dan menurunkan pada bagian belahan bumi lainnya. Misalnya, seperti pada saat ini, dimana posisi bumi sangat dekat dengan matahari pada musim dingin pada belahan bumi utara, musim dingin terasa lebih panas, dan sebaliknya pada belahan bumi selatan. Dampak lainnya adalah perubahan pada kutub utara bumi, yang sudah tidak sedingin sebelumnya dan semakin lama semakin panas.



Gambar 13.5. : Diagram Siklus Milankovitch



Gambar 13.6. : Diagram rotasi dan peredaran bumi berdasarkan *Hipotesis Milankovitch*

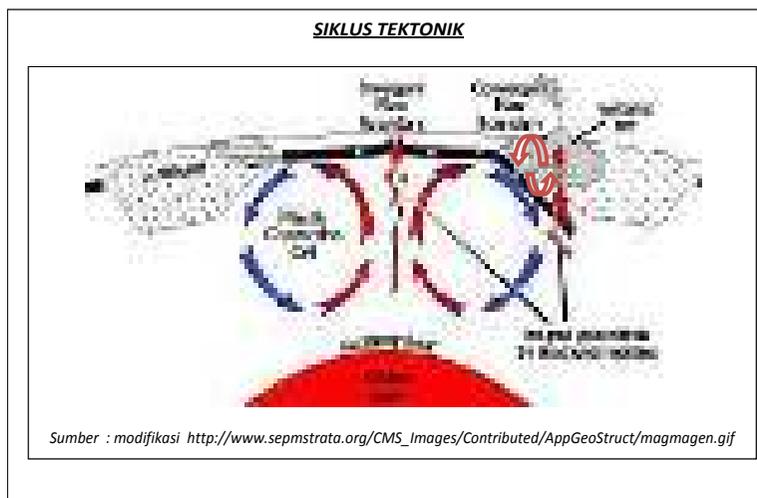
Para ahli memperkirakan kejadian yang terjadi saat ini, seperti perubahan iklim yang terlampaui cepat, kenaikan suhu yang terlalu cepat dan sebagainya, seharusnya baru akan terjadi sekitar 50 000 tahun mendatang. Walaupun beberapa penelitian meng-indikasikan bahwa masa-masa es jutaan tahun yang lalu pada jaman Kwartir (*Quaternary Glaciation*) menunjukkan kesesuaian dengan siklus eksentrisitas orbit bumi pada periode ulang sekitar 100 000 tahun.

13.1.3. Siklus Lithosfer

Kerak bumi adalah bagian padat yang menyelimuti permukaan bumi, yang disebut sebagai *lithosfer*. Berasal dari cairan mantel yang dalam hal ini di indikasikan sebagai *magma* asal, yang mendingin dan membeku sehingga membentuk selimut padat, yang merupakan cikal bakal bebatuan di bumi. Namun pergerakan arus konveksi dalam lapisan mantel dibawahnya memecahkan dan memisahkannya, sehingga membuka celah-celah yang memungkinkan magma menerobos kepermukaan, dan membeku membentuk kerak bumi

baru. Maka lempengan-lempengan kerak bumi mulai memberai bergerak saling menjauh secara divergen.

Namun pada bagian lain di permukaan bumi, lempengan-lempengan kerak bumi justru bergerak saling mendekat, sampai akhirnya bertumbukan secara konvergen. Pada konvergensi tersebut sebagian dari kerak samudera terhunjam kedalam mantel yang panas sehingga meleleh, atau kembali menjadi magma. Sebagian daripadanya, oleh tekanan konvergensi terdorong keatas, keluar kepermukaan sebagai gunung-gunung api, sedangkan bagian lainnya melebur kembali kedalam mantel, untuk kemudian pada saatnya keluar kembali ke permukaan membentuk kerak bumi baru pada zona divergensi kerak bumi. Demikian seterusnya proses tersebut berulang terus menerus, membentuk siklus yang disebut sebagai siklus tektonik.



Gambar 13.7. : Diagram siklus tektonik

13.2. Biosfer

Biosfer adalah bagian luar dari planet Bumi, mencakup udara, daratan, dan air, yang memungkinkan kehidupan dan proses *biotik* berlangsung. Dalam pengertian luas *Biosfer* adalah sistem ekologi global, yang disebut juga sebagai *Ekosfer*, yang menyatukan seluruh makhluk hidup serta hubungan-hubungan diantaranya, termasuk interaksinya dengan unsur lithosfer, hidrosfer dan atmosfer. *Biosfer*

diperkirakan telah mulai berkembang sekitar 3,5 miliar tahun yang lalu, dari sekitar 4,5 miliar tahun usia Bumi.

Bumi adalah planet yang dinamis, dimana proses-proses geologi dan biologi yang menghasilkan energi serta elemen-elemen kehidupan seperti oksigen, hidrogen, karbon, sulfur dan fosfor, ber-interaksi dan ber-sirkulasi secara global, membentuk *Biosfer* sebagai lingkungan hidup bagi makhluk-makhluk hidup di bumi. Sirkulasi itulah yang menunjang kehidupan di bumi, oleh karena menjaga keseimbangan peredaran elemen-elemen kehidupan, energi dan temperatur pada *Biosfer*.

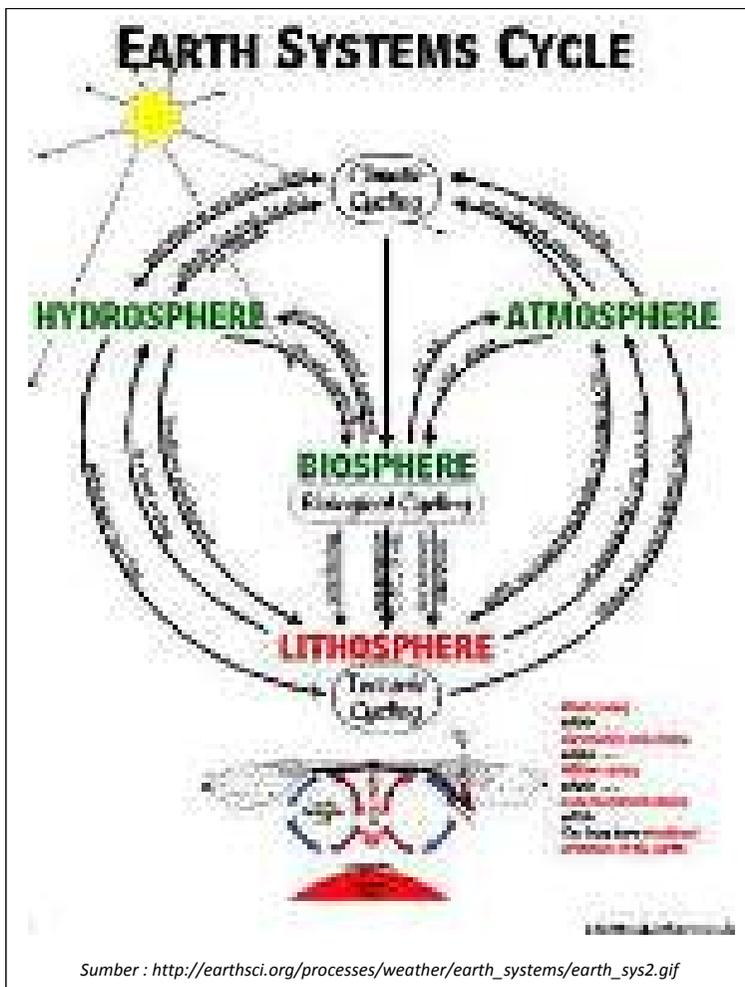


Gambar13.8. : Biosfer sebagai hasil interaksi dari elemen-elemen Lithosfer (*Geosfer*), Hidrosfer dan Atmosfer

Biosfer merupakan suatu sistem ekologi global yang menyatukan semua makhluk hidup termasuk hubungan diantara komponen-komponennya, terdiri dari satuan-satuan ekologi yang lebih kecil yaitu Ekosistem, yang terkadang disebut juga sebagai *Ekosfer*. Ekosistem sendiri merupakan gabungan dari unit-unit biosistem, yang

melibatkan interaksi timbal balik antara organisme dengan lingkungan fisiknya, sedemikian rupa sehingga terjadi aliran energi dalam suatu siklus materi diantara unsur-unsur biotik dan unsur-unsur abiotik.

James Lovelock (1960 an), ilmuwan atmosfer Inggris, mengemukakan *hipotesis Gaia* untuk menjelaskan bagaimana faktor-faktor biotik dan abiotik ber-interaksi dalam *Biosfer*. *Hipotesis Gaia* adalah teori ekologis yang menyatakan bahwa biosfer dan komponen-komponen fisik bumi yang terdiri dari atmosfer, hidrosfer, dan lithosfer, saling menyatu membentuk sistem interaksi yang mengendalikan keseimbangan iklim dan biogeokimia bumi.



Gambar 13.9. : Diagram Siklus Biosfer, berkaitan dengan siklus bumi

Pada awal 1970-an, *Lynn Margulis*, ahli mikrobiologi Amerika Serikat, menambahkan catatan pada hipotesis tersebut, khususnya tentang hubungan antara biosfer dengan sistem bumi lainnya.

Biosfer pada dasarnya bersifat adaptatif terhadap siklus-siklus penggerakannya, yaitu dimana siklus *Biosfer* akan selalu berubah menyesuaikan diri atau ber-adaptasi terhadap perubahan-perubahan pada siklus-siklus alam disekitarnya, diantaranya terkait dengan siklus karbohidrat sebagai komponen utama makhluk hidup beserta sirkulasi elemen-elemen pendukungnya, seperti oksigen (O_2), air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2). Ketiga elemen utama kehidupan tersebut dikendalikan oleh kondisi dan perubahan-perubahan pada hidrosfer sebagai reservoir air (H_2O) dan atmosfer sebagai reservoir oksigen (O_2) dan juga gas karbon dioksida (CO_2). Sedangkan lithosfer sebagai bagian kerak bumi yang padat, lebih berperan sebagai fasilitator untuk dapat bertumbuh kembangnya komponen kehidupan, demikian pula halnya dengan hidrosfer untuk hal-hal yang spesifik seperti kehidupan biota perairan.

Perubahan komposisi daratan dan lautan oleh sebab pergerakan tektonik, dalam jangka panjang akan berpengaruh terhadap makhluk hidup, dimana siklus kehidupan makhluk hidup akan ber-adaptasi, ber-angsur angsur menyesuaikan diri terhadap perubahan yang terjadi, seperti adaptasi dari kehidupan darat menjadi kehidupan perairan atau sebaliknya, dan akan punah apabila tak mampu ber-adaptasi. Namun alam akan menggantikannya dengan kehidupan yang baru, yang lebih adaptatif terhadap lingkungan yang baru.

13.2.1. Adaptasi dan Evolusi

Alam lingkungan makhluk hidup atau *Biosfer* pada dasarnya selalu berubah, baik secara tetap maupun berulang secara periodik dalam suatu siklus. Seperti halnya pergantian siang dan malam ataupun pergantian musim tahunan, yang merupakan proses perubahan periodik singkat dengan perioda ulang yang berbeda. Namun demikian makhluk hidup tidak seperti halnya benda mati, bersifat aktif mempertahankan proses kehidupannya, walaupun kondisi alam lingkungannya ber-ubah ubah. Berbagai tumbuhan tropis akan menggugurkan daun-daunnya memasuki musim panas, untuk mencegah penguapan yang berlebihan. Namun pada daerah

sub-tropis tumbuhan justru mulai bersemi dan berbunga memasuki musim panas, oleh karena timbulnya mata-mata air yang disebabkan oleh mulai mencairnya es. Sekelompok angsa terbang ber-bondong bondong, bermigrasi ke daerah yang lebih panas pada musim dingin, dan kembali ke tempat asalnya ketika musim dingin berakhir. Dan masih banyak lagi contoh perilaku makhluk hidup lainnya. Disamping itu alam juga berubah secara tetap (*non-reversible*) atau berulang dalam kurun waktu yang sangat lama (ribuan sampai jutaan tahun).

Disamping perilaku adaptatif, makhluk hidup juga ber-adaptasi secara fisik, baik bersifat sementara (*adaptasi somatik*), ataupun secara tetap (*adaptasi genetik*).

- ***Adaptasi somatik*** adalah bentuk perubahan struktural ataupun fungsional, yang bersifat sementara dan tidak diturunkan. Sebagai contoh, tanaman rumput akan berdaun lebar pada musim hujan dan mengecil pada musim kemarau. Namun demikian, rumput tersebut akan tetap berdaun lebar walau pada musim kemarau, apabila berada pada daerah yang banyak airnya atau selalu disiram. Contoh lain adalah binatang biri-biri, yang akan memproduksi bulu yang tebal apabila udara menjadi dingin, dan merontokkan bulu-bulunya menjadi tipis-tipis manakala udara menjadi panas.
- ***Adaptasi genetik*** adalah suatu bentuk perubahan struktur fisik yang bersifat permanen dan menurun. Hal tersebut tentu berkaitan dengan perubahan lingkungan, yang bersifat permanen dan tidak berulang secara periodik dalam jangka waktu yang pendek. Tumbuhan air misalnya, umumnya berakar sedikit dan berdaun lebar seperti halnya bunga teratai. Sebaliknya, tumbuhan darat umumnya berdaun kecil dan berakar panjang-panjang. Tumbuhan air akan menurunkan tumbuhan sejenis yang akan sukar tumbuh di daratan, demikian juga sebaliknya. Pada dunia hewan, binatang air dilengkapi dengan sirip dan insang, binatang darat dengan kaki, sedangkan hewan terbang dengan sayap, yang masing-masing bersifat permanen dan menurun. Didalam hal perubahan alam lingkungan yang bersifat *non-reversible* atau yang berulang dalam periode yang sangat panjang, dapat terjadi bahwa *adaptasi genetik* tidak sekedar perubahan struktur tubuh, namun bahkan terjadi perubahan *species*. Dalam hal ini, makhluk hidup diidentifikasi

sebagai telah ber-evolusi. *Mamouth*, binatang sejenis gajah berbulu tebal, ber-evolusi menjadi binatang gajah yang tidak berbulu, dengan *species* yang berbeda, dengan berakhirnya periode es *glacial* yang dingin. Pencairan es pada akhir periode es *glacial* menyebabkan naiknya permukaan laut sehingga menggenangi daratan. Maka berbagai binatang darat pun berangsur angsur secara *evolusi* menyesuaikan diri, dari kehidupan darat menjadi kehidupan air. Berbagai jenis hewan darat mulai belajar berenang, sehingga pada akhirnya secara *species* berubah menjadi ikan yang sepenuhnya hidup di air.

Alam juga berubah secara tetap (*non-reversible*) atau berulang dalam kurun waktu yang sangat lama (ribuan sampai jutaan tahun). Maka, bagi *spesies* makhluk hidup yang tak mampu beradaptasi terhadap habitat barunya, secara berangsur angsur akan mengalami penurunan populasi, sampai pada akhirnya punah. Seperti contoh punahnya kelompok binatang raksasa *Dinosaurus* pada akhir masa *Mesozoikum*. Kepunahan *spesies-spesies* makhluk hidup dapat pula disebabkan oleh suatu peristiwa bencana alam besar yang *katastropik*, seperti erupsi gunung api yang sangat besar (*super volcano*), atau tumbukan benda langit seperti meteor-meteor raksasa. Hal tersebut dapat menghentikan satu atau banyak siklus yang ada di bumi. Namun alam akan selalu menemukan jalannya, dengan memulainya kembali, atau menyusun siklus-siklus yang baru.

13.2.2. Rantai Makanan

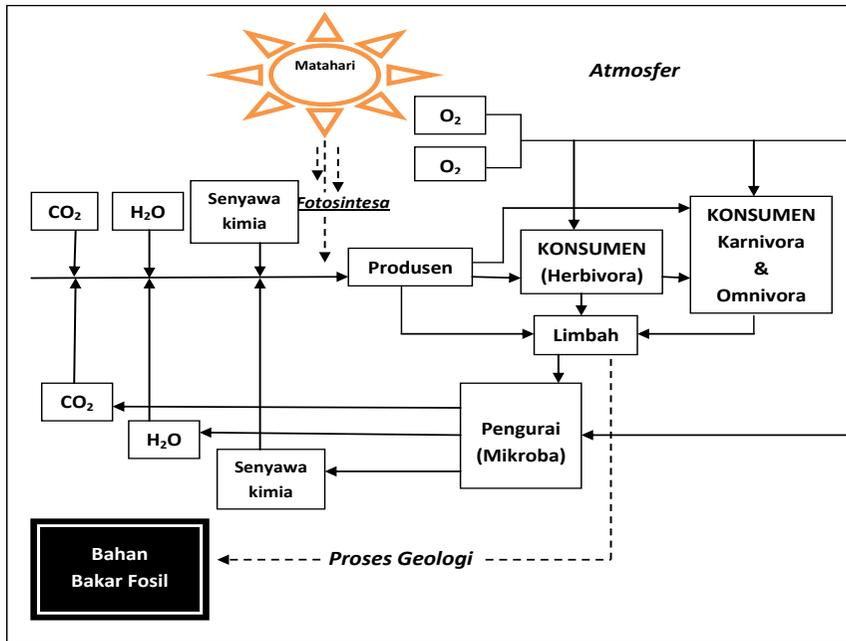
Siklus Rantai Makanan adalah siklus yang menggambarkan interaksi diantara berbagai kelompok makhluk hidup yang berkesinambungan. Dalam sistem rantai makanan ini, makhluk hidup dikelompokkan secara fungsional, menjadi kelompok *Produsen*, *Konsumen* dan *pengurai (decomposer)*.

- ***Produsen*** adalah kelompok makhluk hidup yang memperoleh karbohidrat sebagai nutrisi untuk bertumbuh kembangnya secara pasif, yaitu dari lingkungan alam sekitarnya, baik lithosfer, hidrosfer ataupun atmosfer. Kelompok ini mempunyai kemampuan untuk memproduksi bahan-bahan organik atau karbohidrat, dari bahan-bahan yang anorganik (CO₂, H₂O & mineral² anorganik). Golongan tumbuhan adalah kelompok

produsen dalam sistem rantai makanan ini, yang tumbuh kembangnya sangat tergantung kepada proses fotosintesa. Disebut kelompok produsen, oleh karena produk metabolisme dari kelompok ini merupakan sumber nutrisi bagi kelompok lainnya, yaitu kelompok konsumen.

- **Konsumen** adalah kelompok makhluk hidup yang tak mampu mengolah bahan-bahan anorganik menjadi bahan organik atau karbohidrat, yang diperlukan untuk proses tumbuh kembangnya. Oleh karena itu kelompok ini, yaitu kelompok hewan termasuk manusia, secara aktif mencari makanan dari bahan-bahan organik yang telah ada, sebagai sumber nutrisinya untuk bertumbuh kembang. Sumber-sumber bahan organik tersebut, dapat berasal dari material organik yang diproduksi oleh kelompok produsen (tumbuhan), atau berasal dari sesama konsumen lainnya. Kelompok konsumen yang hanya mengkonsumsi produk produsen (tumbuhan) disebut sebagai herbivora. Kelompok konsumen yang mengkonsumsi produk konsumen lainnya disebut sebagai karnivora. Sedangkan kelompok konsumen yang mengkonsumsi keduanya, baik produk dari produsen maupun produk konsumen lainnya, disebut sebagai omnivora.
- **Pengurai** adalah kelompok organisme yang mengkonsumsi limbah, baik yang berasal dari kelompok produsen maupun konsumen. Bagaimanapun, pada akhirnya semua organisme, baik produsen maupun konsumen, akan mati dengan meninggalkan limbah berupa serasah atau bangkai. Organisme pengurai akan melakukan dekomposisi dari limbah-limbah tersebut, dimana dekomposisi adalah proses meng-konsumsi guna memperoleh energi untuk kelangsungan tumbuh kembang kehidupannya. Kelompok pengurai ini dikenal sebagai jasad renik atau mikroba. Sementara itu, bagian limbah yang terurai namun tak ter-konsumsi oleh pengurai, akan terbuang sebagai limbah anorganik, dalam bentuk mineral-mineral padat dalam tanah, air maupun gas-gas seperti CO₂. Mineral-mineral padat dalam tanah, oleh proses geologi dapat ter-awetkan menjadi bahan bakar fosil, yang merupakan potensi sumberdaya yang tersimpan sebagai cadangan, yang pada saatnya akan dapat kembali masuk kedalam siklus.

Suatu hal yang unik, yaitu apabila kelompok *konsumen* dan *pengurai* memerlukan *oksigen* (O₂) untuk kelangsungan tumbuh kembangnya, dengan membuang gas karbon dioksida (CO₂) sebagai limbahnya, ada saatnya dimana kelompok produsen justru memerlukan CO₂ dan membuang O₂ sebagai limbahnya. Demikian sistem makan memakan diantara mahluk hidup terbentuk, sehingga membentuk suatu siklus rantai makanan.



Gambar 13.10. : Siklus Rantai Makanan

Dampak lingkungan atau bahkan *bencana lingkungan* akan dapat terjadi, manakala keseimbangan rantai makanan tersebut terganggu.

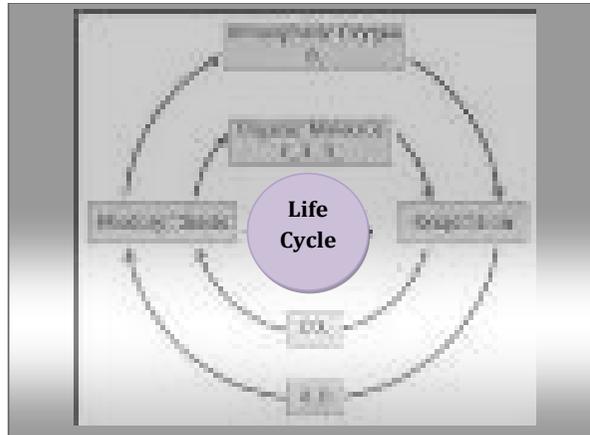
13.3. Siklus Biogeokimia

Unsur dasar pembentuk materi kehidupan, terdiri dari Karbon (C), Hidrogen (H) dan Oksigen (O). Ketiga unsur tersebut, melalui proses reaksi fotosintesa, bergabung membentuk senyawa *Karbohidrat* (C_nH_mO_p) yang merupakan materi dasar mahluk hidup. Unsur-unsur dasar tersebut tersedia di bumi dalam jumlah yang cukup untuk menunjang lingkungan hidup. Oksigen yang merupakan elemen

utama tersedia melimpah sebagai unsur gas di atmosfer, dalam bentuk molekul-molekul O_2 . Hidrogen dalam bentuk senyawa H_2O , atau air, tersedia melimpah sebagai lapisan hidrosfer di bumi. Sedangkan Karbon, juga tersedia sebagai senyawa gas Karbon dioksida (CO_2) di atmosfer. Sementara itu, bumi yang beredar mengitari matahari, terus menerus mendapatkan pasokan sinar matahari, sehingga memungkinkan proses fotosintesa berkelanjutan, membentuk siklus-siklus kehidupan di bumi. Siklus-siklus tersebut disebut sebagai siklus *biogeokimia*, atau yang biasa disebut dengan siklus organik-anorganik. Yaitu siklus dimana unsur-unsur atau senyawa kimia mengalir dari komponen *abiotik* ke komponen *biotik* dan kembali lagi kepada komponen *abiotik* dan seterusnya. Oleh karena siklus unsur-unsur tersebut tidak hanya melalui organisme, tetapi juga melibatkan reaksi-reaksi kimia dalam lingkungan *abiotik*, maka disebut sebagai siklus *biogeokimia*. Beberapa diantaranya yang penting adalah siklus Karbohidrat, siklus Nitrogen, siklus Belerang (Sulfur) dan siklus Fosfor.

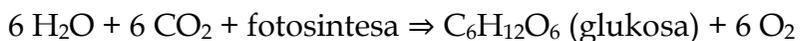
13.3.1. Siklus Karbohidrat

Siklus Karbohidrat adalah siklus yang menggambarkan proses pengulangan pembentukan materi kehidupan, sehingga disebut juga sebagai siklus kehidupan. Yaitu dimulai dengan proses reaksi fotosintesa, penggabungan antara Karbon dioksida (CO_2) dengan air (H_2O), yang menghasilkan senyawa Karbohidrat ($C_nH_mO_p$) sebagai komponen dasar makhluk hidup, dan Oksigen (O_2) yang terbebaskan ke atmosfer. Berikutnya, dalam menjalankan metabolisme dan respirasi untuk pertumbuhan dan perkembangannya, makhluk hidup menyerap Oksigen (O_2) untuk mendapatkan energi, serta membuang limbahnya, yang antara lain berupa Karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O). Sementara itu, organisme tumbuhan juga menyerap Karbon dioksida (CO_2) dan membuang Oksigen (O_2) sebagai limbahnya ke atmosfer. Demikian seterusnya siklus kehidupan berjalan, selama masih ada proses reaksi fotosintesa yang digerakkan oleh radiasi sinar matahari.

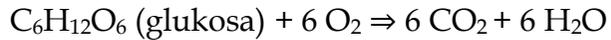


Gambar 13.11. : Diagram Siklus Karbohidrat, yang merupakan molekul organik

Keberadaan unsur Karbon (C) dan Oksigen (O) di atmosfer dalam kadar yang cukup dominan, merupakan faktor penting yang mempengaruhi dinamika proses alam pada kerak bumi, terutama berkaitan dengan perkembangan proses kehidupan. Karbon (C) terdapat di atmosfer sebagai senyawa Karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah yang cukup signifikan, sekitar 0.04% saat ini. Walaupun pernah mencapai lebih dari 20% pada awal terbentuknya bumi, namun ber-angsur angsur berkurang dengan munculnya air (H₂O), yang dengan bantuan sinar matahari memicu proses reaksi fotosintesa, menghasilkan senyawa karbohidrat, diantaranya glukosa, dan oksigen (O₂).



Glukosa merupakan komponen dasar makhluk hidup, dalam hal ini tumbuhan, sehingga lingkungan hidup di bumipun atau biosfer mulai timbul dan berkembang. Disamping karbohidrat, kadar oksigen (O₂) pun ber-angsur angsur meningkat, bahkan sampai dengan kadar yang men-dominasi atmosfer (sekitar 20%). Maka mulai timbul dan berkembang makhluk hidup yang memerlukan proses metabolisme untuk menghasilkan energi, yang dibutuhkan untuk aktivitas kehidupannya, yaitu kelompok binatang. Energi tersebut diperoleh dari proses pembakaran senyawa karbohidrat (glukosa), dalam reaksi oksidasi dengan oksigen, baik yang ada di atmosfer maupun terlarut dalam air (hidrosfer).



Karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) yang dihasilkan dari reaksi oksidasi tersebut, kembali terlepas ke atmosfer, untuk kembali berfotosintesa. Demikian seterusnya proses2 tersebut membentuk suatu siklus.

Namun demikian, siklus karbohidrat tersebut dapat terganggu keseimbangannya oleh proses-proses lainnya, yang tidak terkait dengan siklus karbohidrat. Pembakaran misalnya, baik yang diakibatkan oleh aktivitas manusia ataupun terjadi secara alamiah (erupsi vulkanik, kebakaran hutan secara alamiah, dsb), akan meningkatkan kadar CO₂ dan membatasi O₂ di atmosfer. Kadar CO₂ yang berlebihan akan membentuk selimut yang menghalangi pemantulan panas dari permukaan bumi (efek rumah kaca). Sementara itu berkurangnya kadar O₂ akan menyerap lapisan Ozon (O₃) pada *stratosfer* hingga menipis dan membentuk lubang-lubang Ozon, yang memungkinkan radiasi *ultra-violet* dari matahari menerobos mencapai permukaan bumi. Gangguan siklus karbohidrat ini tentu akan berpengaruh terhadap siklus makhluk hidup di bumi.

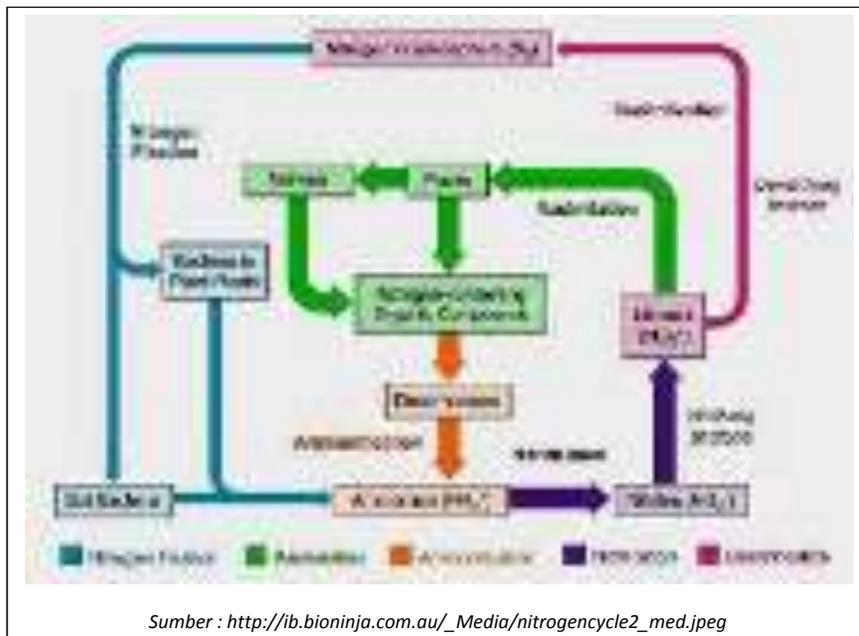
13.3.2. Siklus Nitrogen

Gas Nitrogen (N₂) merupakan gas yang paling banyak terdapat dalam lapisan atmosfer bumi. Nitrogen bereaksi lambat, namun merupakan bagian penting bagi proses kehidupan.

Siklus Nitrogen adalah suatu proses konversi senyawa kimia yang mengandung unsur Nitrogen menjadi berbagai macam bentuk senyawa kimiawi lainnya. Transformasi ini dapat terjadi secara biologis maupun non-biologis. Beberapa proses penting pada siklus nitrogen, antara lain adalah *fiksasi nitrogen*, *mineralisasi*, *nitrifikasi*, dan *denitrifikasi*.

Walaupun terdapat sangat banyak molekul Nitrogen (N₂) di atmosfer, Nitrogen dalam bentuk gas tidak bersifat reaktif. Hanya beberapa jenis organisme saja yang mampu untuk meng-konversinya menjadi senyawa organik dalam proses yang disebut *fiksasi nitrogen*. *Fiksasi nitrogen* lainnya terjadi pada proses klimatologi, seperti pada saat terjadinya kilat.

Hampir seluruh makhluk hidup mendapatkan senyawa Nitrogen dari makhluk hidup lainnya. Oleh sebab itu, reaksi *fiksasi nitrogen* sering disebut sebagai proses *topping-up* atau fungsi penambahan pada cadangan senyawa Nitrogen. Makhluk hidup, secara tidak langsung mengkonsumsi Nitrogen melalui asupan nutrisi dalam bentuk *protein* maupun *asam nukleat*. Didalam tubuh, *makromolekul* tersebut dicerna menjadi bentuk yang lebih kecil, yaitu *asam amino* dan komponen *nukleotida*, dan dipergunakan untuk men-sintesis *protein* dan *asam nukleat* baru, atau senyawa lainnya



Gambar 13.12. : Diagram Siklus Nitrogen

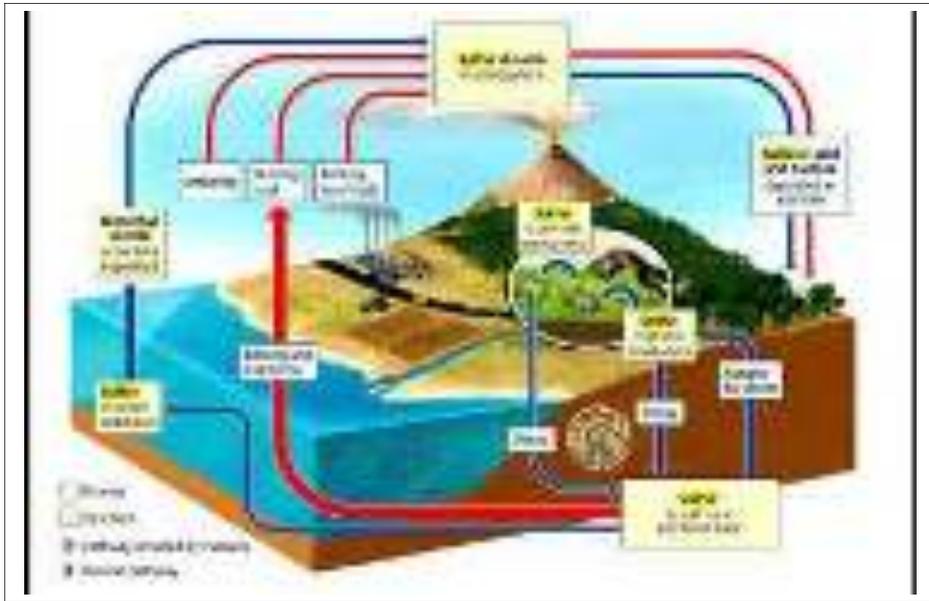
13.3.3. Siklus Sulfur (Belerang)

Siklus Sulfur atau belerang adalah salah satu bentuk siklus *biogeokimia*. Pengertian dan definisi lain dari siklus sulfur, adalah perubahan unsur sulfur dari hidrogen sulfida (H_2S) menjadi sulfur dioksida (SO_2), menjadi sulfat (SO_4^{2-}) dan kembali menjadi hidrogen sulfida (H_2S) dan seterusnya. Sulfur sendiri di alam ditemukan dalam berbagai bentuk, yaitu sebagai mineral dalam tanah dan batuan, sebagai gas sulfur dioksida (SO_2) di udara, dan sebagai penyusun protein dalam organisme.

Siklus sulfur dimulai dari dalam tanah, yaitu ketika ion-ion sulfat (SO_4^-) diserap oleh akar dan menjalani metabolisme menjadi penyusun protein dalam tubuh tumbuhan. Ketika hewan dan manusia memakan tumbuhan, protein tersebut berpindah kedalam tubuhnya. Dari dalam tubuh, senyawa sulfur kembali mengalami metabolisme, dimana sisa-sisa hasilnya diuraikan oleh bakteri dalam lambung dan dikeluarkan sebagai limbah gas.

Hidrogen sulfida (H_2S) dapat berasal dari penguraian hewan dan tumbuhan yang mati oleh mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur. Hidrogen sulfida (H_2S) hasil penguraian tersebut, sebagian akan tetap berada dalam tanah dan sebagian lainnya dilepaskan ke udara dalam bentuk gas. Gas hidrogen sulfida (H_2S) di udara kemudian bersenyawa dengan oksigen membentuk sulfur dioksida (SO_2), sedangkan hidrogen sulfida (H_2S) yang tertinggal didalam tanah dengan bantuan bakteri akan diubah menjadi ion-ion sulfat (SO_4^-) dan senyawa-senyawa sulfur oksida. Ion sulfat (SO_4^-) akan diserap kembali oleh tanaman sedangkan senyawa sulfur dioksida (SO_2) akan terlepas kembali ke udara.

Pelepasan sulfur dioksida (SO_2) ke udara juga dapat melalui peristiwa alam seperti erupsi vulkanik, atau asap-asap pabrik, kendaraan bermotor, dan pembakaran-pembakaran lainnya. Di udara, sulfur dioksida (SO_2) dapat bereaksi dengan oksigen (O_2) dan air (H_2O) membentuk asam sulfat (H_2SO_4) yang kemudian jatuh ke bumi dalam bentuk hujan asam. Hujan asam dapat menyebabkan korosi pada batu-batuan dan logam. Sementara itu, asam sulfat (H_2SO_4) yang jatuh kedalam tanah, diuraikan oleh bakteri menjadi ion-ion sulfat (SO_4^-) yang kembali diserap oleh tumbuhan, untuk kemudian di konsumsi oleh hewan dan manusia. Sementara itu makhluk hidup yang mati akan diuraikan oleh bakteri sehingga menghasilkan senyawa-senyawa sulfur kembali. Demikian seterusnya, siklus sulfur tidak pernah berhenti selama komponen-komponen pentingnya seperti tetumbuhan, masih ada di permukaan bumi.



Gambar 13.13. : Siklus *biogeokimia* Belerang (Sulfur)

Dalam siklus sulfur, perubahan senyawa-senyawa sulfur dapat terjadi secara *abiotik* ataupun secara *biotik*. Perubahan secara *abiotik* terjadi melalui reaksi antara senyawa-senyawa sulfur, oksigen dan air, sedangkan perubahan secara *biotik* terjadi oleh aktivitas mikroorganisme. Beberapa mikroorganisme yang berperan dalam siklus sulfur dalam hal ini adalah dari golongan bakteri. Yaitu diantaranya adalah bakteri *Desulfomaculum* dan bakteri *Desulfibrio*, yang mereduksi sulfat menjadi sulfida dalam bentuk hidrogen sulfida (H_2S). Berikutnya H_2S digunakan oleh bakteri *fotototrof anaerob* (*Chromatium*) dan melepaskan sulfur serta oksigen. Kemudian sulfur yang teroksidasi diubah menjadi sulfat oleh bakteri *kemolitotrof* (*Thiobacillus*).

1. $H_2S \rightarrow S \rightarrow SO_4^-$ (oleh bakteri sulfur tak berwarna, hijau dan ungu).
2. $SO_4^- \rightarrow H_2S$ (reduksi sulfat anaerobik oleh bakteri *Desulfovibrio*)
3. $H_2S \rightarrow SO_4^-$ (Peng-oksidasian sulfida aerobik oleh bakteri *Thiobacilli*).
4. S organik $\rightarrow SO_4^- + H_2S$ (masing-masing oleh mikroorganisme heterotrofik aerobik dan anaerobik)

13.3.4. Siklus Fosfor

Fosfor adalah nutrisi mineral penting untuk semua komponen kehidupan di alam, yang meliputi baik tanaman maupun hewan. Fosfor terdapat dalam air, tanah dan batuan, namun tidak terdapat di udara dalam bentuk gas seperti senyawa-senyawa lain dalam siklus materi.

Siklus fosfor merupakan siklus biogeokimia yang menggambarkan pergerakan fosfor melalui bidang ekosistem, yaitu melalui lithosfer, hidrosfer dan biosfer. Siklus fosfor merupakan siklus biogeokimia yang berjalan paling lambat diantara siklus-siklus materi lainnya. Fosfor memasuki biosfer melalui batuan dan endapan-endapan sedimen. Batuan yang mempunyai kandungan fosfat yang signifikan sehingga mempunyai nilai komersial diantaranya dikenal sebagai *Apatit*. Sedangkan deposit organik yang mempunyai kandungan fosfat komersial, diantaranya berasal dari dekomposisi fosil-fosil tulang hewan, dan kotoran burung yang dikenal sebagai *Guano*.

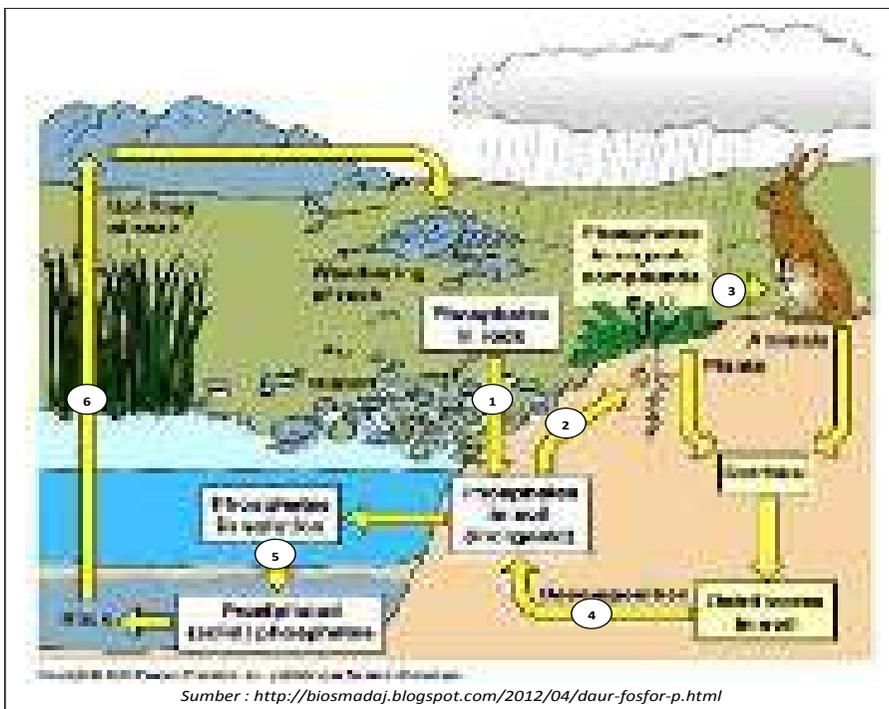
Fosfor membentuk ion fosfat, yang merupakan bagian penting dari molekul DNA dalam makhluk hidup, dan juga merupakan bagian dari molekul-molekul yang menyimpan energi, seperti ATP, ADP dan molekul lemak pada membran sel. Fosfor juga merupakan bagian penyusun utama kerangka makhluk hidup, seperti halnya pada tulang dan gigi hewan dan manusia.

Tahapan proses dalam siklus Fosfor adalah sebagai berikut :

1. Fosfor dalam tanah berasal dari batuan yang mengandung unsur Fosfor (P), yang mengalami desintegrasi dan dekomposisi, oleh sebab pelapukan, erosi dan sedimentasi, yang diendapkan sebagai ion-ion fosfat (PO^{3-}_4) dalam berbagai senyawa kimia. Sebagian kecil daripadanya juga terlarut dan terbawa dalam air menuju ke laut, dan di konsumsi oleh berbagai biota laut, seperti ikan dan berbagai jenis ganggang.
2. Ion-ion fosfat (PO^{3-}_4) dalam tanah diserap oleh akar-akar tetumbuhan bersama dengan sumber-sumber nutrisi lainnya untuk pertumbuhannya.
3. Ion-ion fosfat (PO^{3-}_4) kemudian berpindah kedalam tubuh hewan herbivora dalam proses makanannya. Dan juga kedalam tubuh

hewan karnivora yang memakan hewan-hewan herbivora atau biota laut.

4. Proses ekresi yang menghasilkan kotoran, dan hewan-hewan maupun tumbuhan yang mati, yang tertimbun dalam tanah sebagai detritus, yang kemudian ter-dekomposisi oleh aktivitas berbagai mikroba dalam tanah, sehingga menjadi ion-ion fosfat (PO^{3-}_4) dalam berbagai senyawa kimia.
5. Ion-ion fosfat (PO^{3-}_4) dalam berbagai senyawa kimia dalam tanah, sebagian terserap kembali oleh tetumbuhan untuk pertumbuhannya. Sebagian lainnya terbawa oleh air, mengendap, memadat dan meng-kristal kembali menjadi mineral-mineral fosfor dalam batuan.
6. Proses tektonik mengangkat batuan-batuan ber fosfor ke permukaan, tersingkap, ter-desintegrasi dan ter-dekomposisi, untuk seterusnya ter-erosi dan ter-endapkan kembali kedalam tanah.



Gambar 13.14. : Siklus *biogeokimia* Fosfor

13.4. Siklus Energi

Energi endogen bersumber dari panas bumi (*geothermal*) dan pergerakan arus konveksi didalam mantel. Panas bumi yang berada jauh jauh dibawah permukaan bumi memanaskan biosfer tetap hangat, sehingga dapat menjaga lingkungan yang sesuai untuk kelangsungan hidup dan bertumbuh kembangnya kehidupan. Walaupun ada kalanya panas bumi justru menjadi bencana katastrofik yang menghancurkan kehidupan, seperti ketika terjadi erupsi volkanik yang sangat besar.

Pergerakan arus konveksi dalam mantel menggerakkan kerak bumi yang mengapung diatasnya. Pergerakan tersebut sangat lambat, hanya dalam kisaran beberapa sentimeter per tahun, sehingga tidak memberi pengaruh signifikan bagi siklus-siklus *Biosfer* yang berada didalamnya. Namun dalam jangka panjang, dalam skala waktu geologi pergerakan tersebut memberi pengaruh yang cukup signifikan bagi *Biosfer*. Pergerakan-pergerakan benua dan lantai samudera yang membuka dan menutup, menyebabkan perubahan lingkungan *Biosfer*, dari lingkungan daratan menjadi perairan dan sebaliknya. Hal tersebut mendapat respon adaptasi dari berbagai organisme yang hidup diatasnya. Berbagai jenis organisme ber-adaptasi baik secara *somatik* maupun *genetik*, ber-evolusi dan juga mengalami kepunahan bagi organisme yang tak mampu ber-adaptasi. Namun akan selalu muncul organisme-organisme baru yang bertumbuh kembang mengikuti siklus-siklus *Biosfer* yang sesuai.

Adakalanya pergerakan kerak bumi melepaskan sejumlah besar energinya secara mendadak, yaitu dalam bentuk getaran gempa bumi yang terkadang diikuti dengan terjangan gelombang *tsunami*. Hal tersebut tentunya tidak terlalu memberikan dampak yang signifikan bagi siklus-siklus *Biosfer*, oleh karena peristiwa tersebut terjadi dalam waktu yang singkat. Walaupun dalam skala yang besar gempa bumi dapat merombak konfigurasi permukaan muka bumi, seperti dengan terjadinya longsor. Namun siklus hidrologi dan proses pembentukan batuan sedimen akan ber-angsur angsur menyeimbangkannya kembali.

Radiasi sinar matahari adalah sumber utama dari energi eksogen yang diterima oleh bumi. Matahari merupakan reaktor fusi nuklir yang sangat besar, dimana terjadi proses fusi antara inti atom

Deuterium (D-2) dengan Tritium (T-3) secara berantai, yang menghasilkan inti atom Helium (He-4), dengan menyebarkan sejumlah besar energi radiasi (*insolasi*) kesegala arah, yang sebagian diantaranya mengarah ke bumi.

Maka bumi menerima sebesar 179 Pentawatt (PW) radiasi surya (*insolasi*) pada bagian atas dari selimut atmosfer, dimana sekitar 30% lebih dipantulkan kembali ke luar angkasa, sedangkan sisanya diserap oleh awan, lautan, dan daratan. Sebagian besar spektrum cahaya matahari yang mencapai permukaan bumi berada pada jangkauan spektrum sinar tampak dan *inframerah* dekat, dan sebagian kecil lainnya berada pada rentang *ultraviolet* dekat.

Penyerapan radiasi matahari oleh permukaan daratan, lautan dan atmosfer memanaskan permukaan bumi, ber-interaksi dengan rotasi bumi dan peredaran bumi mengelilingi matahari, menggerakkan peredaran air dalam siklus hidrologi, dan juga menyebabkan terjadinya fenomena atmosferik lainnya, seperti angin, siklon dan anti-siklon.

Di daratan, energi matahari melalui proses fotosintesis pada tanaman, mengubah energinya menjadi energi kimia, dalam bentuk ikatan kimia senyawa karbohidrat yang merupakan materi kehidupan (*biomasa*), yang juga merupakan komponen dasar dari sumber energi potensial bahan bakar fosil, baik berupa minyak dan gas bumi, ataupun batubara.

Hanya sebagian kecil radiasi sinar matahari yang mencapai permukaan bumi, itupun hanya pada bagian permukaan bumi yang menghadap matahari pada siang hari. Maka, daerah tropis disekitar khatulistiwa adalah daerah yang mengalami penyinaran matahari terbanyak sepanjang tahun, dan merupakan habitat hidup utama organisme di bumi, baik manusia, binatang atau tetumbuhan.

Aliran energi dalam hal ini merupakan rangkaian urutan pemindahan bentuk energi satu ke bentuk energi yang lainnya, dimulai dari sinar matahari kepada organisme produsen, berlanjut pada organisme konsumen, sampai kepada organisme pengurai didalam tanah. Organisme memerlukan energi untuk mendukung kelangsungan hidupnya, seperti untuk proses pertumbuhan dan perkembangannya, reproduksi, bergerak, dan proses metabolisme yang ada dalam tubuhnya. Maka didalam ekosistem makhluk hidup

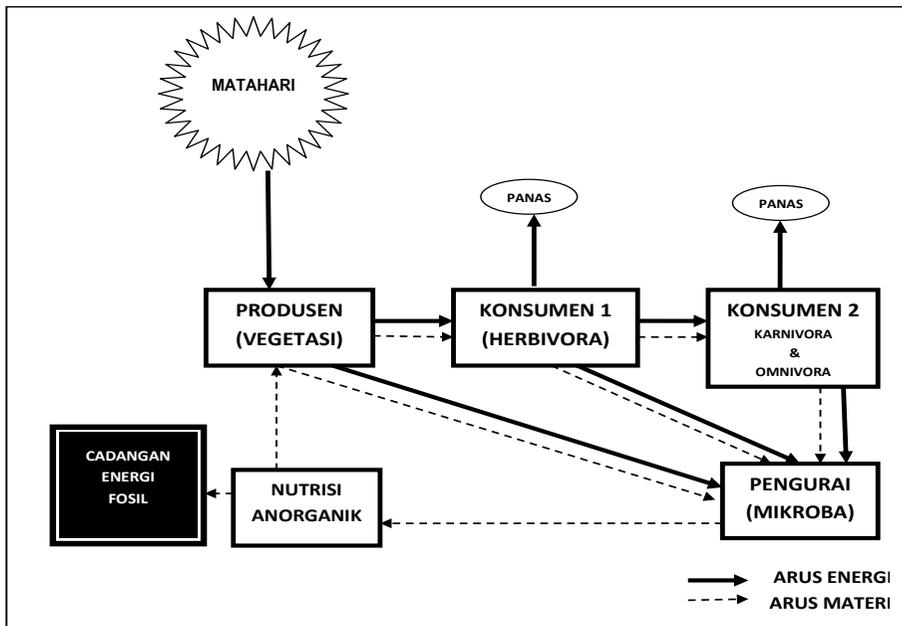
terjadi hubungan saling ketergantungan diantara komponen-komponennya, yang mencakup berbagai kebutuhan untuk bereproduksi, makanan, energi, air, mineral dan udara. Saling ketergantungan itulah yang kemudian membentuk rantai makanan dan aliran energi.

Pengertian aliran energi dalam ekosistem adalah proses berpindahnya energi dari suatu tingkat trofik ke tingkat trofik berikutnya dalam rantai makanan, dimana tumbuhan sebagai organisme produsen berada pada tingkat pertama, kemudian hewan sebagai organisme konsumen dan mikroba sebagai organisme pengurai berada pada tingkat-tingkat trofik berikutnya. Dengan cara tersebut ekosistem mempertahankan diri dengan siklus energi dan nutrisi yang diperoleh dari sumber eksternal.

Proses perpindahan atau aliran energi dalam hal ini mengikuti aliran rantai makanan. Dimulai dengan aliran energi matahari kedalam tumbuhan melalui proses fotosintesa. Hasil fotosintesis dalam tumbuhan yang disebut juga sebagai organisme produsen, disamping digunakan untuk metabolisme dan bertumbuh kembang, juga disimpan sebagai cadangan energi. Ketika konsumen herbivora meng-konsumsi tumbuhan, maka terjadi perpindahan cadangan energi kepada organisme konsumen, dan seterusnya ketika organisme konsumen karnivora meng-konsumsi organisme konsumen lainnya. Ketika organisme-organisme tersebut mati, maka berbagai mikroba organisme pengurai akan menyerap cadangan energi yang tersisa, menggunakannya untuk bertumbuh kembang, dan menyimpan sisanya yang tak terpakai sebagai cadangan nutrisi anorganik didalam tanah. Sebagian dari cadangan energi dalam nutrisi anorganik dalam tanah akan terserap kembali oleh organisme produsen melalui akar-akarnya. Sementara itu sebagian lainnya akan tetap tersimpan dalam tanah sebagai energi cadangan, yang dalam jangka panjang oleh proses geologi dapat dirubah menjadi cadangan energi fosil.

Pada setiap tingkat trofik, hanya sebagian kecil, sekitar 10% dari energi yang digunakan untuk kegiatan hidupnya. Sedangkan sebagian besar energi lainnya dilepaskan ke lingkungan dalam bentuk panas, sehingga semakin jauh dari sumbernya dalam rantai makanan akan semakin kecil alirannya. Maka dalam suatu ekosistem seolah terjadi pemborosan energi, dimana tampak bahwa energi mengalir dari luar (matahari) kedalam ekosistem dalam siklus terbuka. Energi tidak

dapat berdaur ulang kembali lagi ke matahari, namun demikian siklus rantai makanan dapat terus berputar oleh karena pasokan energi matahari yang sangat besar dan nyaris tak terbatas. Bahkan ekosistem pun menyiapkan sistem cadangan untuk menampung kelebihan energi yang tak terpakai, dalam bentuk nutrisi anorganik, yang oleh proses geologi dirubah menjadi cadangan energi fosil.



Gambar 13.15. : Diagram siklus energi yang menyertai rantai makanan

14

BENCANA & DAMPAK LINGKUNGAN

Bencana adalah suatu peristiwa yang menimbulkan dampak kerusakan yang signifikan bagi manusia, baik yang disebabkan oleh proses alam dan atau proses-proses non-alam. Bencana non-alam adalah bencana yang diakibatkan oleh peristiwa atau rangkaian peristiwa non-alam, seperti halnya kegagalan teknologi, kegagalan modernisasi, dan bencana yang diakibatkan oleh kecelakaan industri. Termasuk juga bencana sosial berupa peristiwa atau serangkaian peristiwa yang diakibatkan oleh ulah manusia, yang mengakibatkan konflik sosial antar kelompok, antar komunitas, bahkan antar negara yang berujung pada perang.

Undang-Undang Nomor 24 tahun 2007, tentang Penanggulangan Bencana, mendefinisikan bencana sebagai peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor non-alam maupun faktor manusia, sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

Bencana umumnya terkait dengan kerusakan secara fisik, yang terjadi secara mendadak dalam waktu yang singkat, namun dapat pula menimbulkan *dampak lingkungan* dalam jangka panjang. *Dampak lingkungan* dapat pula terjadi oleh sebab peristiwa atau bencana alam yang sangat hebat, sehingga berdampak terhadap keseimbangan lingkungan disekitarnya, bahkan dapat pula menenyapkan suatu ekosistem.

Menurut *UU Nomor 23 Tahun 1997 Tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup, Ps 1 - 20, dan UU Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan hidup Ps 1 - 26*, Dampak Lingkungan Hidup adalah pengaruh perubahan pada lingkungan

hidup yang diakibatkan oleh suatu usaha dan / atau kegiatan. Walaupun dampak lingkungan sendiri dapat bersifat positif atau negatif, namun pada umumnya dampak lingkungan dikaitkan dengan perubahan-perubahan ekosistem yang bersifat negatif, atau merugikan bagi masyarakat, dan terjadi berangsur-angsur dalam waktu yang tidak terlalu cepat, sehingga seringkali luput dari pengamatan.

Bencana ataupun *dampak lingkungan*, adalah peristiwa-peristiwa yang menimbulkan korban jiwa, cedera maupun kerugian materi bagi manusia, yang dapat terjadi secara saling terkait satu dengan lainnya. Tak ada batasan yang jelas diantara keduanya, namun *bencana lingkungan* biasanya ditujukan pada peristiwa yang menimbulkan korban dan berlangsung cepat, sedangkan *dampak lingkungan* biasanya terjadi berangsur-angsur dalam waktu yang relatif lebih lama. Namun keduanya terjadi oleh sebab berubahnya konfigurasi dan komposisi lingkungan, baik hidrosfer, lithosfer maupun atmosfer. Sedemikian rupa sehingga tidak lagi menunjang keserasian lingkungan oleh karena berubahnya keseimbangan. Korban akan dialami oleh manusia atau organisme lainnya yang tak mampu beradaptasi terhadap konfigurasi dan komposisi lingkungan yang baru.

Penemuan baru dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi, terutama pasca Revolusi Industri, pada dasarnya adalah suatu lompatan perkembangan teknologi dalam industri. Akan tetapi ke tidak siapan untuk menerima pembaharuan teknologi beserta dengan segala konsekuensi dan risikonya, dapat berakibat bencana bagi lingkungan sekitarnya. Peristiwa semacam ini disebut juga sebagai kecelakaan teknologi, atau kecelakaan kerja.

14.1. Polusi

Pengertian Polusi adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan, atau berubahnya tatanan lingkungan oleh kegiatan manusia atau oleh proses alam sehingga kualitas lingkungan menurun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya (*Undang-undang Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 4 Tahun 1982*). Polusi dalam arti pencemaran, dapat berupa pencemaran udara, air, tanah, suara (bising), cahaya dan sebagainya.

Pencemaran dapat terjadi dengan masuknya *polutan* kedalam sistem lingkungan hingga melampaui nilai ambang batas, yang mengakibatkan gangguan bagi makhluk hidup didalamnya. Polusi dapat menimbulkan perubahan unsur fisik, biologis, kimiawi dan thermis dalam suatu lingkungan, sehingga berpotensi menjadikan lingkungan tersebut menjadi tidak nyaman, serta ber-risiko bagi kehidupan makhluk hidup disekitarnya. Polusi ini dapat disebabkan oleh berbagai senyawa gas tertentu, senyawa padat, cair, dan faktor lainnya, yang mencemari udara, perairan, dan tanah, sehingga menimbulkan gangguan kesehatan fisik, bahkan juga mental (polusi cahaya dan suara). Polusi udara, air, tanah dan polusi di tempat kerja merupakan penyebab berbagai penyakit dan penyebab kelahiran prematur terbesar di dunia. Penyakit-penyakit yang disebabkan oleh polusi, konon tercatat sebagai penyebab atas 1 dari 6 kematian di dunia. Laporan *The Lancet Medical Journal* (19/10/2017) misalnya, mencatat setidaknya ada 9 juta orang meninggal dunia akibat polusi pada tahun 2015.

Polutan adalah zat atau bahan yang dapat mengakibatkan pencemaran terhadap lingkungan (udara, tanah, air). Suatu zat disebut *polutan* bila keberadaannya dapat menyebabkan kerugian terhadap makhluk hidup. Pencemaran atau polusi, terjadi dengan masuknya *polutan* kedalam sistem lingkungan, dengan jumlah melampaui jumlah normal yang dapat di-toleransi oleh kehidupan makhluk hidup yang memerlukannya, pada waktu yang tepat. Misalnya, *karbon dioksida* (CO_2) dengan kadar 0,033% di udara diperlukan oleh tumbuhan pada siang hari untuk menjalankan metabolismenya, namun apabila melebihi akan menimbulkan efek merusak.

Beberapa contoh *Polutan* yang berdampak pada lingkungan diantaranya adalah berbagai jenis logam berat, gas-gas beracun, berbagai gas rumah kaca, *Chloro-fluoro-carbons* (CFC), dan juga limbah plastik.

14.1.1. Logam Berat

Logam berat banyak terdapat di lingkungan sekitar kita, namun, tidak semuanya merugikan dan berbahaya. Logam berat akan berbahaya apabila kadarnya melebihi ambang baku.

Logam berat dapat berasal dari proses alam, dan dapat pula bersumber dari proses reaksi buatan (limbah atau reaksi buatan

manusia). Secara alamiah logam berat dapat ter-transportasi dan terendapkan sebagai partikel debu oleh angin, endapan sungai atau produk dari erupsi gunung api. Sedangkan oleh proses buatan, logam berat dapat berasal dari limbah industri, limbah rumah tangga seperti deterjen atau sabun, berbagai jenis sampah, dan asap hasil pembakaran.

Berikut adalah beberapa jenis polutan logam berat :

- **Cadmium (Cd)**

Cadmium berbahaya bagi kesehatan oleh karena sifatnya yang sangat beracun dan termasuk logam berat yang paling berbahaya bagi manusia. WHO menegaskan bahwa kadar Cd yang normal untuk di konsumsi adalah 400 µg per minggu, namun akan lebih baik jika tidak meng konsumsinya. Cd dalam makanan akan dapat menyebabkan gangguan paru-paru, diare kronis, dan *emphysema*. Kadar aman Cd apabila berada di tanah adalah 1 ppm, namun pernah dijumpai tanah dengan kadar Cd 1250 ppm disekitar pertambangan biji Seng (Zn).

- **Mercury (Hg-Air Raksa)**

Mercury (Hg) adalah logam berat yang berbahaya di lingkungan. Mercury yang mencemari lingkungan perairan, sebagian besar merupakan limbah hasil olahan manusia. Mercury yang mencemari perairan akan sangat berbahaya bagi lingkungan. Kontaminasi perairan akan merambat kepada kontaminasi ikan di perairan tersebut, dan akan berdampak pada manusia yang memakan ikannya. Kontaminasi mercury akan menyebabkan penyakit yang cukup parah bagi kesehatan, seperti penyakit syaraf, liver, jantung, bahkan dapat menyebabkan kematian.

- **Chromium (Cr)**

Chrom (Cr) adalah logam abu - abu yang keras, biasanya digunakan pada pabrik-pabrik pembuat gelas, metal, dan fotografi. Pada dasarnya Cr adalah logam dengan tingkat *toxic* yang tidak terlalu tinggi, namun senyawa Cr dengan unsur lainnya dapat bersifat sangat iritan dan korosif, sehingga berbahaya bagi tubuh manusia. Cr dapat menyebabkan infeksi atau kerusakan pada hidung, dan dapat memicu kanker pada paru - paru. Cr memiliki sifat sulit mengendap, sehingga apabila

masuk ke dalam tubuh, akan beredar hingga dapat terkumpul hampir pada setiap bagian tubuh manusia seperti ginjal, kulit bahkan otak.

- **Seng (Zn)**

Seng atau Zn adalah logam berat yang berbentuk padat. Seng biasanya ditemukan di pabrik alloy, aluminium, keramik, pigmen, dan karet. Pada dasarnya, Zn tidak terlalu *toxic* bagi tubuh manusia, bahkan Zn diperlukan untuk proses metabolisme dalam tubuh. Namun apabila kadarnya terlalu tinggi dapat bersifat *toxic*. Seng berwarna metal yang berkilauan, biasanya digunakan sebagai pelapis besi agar tahan karat.

- **Tembaga (Cu)**

Logam ini berbentuk kristal kemerahan. Cu memiliki efek *toxic* bagi manusia apabila terpapar oleh debu atau uap Cu, sehingga akan berbahaya bagi kesehatan. Biasanya akan mengakibatkan kerusakan pada selaput lendir di hidung. Cu juga dapat mengendap di paru-paru dan bersifat korosif, sehingga dapat mengakibatkan kanker dan kerusakan paru-paru.

- **Timah Hitam (Pb)**

Pb merupakan logam berat yang sering digunakan pada mesin otomotif. Pb memiliki sifat mudah terbakar dan iritatif. Berbahaya apabila memasuki tubuh manusia, oleh karena dapat mengakibatkan kerusakan. Dapat menyebabkan gangguan pada otak (menurunkan tingkat kecerdasan pada anak) apabila masuk melalui peredaran darah, oleh karena menyebabkan *Haemoglobin* sulit mengikat oksigen. Selain itu juga dapat menyebabkan gangguan reproduksi, penyakit kronik pada syaraf, dan gangguan paru-paru.

- **Arsenik (As)**

Arsen termasuk logam berat yang berbahaya. Arsen biasanya terdapat pada pabrik keramik atau kerajinan. Apabila masuk kedalam tubuh manusia secara berlebihan akan menyebabkan iritasi, baik pada bagian luar maupun dalam tubuh. Apabila terkena mata, akan menyebabkan iritasi pada kornea mata, katarak, bahkan dapat mengakibatkan kebutaan. Selain itu juga dapat menyebabkan kegagakan fungsi sumsum tulang belakang,

kerusakan ginjal, hati, paru-paru, kanker, liver, bahkan menyebabkan kematian.

14.1.2. Gas-gas Beracun

Gas utama yang sering dikategorikan sebagai gas beracun, diantaranya adalah CO, CO₂, H₂S, NO_x, dan SO₂. Namun gas beracun yang sering menimbulkan korban, terutama adalah gas CO, walaupun tidak menutup kemungkinan bahwa gas yang lainnya pun dapat menimbulkan bencana pula. Kompleks gunung berapi yang sering mengeluarkan gas beracun salah satunya adalah kompleks gunung api Dieng di Jawa Tengah, yaitu pada kawah Sinila dan kawah Timbang.

- Gas CO (gas karbon monoksida)

Karbon monoksida merupakan produk pembakaran yang tidak sempurna dari berbagai bahan bakar organik maupun fosil. Karbon monoksida (CO) merupakan senyawa yang tidak berbau, tidak berasa, dan pada suhu normal berbentuk gas yang tidak berwarna. Hal inilah yang menyebabkan gas CO menjadi gas yang mematikan bila terhisap sampai pada takaran tertentu. Salah satu kemampuan gas CO yang masuk ke paru-paru dan masuk ke pigmen merah atau hemoglobin adalah membentuk *carboxy hemoglobin* yang lebih stabil dibandingkan ikatan *oksi hemoglobin*. Ikatan *carboxy hemoglobin* ini mengganggu aktifitas peredaran oksigen keseluruh tubuh, sehingga mengganggu proses metabolisme otot dan fungsi enzim intra seluler. Kondisi ini akan lebih parah pada orang yang mengalami gangguan otot jantung atau sirkulasi darah perifer. Dampak yang diakibatkan dari gas CO bervariasi tergantung dari status kesehatan individu. Orang yang berbadan gemuk dapat mentolerir pajanan CO sampai kadar *carboxy hemoglobin (HbCO)* 40%. Kondisi ini tentu akan berbeda jika dialami oleh orang yang menderita penyakit jantung atau paru-paru. Kadar CO yang tinggi juga dapat menyebabkan perubahan tekanan darah, ritme jantung abnormal bahkan gagal jantung, dan kerusakan pembuluh darah perifer. Gejala yang muncul ketika terjadi keracunan gas CO pada konsentrasi rendah mirip dengan gejala flu, pusing, pernafasan terganggu dan rasa mual. Pada konsentrasi tinggi dapat menimbulkan kematian mendadak. Tindakan preventif yang bisa

diambil untuk meminimalisir keadaan yang tidak diinginkan adalah dengan memasang detektor karbon monoksida. Detektor ini akan mendeteksi adanya gas CO pada tingkat tertentu dan memberikan peringatan. Selain itu juga dapat menggunakan cara lain yaitu penggunaan masker dan alat pelindung diri dan menjauhi tempat-tempat yang berpotensi mengeluarkan gas CO.

- **Gas CO₂ (gas karbon dioksida)**

Gas ini berbahaya oleh karena tidak berbau dan tidak berwarna, dan memiliki berat jenis lebih tinggi dari udara, sehingga akan terbawa ke tempat yang lebih rendah, mendesak oksigen ke atas, dan memisahkannya dari makhluk hidup yang memerlukannya. Peningkatan kadar karbon dioksida dapat menimbulkan masalah gangguan pernafasan, dengan tingkat keparahan sesuai kadarnya di udara. Pada kadar lebih dari 5 persen gas ini dapat menimbulkan sesak nafas, sedangkan pada kadar lebih 30 persen dapat menyebabkan kematian. Dalam *Emergency Responses Guidebook 2008*, Karbon dioksida termasuk gas inert yang aman pada kadar normal namun, berbahaya pada kadar yang tinggi. Seperti halnya CO, gas ini dapat terbentuk secara alamiah pada erupsi gunung api, pembakaran bahan bakar fosil, atau juga dari peristiwa kebakaran besar seperti kebakaran hutan.

- **Gas Hidrogen Sulfida (H₂S)**

Gas hidrogen sulfida (H₂S) bersifat asam, tidak berwarna, berbau seperti telur busuk, berat jenis sekitar 1.19, termasuk gas beracun, mudah terbakar dan dapat membentuk campuran yang eksplosif dengan udara.

Tabel 14.1. : Indikasi dan bahaya kadar gas hydrogen sulfida

10-20 ppm	Berbau seperti telur busuk, tidak berbahaya
20-100 ppm	Pusing kepala, aman untuk 8 jam exposure
100-200 ppm	Indera penciuman “hilang”, “menusuk” mata dan telinga
500 ppm	Susah nafas selama 30 menit
700 ppm	Meninggal dalam 15 menit
1000 ppm	Mati dalam 1 menit

Sumber : *Emergency Response Guidebook 2008*

Dalam kadar rendah, gas ini dapat memicu iritasi pada mata, dan dalam kadar yang tinggi dapat meng-iritasi pernafasan. Sesuai *Emergency Response Guidebook 2008*, hidrogen sulfida termasuk gas beracun dan mudah terbakar sehingga berbahaya.

Gas ini secara alamiah sering dijumpai pada daerah-daerah gunung api aktif, dan dapat pula terbentuk dari proses dekomposisi bahan-bahan organik.

- **Gas SO₂ (Sulfur dioksida)**

Gas ini mudah dikenali karena memiliki bau yang menyengat. Keracunan gas ini dapat menyebabkan kesulitan bernafas, sakit dada, iritasi pada mata, hidung dan tenggorokan, batuk-batuk dan lain-lain. Berdasarkan pada *Emergency Response Guidebook 2008*, sulfur dioksida termasuk gas korosif, memiliki potensi bahaya pada kesehatan yaitu :

- Beracun, dapat berakibat fatal jika terhisap, tertelan dan terserap melalui kulit.
- Uap SO₂ dapat mengiritasi dan korosif.
- Kontak dengan gas atau gas cair dapat menyebabkan luka bakar, luka parah dan / atau radang dingin.
- Pembakaran api akan dapat menyebabkan iritasi, korosif dan / atau gas beracun.

Selain memiliki potensi bahaya kesehatan gas ini memiliki potensi bahaya lain yaitu :

- Dapat membakar walaupun tidak mudah terbakar.
- Uap dari gas cair pada dasarnya lebih berat daripada udara dan dapat menyebar disepanjang tanah.
- Dapat bereaksi dengan air sehingga menimbulkan kontaminasi, seperti dengan terjadinya hujan asam yang korosif.

Selain dihasilkan oleh proses gunung api, gas ini juga terbentuk dari hasil pembakaran bahan bakar fosil yang berkadar sulfur tinggi.

- Gas NO_x (oksida2 nitrogen)

NO_x adalah salah satu partikulat yang membawa dampak terhadap suhu dan kualitas atmosfer. NO_x atau oksida nitrogen adalah kelompok gas yang ada di atmosfer. Oksida nitrogen terdiri dari gas NO atau nitrogen monoksida dan nitrogen dioksida atau NO₂. NO adalah gas yang terbanyak dari jumlah NO_x yang ada di udara. Kandungan NO_x didaerah gunung api juga dipengaruhi oleh aktifitas gunung tersebut. Pembentukan dari gas NO dan NO₂ merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen yang ada diudara. Reaksi antara oksigen dan nitrogen akan membentuk NO, sedangkan reaksi dimana kadar oksigennya lebih banyak akan menghasilkan NO₂. Kadar NO_x setiap harinya dapat bervariasi sebagai berikut :

1. Kadar NO_x stabil sebelum matahari terbit dan dapat sedikit lebih tinggi dari kadar minimum hariannya.
2. Sekitar jam 6-8 pagi kadar NO meningkat seiring meningkatnya aktivitas manusia.
3. Kadar *Ozon* dapat meningkat seiring menurunnya kadar NO.
4. Produk pencemaran NO_x dapat berupa asam nitrat, yang kemudian diendapkan sebagai garam nitrat didalam air hujan dan debu.

NO_x meliputi gas-gas seperti NO dan NO₂, namun yang berbahaya adalah NO₂ oleh karena dapat berdampak keracunan sebagaimana halnya gas CO. Sementara itu gas NO diudara dalam keadaan ambient normal dapat mengalami oksidasi menjadi NO₂.

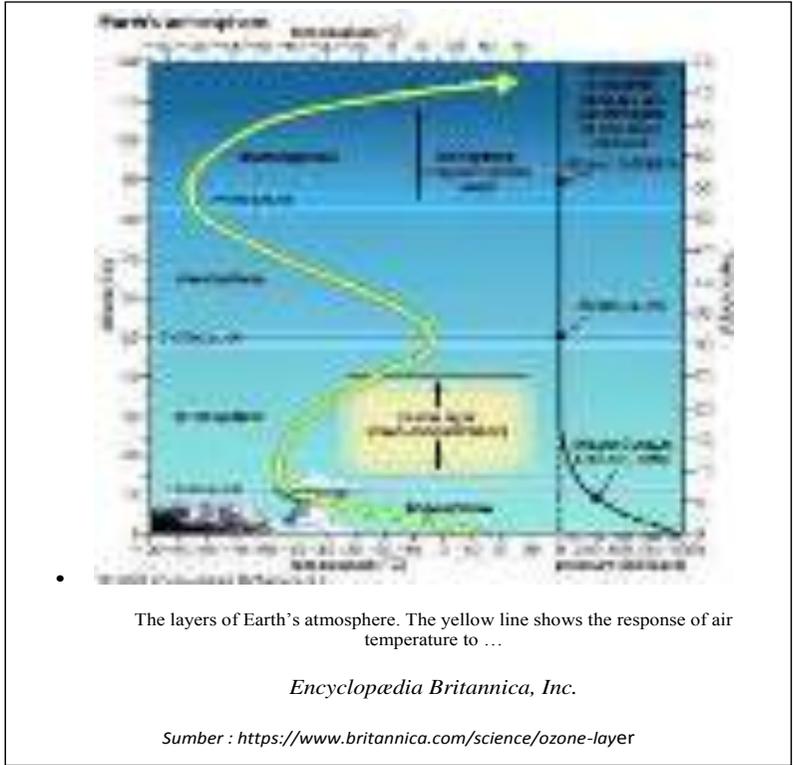
NO₂ yang terhisap akan dapat meracuni paru-paru, yaitu pada kadar NO₂ melebihi 100 ppm dapat menyebabkan edema paru-paru (pembengkakan pulmonari), sementara itu pada kadar 800 ppm dapat mengakibatkan kematian dalam waktu pemajanan 29 menit atau kurang. Pemajanan pada kadar 5 ppm selama 10 menit dapat mengakibatkan gangguan pernafasan.

14.1.3. Gas Rumah Kaca

Matahari adalah sumber energi eksternal yang memanasi permukaan bumi, dimana sebagian besar energi tersebut berbentuk radiasi gelombang pendek, termasuk cahaya tampak. Ketika energi tersebut sampai di permukaan bumi, akan berubah menjadi panas yang menghangatkan bumi. Permukaan bumi akan menyerap sebagian panas, dan memantulkan kembali sisanya, yang sebagiannya berwujud radiasi gelombang panjang *infra-merah* ke angkasa luar. Namun sebagian panas akan tetap terperangkap di atmosfer Bumi akibat akumulasi gas rumah kaca, yang antara lain berupa uap air (H_2O), karbon dioksida (CO_2), sulfur dioksida (SO_2) dan metana (CH_4), yang menjadi perangkap bagi pantulan gelombang radiasi tersebut. Gas-gas tersebut menyerap dan memantulkan kembali radiasi gelombang yang dipancarkan bumi, sehingga panas tersebut tersimpan di atmosfer dekat permukaan bumi. Gas-gas tersebut berperan sebagaimana halnya rumah kaca, dimana dengan semakin meningkatnya konsentrasi gas-gas tersebut di atmosfer, akan semakin banyak pula panas yang terperangkap di bawahnya. Apabila keadaan ini terjadi terus-menerus, maka akan berdampak pada kenaikan temperatur rata-rata tahunan di permukaan bumi. Peristiwa tersebut, disebut sebagai *efek rumah kaca*. *Efek rumah kaca* pada dasarnya dibutuhkan oleh makhluk hidup yang ada di bumi, oleh karena tanpanya planet bumi akan menjadi sangat dingin. Dengan temperatur rata-rata $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($59\text{ }^{\circ}\text{F}$), permukaan bumi sebenarnya telah lebih panas $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($59\text{ }^{\circ}\text{F}$) dari temperatur pada awalnya. Maka, tanpa *efek rumah kaca* temperatur permukaan bumi hanya sekitar $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga es akan menutupi seluruh permukaan bumi. Namun sebaliknya, apabila *gas-gas rumah kaca* ter-akumulasi secara berlebihan di atmosfer, maka akan mengakibatkan pemanasan global.

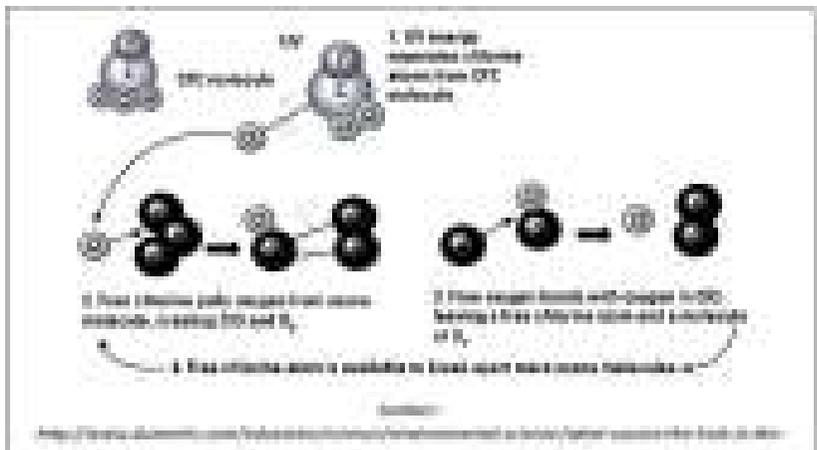
14.1.4. CFC (Chloro-Fluoro-Carbons)

Chloro-fluoro-carbons atau CFC ini dikenal sejak tahun 1920an, sebagai gas pendorong dalam alat pemadam kebakaran, *hairspray*, *refrigerator coolant* dan sebagainya. Gas tersebut pada dasarnya bersifat tidak aktif (*inert*) dan tidak beracun (*non-toxic*), dan dianggap tidak berbahaya. Namun gas ini bersifat stabil diudara dan tak mudah terurai, sehingga dari waktu ke waktu konsentrasinya di atmosfer semakin meningkat dan terus terdesak keatas.



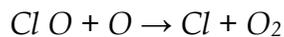
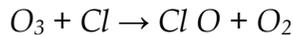
Gambar 14.1. : Konsentrasi lapisan Ozon di atmosfer

Pada tahun 1973, ahli kimia *Frank Sherwood Rowland* dan *Mario Molina* dari *University of California – Irvine*, mempelajari dampak CFC di atmosfer bumi, dan menemukan bahwa molekul CFC cukup stabil untuk tetap berada di atmosfer sampai ke tengah *stratosfer*.



Gambar 14.2. : Diagram intervensi CFC pada siklus ozon

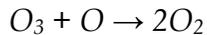
Intervensi atom Chlorine (Cl) menyebabkan reaksi kimia :



Sehingga reaksi kimia semula :



Bergeser menjadi



Selanjutnya molekul CFC akan terurai oleh radiasi *ultra-violet*, dengan membebaskan atom Chlorin (Cl). Atom Chlorin inilah yang diduga menjadi penyebab kerusakan lapisan Ozon di *stratosfer*. Penipisan lapisan Ozon memungkinkan lebih banyak sinar *ultra-violet* menerobos sehingga mencapai permukaan bumi.

14.1.5. Limbah Plastik

Alexander Parkes adalah orang pertama yang memperkenalkan plastik, yaitu pada eksibisi internasional di London - Inggris pada tahun 1862. Plastik temuan *Parkes* ini disebut *Parkesine*, dibuat dari bahan organik dari selulosa. Plastik hasil temuannya ini mempunyai karakteristik menyerupai karet, namun dengan harga yang lebih murah. *Parkesine* ini juga dapat dibuat transparan dan mampu dibuat dalam berbagai bentuk, namun masih belum memasyarakat oleh karena masih mahalnya bahan baku yang digunakan. *Leo Baekeland* (1907) menemukan bahan sintesis pertama yang dikembangkan dari resin cair, yang diberi nama *Bakelite*. Material ini tidak terbakar, tidak meleleh dan tidak mencair dalam larutan asam cuka, sehingga sekali terbentuk tidak akan dapat berubah. *Bakelite* dapat ditambahkan pada berbagai material lainnya seperti kayu lunak.

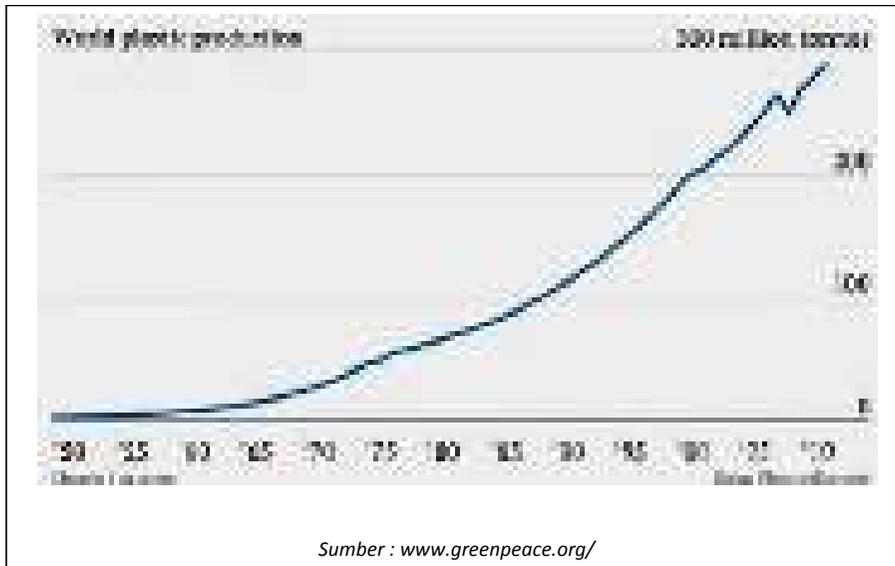
Ralph Wiley (1933), pekerja laboratorium perusahaan kimia Dow, secara tak sengaja menemukan sejenis plastik lain yaitu *Polyvinylidene Chloride*, yang kemudian dikenal dengan sebutan *Saran*, yang pertama kali digunakan untuk peralatan militer. Namun kemudian bahan ini diketahui juga sesuai untuk digunakan sebagai pembungkus makanan, oleh karena dapat melekat pada hampir setiap perabotan seperti mangkok, piring, panci, dan bahkan pada lapisan *Saran* sendiri.

Pada tahun yang sama, *E.W. Fawcett* dan *R.O. Gibson* dari *Imperial Chemical Industries Research Laboratory* menemukan *Polyethylene*, yang mempunyai dampak besar bagi dunia industri. Bahan ini ringan serta tipis, sehingga pada masa Perang Dunia II digunakan sebagai pelapis kabel bawah air, dan sebagai isolasi untuk radar. Pada tahun 1940 penggunaan *Polyethylene* sebagai bahan isolasi mampu mengurangi berat radar sebesar 600 pounds atau sekitar 270 kg. Plastik jenis ini semakin populer pasca perang, dan saat ini banyak digunakan untuk membuat botol minuman, jerigen, tas belanja, dan berbagai kontainer penyimpanan makanan.

Penggunaan plastik secara masal berkembang pada tahun 1970an, ketika perusahaan-perusahaan ritel raksasa Amerika Serikat seperti *Sears*, *Jordan Marsh*, mulai menggunakan kantong plastik sebagai alternatif pengganti kantong kertas. Berlanjut pada tahun 1977, dimana kantong plastik mulai dipergunakan di toko-toko kelontong di Amerika Serikat dan Kanada.

Plastik merupakan material baru, yang secara luas dikembangkan dan digunakan sejak abad ke-20, berkembang secara luar biasa dalam penggunaannya, dari hanya beberapa ratus ton pada tahun 1930-an, menjadi 150 juta ton/tahun pada tahun 1990-an dan 220 juta ton/tahun pada tahun 2005. Plastik yang mulai digunakan sekitar 50 tahun yang lalu, kini telah menjadi barang yang tak terpisahkan dari kehidupan manusia. Saat ini penggunaan material plastik di negara-negara Eropa Barat mencapai 60 kg/orang/tahun, di Amerika Serikat mencapai 80 kg/orang/tahun, sementara di India hanya 2 kg/orang/tahun.

Produksi plastik yang berlebihan, menghasilkan limbah plastik yang besar pula. Oleh karena plastik mempunyai sifat sulit terdegradasi (*non-biodegradable*). Plastik diperkirakan membutuhkan waktu 100 hingga 500 tahun untuk dapat ter-dekomposisi (terurai) dengan sempurna



Gambar 14.3. : Perkembangan produksi plastik dunia.

Secara kimiawi, plastik merupakan rangkaian molekul hidrokarbon dimana unsur penyusun dasarnya adalah karbon dan hidrogen. Plastik yang mempunyai struktur paling sederhana adalah *Polyethylene (PE)*, yang umumnya terdiri dari sekitar 1000 atom karbon pada tulang punggungnya. Molekul plastik sering disebut sebagai makro molekul oleh karena ukurannya yang sangat besar dilihat dari panjang rantai karbonnya. Untuk menyederhanakan penyebutan struktur kimia dari makro molekul tersebut, maka dilakukan penyingkatan, dimana bagian terkecil dari rantai karbon yang panjang disebut dengan *mer* atau *monomer*. Maka secara kimiawi sering dituliskan sebagai :



Dimana *n* adalah jumlah atau derajat dari polimerisasi, sedangkan polimerisasi menunjukkan penggabungan dari *monomer-monomer*. Pada saat ini dikenal ada ribuan jenis plastik, namun pada dasarnya atom-atom penyusun inti plastik adalah Karbon (C), Hidrogen (H) dan beberapa tambahan atom Oksigen (O), nitrogen (N), Klor (Cl), Fluor (F), dan belerang (S).

Pada 2018, diperkirakan sekitar 380 juta ton plastik telah diproduksi di seluruh dunia. Sehingga total dari tahun 1950 sampai

dengan 2018, diperkirakan telah di-produksi 6,3 miliar ton plastik, dimana 9% diantaranya didaur ulang, dan 12% lainnya dibakar. Di Inggris, lebih dari 5 juta ton plastik telah di-konsumsi setiap tahun, dan diperkirakan hanya seperempatnya yang didaur ulang, dan sisanya dibuang sebagai *landfill*. Maka sejumlah besar limbah plastik terbangun memasuki lingkungan, dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa 90% tubuh burung laut mengandung sisa-sisa plastik. Beberapa peneliti bahkan menyatakan, bahwa pada tahun 2050 kemungkinan akan ada lebih banyak plastik di lautan daripada ikan.

Polusi limbah plastik dapat mengenai tanah, saluran air dan lautan. Organisme yang hidup, terutama biota laut, dapat terdampak baik oleh efek mekanis seperti terjatuh di dalam objek plastik, menelan limbah plastik, atau terpapar kandungan bahan kimia dalam plastik sehingga mengganggu fisiologinya.

Limbah plastik yang berkontribusi terhadap pencemaran plastik meliputi *mikroplastik*, *megaplastik* dan *makroplastik*. *Mega* dan *makro* plastik teridentifikasi telah ter-akumulasi dalam kepadatan tinggi di belahan bumi utara, ter-konsentrasi disekitar pusat kota dan *waterfront*.



Gambar 14.4. : Hambaran limbah plastik di *waterfront* pulau Roatan-Karibia-Honduras.

Mikroplastik dapat terdiri dari *Mikroplastik* primer dan sekunder, dimana *Mikroplastik* primer sengaja diproduksi untuk industri produk tertentu seperti kosmetik, pasta gigi, sabun, dan deterjen. Sedangkan *Mikroplastik* sekunder berasal dari plastik ukuran besar yang terdegradasi secara alamiah menjadi partikel yang lebih kecil. Namun keduanya berbahaya apabila masuk ke dalam tubuh manusia atau hewan. *Mikroplastik* bersifat layaknya *transporter*, memiliki kecenderungan untuk mengikat bahan-bahan lain, seperti limbah logam berat, deterjen, pestisida, dan racun. Sehingga, ketika memasuki tubuh, disamping akan menyumbang *chemical* plastiknya sendiri, juga akan melepaskan bahan-bahan lain yang dibawanya, yang akan diserap oleh tubuh. Dengan kata lain *Mikroplastik* mempunyai kecenderungan menyerap bahan kimia beracun, dan melepaskannya ke dalam sistem pencernaan.

Beberapa masalah kesehatan yang dapat disebabkan oleh konsumsi partikel *mikroplastik* adalah sebagai berikut :

- Menyebabkan penyakit *kardiovaskular* atau *serebrovaskular*.
- Memicu kanker dan dapat mempengaruhi sistem kekebalan dan sistem saraf.
- *Mikroplastik* di udara yang terhirup, akan mencapai paru-paru dan dapat menyebabkan lesi pada sistem pernapasan.
- *Mikroplastik* dapat bertindak sebagai pembawa racun dan polutan lain yang ada di udara, seperti bakteri, sehingga menyebabkan kesulitan bernafas.
- Dalam beberapa kasus, dapat menyebabkan kelainan pada janin oleh karena adanya *Mikroplastik* dalam plasenta.

Cara mudah untuk menangani limbah plastik adalah dengan dibakar, namun plastik yang terbentuk dari berbagai bahan kimia yang tidak akan terurai secara alami, apabila dibakar akan melepaskan bahan-bahan kimia pembentuknya, dan terurai atau menghasilkan senyawa baru. Dalam hal ini Dioksin dan Furan adalah hasil yang akan dilepaskan ke udara dalam proses pembakaran plastik, dimana kedua senyawa ini bersifat *karsinogen*.

Dioksin merupakan kelompok zat-zat berbahaya yang termasuk dalam golongan senyawa CDD (*Chlorinated Dibenzo-p-Dioxin*), CDF (*Chlorinated Dibenzo Furan*), dan PCB (*Poly Chlorinated Biphenyl*). *Dioksin* berasal dari proses sintesis kimia pada proses pembakaran zat

organik yang bercampur dengan unsur halogen pada temperatur tinggi. *Dioksin* berasal dari pembakaran limbah rumah tangga maupun industri yang mengandung senyawa khlor seperti pestisida, plastik, dan pulp kertas. Sedangkan pembakaran karbon yang tidak sempurna menghasilkan karbon monoksida dan *partially oxidized hydrocarbons*. Suhu tinggi menyebabkan sebagian kecil nitrogen ter-oksidasi menjadi nitrat oksidan dan nitrat dioksida. Sulfur dalam bahan bakar atau limbah akan ter-oksidasi menjadi sulfur dioksida dan sulfur trioksida yang akan bereaksi dengan air membentuk asam sulfat. Apabila limbah atau bahan bakar mengandung halogen seperti *khlorin* dan *fluorin*, akan dapat membentuk *dioksin*. Berdasarkan *Enviromental Protection Agency (1994)*, beberapa sumber utama *dioksin* berasal dari hasil pembakaran sampah, hasil sampingan proses produksi pestisida, hasil pembakaran pada proses produksi baja, dan air buangan industri, terutama industri kertas yang menggunakan khlor sebagai pemutih. *Dioksin* juga dapat dihasilkan dari kebakaran hutan dan aktivitas gunung berapi (*Tchobanoglous et al., 1993*).

Furan, juga dikenal sebagai *furfuran* atau *furana*, adalah sejenis senyawa kimia *heterosiklik*, umumnya diturunkan dari dekomposisi thermal bahan-bahan yang mengandung *pentosa* seperti kayu tusam. *Furan* tidak berwarna, mudah terbakar, sangat mudah menguap dengan titik didih merndekati suhu kamar, dan dapat bersifat *karsinogenik*.

Limbah plastik tidak akan mengeluarkan zat *dioksin* dan *furan*, apabila dibakar pada suhu tinggi lebih dari 1000⁰ C. Namun, pembakaran untuk mencapai suhu 1000⁰ C, hanya dapat dilakukan dengan *incinerator*, yang berbiaya mahal.

Sejauh ini belum terjadi bencana lingkungan yang signifikan yang diakibatkan oleh limbah plastik. Namun tanpa upaya penanganan yang optimal, keberadaan limbah plastik ber-potensi memicu bencana lingkungan dikemudian hari, mengingat semakin meningkat pesatnya produksi dan konsumsi plastik untuk berbagai kepentingan.

14.2. Tragedi Minamata

Pada akhir tahun 1953, disebelah baratdaya pulau Kyushu - Jepang, disekitar teluk Minamata, beberapa penduduk dan keluarga

Melalui pengamatan yang mendalam dari gejala penyakit yang ditimbulkan, dan pengamatan atas kebiasaan pola makan penduduk, maka diperoleh suatu hipotesa bahwa penyakit tersebut menyerupai dampak yang diakibatkan oleh keracunan logam berat. Sedangkan pengamatan atas budaya masyarakat setempat, diketahui bahwa penduduk mempunyai kebiasaan meng-konsumsi ikan laut dalam jumlah besar.

Para peneliti dari *Universitas Kumamoto (Medical study group)* dan Kementrian kesehatan dan kesejahteraan Jepang akhirnya menyimpulkan bahwa telah terjadi pencemaran *methyl-mercury* di teluk Minamata, dimana diduga seluruh ikan dan hewan laut lainnya di teluk Minamata telah tercemar. Sementara itu, umumnya penduduk Minamata mengkonsumsi ikan rata-rata sebanyak 3 kg per-hari, sehingga hal ini menyebabkan *bio-akumulasi* yang menyebabkan gangguan pada system syaraf. Penelitian selanjutnya menemukan bahwa sumber *merkuri* berasal dari limbah pabrik *Chisso*.

Pabrik *Chisso* yang didirikan pada tahun 1908, merupakan pabrik yang memproduksi pupuk kimia untuk pertanian dan salah satu pabrik besar yang bergerak dalam bidang ini di Jepang. Selain memproduksi pupuk kimia, *Chisso* juga memproduksi *Asam asetat (Acetic acid)*, *Vinyl Chloride* dan *Plasticizers*, dimana dalam memproduksi *asam asetat*, *Chisso* menggunakan *Methyl-mercury* sebagai katalis untuk membuat *Acetaldehyde*. *Acetaldehyde* inilah yang nantinya akan menjadi *asam asetat*. Dengan sistem pengolahan limbah yang buruk, pabrik *Chisso* membuang limbah *Methyl-mercury* ke teluk Minamata, dimana hal ini menjadi cikal bakal tragedi Minamata. *Chisso* akhirnya menutup pabriknya pada tahun 1968, dengan membayar ganti rugi sebesar 26.6 juta dolar.

Tragedi *Minamata* terjadi akibat kegagalan industri atau modernisasi, sehingga berdampak pada penumpukan (*bio-akumulasi*) zat *methyl-mercury* pada tubuh manusia, dimana proses *bio-akumulasi* tersebut terjadi oleh sebab masuknya *methyl-mercury* kedalam *siklus rantai makanan*. Dan laut yang tercemar menyebabkan *plankton* sebagai makanan ikan juga turut tercemar, sehingga berikutnya *methyl-mercury* ini ter-akumulasi dalam tubuh ikan, dan manusia sebagai puncak dalam *siklus rantai makanan* akan mengalami akumulasi kandungan *methyl-mercury* terbanyak (*bio-magnification*).

Perairan teluk Minamata termasuk ekosistem kehidupan didalamnya, dalam hal ini telah tercemar berat, sehingga tak dapat lagi dikelola. Namun bagaimanapun, perikanan merupakan sumber mata pencaharian utama masyarakat nelayan, yang menggerakkan ekonomi di sepanjang teluk Minamata. Hal ini di-antisipasi oleh pemerintah bersama dengan *Chisso*, dengan tetap membiarkan penangkapan ikan terus berjalan, namun membeli seluruh hasil tangkapannya untuk dimusnahkan. Pemerintah Daerah Kumamoto juga melakukan pengerukan sedimen untuk membersihkan perairan teluk Minamata.

Pengalaman pahit tragedi Minamata telah menjadi pelajaran berharga bagi masyarakat setempat. Kesadaran akan perlunya mengolah sampah dan limbah, tumbuh dan menjadi budaya masyarakat. Sehingga pada saat ini, teluk Minamata telah bersih dan bebas dari *merkuri* seperti yang diinformasikan oleh pemerintah daerah *Kumamoto*. Bahkan teluk Minamata merupakan teluk yang terbersih di *Prefecture Kumamoto* dan dijadikan sebagai *eco-tourism area*, yang mengajarkan bagaimana hidup sehat dan menjaga lingkungan.

14.3. Pemanasan Global & Protokol Kyoto

Temperatur rata-rata global pada permukaan bumi telah meningkat sebesar 0.74 ± 0.18 °C (1.33 ± 0.32 °F) dalam seratus tahun terakhir. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* menyimpulkan bahwa, sebagian besar peningkatan temperatur rata-rata global sejak pertengahan abad ke-20 diduga disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas-gas rumah kaca, yang diakibatkan oleh aktivitas manusia, yang mengakibatkan efek rumah kaca. Kesimpulan dasar ini telah dikemukakan oleh setidaknya 30 badan ilmiah dan akademis, termasuk semua akademi sains nasional dari negara-negara G-8, walaupun terdapat sanggahan dari beberapa ilmuwan atas beberapa kesimpulan yang dikemukakan *IPCC* tersebut.

Dari model iklim yang dijadikan sebagai acuan dalam proyek *IPCC*, ditunjukkan bahwa temperatur permukaan global akan meningkat sekitar 1.1 - 6.4 °C (2.0 - 11.5 °F) antara tahun 1990 sampai 2100. Meningkatnya temperatur global diperkirakan akan berdampak pada terjadinya berbagai perubahan, seperti naiknya permukaan air

laut, meningkatnya intensitas fenomena cuaca yang ekstrim, serta perubahan-perubahan pada pola musim hujan. Akibat pemanasan global lanjutan lainnya adalah terpengaruhnya pertanian, hilangnya gletscher, dan punahnya berbagai jenis hewan.

Walaupun sebagian besar penelitian terfokus pada periode sampai dengan tahun 2100, dimana tingkat emisi gas rumah kaca diperkirakan telah stabil, pemanasan dan kenaikan muka air laut diperkirakan akan masih tetap berlanjut selama lebih dari seribu tahun, dimana hal tersebut mencerminkan besarnya kapasitas kalor yang dimiliki lautan.

14.3.1. Efek Rumah Kaca

Matahari adalah sumber energi eksternal yang memanasi permukaan bumi, dimana sebagian besar energi tersebut berbentuk radiasi gelombang pendek, termasuk cahaya tampak. Ketika energi tersebut mencapai permukaan bumi, akan berubah menjadi panas yang menghangatkan bumi. Permukaan bumi akan menyerap sebagian panas, dan memantulkan kembali sisanya, yang sebagiannya berwujud radiasi gelombang panjang *infra-merah* ke angkasa luar. Namun sebagian panas akan tetap terperangkap di atmosfer Bumi akibat akumulasi gas rumah kaca, yang antara lain berupa uap air (H_2O), karbon dioksida (CO_2), sulfur dioksida (SO_2) dan metana (CH_4), yang menjadi perangkap bagi pantulan gelombang radiasi tersebut. Gas-gas tersebut menyerap dan memantulkan kembali radiasi gelombang yang dipancarkan bumi, sehingga panas tersebut tersimpan di atmosfer dekat permukaan bumi. Gas-gas tersebut berperan sebagaimana halnya rumah kaca, dimana dengan semakin meningkatnya konsentrasi gas-gas tersebut di atmosfer, akan semakin banyak pula panas yang terperangkap di bawahnya. Apabila keadaan ini terjadi terus-menerus, maka akan berdampak pada kenaikan temperatur rata-rata tahunan di permukaan bumi. Peristiwa tersebut, disebut sebagai *efek rumah kaca*. *Efek rumah kaca* pada dasarnya dibutuhkan oleh makhluk hidup yang ada di bumi, oleh karena tanpanya planet bumi akan menjadi sangat dingin. Dengan temperatur rata-rata $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($59\text{ }^{\circ}\text{F}$), permukaan bumi sebenarnya telah lebih panas $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($59\text{ }^{\circ}\text{F}$) dari temperatur pada awalnya. Maka, tanpa *efek rumah kaca* temperatur permukaan bumi hanya sekitar $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,

sehingga es akan menutupi seluruh permukaan bumi. Namun sebaliknya, apabila *gas-gas rumah kaca* ter-akumulasi secara berlebihan di atmosfer, maka akan mengakibatkan pemanasan global.

Pemanasan global juga dipengaruhi oleh berbagai proses umpan balik, seperti contoh pada penguapan air. Pada kasus pemanasan akibat bertambahnya gas rumah kaca seperti CO₂, pemanasan pada awalnya menyebabkan lebih banyak penguapan air. Oleh karena uap air juga merupakan gas rumah kaca, pemanasan akan terus berlanjut dan meningkatkan jumlah uap air di udara sampai tercapai keseimbangan uap air di udara. Efek umpan balik karena pengaruh awan sampai saat ini masih menjadi objek penelitian. Dari arah bawah, awan akan memantulkan kembali radiasi infra-merah ke permukaan bumi, sehingga akan meningkatkan efek pemanasan. Namun sebaliknya dari arah atas, awan akan memantulkan sinar matahari dan radiasi infra-merah kembali ke angkasa, sehingga menimbulkan efek pendinginan. Walaupun demikian, umpan balik awan berada pada posisi yang cukup signifikan dan berpotensi untuk dapat meningkatkan pemanasan. Umpan balik penting lainnya adalah berkurangnya kemampuan memantulkan cahaya (*albedo*) oleh es. Ketika temperatur global meningkat, terjadi pencairan es di permukaan bumi dengan kecepatan yang terus meningkat. Bersamaan dengan itu, daratan atau air di bawah lapisan mulai terbuka. Baik daratan maupun air memiliki kemampuan memantulkan cahaya lebih rendah dibandingkan dengan es, sehingga akan menyerap lebih banyak radiasi matahari. Hal ini akan menambah pemanasan dan menimbulkan lebih banyak lagi es yang mencair, sehingga menjadikan suatu siklus yang berkelanjutan.

14.3.2. Dampak Pemanasan Global

Dengan menggunakan permodelan komputer, dari parameter temperatur, pola curah hujan, sirkulasi atmosfer, para peneliti mempelajari pemanasan global. Berdasarkan permodelan tersebut, para peneliti telah membuat beberapa prakiraan tentang dampak pemanasan global terhadap cuaca, tinggi permukaan air laut, pantai, pertanian, kehidupan hewan liar dan kesehatan manusia.

Ketidakstabilan Iklim :

- Diperkirakan selama pemanasan global, daerah bagian utara dari Belahan Bumi Utara (*Northern Hemisphere*) akan memanas melebihi daerah-daerah lainnya di bumi. Sehingga sebagai akibatnya, gunung-gunung es akan mencair dan daratan akan menyempit. Akan lebih sedikit bongkah-bongkah es yang terapung di perairan Utara tersebut. Daerah-daerah yang sebelumnya mengalami musim salju ringan, kemungkinan tidak akan mengalaminya lagi. Pada pegunungan-pegunungan di daerah *subtropis*, bagian yang ditutupi salju akan semakin berkurang serta akan lebih cepat mencair. Musim tanam akan lebih panjang di beberapa wilayah. Temperatur pada musim dingin dan malam hari akan cenderung meningkat.
- Daerah yang hangat akan menjadi lebih lembab, oleh karena akan lebih banyak air yang menguap dari lautan. Namun para peneliti belum terlalu yakin apakah kelembaban akan meningkatkan atau menurunkan pemanasan. Hal ini disebabkan oleh karena uap air merupakan gas rumah kaca, sehingga keberadaannya akan meningkatkan efek insulasi pada atmosfer. Akan tetapi, uap air yang lebih banyak juga akan membentuk awan, yang akan memantulkan cahaya Matahari kembali ke angkasa luar, dimana hal ini akan dapat menurunkan proses pemanasan. Kelembaban yang tinggi akan meningkatkan curah hujan rata-rata, sekitar 1 persen untuk setiap derajat Fahrenheit pemanasan, dimana curah hujan di seluruh dunia telah meningkat 1 persen dalam seratus tahun terakhir. Badai akan lebih sering terjadi, air akan lebih cepat menguap dari tanah, yang berakibat beberapa daerah akan menjadi lebih kering dari sebelumnya. Angin akan bertiup lebih kencang dan kemungkinan dengan pola yang berbeda. Topan badai (*hurricane*) yang memperoleh kekuatannya dari penguapan air akan menjadi lebih besar. Berlawanan dengan pemanasan yang terjadi, beberapa periode yang sangat dingin mungkin akan terjadi. Pola cuaca menjadi tidak terprediksi dan lebih ekstrem.

Kenaikan muka laut :

- Ketika atmosfer menghangat, lapisan permukaan lautan juga akan menghangat, sehingga volumenya akan membesar dan

menaikkan tinggi permukaan laut. Pemanasan juga akan mencairkan es di kutub, terutama sekitar Greenland, sehingga meningkatkan volume air laut. Tinggi muka laut di seluruh dunia yang telah meningkat 10 - 25 cm (4 - 10 inchi) selama abad ke-20, oleh para peneliti IPCC diprediksi meningkat 9 - 88 cm (4 - 35 inci) pada abad ke-21.

- Perubahan tinggi muka laut akan sangat mempengaruhi kehidupan di daerah pantai. Kenaikan 100 cm (40 inchi) akan menenggelamkan 6% daerah Belanda, 17,5% daerah Bangladesh, dan banyak pulau-pulau lainnya. Erosi pada tebing pantai dan bukit pasir akan meningkat. Ketika tinggi lautan mencapai muara sungai, banjir yang diakibatkan air pasang akan meningkat di daratan. Negara-negara kaya akan menghabiskan dana yang sangat besar untuk melindungi daerah pantainya, sementara negara-negara miskin mungkin hanya mampu melakukan evakuasi dari daerah pantai.
- Sedikit saja kenaikan muka laut akan berdampak mempengaruhi ekosistem pantai. Kenaikan 50 cm (20 inchi) akan menenggelamkan separuh dari rawa-rawa pantai di Amerika Serikat. Rawa-rawa baru juga akan terbentuk, namun tidak di area perkotaan dan daerah yang sudah dibangun. Kenaikan muka laut ini akan menutupi sebagian besar dari Everglades, Florida.

Dampak temperatur global yang cenderung meningkat :

Bumi yang lebih hangat akan menghasilkan lebih banyak makanan dari sebelumnya, akan tetapi hal ini sebenarnya tidak sama pada tempat-tempat yang berbeda. Bagian selatan Kanada misalnya, mungkin akan mendapat keuntungan dari lebih tingginya curah hujan dan lebih lamanya masa tanam. Namun dilain pihak, lahan pertanian *tropis* semi kering di beberapa bagian Afrika mungkin justru tidak dapat tumbuh. Daerah pertanian gurun yang menggunakan air irigasi dari gunung-gunung yang jauh, dapat mengalami masalah serius, jika *snowpack* (kumpulan salju) musim dingin yang berfungsi sebagai reservoir alami, mencair sebelum puncak bulan-bulan masa tanam. Tanaman pangan dan hutan dapat mengalami serangan serangga dan penyakit yang lebih hebat.

Gangguan ekologis :

Hewan dan tumbuhan adalah makhluk hidup yang sulit menghindari dari efek pemanasan global, oleh karena sebagian besar lahan telah dikuasai manusia. Dalam pemanasan global, hewan cenderung untuk ber-migrasi ke arah kutub atau ke atas pegunungan. Tumbuhan akan mengubah arah pertumbuhannya, menuju daerah baru oleh karena habitat lamanya menjadi terlalu hangat. Akan tetapi, pembangunan manusia akan menghalangi perpindahan tersebut. *Spesies-spesies* yang ber-migrasi ke arah utara atau selatan yang terhalangi oleh kota-kota atau lahan-lahan pertanian mungkin akan mati. Beberapa jenis *spesies* yang tidak mampu secara cepat berpindah menuju kutub mungkin juga akan musnah.

Dampak kesehatan :

Perubahan cuaca dan lautan dapat mengakibatkan munculnya penyakit yang berhubungan dengan panas (*heat stroke*) dan dapat berakibat kematian. Temperatur yang panas juga dapat menyebabkan gagal panen sehingga akan muncul kelaparan dan malagizi. Perubahan cuaca yang ekstrim dan peningkatan permukaan air laut akibat mencairnya es di kutub dapat memicu berbagai penyakit yang berhubungan dengan bencana alam (banjir, badai dan kebakaran), dan kematian akibat trauma. Timbulnya bencana alam yang biasanya disertai dengan perpindahan penduduk ke tempat-tempat pengungsian sering disertai dengan timbulnya berbagai penyakit pengungsian, seperti: diare, malagizi, defisiensi mikronutrien, trauma psikologis, penyakit kulit, dan lain-lain.

Pergeseran ekosistem :

Pergeseran ekosistem dapat berdampak pada penyebaran penyakit melalui air (*waterborne diseases*) maupun melalui berbagai vektor (*vector-borne diseases*). Seperti meningkatnya kejadian demam berdarah oleh karena munculnya ruang (ekosistem) baru untuk nyamuk berkembang biak. Dengan adanya perubahan iklim ada beberapa *spesies* vektor penyakit, seperti *aedes aegypti*, virus, bakteri, plasmodium menjadi lebih resisten terhadap obat tertentu. Selain itu dapat pula diprediksi, bahwa ada beberapa *spesies* yang secara alamiah akan terseleksi ataupun punah oleh karena perubahan ekosistem yang ekstrim. Maka dalam hal ini, perubahan iklim dapat juga berdampak pada peningkatan kasus penyakit tertentu seperti

ISPA yang dipicu oleh kemarau panjang/kebakaran hutan, DBD yang berkaitan dengan musim hujan yang tidak menentu, dan sebagainya.

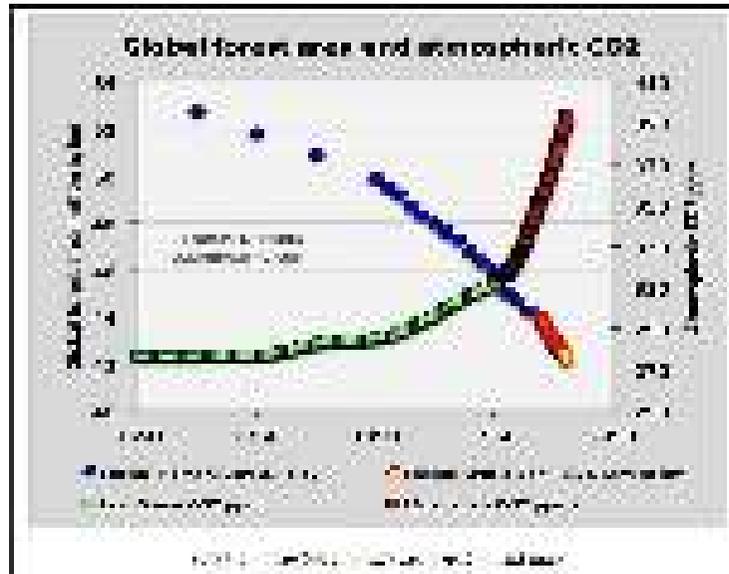
Gradasi Lingkungan yang disebabkan oleh pencemaran limbah pada sungai juga berkontribusi pada *waterborne diseases* dan *vector-borne disease*. Demikian pula halnya dengan polusi udara hasil emisi gas-gas buangan pabrik yang tak terkontrol, selanjutnya akan berkontribusi terhadap penyakit-penyakit saluran pernapasan seperti asma, alergi, *coccidioidomycosis*, penyakit jantung dan paru kronis, dan lain-lain.

14.3.3. Pengendalian Pemanasan Global & Protokol Kyoto

Salah satu sumber penyumbang karbon dioksida, yang merupakan salah satu *gas rumah kaca*, adalah pembakaran bahan bakar fosil. Penggunaan bahan bakar fosil mulai meningkat pesat sejak revolusi industri pada abad ke-18. Pada saat itu, batubara menjadi sumber energi dominan, untuk kemudian digantikan oleh minyak bumi pada pertengahan abad ke-19. Pada abad ke-20, energi gas bumi mulai biasa digunakan di dunia sebagai sumber energi. Perubahan trend penggunaan bahan bakar fosil ini sebenarnya secara tidak langsung telah mengurangi jumlah *karbon dioksida* yang dilepas ke udara, oleh karena gas bumi melepaskan *karbon dioksida* lebih sedikit bila dibandingkan dengan minyak bumi, apalagi dengan batubara. Walaupun demikian, penggunaan energi terbarukan dan energi nuklir akan lebih mengurangi pelepasan karbon dioksida ke udara. Energi nuklir, walaupun kontroversial oleh karena alasan keselamatan dan limbahnya yang berbahaya, namun tidak melepas *karbon dioksida* sama sekali.

Peningkatan pemanasan global, pada satu sisi terpicu dengan semakin meningkatnya kadar *karbon dioksida* di atmosfer, sejalan dengan semakin meningkatnya penggunaan bahan bakar fosil yang menghasilkan limbah gas tersebut. Namun pada sisi lain, daya serap *karbon dioksida* (CO_2) oleh vegetasi melalui proses *biogeokimia*, semakin menurun dengan semakin berkurangnya luas hutan di bumi. Identifikasi oleh berbagai lembaga peneliti, menunjukkan adanya korelasi antara semakin menurunnya luas hutan di bumi dengan semakin meningkatnya kandungan *karbon dioksida* (CO_2) di atmosfer, yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Maka tak dapat lagi untuk dihindari, bahwa pemanasan global, seyogyanya menjadi

tanggungjawab bersama, dan harus ditangani bersama-sama secara kolektif. Kerja sama internasional diperlukan untuk menagani masalah pemanasan global, yang salah satunya adalah dengan upaya pengurangan *gas rumah kaca*.



Gambar 14.6. : Grafik peningkatan kadar CO₂ & pengurangan kawasan hutan

Pada tahun 1992, pada *Earth Summit* di Rio de Janeiro-Brasil, 150 negara telah berikrar untuk menghadapi masalah *gas rumah kaca* dan menyetujui untuk menterjemahkan maksud tersebut dalam suatu perjanjian yang mengikat. Maka, pada tahun 1997 di Jepang 160 negara merumuskan persetujuan yang lebih kuat yang dikenal sebagai *Protokol Kyoto*. Perjanjian ini, yang belum diimplementasikan, menyerukan kepada 38 negara industri sebagai pemegang persentase paling besar dalam melepaskan *gas rumah kaca*, untuk memangkas emisi *gas rumah kaca* yang dihasilkan ke tingkat 5 persen di bawah emisi tahun 1990, yang harus dapat dicapai paling lambat tahun 2012. Pada mulanya, Amerika Serikat bahkan mengajukan diri untuk melakukan pemangkasan yang lebih ambisius, yaitu menjanjikan pengurangan emisi hingga 7% di bawah tingkat tahun 1990. Sementara itu Uni Eropa, yang menginginkan perjanjian yang lebih keras, berkomitmen 8%, dan Jepang 6%. Sedangkan sisa 122 negara

lainnya, yang sebagian besar merupakan negara berkembang, belum diminta untuk berkomitmen dalam pengurangan emisi *gas rumah kaca*.

Protokol Kyoto tidak akan banyak berpengaruh apabila negara-negara industri yang bertanggung jawab menyumbang 55% dari emisi *gas rumah kaca* pada tahun 1990 tidak me-ratifikasinya. Persyaratan tersebut berhasil terpenuhi ketika pada tahun 2004 Presiden Rusia, Vladimir Putin me-ratifikasi perjanjian ini, dan memberikan jalan untuk berlakunya perjanjian ini mulai tanggal 16 Februari 2005.

Setelah tahun 1997, perwakilan dari penandatanganan *Protokol Kyoto* bertemu secara reguler untuk me-negoisasikan isu-isu yang belum terselesaikan, seperti peraturan, metode dan penalti yang wajib diterapkan pada setiap negara untuk memperlambat emisi *gas rumah kaca*. Para negoisator merancang sistem dimana bagi suatu negara yang memiliki program pembersihan yang berhasil, dapat mengambil keuntungan dengan menjual hak polusi yang tidak digunakannya kepada negara lain. Sistem ini disebut sebagai perdagangan karbon. Sebagai contoh, negara yang sulit meningkatkan lagi hasilnya seperti Belanda, dapat membeli kredit polusi di pasar, yang dapat diperoleh dengan biaya yang lebih rendah. Rusia, merupakan negara yang memperoleh keuntungan apabila sistem ini diterapkan. Pada tahun 1990 dalam kondisi ekonomi yang sangat parah dan memproduksi emisi *gas rumah kaca* sangat tinggi, Rusia berhasil memangkas emisinya lebih dari 5 persen di bawah tingkat 1990. Sehingga Rusia berada dalam posisi untuk menjual kredit emisi kepada negara-negara industri lain yang memerlukan, terutama yang berada di lingkungan Uni Eropa.

14.4. Kebocoran Ozon & Protokol Montreal

Pada periode tahun 1980an, para peneliti atmosfer menemukan kondisi dimana terjadi penipisan pada lapisan *Ozon* diatas atmosfer Kutub Selatan. Pengamatan lebih lanjut meng-identifikasi, bahwa penipisan tersebut disebabkan oleh polusi udara akibat aktivitas manusia. Yaitu akibat dari semakin banyaknya konsentrasi molekul-molekul gas *aerosol* yang disebut sebagai *chloro-fluoro-carbons* atau CFC. *Chloro-fluoro-carbons* atau CFC ini mulai dikenal sejak tahun 1920an, sebagai gas pendorong dalam alat pemadam kebakaran,

hairspray, refrigerator coolant dan sebagainya. Gas tersebut pada dasarnya bersifat tidak aktif (*inert*) dan tidak beracun (*non-toxic*), dan dianggap tidak berbahaya. Namun gas ini bersifat stabil diudara dan tak mudah terurai, sehingga dari waktu ke waktu konsentrasinya di atmosfer semakin meningkat dan terus terdesak keatas.

Penipisan lapisan *Ozon* memungkinkan lebih banyak sinar *ultra-violet* menerobos sehingga mencapai permukaan bumi. Diantaranya, lubang *Ozon* terbentuk diatas benua *Antartika* di Kutub Selatan bumi. Hal tersebut terjadi pada setiap bulan September, dan kembali pada keadaan semula memasuki musim semi atau awal musim panas. Pada bulan Oktober tahun 1987, 1989, 1990 dan 1991, ter-identifikasi adanya lubang *Ozon* yang luas diatas benua *Antartika*, atau meningkat 60 % dari kondisi sebelumnya.

Penerobosan sinar *ultra-violet*, dalam hal ini akan dapat menimbulkan bencana bagi kehidupan di bumi. Bahaya radiasi *ultra-violet* antara lain menimbulkan kanker kulit *melanoma maligna*, juga meniadakan fungsi vaksinasi. Sehingga berbagai penyakit yang telah dapat dihindari dengan vaksinasi, ber-potensi untuk tumbuh kembali walau telah di-vaksinasi, sebagai akibat radiasi *ultra-violet*. Seperti contohnya *TBC, campak, cacar air, herpes, malaria, kusta, infeksi jamur/candidiasis* dan *investasi parasit* seperti *leishmaniasis*. Bahkan radiasi *ultra-violet* juga dapat menyebabkan kebutaan akibat *katarak*.

Protokol Montreal adalah sebuah perjanjian internasional yang dirancang untuk melindungi lapisan *Ozon*, dengan pentahapan keluar produksi berbagai zat diyakini bertanggung jawab terhadap penipisan lapisan *Ozon*. Perjanjian ini merupakan tindak lanjut dari *Konvensi Wina (1985)*, yang merupakan pertemuan internasional pertama yang membahas tentang penipisan lapisan *Ozon*. Perjanjian tersebut telah dibuka untuk ditandatangani pada tanggal 16 September 1987, dan diberlakukan pada tanggal 1 Januari 1989, diikuti oleh pertemuan pertama di Helsinki, Mei 1989. Maka, tanggal 16 September kemudian ditetapkan dan diperingati sebagai "*Hari Ozon Internasional*".

Sejak saat itu, perjanjian *Protokol Montreal* telah mengalami beberapa kali revisi, yaitu pada tahun 1990 (London), 1991 (Nairobi), 1992 (Kopenhagen), 1993 (Bangkok), 1995 (Wina), 1997 (Montreal), dan 1999 (Beijing). Diyakini bahwa apabila isi perjanjian internasional tersebut dijalankan, lapisan *Ozon* akan kembali kepada kondisi

semula dari penipisannya pada tahun 2050. Perjanjian internasional ini telah diratifikasi oleh 196 negara.

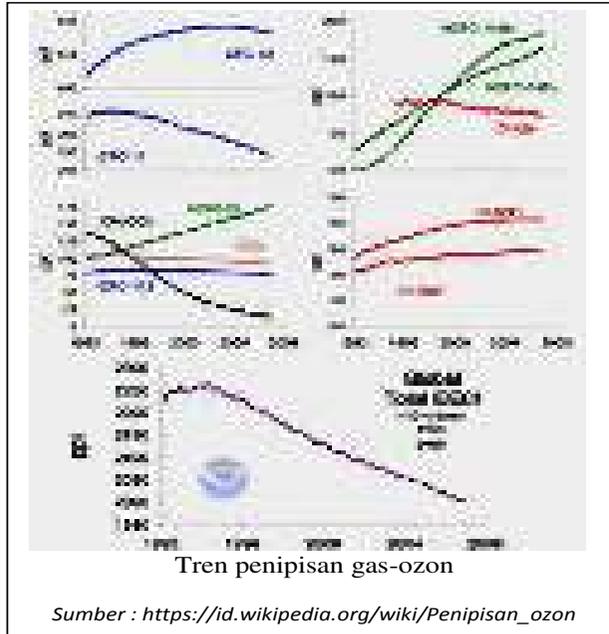
Protokol Montreal merupakan produk kesepakatan internasional yang dinilai merupakan suatu keberhasilan besar. Disamping telah diratifikasi oleh 196 negara penandatanganan protokol, implementasi dari kesepakatan tersebut juga telah mulai menunjukkan hasil yang positif. Protokol ini bertujuan untuk menyelamatkan lapisan *Ozon* yang melindungi bumi dari radiasi sinar *ultra-violet*, dengan mengurangi gas-gas yang merusak *ozon* (*ODSs-Ozon Deplete Substances*).

Implementasi *Protokol Montreal* telah menghasilkan pengurangan emisi *ODSs*, dimana konsentrasinya di atmosfer secara signifikan telah menurun. Zat ini secara bertahap dikeluarkan dari atmosfer, dimana sejak memuncak pada tahun 1994, tingkat *Effective Equivalent Chlorine* (*EECl*) di atmosfer telah menurun sekitar 10 % pada tahun 2008.

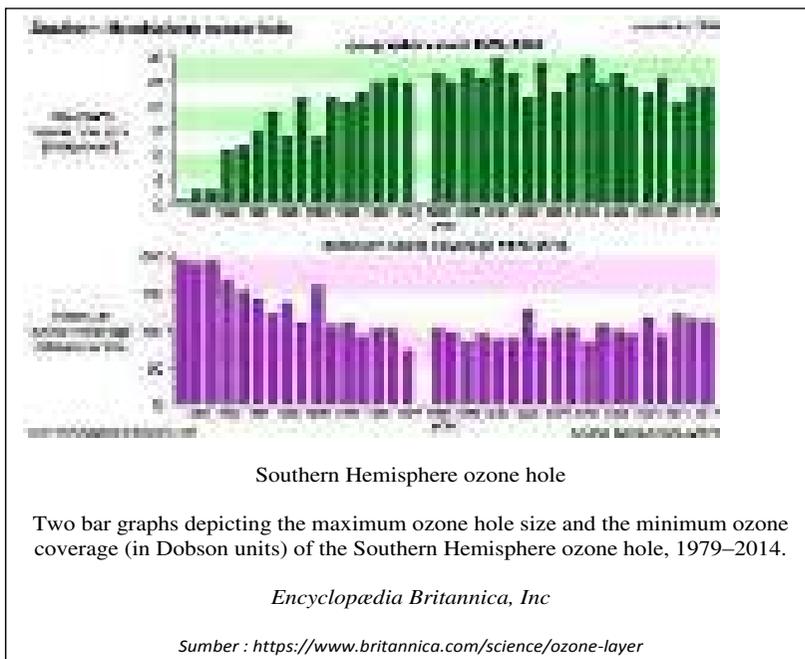
Penurunan bahan kimia perusak *Ozon* juga dipengaruhi secara signifikan oleh penurunan penggunaan bahan kimia yang mengandung *bromin*. Data menunjukkan bahwa sumber alami yang substansial terdapat pada *metil bromida* (CH_3Br) di atmosfer.

Pembatasan *ODSs* berarti meliputi pula bahan *dinitrogen oksida* (N_2O) yang tidak tercakup dalam *Protokol Montreal*, dimana bahan tersebut merupakan perusak *Ozon* yang paling besar, dan diperkirakan akan tetap bertahan sepanjang abad ke-21.

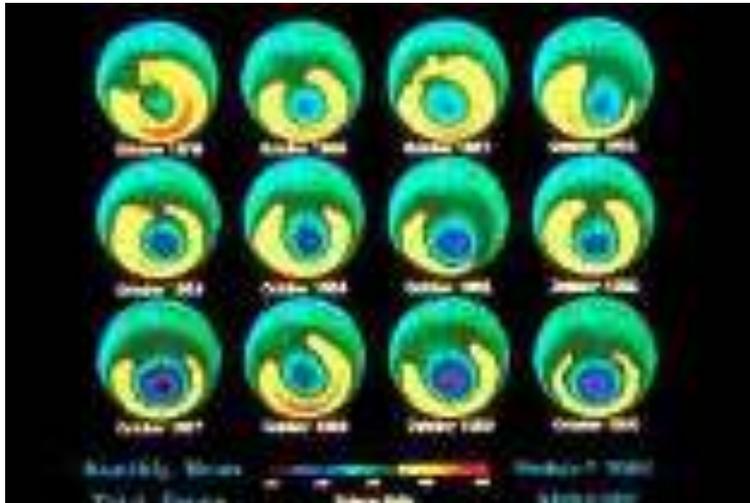
Sebuah tinjauan *IPCC* (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) pada tahun 2005 menyimpulkan bahwa jumlah *Ozon* global pada saat ini masih belum stabil, termasuk di daerah kutub dimana dijumpai tingkat penipisan *Ozon* terbesar. Apabila implementasi *Protokol Montreal* dilaksanakan secara konsisten, maka penurunan konsentrasi zat perusak *ozon* akan memulihkan lapisan *Ozon* dalam beberapa dekade mendatang, walaupun keberadaan lubang *Ozon* di Antartika diperkirakan masih tetap akan ada sampai beberapa dekade mendatang. Namun konsentrasi *Ozon* di lapisan *stratosfer* di atas *Antartika*, yang diperkirakan akan meningkat 5-10 % pada tahun 2020, akan kembali ke tingkat pra-1980 pada sekitar tahun 2060-2075.



Gambar 14.7. : Trend pengurangan gas-gas perusak ozon sampai dengan tahun 2008



Gambar 14.8. : Grafik perkembangan lubang Ozon di Belahan Bumi Selatan sampai dengan tahun 2014.



Changes in the size of the ozone hole from October 1979 to October 1990.

© *Photos.com/Thinkstock*

Sumber : <https://www.britannica.com/science/ozone-layer>

Gambar 14.9. : Perkembangan lubang Ozon diatas benua *Antartika*

15

ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN (AMDAL)

Ketajaman penalaran manusia sebagai makhluk sosial pada akhirnya berujung kepada kesadaran, bahwa proses alam akan ber-reaksi atas perubahan-perubahan yang diakibatkan oleh upayanya meng-eksploitasi sumberdaya alam yang dilakukan secara berlebihan. Ketidak seimbangan lingkungan yang terjadi mulai dirasakan dampaknya, dan telah mulai berbalik merugikan atau bahkan membahayakan kehidupan manusia. Maka upaya-upaya penanggulangan mulai dilakukan, termasuk mem-prediksi apa yang akan terjadi pada masa mendatang. Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) mulai diperkenalkan dan dijadikan rujukan dalam berbagai rencana kegiatan. AMDAL (Analisis Mengenai Dampak Lingkungan) atau *EIA (Environmental Impact Assessment)* mulai diperkenalkan di Amerika melalui *US National Environmental Policy Act (NEPA)* atau Undang Undang Perlindungan Lingkungan pada tahun 1969 dan mulai diterapkan pada tahun 1970, yang kemudian telah di-adopsi oleh lebih dari seratus negara di dunia.

Terbitnya *NEPA* ini adalah sebagai reaksi atas terbitnya buku *The Sillent Spring* yang ditulis oleh *Rachel Carson (1962)*. Buku ini bercerita tentang kerusakan lingkungan yang terjadi di Amerika Serikat akibat penggunaan DDT sebagai pestisida. Dalam buku tersebut digambarkan bagaimana DDT membunuh tidak hanya serangga yang menjadi sasaran, namun juga serangga-serangga lainnya. DDT juga masuk kedalam rantai makanan, dan ter-akumulasi dalam jaringan lemak hewan termasuk manusia, dan menyebabkan tumbuhnya kanker dan mengakibatkan kerusakan genetik. Buku ini mendapatkan banyak perhatian dan menyadarkan pemerintah Amerika Serikat akan kerusakan lingkungan yang terjadi.

NEPA merupakan perangkat perencanaan yang kuat dan diakui oleh PBB dalam *Deklarasi Rio (1992)*, bahwa sebagai instrumen nasional, AMDAL harus dilaksanakan bagi setiap rencana kegiatan yang berpotensi menimbulkan dampak penting, seperti dalam pernyataannya *“Environmental impact assessment, as a national instrument, shall be undertaken for proposed activities that are likely to have a significant adverse impact on the environment and are subject to a decision of a competent national authority. (Principle 17 of the Rio Declaration on Environment and Development, UNCED 1993)”*.

AMDAL merupakan bagian dari ekologi pembangunan yang mempelajari hubungan timbal balik atau interaksi antara pembangunan dan lingkungan, atau secara konsep mempelajari dampak suatu kegiatan / pembangunan terhadap lingkungan, dan juga sebaliknya dampak lingkungan terhadap suatu kegiatan / pembangunan. Didalam AMDAL, pengertian dampak diberi batasan pada perbandingan antara kondisi lingkungan yang diperkirakan akan terjadi dengan adanya kegiatan / pembangunan, dengan yang diperkirakan akan terjadi apabila tidak ada kegiatan / pembangunan. Maka AMDAL sering pula disebut sebagai pre-audit lingkungan.

Analisa dampak yang meliputi dampak biofisik maupun dampak sosial, seyogyanya tidak dilakukan secara terpisah. Dan AMDAL seyogyanya tidak hanya dilakukan untuk program atau proyek yang bersifat fisik, namun juga untuk yang bersifat non-fisik, termasuk usulan produk legislatif.

15.1. Sejarah Per-Undangan Lingkungan Hidup di Indonesia

Titik awal pengelolaan lingkungan hidup secara terpadu di Indonesia, yang merupakan manifestasi konkret dari upaya-upaya sadar, bijaksana dan berencana, dimulai pada tahun 1982 dengan dikeluarkannya Undang-undang No. 4 tahun 1982, tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup. Sebelum diterbitkannya undang-undang tersebut, berbagai peraturan perundangan yang berkaitan dengan lingkungan hidup sesungguhnya telah ada, namun umumnya bersifat parsial-sektoral, dimana masing-masing materi mempunyai ketentuan yang mengacu kepada pengaturan masalah tertentu secara khusus, sehingga acapkali tumpang tindih satu dengan lainnya.

Setelah KTT Bumi 1992 di *Rio de Janiero*, beberapa pemikiran untuk menyempurnakan Undang-undang No. 4 tahun 1982 mulai berkembang. Maka pada tahun 1997 diterbitkan Undang-undang No. 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang kemudian lebih disempurnakan dengan terbitnya Undang-undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Sebenarnya telah ada sejumlah peraturan perundangan yang berkaitan dengan lingkungan hidup, yang diterbitkan sejak zaman kolonial Belanda, yang diantaranya diterbitkan dalam bentuk *ordonansi* seperti *Vischerij Ordonantie 1916*. Berbagai peraturan perundang-undangan pada masa sebelum kemerdekaan (1912 - 1945) tersebut diantaranya adalah :

- Peraturan tentang Pengeluaran Ternak (Sbld 1912 No. 432)
- *Vischerij Ordonantie*, 1916 (Ordonansi Penangkapan Ikan)
- *Reden Reglemen* (Reglemen Bandar) Sbld 1924 No. 500
- *Hinder Ordonantie*, 1926 (Undang-undang Gangguan)
- *Kustvoisserij Ordonnantie* Sbld 1927 No. 144 (Ordonansi Penangkapan Ikan di kawasan Pesisir)
- *Petroleum en Andere Licht Onvolambare Olien* (Ordonansi Pengangkutan minyak Tanah) Sbld 1927 No. 214
- *Mijn-Politic Reglement* No. 341/1930
- Peraturan Pendaftaran kapal-kapal Nelayan Laut Asing Sbld 1938 Nomor 201
- *Bedrijfsreglementeering Ordonantie*, 1938 (Ordonansi Perusahaan)
- *Territoriale Zee en Maritieme Kringen Ordonantie* (Kringen Ordonansi) Sbld 1939 No. 22
- *Jacht Ordonantie*, 1940 (Ordonansi Perburuan)
- *Natuurbeschermings Ordonantie*, 1941 (Ordonansi Perlindungan Alam)

Diantara peraturan perundang-undangan tersebut ada yang masih diberlakukan hingga saat ini, seperti *Hinder Ordonantie 1926* (Undang-undang Gangguan), yang masih diberlakukan dalam pengurusan persyaratan perizinan.

Setelah masa kemerdekaan RI pada tahun 1945 hingga menjelang diterbitkannya Undang-undang No. 4 tahun 1982 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup, beberapa produk hukum terkait dengan lingkungan hidup yang telah diterbitkan, diantaranya adalah :

- *Stadtsvoormings Ordonantie*, 1948 (Ordonansi Pembentukan Kota)
- Undang-undang No. 3 Tahun 1951 tentang Pernyataan Berlakunya Undang-undang Pengawasan Perburuan Tahun 1948 No. 23 dari Republik Indonesia untuk Seluruh Indonesia
- Undang-undang No. 5 Tahun 1960 tentang Ketentuan-ketentuan Pokok Agraria
- Undang-undang No. 44 Tahun 1960 tentang Pertambangan Minyak dan Gas Bumi
- Undang-undang No. 2 Tahun 1961 tentang Impor dan Ekspor Bibit Tanaman
- Undang-undang No. 31 Tahun 1964 tentang Ketentuan Pokok Tenaga Atom
- Undang-undang No. 2 Tahun 1966 tentang Higiene
- Undang-undang No. 5 Tahun 1967 tentang Ketentuan-ketentuan Pokok Kehutanan
- Undang-undang No. 6 Tahun 1967 tentang Peternakan
- Undang-undang No. 11 Tahun 1967 tentang Ketentuan Pokok Pertambangan
- Undang-undang No. 14 Tahun 1969 tentang Ketentuan-ketentuan Pokok Tenaga Kerja
- Undang-undang no. 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja
- Undang-undang No. 3 Tahun 1972 tentang Transmigrasi
- Undang-undang No. 1 Tahun 1973 tentang Landas Kontinen
- Undang-undang No. 7 Tahun 1973 tentang Penggunaan Pestisida
- Undang-undang No. 5 Tahun 1974 tentang Ketentuan Pokok Pemerintah Daerah
- Undang-undang No. 11 Tahun 1974 tentang Pengairan
- Undang-undang No. 8 Tahun 1979 tentang Ratifikasi Perjanjian Mengenai Pencegahan Penyebaran Senjata Nuklir
- Dll.

Pemerintah Indonesia sejak persiapan dan berakhirnya Konferensi Stockholom (1972) atau Konferensi PBB mengenai Lingkungan Hidup Manusia (UNCHE), telah berupaya untuk menginventarisasi berbagai peraturan perundang-undangan terkait, dalam rangka penyusunan *initial draft* suatu undang-undang lingkungan hidup. Maka kemudian telah berhasil disusun *Undang-undang No. 4 tahun 1982 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup*, yang memuat ketentuan pokok, asas dan prinsip-prinsip tentang lingkungan hidup, dimana undang-undang tersebut merupakan ketentuan payung (*umbrella provision*), yang bercirikan :

- Sederhana namun mencakup kemungkinan pengembangannya pada masa mendatang, sesuai dengan tuntutan keadaan, tempat dan waktu.
- Mengandung ketentuan-ketentuan pokok sebagai dasar bagi peraturan pelaksanaannya lebih lanjut.
- Mencakup semua bidang terkait lingkungan hidup, sehingga dapat menjadi dasar bagi pengaturan lebih rinci bagi masing-masing bidang, yang dapat dituangkan dalam bentuk peraturan tersendiri.

Berikutnya adalah, diterbitkan berbagai undang-undang yang mengacu kepada Undang-undang No.4 tahun 1982, sebagai berikut :

- Undang-undang No. 5 Tahun 1983 tentang Zona Ekonomi Eksklusif
- Undang-undang No. 5 Tahun 1984 tentang Perindustrian
- Undang-undang No. 9 Tahun 1985 tentang Perikanan
- Undang-undang No. 12 Tahun 1985 tentang Pajak Bumi dan Bangunan
- Undang-undang No. 16 Tahun 1985 tentang Rumah Susun
- Undang-undang No. 17 Tahun 1985 tentang Ratifikasi UNCLOS
- Undang-undang No. 5 Tahun 1990 tentang Konservasi Sumberdaya Alam dan Ekosistemnya
- Undang-undang No. 3 Tahun 1992 tentang Jaminan Sosial Tenaga Kerja
- Undang-undang No. 4 Tahun 1992 tentang Perumahan dan Pemukiman

- Undang-undang No. 5 Tahun 1992 tentang Benda Cagar budaya
- Undang-undang No. 10 Tahun 1992 tentang Perkembangan Kependudukan dan Pembangunan Keluarga Sejahtera
- Undang-undang No. 12 Tahun 1992 tentang Sistem Budidaya Tanaman
- Undang-undang No. 21 Tahun 1992 tentang Pelayaran
- Dll.

Kemudian beberapa peraturan perundangan diterbitkan pasca KTT Bumi *Rio de Janeiro* (1992), diantaranya adalah :

- Undang-undang No. 23 Tahun 1992 tentang Kesehatan
- Undang-undang No. 24 Tahun 1992 tentang Penataan Ruang
- Undang-undang No. 5 Tahun 1994 tentang Ratifikasi konvensi PBB mengenai keanekaragaman hayati
- Undang-undang No. 6 Tahun 1994 tentang ratifikasi Kerangka Konvensi PBB mengenai Perubahan Iklim
- Undang-undang No. 10 Tahun 1995 tentang Kepabeanan
- Undang-undang No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran

Pasca KTT Bumi *Rio de Janeiro* (1992), beberapa pemikiran mulai berkembang, dimana Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup (KLH) meng-identifikasi adanya beberapa masalah yang mendorong perlunya penyempurnaan Undang-undang No. 4 tahun 1982, yaitu :

- Berkembangnya perhatian masyarakat dunia tentang lingkungan hidup seperti berlangsungnya KTT Bumi di Rio de Janeiro 1992.
- Masih banyaknya peraturan pelaksanaan yang belum ditindaklanjuti sehingga sering menjadi hambatan dalam penerapan Undang-undang Lingkungan Hidup.
- Semakin meningkatnya peran masyarakat yang menuntut keterbukaan dalam pengelolaan lingkungan hidup.
- Penerapan audit lingkungan yang dirasakan sangat bermanfaat dan belum mendapatkan tempat yang cukup memadai dalam peraturan perundang-undangan.
- Analisis mengenai dampak lingkungan masih dipandang sebagai formalitas, sehingga walaupun studi AMDAL telah dilakukan,

namun masih banyak ditemukan usaha dan/atau kegiatan yang terbukti masih mencemari lingkungan.

- Kesulitan-kesulitan dalam pembuktian kasus lingkungan, sehingga sulit untuk menerapkan ketentuan pidana ex pasal 22 Undang-undang Lingkungan Hidup No. 4 tahun 1982, dan belum diaturnya tindak pidana korporasi.

Maka berikutnya diterbitkan *Undang-undang No. 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Namun demikian sebenarnya UU No. 23 tahun 1997, yang substansinya sudah mengatur hal-hal yang bersifat teknis, bukanlah penyempurnaan dari Undang-undang No. 4 tahun 1982, dan bukan pula merupakan *umbrella provision* (Soetaryono-2000 :16).

Undang-undang No. 23 tahun 1997, kemudian menurunkan berbagai produk perundangan yang mengacu padanya, yaitu diantaranya :

- Undang-undang No. 25 Tahun 1997 tentang Ketenaga Kerjaan
- Undang-undang Nomor 18 Tahun 1999 tentang jasa Kontruksi
- Undang-undang No. 22 Tahun 1999 tentang Pemerintahan di Daerah
- Undang-undang No. 25 Tahun 1999 tentang Perimbangan Keuangan Pusat dan Daerah
- Undang-undang Nomor 29 tahun 2000 tentang Perlindungan Varietas Tanaman
- Undang-undang Nomor 22 Tahun 2001 tentang Minyak dan Gas Bumi
- Undang-undang Nomor 3 Tahun 2002 tentang Pertahanan Negara
- Undang-undang Nomor 24 tahun 2003 tentang Mahkamah Konstitusi
- Undang-undang Nomor 27 tahun 2003 tentang Panas Bumi
- Undang-undang Nomor 7 Tahun 2004 tentang Sumberdaya Air
- Undang-undang Nomor 31 Tahun 2004 tentang Perikanan
- Undang-undang Nomor 4 Tahun 2006 tentang Pengesahan Plant Genetic Resources for Food and Agriculture.

- Undang-undang Nomor 25 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana
- Undang-undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang
- Undang-undang Nomor 27 tahun 2007 tentang Pengelolaan Pesisir dan Pulau-pulau Kecil
- Undang-undang Nomor 9 Tahun 2008 tentang Penggunaan Bahan Kimia dan Larangan Penggunaan Bahan Kimia Sebagai Senjata Kimia.
- Undang-undang Nomor 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah
- Undang-undang Nomor 28 tahun 2009 tentang Pajak dan Retribusi Daerah
- Dll.

Atas inisiatif Dewan Perwakilan Rakyat (DPR - RI), Undang-undang No. 23 tahun 1997, kemudian disempurnakan dengan terbitnya Undang-undang No. 32 tahun 2009, tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, yang inti dan tujuannya diantaranya adalah untuk penguatan kewenangan kelembagaan lingkungan hidup, dan untuk pengembangan atas dinamika serta isue internasional.

Terbitnya Undang-undang No. 32 tahun 2009, kemudian diikuti dengan terbinya berbagai peraturan perundangan yang berkaitan, yang antara lain adalah :

- Undang-undang Nomor 11, Tahun 2010 tentang Benda Cagarbudaya
- Undang-undang Nomor 13, Tahun 2010 tentang Holtikultura
- Undang-undang Nomor 1, Tahun 2011 tentang Perumahan dan Permukiman
- Dll.

Di Indonesia Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL) mulai dilaksanakan sejak diterbitkannya *Peraturan Pemerintah No. 29 tahun 1986 tentang AMDAL*, yang dalam perjalanannya mengalami beberapa kali perbaikan atau penyempurnaan. Yaitu pada tahun 1993 dengan diterbitkannya *Peraturan Pemerintah No.51 tahun 1993* yang dimaksudkan untuk menyempurnakan PP No. 29 tahun 1986, dimana

hal ini dilakukan oleh karena adanya kebijakan deregulasi dan debirokritasi. Berikutnya AMDAL kembali disempurnakan dengan diterbitkannya *Peraturan Pemerintah No. 27 tahun 1999 tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL)*, yang didorong oleh kebijakan baru dalam bidang politik, yaitu demokratisasi, reformasi dan otonomi daerah. Perubahan ini ditindak lanjuti dengan berbagai kebijakan baru, yang dituangkan dalam berbagai peraturan yang dibuat oleh instansi teknis pada bidang lingkungan, baik ditingkat pusat maupun daerah.

Demikian akan terjadi seterusnya, peraturan perundangan tentang lingkungan akan terus berkembang secara dinamis pula, seperti halnya proses alam lingkungan yang selalu berkembang secara dinamis.

15.2. Kegiatan Wajib AMDAL

Berbagai kegiatan atau rencana kegiatan di wilayah Indonesia, yang wajib disertai dengan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), telah ditetapkan melalui Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 05 tahun 2012, tentang jenis rencana usaha dan/atau kegiatan yang wajib memiliki ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN HIDUP, yang merupakan tidak lanjut dari pelaksanaan Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, pasal 23 (2).

**Tabel 15.1. : Salinan DAFTAR KAWASAN LINDUNG, SESUAI Lampiran III
Peraturan MNLH No.05 tahun2012.**

<p style="text-align: center;">LAMPIRAN III PERATURAN MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA NOMOR 05 TAHUN 2012 TENTANG JENIS RENCANA USAHA DAN/ATAU KEGIATAN YANG WAJIB MEMILIKI ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN HIDUP DAFTAR KAWASAN LINDUNG</p> <p>Kawasan Lindung yang dimaksud dalam Peraturan Menteri ini sebagai berikut :</p> <ol style="list-style-type: none">1. kawasan hutan lindung;2. kawasan bergambut; dan3. kawasan resapan air.4. sempadan pantai;5. sempadan sungai;6. kawasan sekitar danau atau waduk;7. suaka margasatwa dan suaka margasatwa laut;8. cagar alam dan cagar alam laut;9. kawasan pantai berhutan bakau;10. taman nasional dan taman nasional laut;11. taman hutan raya;12. taman wisata alam dan taman wisata alam laut;13. kawasan cagar budaya dan ilmu pengetahuan;14. kawasan cagar alam geologi ;15. kawasan imbuhan air tanah;16. sempadan mata air;17. kawasan perlindungan plasma nutfah;18. kawasan pengungsian satwa;19. terumbu karang; dan20. kawasan koridor bagi jenis satwa atau biota laut yang dilindungi <p>Kawasan lindung sebagaimana dimaksud pada angka 1 sampai dengan 20 adalah wilayah yang ditetapkan dengan fungsi utama melindungi kelestarian lingkungan hidup yang mencakup sumber daya alam dan sumber daya buatan. Penetapan kawasan lindung tersebut dilakukan sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan.</p> <p style="text-align: right;">MENTERI NEGARA LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA, ttd BALTHASAR KAMBUAYA</p> <p><i>Disalin oleh penulis</i></p>

Jenis-jenis kegiatan atau rencana kegiatan yang wajib disertai dengan AMDAL tersebut adalah :

- Setiap Usaha dan/atau Kegiatan yang berdampak penting terhadap lingkungan hidup (Peraturan MNLH No. 05 tahun 2012, ps 2 (1)), dengan rinciannya tertuang dalam lampiran I peraturan tersebut.
- Rencana Usaha dan/atau kegiatan yang dilakukan (Peraturan MNLH No. 05 tahun 2012, ps 3 (1)) :
 - Didalam kawasan lindung; dan/atau
 - Berbatasan langsung dengan kawasan lindung.

Dimana kawasan lindung yang dimaksud tercantum dalam Lampiran III peraturan tersebut.

Tabel 15.2. Daftar kegiatan wajib AMDAL sesuai Peraturan MENLH No. 05/2012

Jenis Rencana Usaha dan/atau Kegiatan Wajib AMDAL

Lampiran 1 Peraturan MENLH No. 05/2012

- 14 Bidang
- 72 Jenis Kegiatan

Rencana usaha dan/atau kegiatan dilakukan:

- Di dalam Kawasan Lindung
- Berbatasan langsung dengan kawasan lindung

No	Uraian	Skala (SDG Kabupaten)
1.	Perikanan	0
2.	Pemukiman	0
3.	Pertanian	0
4.	Pemukiman (Kampung, Desa)	1
5.	Perdagangan	1
6.	Pemukiman	0
7.	Perdagangan	0
8.	Pemukiman	0
9.	Pemukiman	0
10.	Perdagangan (Kampung, Desa)	1
11.	Perdagangan (Kampung, Desa)	0
12.	Perdagangan	0
13.	Perdagangan	0
14.	Perdagangan (Kampung, Desa)	0

Sumber : <https://www.slideserve.com/colm/kementerian-lingkungan-hidup-klh-pusat-pengelolaan-ekoregion-sumatera>

Adapun jenis rencana usaha dan/atau kegiatan yang wajib memiliki Analisis Mengenai Dampak Lingkungan Hidup (AMDAL), berdasarkan Peraturan MENLH No. 05/2012, ditetapkan berdasarkan:

- a. Potensi dampak penting Potensi dampak penting bagi setiap jenis usaha dan/atau kegiatan tersebut ditetapkan berdasarkan :
- 1) Besarnya jumlah penduduk yang akan terkena dampak rencana usaha dan/atau kegiatan;
 - 2) Luas wilayah penyebaran dampak;
 - 3) Intensitas dan lamanya dampak berlangsung;
 - 4) Banyaknya komponen lingkungan hidup lain yang akan terkena dampak;
 - 5) Sifat kumulatif dampak;
 - 6) Berbalik atau tidak berbaliknya dampak; dan
 - 7) Kriteria lain sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi; dan/atau
 - 8) Referensi internasional yang diterapkan oleh beberapa negara sebagai landasan kebijakan tentang Amdal.
- b. Ketidakpastian kemampuan teknologi yang tersedia untuk menanggulangi dampak penting negatif yang akan timbul

Berikut ini adalah beberapa jenis rencana usaha dan/atau kegiatan yang wajib memiliki AMDAL :

1. Bidang Multi Sektor

Bidang Multisektor berisi jenis kegiatan yang bersifat lintas sektor. Jenis kegiatan yang tercantum dalam bidang multisektor merupakan kewenangan Kementerian/Lembaga Pemerintah non-kementerian terkait sesuai dengan ketentuan peraturan perundangan, seperti :

- Reklamasi Wilayah Pesisir dan pulau-pulau Kecil, dengan :
 - a. Luas area reklamasi ≥ 25 ha
 - b. Volume material urug ≥ 500.000 m³
 - c. Panjang reklamasi ≥ 50 m tegaklurus kearah laut dari garis pantai
 - Pemotongan bukit dan pengurugan lahan dengan Volume ≥ 500.000 m³
 - Pengambilan air bersih dari danau, sungai, mata air, atau sumber air permukaan lainnya dengan debit

pengambilan ≥ 250 liter/detik, dimana hal ini setara dengan kebutuhan air bersih 250.000 orang.

- Pengambilan air bawah tanah (sumur tanah dangkal, sumur tanah dalam) ≥ 50 liter/detik (dari satu atau beberapa sumur pada kawasan < 10 ha)
- Pembangunan bangunan gedung dengan luas lahan ≥ 5 ha, atau luas bangunan ≥ 10.000 m².

2. Bidang Pertahanan

Secara umum, kegiatan yang berkaitan dengan aktivitas militer dengan skala/besaran tertentu berpotensi menimbulkan dampak penting antara lain potensi terjadinya ledakan serta keresahan sosial akibat kegiatan operasional dan penggunaan lahan yang cukup luas. Yaitu meliputi :

- Pembangunan Pangkalan TNI AL Kelas A dan B
- Pembangunan Pangkalan TNI AU Kelas A dan B
- Pembangunan Pusat Latihan Tempur dengan luas ≥ 10.000 ha

3. Bidang Pertanian

Pada umumnya dampak penting yang ditimbulkan usaha budidaya tanaman pangan, hortikultura, dan perkebunan berupa erosi tanah, perubahan ketersediaan dan kualitas air akibat kegiatan pembukaan lahan, persebaran hama, penyakit dan gulma pada saat beroperasi, serta perubahan kesuburan tanah akibat penggunaan pestisida/herbisida. Di samping itu sering pula muncul potensi konflik sosial dan penyebaran penyakit endemik. Maka persyaratan AMDAL yang ditetapkan meliputi :

- Budidaya tanaman pangan dengan atau tanpa unit pengolahannya, dengan luas ≥ 2.000 ha.
- Budidaya tanaman hortikultura dengan atau tanpa unit pengolahannya, dengan luas ≥ 5.000 ha.
- Budidaya tanaman perkebunan :
 - a. Semusim dengan atau tanpa unit pengolahannya :
 1. Dalam kawasan budidaya non kehutanan, luas ≥ 2.000 ha

2. Dalam kawasan hutan produksi yang dapat dikonversi (HPK), luas ≥ 2.000 ha.
- b. Tahunan dengan atau tanpa unit pengolahannya :
1. Dalam kawasan budidaya non kehutanan, luas ≥ 3.000 ha
 2. Dalam kawasan hutan produksi yang dapat dikonversi (HPK), luas ≥ 3.000 ha.

4. Bidang Perikanan dan Kelautan

Pada umumnya dampak penting yang ditimbulkan usaha budidaya tambak udang dan ikan adalah perubahan ekosistem perairan dan pantai, hidrologi, dan bentang alam. Pembukaan hutan *mangrove* akan berdampak terhadap habitat, jenis dan kelimpahan dari tumbuh tumbuhan dan hewan yang berada di kawasan tersebut. Pembukaan hutan mangrove dimaksud wajib sesuai dengan ketentuan peraturan perundangan, seperti memperhatikan kelestarian sempadan pantai *mangrove*, tata cara konversi *mangrove* yang baik dan benar untuk meminimalisasi dampak, dan lain sebagainya. Maka persyaratan AMDAL yang ditetapkan meliputi usaha budidaya perikanan meliputi :

- a. Budidaya tambak udang/ikan tingkat teknologi maju dan madya dengan atau tanpa unit pengolahannya dengan luas ≥ 50 ha.
- b. Usaha budidaya perikanan terapung (jaring apung dan pen system) :
 - Di air tawar (danau) luas ≥ 2.5 ha, atau jumlah ≥ 500 unit
 - Di air laut luas ≥ 5 ha, atau jumlah ≥ 1000 unit

5. Bidang Kehutanan

Pada umumnya dampak penting yang ditimbulkan adalah gangguan terhadap ekosistem hutan, hidrologi, keanekaragaman hayati, hama penyakit, bentang alam dan potensi konflik sosial. Usaha bidang kehutanan yang ditetapkan harus disertai AMDAL adalah Usaha Pemanfaatan Hasil Hutan :

- a. Usaha Pemanfaatan Hasil Hutan Kayu (UPHHK) dari Hutan Alam (HA)
- b. Usaha Pemanfaatan Hasil Hutan Kayu (UPHHK) dari Hutan Tanaman dengan luas ≥ 5.000 ha

6. Bidang Perhubungan

Kegiatan atau proyek yang terkait dengan perhubungan darat berpotensi menimbulkan dampak berupa emisi, gangguan lalu lintas, kebisingan, getaran, gangguan pandangan, ekologis, dampak sosial, gangguan jaringan prasaranan sosial (gas, listrik, air minum, telekomunikasi) serta dampak perubahan kestabilan lahan, land subsidence dan air tanah. Disamping itu juga berpotensi menimbulkan dampak berupa emisi, gangguan lalu lintas, kebisingan, pencemaran udara, getaran, tata ruang, dan dampak sosial.

Kegiatan terkait dengan perhubungan perairan berpotensi menyebabkan terjadinya perubahan bentang lahan yang akan mempengaruhi ekologis, hidrologi setempat, dan

dampak penting terhadap sistem hidrologi dan ekologi yang lebih luas dari batas tapak kegiatan itu sendiri, perubahan batimetri, ekosistem, dan mengganggu proses-proses alamiah didaerah perairan (sungai dan laut), termasuk menurunnya produktivitas kawasan yang dapat menimbulkan dampak sosial.

Kegiatan terkait perhubungan udara termasuk kegiatan yang berteknologi tinggi, yang harus memperhatikan ketentuan keselamatan penerbangan dan terikat dengan konvensi internasional, berpotensi menimbulkan dampak berupa kebisingan, getaran, dampak sosial, keamanan negara, emisi dan kemungkinan bangkitan transportasi baik darat maupun udara. Adanya ketentuan KKOP (Kawasan Keselamatan Operasi Penerbangan) yang membatasi pemanfaatan ruang udara sehingga berpotensi menimbulkan dampak sosial. Disamping itu, pembangunan bandar udara akan mengubah bentuk lahan dan bentang alam, yang akan merubah keseimbangan lahan.

Kegiatan terkait bidang perhubungan yang wajib AMDAL meliputi :

1. Pembangunan Jalur Kereta Api, dengan atau tanpa stasiunnya :

- a. Pada permukaan tanah (at-grade), panjang ≥ 25 km
- b. Dibawah permukaan tanah (underground)
- c. Diatas permukaan tanah (elevated), panjang ≥ 5 km
2. Pembangunan terminal penumpang dan terminal barang transportasi jalan ≥ 5 ha
3.
 - a. Pengerukan perairan dengan capital dredging - Volume ≥ 500.000 m³
 - b. Pengerukan perairan sungai dan/atau laut dengan capital dredging yang memotong batu, yang bukan termasuk material karang ≥ 250.000 m³ atau semua besaran yang menggunakan bahan peledak
 - c. Penempatan hasil keruk di laut dengan volume ≥ 500.000 m³, atau dengan luas area penempatan hasil keruk ≥ 5 ha
4. Pembangunan pelabuhan dengan salah satu fasilitas berikut :
 - a. Dermaga dengan bentuk konstruksi sheet pile atau open pile dengan panjang ≥ 200 m, atau dengan luas ≥ 6.000 m²
 - b. Dermaga dengan konstruksi masif
 - c. Penahan gelombang (talud) dan/ atau pemecah gelombang (break water) dengan panjang ≥ 200 m
 - d. Fasilitas Terapung (Floating Facility) dengan kapasitas ≥ 10.000 DWT
5. Pembangunan Bandar udara untuk fixed wing beserta fasilitasnya
 - Landasan pacu, dengan panjang ≥ 1.200 m
 - Terminal penumpang atau terminal kargo, dengan luas ≥ 10.000 m²

7. Bidang Teknologi Satelit

Kegiatan terkait teknologi satelit memerlukan persyaratan AMDAL oleh karena :

- Termasuk kegiatan yang berteknologi tinggi, harus memperhatikan ketentuan :
 - a. Keamanan dan keselamatan peluncuran dan terikat dengan konvensi internasional

- b. Keselamatan penerbangan dan terikat dengan konvensi internasional.
 - c. Ketentuan telekomunikasi dan terikat dengan konvensi internasional.
- Kegiatan ini memerlukan persyaratan lokasi yang khusus (sepi penduduk, di daerah katulistiwa/ekuator, dekat laut), teknologi canggih, dan tingkat pengamanan yang tinggi.
 - Berpotensi menimbulkan dampak berupa kebisingan, getaran, dampak sosial, keamanan negara, emisi dan kemungkinan kerusakan dan kerugian yang tidak ter-prediksi di darat, laut dan udara.
 - Bangunan peluncuran satelit dan fasilitas pendukung, termasuk daerah penyangga, tertutup bagi masyarakat.
 - Adanya ketentuan Zona bahaya 1, 2 dan zona aman.
 - Zona bahaya 1 dan 2 ditetapkan sebagai kawasan terbatas (restricted area).
 - Berdampak sosial, ekonomi dan politik baik nasional maupun internasional.
 - Merupakan kawasan strategis nasional.

Kegiatan terkait teknologi satelit yang memerlukan AMDAL meliputi :

1. Pembangunan dan pengoperasian Bandar Antariksa.
2. Pembangunan Fasilitas Peluncuran Roket di darat dan tujuan lainnya. Dengan jarak jangkauan ≥ 300 km, daya angkut ≥ 500 km, dan kecepatan ≥ 1000 km/jam.
3. Pembangunan fasilitas pembuatan Propelan Roket.
4. Pembangunan Pabrik Roket.
5. Pembangunan fasilitas uji static dan fasilitas peluncuran roket.

8. Bidang Perindustrian

Kegiatan bidang perindustrian bersifat sangat kompleks, oleh karena melibatkan berbagai macam bahan, sejumlah besar energi dan sumberdaya manusia. Umumnya dampak yang ditimbulkan disebabkan oleh :

- a. Kebutuhan lahan yang luas.
- b. Kebutuhan air yang cukup besar, baik untuk bahan baku, untuk pendingin, dan berbagai keperluan penunjang lainnya.
- c. Kebutuhan akan jumlah tenaga yang kerja besar.
- d. Kebutuhan energi yang relatif besar, yang disamping bersumber dari listrik juga dari gas, atau bahan bakar lainnya.
- e. Potensi terbentuknya berbagai limbah berbahaya, seperti gas (SO_2 dan NO_x), debu (SiO_2), limbah cair (TSS, BOD, COD, NH_4Cl) dan limbah bekas lainnya yang bersifat B3.

Kegiatan bidang perindustrian yang ditetapkan wajib AMDAL meliputi :

1. Industri Semen (yang dibuat melalui produksi klinker).
2. Industri Pulp atau industri Pulp dan Kertas yang ter-integrasi dengan Hutan Tanaman Industri, dengan kapasitas ≥ 300.000 ton Pulp per tahun.
3. Industri Petrokimia hulu.
4. Kawasan Industri (termasuk kompleks industri yang terintegrasi).
5. Industri Galangan Kapal dengan sistem graving dock ≥ 50.000 DWT.
6. Industri Propelan, Amunisi dan bahan peledak.
7. Industri Peleburan Timah Hitam.
8. Kegiatan industri yang tidak termasuk angka 1 sampai dengan angka 7 yang menggunakan areal :
 - a. Urban: Metropolitan dengan luas ≥ 5 ha ; Kota besar dengan luas ≥ 10 ha ; Kota sedangdengan luas ≥ 15 ha ; Kota kecil dengan luas ≥ 20 ha.
 - b. Rural/pedesaan dengan luas ≥ 30 ha.

9. Bidang Pekerjaan Umum

Beberapa kegiatan pada bidang Pekerjaan Umum mempertimbangkan skala/ukuran kawasan perkotaan (metropolitan, besar, sedang, kecil) yang menggunakan kriteria yang diatur dalam peraturan perundangan yang berlaku yang mengatur tentang penyelenggaraan penataan ruang (Peraturan Pemerintah Nomor 15 Tahun 2010 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang) atau

penggantian. Bidang-bidang terkait Pekerjaan Umum yang perlu disertai AMDAL meliputi :

1. Pembangunan Bendungan/Waduk atau Jenis Tampungan Air lainnya
 - 1) Tinggi ≥ 15 m atau
 - 2) Daya tampung waduk ≥ 500.000 m³ atau
 - 3) Luas genangan, atau > 200 ha
2. Daerah irigasi :
 - a. Pembangunan baru dengan luas ≥ 3.000 ha.
 - b. Peningkatan dengan luas tambahan ≥ 1.000 ha.
 - c. Pencetakan sawah, dengan luas (perkelompok) ≥ 500 ha
3. Pengembangan Rawa: Reklamasi rawa untuk kepentingan irigasi dengan luas ≥ 1.000 ha.
4. Pembangunan Pengaman Pantai dan perbaikan muara sungai dengan jarak dihitung tegak lurus pantai ≥ 500 m.
5. Normalisasi sungai (termasuk sodetan) dan pembuatan Kanal Banjir :
 - a. Kota besar/metropolitan dengan panjang ≥ 5 km, atau volume pengerukan ≥ 500.000 m³.
 - b. Kota sedang dengan panjang ≥ 10 km atau volume pengerukan ≥ 500.000 m³.
 - c. Pedesaan dengan panjang ≥ 15 km, atau volume pengerukan ≥ 500.000 m³.
6. Pembangunan dan/atau peningkatan jalan tol yang membutuhkan pengadaan lahan diluar rumija (ruang milik jalan) dengan skala/besaran panjang (km) dan skala/besaran luas pengadaan lahan (ha) :
 - a. Kota metropolitan/besar dengan panjang jalan ≥ 5 km dan pengadaan lahan ≥ 10 ha, atau Luas pengadaan lahan ≥ 30 ha.
 - b. Kota sedang dengan panjang jalan ≥ 5 km dengan pengadaan lahan ≥ 20 ha, atau Luas pengadaan lahan ≥ 30 ha.
 - c. Pedesaan dengan panjang jalan ≥ 5 km dan pengadaan lahan ≥ 30 ha, atau luas pengadaan lahan ≥ 40 ha.

7. Pembangunan dan/atau peningkatan jalan dengan pelebaran yang membutuhkan pengadaan lahan (di luar rumija) :
 - a. Kota metropolitan/besar dengan panjang jalan ≥ 5 km dengan luas pengadaan lahan ≥ 20 ha, atau luas pengadaan lahan ≥ 30 ha.
 - b. Kota sedang dengan panjang jalan ≥ 5 km dengan luas pengadaan lahan ≥ 30 ha, luas pengadaan lahan ≥ 40 ha.
 - c. Pedesaan dengan panjang jalan ≥ 5 km dengan luas pengadaan lahan > 40 ha, atau luas pengadaan lahan ≥ 50 ha.
8.
 - a. Pembangunan subway / underpass, terowongan/ tunnel, jalan layang/flyover, dengan panjang ≥ 2 km.
 - b. Pembangunan jembatan, dengan panjang ≥ 500 m.
9. Persampahan :
 - a. Pembangunan TPA sampah domestik pembuangan dengan sistem controlled landfill/sanitary landfill termasuk instalasi penunjangnya dengan luas kawasan TPA ≥ 10 ha, atau - kapasitas total ≥ 100.000 ton.
 - b. TPA di daerah pasang surut, dengan semua luas landfill atau kapasitas total.
 - c. Pembangunan transfer station dengan kapasitas ≥ 500 ton/hari.
 - d. Pembangunan instalasi Pengolahan Sampah Terpadu dengan kapasitas ≥ 500 ton/hari.
 - e. Pengolahan dengan insinerator, untuk semua kapasitas.
 - f. Composting Plant dengan kapasitas ≥ 500 ton/hari.
10. Air Limbah Domestik :
 - a. Pembangunan Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT), termasuk fasilitas penunjangnya dengan luas ≥ 2 ha, atau dengan kapasitas ≥ 11 m³/hari.
 - b. Pembangunan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) limbah domestik termasuk fasilitas penunjangnya dengan luas ≥ 3 ha, atau dengan beban organik $\geq 2,4$ ton/hari.
 - c. Pembangunan sistem perpipaan air limbah, dengan luas layanan ≥ 500 ha, atau dengan debit air limbah ≥ 16.000 m³/hari.

Pembangunan saluran drainase (primer dan/atau sekunder) di permukiman :

- a. Kota besar/ metropolitan, panjang ≥ 5 km.
 - b. Kota sedang, panjang ≥ 10 km.
11. Pembangunan saluran drainase (primer dan/atau sekunder) di permukiman :
- a. Kota besar/ metropolitan, panjang ≥ 5 km.
 - b. Kota sedang, panjang ≥ 10 km.
12. Jaringan air bersih di kota besar / metropolitan :
- a. Pembangunan jaringan distribusi dengan luas layanan ≥ 500 ha.
 - b. Pembangunan jaringan transmisi dengan panjang ≥ 10 km.

10. Bidang Perumahan dan Kawasan Pemukiman

Pembangunan perumahan dan kawasan permukiman seyogyanya dilakukan dengan mempertimbangkan :

- a. Hubungan antar kawasan fungsional sebagai bagian lingkungan hidup diluar kawasan lindung.
- b. Keterkaitan lingkungan hunian perkotaan dengan lingkungan hunian perdesaan.
- c. Keterkaitan antara pengembangan lingkungan hunian perkotaan dengan pengembangan lingkungan hunian perdesaan.
- d. Keserasian tata kehidupan manusia dengan lingkungan hidup.
- e. Keseimbangan antara kepentingan publik dan kepentingan privat.
- f. Analisis teknis, meliputi :
 - Tingkat pembebasan lahan.
 - Daya dukung lahan, seperti daya dukung tanah, kapasitas resapan air tanah, tingkat kepadatan bangunan per-hektar.
 - Tingkat kebutuhan air sehari-hari.
 - Limbah yang dihasilkan sebagai akibat hasil kegiatan perumahan dan permukiman.
 - Efek pembangunan terhadap lingkungan sekitar (mobilisasi material, manusia, dan lalu lintas).

- KDB (Koefisien dasar bangunan) dan KLB (Koefisien luas bangunan).
- Peningkatan air larian (run-off) yang mengakibatkan banjir dihilirnya.

Maka persyaratan AMDAL yang diberlakukan bagi pembangunan perumahan dan kawasan pemukiman dengan pengelola tertentu, ditetapkan sebagai berikut :

- a. Di kota metropolitan, dengan luas > 25 ha.
- b. Di kota besar, dengan luas \geq 50 ha.
- c. Di kota sedang dan kecil, dengan luas \geq 100 ha.
- d. Untuk keperluan settlement transmigrasi dengan luas \geq 2.000 ha.

11. Bidang Energi dan Sumberdaya Mineral

Bidang ini secara umum mencakup wilayah kegiatan yang luas, dimana luas wilayah kegiatan operasional akan berkorelasi dengan luas penyebaran dampak yang mungkin terjadi. Kegiatan ini juga umumnya mencakup perubahan fungsi lahan yang cukup signifikan, yang akan dapat menyebabkan perubahan terhadap struktur dan stabilitas tanah. Disamping itu juga akan berpotensi menimbulkan dampak pada aspek fisik kimia, terutama pada kualitas udara (emisi, ambient dan kebisingan) dan kualitas air (ceceran minyak pelumas, limbah bahang) serta air tanah, aspek flora dan fauna, serta berpotensi pula untuk menimbulkan dampak pada aspek sosial, ekonomi dan budaya, yang memicu keresahan masyarakat, terutama terkait dengan pembebasan lahan dan lapangan kerja. Maka bidang-bidang Energi dan Sumberdaya Mineral yang dipersyaratkan AMDAL ditetapkan sebagai berikut :

Kategori K.1. : Mineral Batubara

1. Eksploitasi (Operasi Produksi) Mineral dan Batubara :
 - a. Luas Perizinan \geq 200 ha.
 - b. Luas daerah terbuka untuk pertambangan \geq 50 ha (kumulatif pertahun).
2. Eksploitasi (Operasi Produksi) Batubara :
 - a. Kapasitas \geq 1.000.000 ton/tahun, dan/atau

- b. Jumlah material penutup yang dipindahkan $\geq 4.000.000$ bank cubic meter (bcm)/tahun.
3. Eksploitasi (Operasi Produksi) Mineral logam :
 - a. Kapasitas biji, ≥ 300.000 ton/tahun dan/atau
 - b. Jumlah material penutup yang dipindahkan $\geq 1.000.000$ ton/tahun.
4. Eksploitasi (Operasi Produksi) Mineral bukan logam atau mineral batuan :
 - a. Kapasitas ≥ 500.000 m³/tahun dan/atau
 - b. Jumlah material penutup yang dipindahkan $\geq 1.000.000$ m³/tahun.
5. Pengolahan dan pemurnian:
 - a. Mineral logam.
 - b. Mineral bukan logam ≥ 500.000 m³/tahun.
 - c. Batuan ≥ 500.000 m³/tahun.
 - d. Batubara $\geq 1.000.000$ m³/tahun.
 - e. Mineral radioaktif.
6. Eksploitasi (Operasi Produksi) Mineral radioaktif untuk semua besaran (ton/tahun), kecuali untuk tujuan penelitian dan pengembangan.
7. Penambangan di laut.
8. Melakukan penempatan tailing di bawah laut.

Kategori K.2. : Minyak Dan Gas Bumi

1. Eksploitasi Minyak dan Gas Bumi serta pengembangan produksi:
 - a. Di darat :
 - 1) Lapangan minyak bumi ≥ 5.000 BOPD.
 - 2) Lapangan gas bumi ≥ 30 MMSCFD.
 - b. Di laut :
 - 1) Lapangan minyak bumi ≥ 15.000 BOPD
 - 2) Lapangan gas bumi ≥ 90 MMSCFD Jumlah total lapangan semua sumur.

2. Pipanisasi minyak bumi, gas bumi dan bahan bakar minyak di laut :
 - a. Panjang, ≥ 100 km, atau
 - b. Tekanan ≥ 16 bar.
3. Pembangunan Kilang :
 - a. Liquefied Petroleum Gas (LPG) ≥ 50 MMSCFD.
 - b. Liquefied Natural Gas (LNG) ≥ 550 MMSCFD.
 - c. Minyak Bumi ≥ 10.000 BOPD.
4. Terminal regasifikasi LNG (darat/laut) ≥ 550 MMSCFD.
5. Kilang minyak pelumas (termasuk fasilitas penunjang) ≥ 10.000 ton/tahun.
6. Pengembangan lapangan Coal Bed Methane (CBM)/Gas Metana Batubara pada tahap eksploitasi dan pengembangan produksi yang mencakup :
 - a. Pemboran sumur produksi.
 - b. Pembangunan fasilitas produksi dan fasilitas pendukung.
 - c. Kegiatan operasi produksi dan
 - d. Pasca operasi.

Kategori K.3. : Ketenagalistrikan

1. Pembangunan jaringan transmisi :
 - a. Saluran Udara Tegangan Tinggi > 150 kV.
 - b. Saluran Kabel Tegangan Tinggi > 150 kV.
 - c. Kabel laut Tegangan Tinggi > 150 Kv.
2. Pembangunan :
 - a. PLTD/PLTG/ PLTU/PLTGU ≥ 100 MW (dalam satu lokasi).
 - b. Pembangunan PLTP ≥ 55 MW
 - c. Pembangunan PLTA dengan :
 - Tinggi bendung ≥ 15 m, atau
 - Luas genangan ≥ 200 ha, atau
 - Kapasitas daya (aliran langsung) ≥ 50 MW.

- d. PLT Sampah (PLTSa) dengan proses methane harvesting ≥ 30 MW.
- e. Pembangunan pembangkit listrik dari jenis lain (antara lain: PLT Surya, Angin, PLT Biomassa/ Gambut, PLT Bayu) ≥ 10 MW (Dalam satu lokasi).

Kategori K.4. : Energi Baru Dan Terbarukan

1. Panas Bumi Tahap Eksploitasi :
 - a. Luas perizinan (WKP Panas Bumi) ≥ 200 ha.
 - b. Luas daerah terbuka untuk usaha panas bumi ≥ 50 ha, atau
 - c. Pengembangan uap panas bumi dan/atau pembangunan PLTP (pengembangan panas bumi) ≥ 55 MW.
2. Pembangunan Kilang biofuel dengan kapasitas ≥ 30.000 ton/tahun.

12. Bidang Pariwisata

Pada umumnya dampak penting yang ditimbulkan adalah gangguan terhadap ekosistem, hidrologi, bentang alam dan potensi konflik sosial, oleh karena berkaitan dengan perubahan fungsi lahan/kawasan, gangguan lalu lintas, pembebasan lahan, dan masalah sampah. Maka kegiatan bidang pariwisata yang perlu disertai AMDAL ditetapkan sebagai berikut :

1. Kawasan wisata :
 - a. Kawasan Pariwisata untuk semua besaran.
 - b. Taman Rekreasi, dengan luas ≥ 100 ha
2. Lapangan golf (tidak termasuk driving range) untuk semua besaran, oleh karena berpotensi menimbulkan dampak, dari penggunaan pestisida/herbisida, limpasan air permukaan (run off), serta kebutuhan air yang relatif besar.

13. Bidang Ketenaganukliran

Secara umum, kegiatan-kegiatan yang berkaitan dengan pengembangan dan penggunaan teknologi nuklir selalu memiliki potensi dampak dan risiko radiasi. Persoalan kekhawatiran masyarakat yang selalu muncul terhadap kegiatan-kegiatan ini juga menyebabkan kecenderungan terjadinya dampak sosial. Maka untuk

kegiatan-kegiatan bidang ketenaganukliran perlu dilakukan AMDAL, yaitu meliputi :

1. Pembangunan dan pengoperasian reaktor nuklir, oleh karena bersifat strategis dan dapat mempengaruhi pertahanan negara. Dimana pada tahap operasi akan mengemisikan produk fisi, sehingga akan meningkatkan temperatur air di perairan, sebagai hasil disipasi thermal dari air pendingin sekunder, menghasilkan limbah radioaktif serta spent fuel dalam jumlah berarti. Sedangkan pada tahap pasca operasi yang meliputi kegiatan pembongkaran fasilitas, dekontaminasi dan remediasi akan meningkatkan volume limbah radioaktif dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Yaitu meliputi pembangunan :
 - a. Reaktor Daya untuk semua kapasitas.
 - b. Reaktor Non Daya dengan kapasitas ≥ 100 kW thermal .
2. Pembangunan dan pengoperasian instalasi nuklir non reaktor, yang meliputi kegiatan :
 - a. Pengayaan bahan nuklir, konversi bahan nuklir, dan/atau permurnian bahan nuklir untuk semua kapasitas (kecuali untuk tujuan penelitian dan pengembangan).
 - b. Pengolahan ulang bahan bakar nuklir bekas untuk semua kapasitas.
 - c. Penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas dengan kapasitas ≥ 3.000 MW thermal.
 - d. Penyimpanan lestari untuk semua kapasitas.
3. Pembangunan dan Pengoperasian Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif, yang meliputi kegiatan konstruksi dan operasi, tahap pengolahan limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang, dan penyimpanan (disposal) limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang, untuk semua kapasitas (kecuali untuk tujuan penelitian dan pengembangan).
4. Produksi Radioisotop (untuk semua kapasitas yang berasal dari reaksi fisi), oleh karena . menghasilkan emisi airborne dan air buangan yang mengandung zat radioaktif, menghasilkan limbah radioaktif dalam jumlah berarti, dan berpotensi meningkatkan paparan radiasi di lingkungan.

14. Bidang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (LB3)

Kegiatan yang menghasilkan limbah B3 berpotensi menimbulkan dampak terhadap lingkungan dan kesehatan manusia, terutama kegiatan yang dipastikan akan mengkonsentrasikan limbah B3 dalam jumlah besar. Kegiatan-kegiatan ini juga secara ketat diikat dengan perjanjian internasional (konvensi basel) yang mengharuskan pengendalian dan penanganan yang sangat seksama dan terkontrol. Kegiatan terkait bidang pengelolaan limbah B3 yang harus disertai AMDAL adalah :

1. Industri jasa pengelolaan limbah B3 yang melakukan kombinasi 2 (dua) atau lebih kegiatan meliputi: pemanfaatan, pengolahan, dan/atau penimbunan limbah B3.
2. Pemanfaatan limbah B3 :
 - a. Pemanfaatan limbah B3 sebagai bahan bakar sintetis pada kiln di industri semen, kecuali pemanfaatan limbah B3 yang dihasilkan sendiri dan berasal dari 1 (satu) lokasi kegiatan.
 - b. Pemanfaatan limbah B3 dalam bentuk pembuatan bahan bakar sintetis (fuel blending) dari limbah B3.
 - c. Pemanfaatan limbah B3 sebagai material alternatif pada industri semen, kecuali pemanfaatan yang hanya menggunakan fly ash.
 - d. Pemanfaatan limbah B3 oli bekas sebagai bahan baku industri daur ulang pelumas (lubricant), termasuk sebagai bahan baku pembuatan base oil.
 - e. Pemanfaatan limbah B3 pelarut bekas (used solvents) untuk industri daur ulang pelarut (solvents).
 - f. Pemanfaatan limbah B3 aki bekas melalui proses peleburan timbal (Pb).
 - g. Pemanfaatan limbah B3 batere dan/atau aki kering bekas dengan pembentukan ingot.
 - h. Pemanfaatan limbah B3 katalis bekas dalam bentuk daur ulang (recycle) dan/atau perolehan kembali (recovery).
3. Pengolahan limbah B3 :
 - a. Pengolahan limbah B3 secara termal menggunakan insinerator, kecuali mengolah limbah B3 yang dihasilkan sendiri dan berasal dari 1 (satu) lokasi kegiatan.

- b. Pengolahan limbah B3 secara biologis (composting, biopile, landfarming, bioventing, biosparging, bioslurping, alternate electron acceptors, dan/atau fitoremediasi), sebagai kegiatan utama (jasa pengolahan limbah B3).
 - c. Injeksi dan/atau Reinjeksi limbah B3 ke dalam formasi.
4. Penimbunan limbah B3 dengan landfill kelas 1, kelas 2, dan/atau kelas 3.

Namun demikian ada pula jenis-jenis kegiatan atau rencana kegiatan yang dikecualikan, tidak memerlukan AMDAL, yaitu :

- Berdasarkan Peraturan MNLH No.05 tahun 2012, ps 3 (4) :
 - Eksplorasi pertambangan, minyak dan gas bumi, dan panas bumi;
 - Penelitian dan pengembangan di bidang ilmu pengetahuan;
 - Yang menunjang pelestarian kawasan lindung;
 - Yang terkait kepentingan pertahanan dan keamanan negara yang tidak berdampak penting terhadap lingkungan hidup;
 - Budidaya yang secara nyata tidak berdampak penting terhadap lingkungan hidup;
 - Budidaya yang diizinkan bagi penduduk asli dengan luasan tetap dan tidak mengurangi fungsi lindung kawasan dan dibawah pengawasan ketat.
- Berdasarkan Peraturan MNLH No.05 tahun 2012, ps 5 (1) : Jenis rencana Usaha dan/atau Kegiatan yang wajib memiliki Amdal dapat ditetapkan menjadi rencana Usaha dan/atau Kegiatan yang tidak wajib memiliki Amdal, apabila :
 - Dampak dari rencana usaha dan/atau kegiatan tersebut dapat ditanggulangi berdasarkan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi; dan/atau
 - Berdasarkan pertimbangan ilmiah, tidak menimbulkan dampak penting terhadap lingkungan hidup.

Namun demikian Jenis rencana usaha dan/atau kegiatan sebagaimana dimaksud wajib memiliki Upaya Pengelolaan Lingkungan (UKL) - Upaya Pemantauan Lingkungan (UPL) atau surat pernyataan kesanggupan pengelolaan dan pemantauan lingkungan hidup sesuai dengan peraturan per undang-undangan

mengenai jenis rencana usaha dan/atau kegiatan yang wajib memiliki UKL-UPL, atau surat pernyataan kesanggupan pengelolaan dan pemantauan lingkungan hidup (Peraturan MNLH No.05 tahun 2012, ps 5 (4)).

15.3. Tujuan dan Fungsi AMDAL

Pengertian *dampak* sesuai Kamus Besar Bahasa Indonesia, adalah pengaruh kuat yang mendatangkan akibat (baik negatif maupun positif). Maka, dampak lingkungan dalam hal ini adalah pengaruh kuat yang mendatangkan akibat terhadap lingkungan, baik positif maupun negatif, yang disebabkan oleh suatu peristiwa.

Menurut Undang-undang, Dampak Lingkungan Hidup adalah “pengaruh perubahan pada lingkungan hidup yang diakibatkan oleh suatu usaha dan/atau kegiatan” (*Pasal 1 Angka 20 UU Nomor 23 Tahun 1997 Tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup & Pasal 1 Angka 26 UU Nomor 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan hidup*). Undang-undang tersebut diterbitkan untuk menjadi dasar hukum dalam melaksanakan program pembangunan berwawasan lingkungan, dalam rangka mencapai tujuan pembangunan yang berkelanjutan yang sudah mulai dilaksanakan sejak tahun 1982, dimana salah satu instrumen yang diharapkan dapat mendukungnya adalah Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL).

Sedangkan AMDAL sendiri adalah kajian mengenai dampak besar dan penting untuk pengambilan keputusan suatu usaha dan/atau kegiatan yang direncanakan pada lingkungan hidup yang diperlukan bagi proses pengambilan keputusan tentang penyelenggaraan usaha dan/atau kegiatan (*PP No. 27 tahun 1999 tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan*).

Secara umum, tujuan dan fungsi AMDAL adalah untuk menjaga dan meningkatkan kualitas lingkungan hidup, serta me-minimalkan dampak negatif dan pencemaran, atas suatu rencana kegiatan, yang dalam pelaksanaannya meliputi beberapa hal pokok, yaitu :

- Meng-identifikasi, mem-prakirakan dan meng-evaluasi dampak yang mungkin terjadi terhadap lingkungan hidup yang disebabkan oleh kegiatan yang direncanakan.

- Upaya meningkatkan dampak positif dan me-minimalkan dampak negatif yang mungkin akan terjadi, dengan menyusun rencana pengelolaan lingkungan (RKL) dan rencana pemantauan lingkungan (RPL), sebagai pedoman untuk dilaksanakan.
- Pelibatan masyarakat, melalui sosialisasi agar masyarakat yang terkait mengetahui rencana kegiatan yang direncanakan didaerahnya, mengetahui perubahan lingkungan yang akan terjadi termasuk manfaat dan risiko yang akan dihadapi, mengenal hak dan kewajibannya dalam hubungannya dengan suatu rencana usaha dalam menjaga dan mengelola kualitas lingkungan. Bagaimanapun, masyarakat adalah komponen sosial lingkungan dalam suatu ekosistem.

15.4. Identifikasi Dampak Lingkungan

Prinsip dasar dan teknik dalam studi AMDAL adalah meng-identifikasi interaksi antara komponen-komponen lingkungan dengan tahapan-tahapan dari kegiatan yang direncanakan, oleh karena dari sanalah dampak akan timbul. Dampak yang diperkirakan akan timbul kemudian dipelajari dan di-analisa untuk cara-cara mengatasi dan menanggulangnya. Maka, faktor-faktor yang perlu di-identifikasi dalam AMDAL adalah :

- a. Tahap dan jenis kegiatan yang berpotensi menjadi sumber dampak.
- b. Komponen lingkungan yang berpotensi terkena dampak.
- c. Wilayah yang potensial terkena dampak serta metoda penanggulangan dampak yang sesuai, termasuk antisipasi terhadap kemungkinan dampak yang berbalik terhadap kegiatan.

15.4.1. Identifikasi Rencana Kegiatan / Usaha

Komponen rencana kegiatan / usaha yang berpotensi sebagai sumber dampak, dapat meliputi seluruh tahapan kegiatan, mulai dari tahap perencanaan, tahap pra-konstruksi, tahap konstruksi, tahap operasi dan pemeliharaan, sampai dengan tahap pasca operasi.

- **Tahap Perencanaan :**

Tahap ini dimulai dari pada saat awal munculnya ide untuk melaksanakan suatu kegiatan atau usaha. Pada tahap ini belum ada kegiatan yang secara fisik mempengaruhi lingkungan. Pada dasarnya masih berupa kegiatan administratif, mulai dari identifikasi lokasi, pengumpulan data dan studi kelayakan, penyusunan *basic design*, upaya penggalangan dana, perijinan dan berbagai kegiatan yang berkaitan dengan hukum.

- **Tahap Pra-Konstruksi :**

Tahap pra-konstruksi merupakan tahap persiapan pelaksanaan suatu konstruksi atau prasarana dan sarana untuk suatu kegiatan / usaha. Maka pada tahap ini sudah mulai ada aktifitas fisik yang walaupun sedikit namun sudah mulai merubah konfigurasi lahan, dan juga aktivitas non-fisik yang bersinggungan dengan komponen sosial masyarakat. Tahapan ini meliputi antara lain :

- Survei, studi kelayakan sampai dengan penyusunan *basic design*.
- Pembebasan dan pematangan lahan, termasuk proses perijinan dan persyaratan hukum lainnya.
- Penyiapan dan pembangunan sarana penunjang, seperti jalan masuk (*access road*), gudang bahan konstruksi, perumahan / perkantoran pegawai konstruksi, direksi kit dan sebagainya.
- Penyiapan manajemen proyek konstruksi dan rekrutmen pegawai proyek.

Pada tahap ini telah mulai ada kontak secara fisik dengan lingkungan, sementara interaksi non-fisik nya sudah semakin meluas.

- **Tahap Konstruksi :**

Pada tahap konstruksi ini, kontak dengan lingkungan secara fisik semakin meluas, dan mulai terjadi perubahan konfigurasi fisik lingkungan yang signifikan. Sementara itu interaksi sosial non-fisik dengan lingkungan masyarakat sekitar semakin intensif pula. Tahapan ini meliputi kegiatan-kegiatan :

- Mobilisasi peralatan dan material konstruksi.

- Pembangunan konstruksi utama, yang meliputi konstruksi sipil maupun instalasi elektro-mekanik.
- Berbagai kegiatan uji coba sampai dengan uji serah terima.
- Kegiatan pasca-konstruksi, yang meliputi demobilisasi peralatan konstruksi, pelepasan pegawai proyek, penyiapan manajemen dan rekrutmen pegawai operasional.

- ***Tahap Operasional :***

Tahap ini adalah tahap dimana seluruh kegiatan operasi sepenuhnya telah memasuki *ekosistem*, atau bahkan dapat pula membentuk *ekosistem* yang baru. Interaksi antara kegiatan yang direncanakan dengan *ekosistem* telah terjadi dan saling mempengaruhi.

- ***Tahap Pasca-Operasi :***

Pada tahap ini, semua kegiatan yang direncanakan telah berakhir. Maka semua perubahan fisik yang berkaitan dengan operasional seyogyanya dikembalikan kepada kondisi semula, namun tentunya hal tersebut tak dapat dilakukan seluruhnya, seperti halnya pada usaha pertambangan baik terbuka maupun bawah tanah, dan pembangunan bendungan. Demikian pula halnya dengan perubahan-perubahan sosial atau non-fisik, tentu tak dapat dikembalikan pada kondisi semula. Maka upaya-upaya harus dilakukan, setidaknya untuk me-minimalkan dampak negatif pasca berakhirnya suatu kegiatan. Hal penting yang harus dilakukan pada tahap ini adalah :

- Rehabilitasi lahan, meskipun tidak mengembalikan seluruhnya pada kondisi semula.
- Proses pembubaran organisasi, termasuk didalamnya pemutusan hubungan kerja atau alih kerja bagi pegawai-pegawai operasional.
- Demobilisasi dan/atau penghapusan peralatan operasi.

15.4.2. Identifikasi Rona Lingkungan Awal

Untuk dapat menganalisa dan mem-prediksi dampak lingkungan yang akan terjadi sebagai akibat dari suatu kegiatan yang direncanakan, maka yang harus di-identifikasi adalah kondisi atau rona lingkungan awal. Yaitu meliputi semua komponen lingkungan

yang ada pada ekosistem yang terkait, meliputi komponen abiotik, komponen biotik dan komponen sosial, termasuk sub-komponen dan parameter lingkungan yang sifatnya sangat tergantung pada karakteristik lingkungan disekitar lokasi rencana kegiatan.

- ***Komponen Abiotik :***

Komponen ini, yang disebut juga sebagai komponen Geo-Fisik-Kimia, meliputi semua faktor yang terkait dengan unsur-unsur geologi/geografi, fisik dan kimiawi. Yaitu meliputi faktor-faktor:

- Iklim, curah hujan, temperatur, kualitas udara dsb.
- Hidrologi/hidrografi/oseanografi, aliran/genangan air, air tanah, kualitas air dsb.
- Fisiografi, kondisi geologi/geografi, komposisi tanah/batuan, topografi dsb.
- Kondisi tata ruang dan tata guna lahan.

- ***Komponen Biotik :***

Komponen ini meliputi semua *biota* yang berada didalam lingkup ekosistem, dimana lokasi suatu kegiatan direncanakan. Identifikasi *biota* ini meliputi flora dan fauna baik daratan maupun perairan, termasuk distribusi, populasi, beserta berbagai karakteristik spesifiknya. Seperti sifat-sifat endemik atau epidemik yang dimiliki, apakah merupakan *biota* asli setempat, pendatang, atau *biota* hasil budidaya dan sebagainya, termasuk perlu pula di-identifikasi keberadaan *biota* langka yang dilindungi. Oleh karena bagaimanapun, perubahan konfigurasi fisik lahan serta aktifitas suatu rencana kegiatan, sedikit banyak tentu akan mempengaruhi komponen ini.

- ***Komponen Sosial :***

Komponen ini berkaitan dengan kelompok manusia sebagai aktor pemeran utamanya, oleh karena bagaimanaoun manusia bukan hanya ber-adaptasi namun turut berperan mengelola lingkungan. Maka, segala sesuatu yang berhubungan dengan kehidupan sosial masyarakat, merupakan bagian dari komponen lingkungan yang harus di-identifikasi, yaitu meliputi faktor-faktor :

- Kependudukan, yang meliputi populasi, struktur penduduk, tingkat kepadatan dan sebarannya, tingkat kelahiran dan pertumbuhannya, tingkat pendidikan dan angkatan kerja produktif dan sebagainya. Termasuk juga didalamnya, komposisi antara penduduk asli dengan pendatang.
- Kondisi ekonomi, yang meliputi mata pencaharian, tingkat pendapatan, prasarana dan sarana perekonomian, kepemilikan lahan dan sebagainya.
- Kondisi sosial budaya, yang meliputi adat istiadat, pola kebiasaan, pranata dan proses sosial, sikap dan persepsi masyarakat, dan lain-lain. Termasuk didalamnya tentang keberadaan cagar budaya, peninggalan sejarah dan situs-situs penting yang terkait dengan budaya masyarakat.
- Kondisi kesehatan dan penyehatan masyarakat, yang meliputi jumlah dan fasilitas kesehatan termasuk cakupan pelayanannya, sanitasi lingkungan, insiden dan prevalensi penyakit, status gizi dan kecukupan pangan, dan sebagainya.

15.4.3. Wilayah Sebaran Dampak

Wilayah yang berpotensi terkena dampak suatu rencana kegiatan atau proyek, tidak hanya terbatas pada lokasi kegiatan proyek secara geografis, namun dapat menyebar melintasi batas-batas administratif, batas ekologi, dan batas sosial.

- *Batas Administratif :*

Batas administratif ditentukan berdasarkan peraturan perundang-undangan dan kaidah-kaidah administrasi yang membentuk satuan-satuan wilayah administratif. Batas administratif biasanya merujuk pada wilayah administrasi desa/kelurahan, kecamatan, kabupaten/kota, dan propinsi bahkan negara, tempat rencana kegiatan tersebut, yang dapat pula meliputi lebih dari satu wilayah administratif. Walaupun lokasi suatu rencana kegiatan atau proyek terletak pada satu atau beberapa wilayah administratif, dampak yang diakibatkannya

dapat saja lebih luas melintasi batas-batas administratif lokasi kegiatan atau proyek tersebut.

- **Batas Sosial :**

Batas sosial merupakan batas wilayah di sekitar lokasi rencana kegiatan tempat berlangsungnya berbagai interaksi sosial, adat istiadat, kepercayaan, dan stuktur sosial yang diperkirakan akan terkena dampak langsung maupun tidak langsung. Batas sosial ini dapat berbeda dengan batas administratif atau bahkan melampauinya.

- **Batas Ekologi :**

Batas ekologi dapat terdiri dari berbagai hamparan ekosistem yang berpotensi untuk terkena dampak rencana kegiatan atau proyek. Batas ekologi bisa meliputi ekosistem terestrial ataupun akuatik (sungai, rawa, muara), pesisir pantai, laut dan atmosferik. Batas ekologi ini biasanya ditetapkan berdasarkan luas wilayah persebaran dampak, dalam konteks ruang dan waktu.

15.5. Identifikasi Dampak Potensial

KOMPONEN KEGIATAN		KOMPONEN LINGKUNGAN		
		SOSIAL	ABIOTIS	BIOTIS
T A H A P A N K E G I A T A N	PERENCANAAN	POTENSI DAMPAK		
	PRA KONSTRUKSI			
	KONSTRUKSI			
	OPERASI			
	PASCA OPERASI			

Gambar 15.1. : Interaksi antara tahapan kegiatan dengan komponen lingkungan, beserta potensi dampak yang dapat terjadi.

Komponen lingkungan yang berpotensi terkena dampak dari suatu kegiatan atau proyek, meliputi seluruh komponen, baik komponen sosial, komponen abiotis ataupun komponen biotis. Namun besaran dampak yang akan dialaminya tentu berbeda, tergantung kepada karakteristik dan ukuran fisik dari rencana kegiatan atau proyek yang akan dilakukan, dan dampak tersebut dapat terjadi mulai dari tahap perencanaan sampai dengan tahap pasca operasi.

15.5.1. Dampak Lingkungan Sosial

Dampak sosial dapat terjadi mulai sejak tahap perencanaan awal, sampai dengan tahap pasca operasi suatu kegiatan. Oleh karena bagaimanapun, suatu kegiatan tentu akan terkait dengan tenaga kerja, lapangan kerja, dan berbagai kelompok masyarakat yang terlibat, baik secara langsung maupun tidak langsung, dengan kegiatan tersebut.

Walaupun pada tahap perencanaan nyaris belum ada kegiatan fisik yang signifikan mempengaruhi lingkungan, namun bukan berarti tidak berpotensi untuk menimbulkan dampak. Dampak non-fisik dapat terjadi terhadap komponen lingkungan sosial, yang melibatkan kelompok-kelompok masyarakat yang mungkin akan terkena dampak dari kegiatan, baik secara langsung maupun tidak langsung. Dampak tersebut lebih merupakan dampak psikologis, yang dapat berupa harapan ataupun kekhawatiran atas suatu rencana kegiatan, bahkan apabila rencana kegiatan tersebut kemudian batal dilaksanakan sekalipun. Dalam berbagai kasus, bahkan masyarakat sudah mulai meng-ekspresikan reaksinya walaupun belum ada kegiatan fisik terhadap suatu rencana, seperti dalam berbagai bentuk unjuk rasa, baik menolak maupun mendukung suatu rencana kegiatan. Tak jarang reaksi masyarakat ini justru berbalik, berdampak yang mempengaruhi rencana kegiatan tersebut. Misalnya dengan meningkatnya harga tanah, tuntutan dan berbagai tindakan resistensi masyarakat lainnya terhadap suatu rencana kegiatan atau proyek.

Pada tahap berikutnya, intensitas kegiatan sudah semakin nyata. Pergeseran lapangan kerja mulai terjadi dengan disertai mobilisasi dan demobilisasi tenaga kerja, yang akan diikuti dengan interaksi antara penduduk lokal dan tenaga kerja pendatang, dengan segala konsekuensinya.

Mobilisasi sejumlah besar tenaga kerja konstruksi akan terjadi pada tahap pra-konstruksi dan konstruksi, beserta dengan berkurang atau bahkan hilangnya lapangan kerja atau usaha penduduk lokal. Sementara itu demobilisasi tenaga kerja konstruksi akan terjadi pada akhir tahap konstruksi, untuk digantikan dengan tenaga kerja operasi. Dan seterusnya, demobilisasi tenaga kerja operasinya pun akan terjadi ketika operasional kegiatan telah berakhir, dan memasuki tahap pasca-operasi.

Interaksi sosial antara penduduk lokal dengan tenaga kerja pendatang, akan dapat menyebabkan berubahnya struktur sosial masyarakat, yang dapat saja berdampak terhadap timbulnya berbagai konflik sosial.



Gambar 15.2. : Contoh unjuk rasa penolakan rencana pembangunan PLTN Muria

15.5.2. Dampak Lingkungan Fisik

Setiap suatu kegiatan atau proyek, secara umum akan selalu menyebabkan perubahan fisik konfigurasi lahan pada lokasi proyek dan sekitarnya, yang besarnya tergantung kepada besaran proyek itu sendiri. Maka, sedikit banyak tentu akan mengakibatkan dampak perubahan keseimbangan pada lokasi tersebut, yang dapat berupa perubahan keseimbangan lahan, perairan maupun sirkulasi udara.

Perubahan konfigurasi fisik tersebut dapat mulai terjadi pada tahap pra-konstruksi dan mencapai puncaknya pada tahap konstruksi yang memicu terjadinya dampak secara langsung maupun dampak tak langsung dalam jangka panjang. Sedangkan pada tahap operasi, walaupun proses perubahan konfigurasi fisik sudah mulai menurun, namun dampak-dampak fisik operasional jangka panjang masih dapat terjadi, termasuk diantaranya sirkulasi air dan udara yang berubah.

Pada tahap pasca operasi, demobilisasi konstruksi dan peralatan operasi serta pemulihan lahan, kembali akan merubah konfigurasi lahan beserta segala dampaknya.

15.5.3. Dampak Ekosistem

Perubahan konfigurasi lahan yang diantaranya meliputi topografi dan tata guna lahan, sedikit banyak akan merubah ekosistem disekitar lokasi kegiatan atau proyek, terutama pada tahap konstruksi dan operasional kegiatan. Berbagai biota yang ada disekitar lokasi secara alamiah akan ber-adaptasi dengan kondisi ekosistem yang baru. Namun bagaimanapun keseimbangan ekosistem tersebut akan berubah pula menjadi keseimbangan yang baru. Berbagai biota akan dapat bertahan hidup dan berkembang, sementara biota lainnya yang tak dapat ber-adaptasi akan ber-angsur-angsur menyusut, ber-migrasi atau bahkan punah.

Perubahan ekosistem tersebut dapat terjadi secara permanen, dan bahkan tidak berbalik kembali pada kondisi semula, walaupun kegiatan operasional telah berakhir dan telah diupayakan pula pemulihan lahan, kembali pada kondisi semula.

15.6. Baku Mutu Lingkungan

Pengertian Baku Mutu Lingkungan Hidup (*environmental quality standard*) adalah ukuran batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi, atau komponen yang ada atau harus ada, dan/atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam suatu sumberdaya tertentu sebagai unsur lingkungan hidup (UU No 32 tahun 2009, Ps 1 (13)). Dengan kata lain, Baku Mutu Lingkungan adalah ambang batas kadar maksimum suatu zat atau bahan yang diperbolehkan berada di

lingkungan agar tidak menimbulkan dampak negatif. Maka, Baku Mutu Lingkungan Hidup yang dikenal juga dengan istilah nilai ambang batas lingkungan, merupakan indikator kondisi lingkungan secara fisik dan terukur, yang berfungsi sebagai tolok ukur untuk menilai apakah telah terjadi kerusakan atau pencemaran terhadap lingkungan hidup. Namun demikian ada pula indikator non-fisik yang tak terukur, terutama terkait dengan lingkungan sosial, yang memberikan gambaran terjadinya dampak sosial baik positif maupun negatif, seperti tingkat pertumbuhan ekonomi, pendapatan, kesehatan masyarakat, pendidikan, ketenagakerjaan dan sebagainya.

15.6.1. Jenis – Jenis Baku Mutu Lingkungan

Dalam pengertian tentang baku mutu lingkungan, terutama yang terkait dengan suatu kegiatan, dikenal ada dua sistem yaitu :

- *Effluent Standard*, yang merupakan kadar maksimum limbah yang diperbolehkan untuk dibuang ke lingkungan.
- *Stream Standard*, yang merupakan batas kadar untuk sumberdaya tertentu, seperti sungai, waduk, dan danau. Kadar yang diterapkan ini didasarkan pada kemampuan sumberdaya beserta sifat peruntukannya. Misalnya batas kadar badan air untuk air minum akan berlainan dengan batas kadar bagi badan air untuk pertanian.

Untuk hal tersebut, Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup dalam keputusannya No. KEP-03/MENKLH/II/1991, telah menetapkan baku mutu air pada sumber air, baku mutu limbah cair, baku mutu udara ambien, baku mutu udara emisi dan baku mutu air laut. Yaitu dengan pengertian sebagai berikut :

1. Baku mutu air pada sumber air, disingkat baku mutu air, adalah batas kadar yang diperolehkan bagi zat atau bahan pencemar terdapat dalam air, namun air tetap berfungsi sesuai dengan peruntukannya;
2. Baku mutu limbah cair adalah batas kadar yang diperbolehkan bagi zat atau bahan pencemar untuk dibuang dari sumber pencemaran kedalam air pada sumber air, sehingga tidak menyebabkan dilampauinya baku mutu air;

3. Baku mutu udara ambien adalah batas kadar yang diperbolehkan bagi zat atau bahan pencemar terdapat di udara, namun tidak menimbulkan gangguan terhadap makhluk hidup, tumbuh-tumbuhan dan benda;
4. Baku mutu udara emisi adalah batas kadar yang diperbolehkan bagi zat atau bahan pencemar untuk dikeluarkan dari sumber pencemaran ke udara, sehingga tidak mengakibatkan dilampauinya baku mutu udara ambien;
5. Baku mutu air laut adalah batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi, atau komponen lain yang ada atau harus ada, dan zat atau bahan pencemar yang ditenggang adanya dalam air laut;

Baku mutu limbah cair :

Kriteria kualitas sumber air di Indonesia ditetapkan berdasarkan pemanfaatan sumber-sumber air tersebut dan mutu yang ditetapkan berdasarkan karakteristik suatu sumber air penampungan tersebut dan pemanfaatannya. Dalam hal ini, badan air dapat digolongkan menjadi 5, yaitu :

1. **Golongan A**, yaitu air yang dapat digunakan sebagai air minum secara langsung tanpa pengolahan terlebih dahulu.
2. **Golongan B**, yaitu air baku yang baik untuk air minum dan rumah tangga dan dapat dimanfaatkan untuk keperluan lainnya tetapi tidak sesuai untuk golongan A.
3. **Golongan C**, yaitu air yang baik untuk keperluan perikanan dan peternakan, dan dapat dipergunakan untuk keperluan lainnya tetapi tidak sesuai untuk keperluan tersebut pada golongan A dan B.
4. **Golongan D**, yaitu air yang baik untuk keperluan pertanian dan dapat dipergunakan untuk perkantoran, industri, listrik tenaga air, dan untuk keperluan lainnya, tetapi tidak sesuai untuk keperluan A, B, dan C.
5. **Golongan E**, yaitu air yang tidak sesuai untuk keperluan tersebut dalam golongan A, B, C, dan D.

Tabel 15.3. : Contoh baku mutu air limbah idustri berdasarkan peruntukan badan air penerima (*Stream Standard*)

BAKU MUTU AIR LIMBAH CAIR (TERMASUK PENGOLAH LIMBAH CAIR TERPUSAT (KAWASAN))					
Parameter	Satuan	Golongan Baku Mutu Limbah Cair (Golongan Sungai)			
		I	II	III	IV
A. FISIKA					
Temperatur	°C	35	38	40	45
Zat padat terlarut	mg/L	1500	2000	4000	5000
Zat padat tersuspensi	mg/L	100	200	200	500
B. KIMIA					
pH		6-9	6-9	6-9	6-9
Besi (Fe)	mg/L	5	10	15	20
Mangan (Mn)	mg/L	0,5	2	5	10
Barium (Ba)	mg/L	1	2	3	5
Tembaga (Cu)	mg/L	1	2	3	5
Seng (Zn)	mg/L	5	10	15	20
Kromium heksavalen(Cr ⁺⁶)	mg/L	0,05	0,1	0,5	2
Kromium total (Cr tot)	mg/L	0,1	0,5	1	2
Kadmium (Cd)	mg/L	0,01	0,05	0,1	1
Raksa (Hg)	mg/L	0,001	0,002	0,005	0,01
Timbal (Pb)	mg/L	0,1	0,5	1	3
Timah putih (Sn)	mg/L	2	3	4	5
Arsen (As)	mg/L	0,05	0,1	0,5	1
Selenium (Se)	mg/L	0,01	0,05	0,1	1
Nikel (Ni)	mg/L	0,1	0,2	0,5	1
Kobal (Co)	mg/L	0,2	0,4	0,6	1
Sianida (CN)	mg/L	0,05	0,1	0,5	1
Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0,01	0,06	0,1	1
Flourida (F)	mg/L	1,5	15	20	30
Klorin bebas (Cl ₂)	mg/L	0,02	0,03	0,04	0,05
Amonia bebas (NH ₃ -N)	mg/L	0,5	1	5	20
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	10	20	30	50
Nitrit (NO ₂ -N)	mg/L	0,06	1	3	5
BOD ₅	mg/L	30	50	150	300
COD	mg/L	80	100	300	600
Detergen anionik	mg/L	0,5	1	10	15
Phenol	mg/L	0,01	0,05	1	2
Minyak & Lemak	mg/L	1	5	15	20
PCB	mg/L	NIHIL	NIHIL	NIHIL	NIHIL

BAKU MUTU AIR LIMBAH CAIR (TERMASUK PENGOLAH LIMBAH CAIR TERPUSAT (KAWASAN))					
Parameter	Satuan	Golongan Baku Mutu Limbah Cair (Golongan Sungai)			
		I	II	III	IV
C. BIOLOGI					
Coliform Group	MPN / 100 ml	100	1000	2000	2000
Coliform tinja	MPN / 100 ml	1000	5000	10000	10000

Sumber : <http://ketutsumada.blogspot.com/2012/01/baku-mutu-air-limbah-industri.htm>

Tabel 15.4. : Contoh baku mutu air limbah industri berdasarkan standar air limbah (*Effluent Standard*)

Parameter	Kadar Maksimum (mg/L)	Beban Pencemaran Maksimum (gram/satuan produk)
BOD ₅	75	22,5
COD	125	37,5
TSS	50	15
Fenol	0,25	0,08
Amonia total (sebagai N)	4	1,2
pH	6-9	
Debit limbah maksimum	0,3 m ³ / satuan produk	

Sumber : <http://ketutsumada.blogspot.com/2012/01/baku-mutu-air-limbah-industri.htm>

Untuk melindungi sumber air sesuai dengan kegunaannya, maka perlu ditetapkan baku mutu limbah cair dengan berpedoman kepada alternatif baku mutu limbah cair yang telah ditetapkan dalam Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup No. KEP-03/MENKLH/II/1991. Baku mutu limbah cair tersebut ditetapkan oleh gubernur dengan memperhitungkan beban maksimum yang dapat diterima air pada sumber air.

Baku mutu air dan baku mutu limbah cair yang ditetapkan oleh gubernur dimaksudkan untuk melindungi peruntukan air di

daerahnya. Hal tersebut mengharuskan setiap pembuangan limbah cair ke dalam air pada sumber air, mencantumkan kuantitas dan kualitas limbahnya. Maka, setiap kegiatan yang menghasilkan limbah cair dan yang membuangnya kedalam air pada sumber air, harus memenuhi persyaratan :

1. Mutu limbah cair yang dibuang ke dalam air pada sumber air tidak boleh melampaui baku mutu limbah cair yang telah ditetapkan.
2. Tidak mengakibatkan turunnya kualitas air pada sumber air penerima limbah.

Baku mutu udara :

Baku mutu udara ambien dan emisi ditetapkan dengan maksud untuk melindungi kualitas udara di suatu daerah. Maka mutu dan ambien setiap limbah gas yang dibuang ke udara harus dicantumkan dengan jelas dalam izin pembuangan gas.

BAKU MUTU UDARA AMBIEN NASIONAL					
No	Parameter	Batas Bersudut	Batas Masa	Metode Analisis	Peraturan
1	SO ₂ (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 24 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 24 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Spektrofotometri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
2	CO (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 24 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Metode Kalibrasi	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
3	NO _x (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Kalibrasi	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
4	O ₃ (1 Jam)	100 µg/m ³ 1 Jam	100 µg/m ³ 1 Jam	Perbandingan Absorpsi	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
5	H ₂ (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Perbandingan Absorpsi	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
6	NO ₂ (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Perbandingan Absorpsi	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
7	PM ₁₀ (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
8	PM _{2.5} (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
9	PM _{10-2.5} (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
10	PM _{2.5-10} (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
11	PM _{10-2.5-10} (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
12	PM _{2.5-10-2.5} (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997
13	PM _{10-2.5-10-2.5} (1 Jam/24 Jam/3 Hari/1 Tahun)	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	100 µg/m ³ 1 Jam 100 µg/m ³ 1 Tahun	Gravimetri	Spesifikasi Baku Mutu Bahan Kimia (SBBKM) No. 10/1997

Sumber : Peraturan Pemerintah RI no 41 Tahun 1999

Tabel 15.5. : Baku mutu udara ambien nasional

No.	PARAMETER	SATUAN	NILAI BATAS	METODE PENGUKURAN	PERALATAN
1.	Amoniak (NH ₃)	ppm	25	Metode tabungtest	Spektrofotometer Gas infra merah
2.	Melanitrodipnit (C ₂ H ₂ N ₂ O ₄)	ppm	0,001	Absorpsi gas	Gas infra merah
3.	Hidroperoksida (H ₂ O ₂)	ppm	0,12	1. Metoda tabungtest 2. Absorpsi gas	Spektrofotometer Gas infra merah
4.	Metil sulfid (CH ₃ SH) (TMS)	ppm	0,11	Absorpsi gas	Gas infra merah
5.	Sikrona (C ₂ H ₂ Cl ₂ CS ₂)	ppm	0,3	Absorpsi gas	Gas infra merah

* Catatan : ppm = satu bagian dalam satu juta
 * Satuan volume merupakan
 * Tingkat kebauan yang diukur oleh standar di lapangan sebagai acuan yang dapat di tolak atau tidak menurut 100% sebagai prosedur yang ditetapkan oleh pasal 2, ayat 1 dan 2 undang-undang

Sumber : Kep Men LH No. 50 Tahun 1996: Baku Mutu Tingkat Kebauan

Tabel 15.6. : Baku mutu udara berdasarkan bau

Pecantakan kawasan lingkungan kegiatan	Tingkat kebisingan db(A)
a. Pecantakan kawasan	
1. perumahan dan pemukiman	55
2. perdagangan dan jasa	70
3. perkantoran dan perdagangan	65
4. ruang terbuka hijau	50
5. industri	70
6. pemerintahan dan fasilitas umum	60
7. rekreasi	70
8. kebun:	
- bandar udara*	
- stasiun kereta api*	
- pelabuhan laut	70
- cagar budaya	60
b. Lingkungan kegiatan	
1. rumah sakit atau sejenisnya	55
2. sekolah atau sejenisnya	55
3. tempat ibadah atau sejenisnya	55

*) disesuaikan dengan ketentuan Mutu Ruang

Sumber : Kep Men LH No. 48 Tahun 1996: Baku Tingkat Kebisingan

Tabel 15.7. : Baku mutu tingkat kebisingan

Semua kegiatan yang membuang limbah gas ke udara ditetapkan mutu emisinya, termasuk getaran kebisingan yang diakibatkannya, dalam pengertian :

1. Mutu emisi dari limbah gas yang dibuang ke udara tidak melampaui baku mutu udara emisi yang telah ditetapkan.
2. Tidak menyebabkan turunnya kualitas udara, dan tidak mengakibatkan kebisingan.

Baku mutu udara ambien sendiri ditetapkan untuk 9 komponen, yaitu :

1. Sulfur dioksida;
2. Karbon monoksida;
3. Oksida nitrogen;
4. Oksida;
5. Hidrogen sulfida;
6. Hidrokarbon;
7. Amoniak;
8. Timah hitam/Timbal;
9. Debu.

15.6.2. Peraturan Perundangan Tentang Baku Mutu Lingkungan

Penetapan Baku Mutu Lingkungan Hidup, berguna sebagai alat evaluasi bagi badan-badan yang berwenang atas mutu lingkungan hidup suatu daerah atau kompartemen, yaitu sebagai alat penataan hukum administratif bagi pihak-pihak yang berkaitan dengan pengelolaan lingkungan hidup, seperti perusahaan ataupun industri. Disamping itu juga berguna bagi pelaksanaan AMDAL, yang merupakan konsep pengendalian lingkungan sejak dini (*preventive*), yaitu sebagai alat kontrol untuk memudahkan pengelolaan dan pengawasan perizinan, dan berguna dalam proses hukum yang terkait dengan pelanggaran peraturan lingkungan hidup.

Pasal 20 (3) Undang-undang No. 32 tahun 2009, menetapkan bahwa setiap orang diperbolehkan untuk membuang limbah ke media lingkungan hidup dengan prasyarat, memenuhi baku mutu lingkungan hidup, dan mendapat izjn dari menteri, gubernur, atau bupati/walikota sesuai dengan kewenangannya.

Peraturan perundangan, baik ditingkat nasional maupun daerah, yang mengatur baku mutu lingkungan, diperlukan untuk memungkinkan pengendalian dan pengawasan dampak lingkungan dapat dilakukan secara efektif. Yaitu sebagai referensi untuk menilai apakah masuknya unsur pencemar kedalam media lingkungan (tanah, perairan ataupun udara), melampaui atau masih dalam batas toleransi yang diijinkan.

Dasar hukum dari penetapan baku mutu lingkungan sendiri, telah ditetapkan sejak pertama kalinya diterbitkan undang-undang lingkungan pada tahun 1982. Yaitu pada Undang-undang No. 4 tahun 1982 Ps. 15, dimana disebutkan *“perlindungan lingkungan hidup dilakukan berdasarkan baku mutu lingkungan yang diatur dengan peraturan per undang-undangan”*.

Selanjutnya, berbagai peraturan perundangan terkait baku mutu lingkungan yang telah diterbitkan pemerintah RI, adalah sebagai berikut :

- Kep.Menneg LH No:KEP-51/MENLH/10/1995 Tentang Baku Mutu Limbah Cair bagi kegiatan Industri;
- Kep Menneg LH No KEP-52/MENLH/10/1995 Tentang Baku Mutu Limbah cair Kegiatan Hotel;
- Kep Menneg LH No.112 Tahun 2003 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik;
- Kep Menneg LH No.202 Tahun 2004 Tentang Baku Air Limbah bagi usaha dan/atau kegiatan pertambangan dan Biji Emas dan atau tembaga;
- Per.Menneg LH No 02 Thn 2006 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Kegiatan Rumah Potong Hewan.
- Per.Menneg LH No.9 thn 2006 Tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau kegiatan pertambangan bijih nikel;
- Per. Menneg LH No.4 thn 2007 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau kegiatan minyak dan gas serta Panas Bumi;
- Per.Menneg LH No.5 tahun 2007 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau kegiatan pengolahan buah-buahan dan sayuran;
- Per.Menneg LH No.6 tahun 2007 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau kegiatan pengolahan hasil perikanan;

- Per.Menneg LH No. 8 tahun 2007 Tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau Kegiatan Industri petrokimia Hulu;
- Per.Menneg LH No. 9 Tahun 2007 tentang Baku Mutu Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Rayon;
- Per.Menneg LH No. 3 tahun 2007 tentang Baku Mutu Lingkungan Bagi Kawasan Industri;
- Per.Menneg LH No.6 tahun 2007 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau kegiatan pengolahan hasil perikanan;
- Per.Menneg LH No. 8 tahun 2007 Tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau Kegiatan Industri petrokimia Hulu;
- Per.Menneg LH No. 9 Tahun 2007 tentang Baku Mutu Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Rayon;
- Per.Menneg LH No. 3 tahun 2007 tentang Baku Mutu Lingkungan Bagi Kawasan Industri;
- Per.Menneg LH No. 4 tahun 2010 Tentang Baku Mutu Lingkungan bagi usaha dan/atau kegiatan Industri Minyak Goreng;
- Per.Menneg LH No. 5 tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Industri Gula;
- Per Menneg LH No. 8 tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Industri Kimia Hulu;
- Per Menneg LH No. 10 tahun 2010 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha dan/atau kegiatan Industri;

Peraturan perundangan tentang baku mutu lingkungan ini bersifat progresif, akan terus dievaluasi dan dikembangkan untuk disesuaikan dengan perkembangan keadaan.

15.7. Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan

Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup (PPLH) adalah upaya sistematis dan terpadu yang dilakukan untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup dan mencegah terjadinya pencemaran dan/atau kerusakan lingkungan hidup yang meliputi perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pemeliharaan, pengawasan, dan penegakan hukum (UU no. 32 tahun 2009 pasal 1 (2)). Maka, perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup pada dasarnya

adalah sebuah upaya untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup serta untuk mencegah pencemaran dan kerusakan lingkungan hidup.

Kerusakan lingkungan hidup adalah perubahan langsung dan/atau tidak langsung terhadap sifat fisik, kimia, dan/atau hayati lingkungan hidup yang melampaui kriteria baku kerusakan lingkungan hidup (UU no. 32 tahun 2009 pasal 1 (17)). Maka, aspek perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup dalam undang-undang tersebut seyogyanya meliputi :

1. Aspek Perencanaan yang dilakukan melalui inventarisasi lingkungan hidup, penetapan wilayah ekoregion dan penyusunan RPPLH (Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup).
2. Aspek Pemanfaatan sumberdaya alam yang dilakukan berdasarkan RPPLH. Namun bila RPPLH belum tersusun, maka upaya pemanfaatan sumberdaya alam dilaksanakan berdasarkan daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup.
3. Aspek pengendalian terhadap pencemaran dan kerusakan fungsi lingkungan hidup yang meliputi pencegahan, penanggulangan dan pemulihan.
4. Aspek pengaturan beberapa instrumen pengendalian baru, antara lain : KLHS, tata ruang, kriteria baku kerusakan lingkungan hidup, AMDAL, UKL-UPL, perizinan, instrumen ekonomi lingkungan hidup, peraturan perundang-undangan berbasis lingkungan hidup, anggaran berbasis lingkungan hidup, analisis resiko lingkungan hidup, audit lingkungan hidup, dan instrumen lain sesuai dengan kebutuhan dan/atau perkembangan ilmu pengetahuan.
5. Aspek pemeliharaan lingkungan hidup yang dilakukan melalui upaya konservasi sumberdaya alam, pencadangan sumberdaya alam, dan/atau pelestarian fungsi lingkungan.
6. Aspek pengawasan dan penegakan hukum, meliputi penerapan sanksi (pidana dan perdata) bagi pelanggaran terhadap baku mutu, pelanggar AMDAL (termasuk pejabat yang menbitkan izin tanpa AMDAL atau UKL-UPL), dan sebagainya.

15.7.1. Rencana Pengelolaan Lingkungan (RKL) dan Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL)

RKL / RPL disusun sebagai penunjang upaya melestarikan fungsi lingkungan serta untuk mencegah pencemaran dan kerusakan lingkungan, sejak masih dalam tahap perencanaan suatu kegiatan sampai dengan setelah kegiatan tersebut dijalankan. Dokumen RKL / RPL adalah bagian dari AMDAL atas suatu rencana kegiatan atau proyek, yang disusun berdasarkan hasil suatu studi analisis dampak lingkungan (ANDAL), termasuk pada proyek atau kegiatan yang sudah dijalankan namun belum memiliki RKL / RPL. Dokumen RKL - RPL dalam hal ini akan menjadi pedoman bagi pengelolaan dan pemantauan lingkungan, baik untuk dampak positif maupun negatif, yang harus dikelola dan dipantau pada tahap pra-konstruksi, konstruksi, operasi, serta pasca-operasi.

Fungsi RKL dalam hal ini adalah sebagai pedoman dalam upaya meningkatkan dan / atau mempertahankan dampak positif, dan mencegah, meminimalkan, serta mengelola dampak negatif. Sementara itu RPL berfungsi sebagai pedoman pemantauan, yang mengacu pada baku mutu lingkungan yang ditetapkan untuk mengevaluasi upaya-upaya tersebut, dimana pemantauan lingkungan adalah upaya pengawasan untuk memastikan bahwa suatu kegiatan tidak menyebabkan kerusakan pada fungsi lingkungan, seperti yang direncanakan sejak awal.

15.7.2. Audit Lingkungan

Audit lingkungan merupakan suatu upaya pengendalian atau kontrol, untuk memastikan bahwa suatu usaha atau kegiatan, tidak mengakibatkan kerusakan atau pencemaran terhadap komponen-komponen lingkungan disekitarnya.

Audit lingkungan adalah suatu alat manajemen yang meliputi evaluasi secara sistematis, terdokumentasi, periodik, dan obyektif, tentang bagaimana suatu kinerja organisasi, sistem manajemen, dan peralatan yang digunakan, dengan tujuan memfasilitasi kontrol manajemen terhadap *upaya pengendalian dampak lingkungan* dan pengkajian penataan kebijaksanaan usaha atau kegiatan terhadap peraturan perundang-undangan tentang pengelolaan lingkungan (Kep. Men. LH No.42 Tahun 1994).

Audit lingkungan adalah suatu proses evaluasi yang dilakukan penanggung jawab usaha dan atau kegiatan untuk menilai tingkat ketaatan terhadap persyaratan hukum yang berlaku dan atau kebijaksanaan dan standar yang ditetapkan oleh penanggung jawab usaha atau kegiatan yang bersangkutan (UU No. 23 tahun 1997).

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Indonesia No. 3 tahun 2013 tentang Audit Lingkungan Hidup, audit lingkungan dapat bersifat sukarela dan juga dapat diwajibkan oleh Menteri Lingkungan Hidup. Audit yang diwajibkan ditujukan bagi usaha / kegiatan tertentu yang berisiko tinggi terhadap lingkungan hidup, dan / atau usaha / kegiatan yang menunjukkan ketidak-taatan terhadap peraturan perundang-undangan dalam bidang

Peran audit lingkungan sebagai alat manajemen terletak pada pengertian evaluasi yang sistematis, ter-dokumentasi, periodik dan objektif. Evaluasi dalam pelaksanaannya dapat dilakukan dengan pemeriksaan dan/atau pengukuran, sedangkan evaluasi yang sistematis dan periodik dilaksanakan dengan pemantauan yang terdokumentasi dan terjamin objektivitasnya. Sehingga berbagai pihak yang memerlukan dapat melaksanakan pemeriksaan kembali. Dengan pengertian ini, maka audit lingkungan merupakan proses pemeriksaan untuk mengetahui potret keadaan lingkungan.

Aspek audit lingkungan, dalam hal ini meliputi :

- ***Aspek Kepatuhan terhadap perundangan lingkungan.***

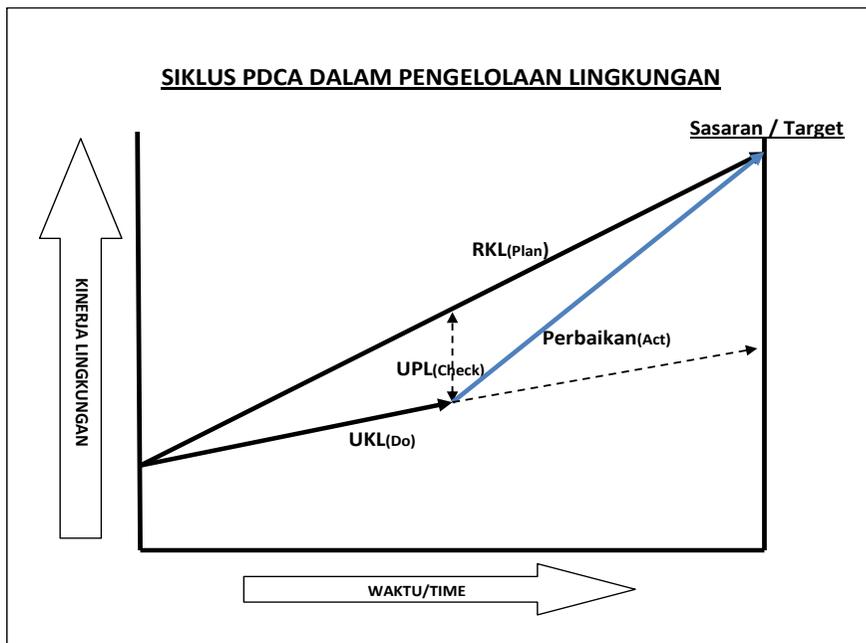
Audit kepatuhan peraturan perundangan lingkungan dilakukan terhadap usaha / kegiatan yang berisiko tinggi terhadap lingkungan hidup, dan / atau usaha / kegiatan yang menunjukkan atau diduga menunjukkan ketidak-taatan terhadap peraturan perundangan dalam bidang lingkungan yang berlaku.

- ***Aspek Upaya Pengelolaan Lingkungan (UKL).***

Audit lingkungan dilakukan terhadap upaya-upaya pengelolaan lingkungan (UKL) yang dilakukan oleh suatu kegiatan yang mempunyai rencana pengelolaan lingkungan (RKL), baik yang merupakan bagian dari AMDAL, maupun tidak melakukan AMDAL. Audit disini dilakukan dengan membandingkan antara hasil dari pelaksanaan UKL terhadap RKL yang telah ditetapkan sebelumnya.

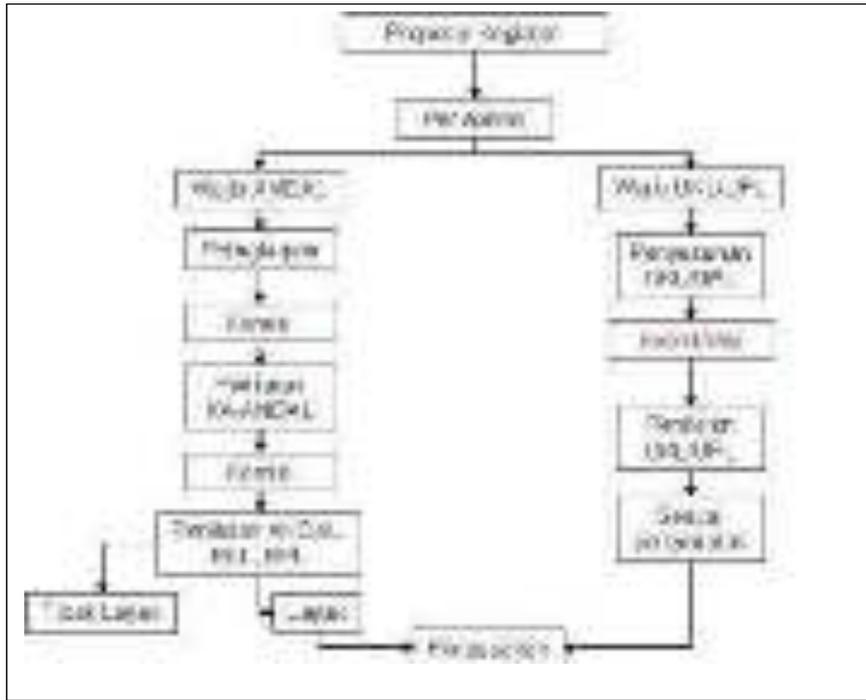
- ***Analisa dan Evaluasi Hasil Pemantauan Lingkungan (UPL).***

Pemantauan merupakan bagian yang penting dalam pengelolaan lingkungan. UKL tanpa disertai pemantauan tidak akan banyak berarti, oleh karena tidak dapat meng-identifikasi dugaan terjadinya dampak seperti yang diperkirakan dalam dokumen AMDAL. Maka rencana pemantauan dampak lingkungan (RPL) harus merupakan bagian dari AMDAL, sedangkan upaya pemantauan dampak lingkungan (UPL) adalah implementasi dari RPL. Hasil dari UPL kemudian di-analisa dengan dibandingkan dengan baku mutu lingkungan yang berlaku dan ditetapkan. Hasil analisa tersebut kemudian di-evaluasi, yaitu meliputi tingkat penyimpangannya dari baku mutu lingkungan dan rencana pengelolaan lingkungan (RPL) serta kecenderungannya, yang kemudian dijadikan dasar untuk memperbaiki upaya pengelolaan lingkungan (UKL). Pada dasarnya UPL dilakukan secara terus menerus atau diukur secara periodik, selama usaha / kegiatan tersebut berjalan, untuk memperoleh perbaikan yang berkesinambungan.



Gambar 15.3. : Diagram perbaikan upaya pengelolaan lingkungan (UPL)

15.8. Prosedur AMDAL



Gambar 15.4. : Diagram prosedur pelaksanaan AMDAL

Prosedur AMDAL terdiri dari proses penapisan (*screening*) wajib AMDAL; proses pengumuman; proses pelingkupan (*scoping*); penyusunan dan penilaian KA-AMDAL; penyusunan dan penilaian AMDAL, RKL, dan RPL; persetujuan *Kelayakan Lingkungan*.

- **Proses penapisan (*screening*) wajib AMDAL**, atau disebut proses seleksi wajib AMDAL adalah proses untuk menentukan apakah suatu rencana kegiatan wajib menyusun AMDAL atau tidak, yang mengacu pada dasar pertimbangan kegiatan Wajib AMDAL dalam Peraturan MENLH No. 05/2012.
- **Proses pengumuman**, yaitu dimana setiap rencana kegiatan yang sesuai peraturan perundangan wajib untuk dilakukan AMDAL, wajib mengumumkan rencana kegiatannya kepada masyarakat sebelum pemrakarsa melakukan penyusunan AMDAL. Pengumuman dilakukan oleh instansi yang bertanggung jawab dan pemrakarsa kegiatan. Hal tersebut diatur

dalam Keputusan Kepala BAPEDAL No. 08/2000 tentang Keterlibatan Masyarakat dan Keterbukaan Informasi dalam Proses AMDAL.

- **Proses pelingkupan (*scoping*)**, yaitu merupakan suatu proses awal untuk menentukan lingkup permasalahan dan mengidentifikasi dampak penting yang terkait dengan rencana kegiatan. Tujuan pelingkupan adalah untuk menetapkan batas wilayah studi, mengidentifikasi kemungkinan dampak penting terhadap lingkungan, menetapkan tingkat kedalaman studi, menetapkan lingkup studi, menelaah kegiatan lain yang terkait dengan rencana kegiatan yang dikaji. Saran dan masukan masyarakat menjadi bahan pertimbangan dalam proses pelingkupan. Proses pelingkupan ini meliputi :
 - Pelingkupan ekologi (*ecological scoping*) : menetapkan dampak penting berdasarkan nilai-nilai ekologi/peranan ekologinya.
 - Pelingkupan sosial (*social scoping*) : menetapkan dampak penting berdasarkan pandangan dan penilaian masyarakat (*public hearing*).
 - Pelingkupan kebijakan dan perencanaan (*policy/planning scoping*) : menentukan pilihan proyek, analisis dampak sesuai dengan kebijakan dan rencana pembangunan pemerintah.

Hasil akhir dari proses pelingkupan dituangkan dalam dokumen *Kerangka Acuan Analisis Dampak Lingkungan (KA-ANDAL)*.

- **Penyusunan dan penilaian KA-ANDAL** dilakukan atas dokumen *KA-ANDAL* yang diajukan pemrakarsa kepada Komisi Penilai AMDAL untuk disetujui, setelah diperbaiki atau disempurnakan manakala diperlukan. Faktor yang perlu diperhatikan dalam penilaian *KA-ANDAL* adalah :
 - Harus dapat menampung aspirasi dari berbagai pihak yang terlibat.
 - Perlu ditelaah dan dievaluasi untuk berbagai alternatif rencana kegiatan yang layak secara ekologis, teknis, dan ekonomis.

- Komponen-komponen lingkungan hidup yang penting.
 - Dampak kegiatan yang memiliki keterkaitan dan ketergantungan satu dengan lainnya, sehingga perlu dipahami hubungan sebab-akibatnya sejak awal.
- **Penyusunan dan penilaian ANDAL, RKL, RPL** dilakukan dengan mengacu pada KA-ANDAL yang telah disetujui dari hasil penilaian Komisi AMDAL. Setelah selesai disusun, pemrakarsa dapat mengajukan dokumen kepada Komisi Penilai AMDAL untuk dinilai dan disetujui, setelah diperbaiki atau disempurnakan apabila diperlukan.
- **Persetujuan Kelayakan Lingkungan** atas suatu rencana usaha/kegiatan diterbitkan oleh Menteri, Gubernur dan Bupati/Walikota, dengan mencantumkan dasar pertimbangan dikeluarkannya keputusan tersebut, dan pertimbangan atas saran, pendapat dan tanggapan warga masyarakat.

Catatan :

Analisis Dampak Lingkungan Hidup, yang selanjutnya disebut ANDAL, adalah telaahan secara cermat dan mendalam tentang dampak penting suatu rencana Usaha dan/atau Kegiatan (PP No. 27 tahun 2012, Tentang Izin Lingkungan).

16

CATATAN PENUTUP

Apabila bencana di-identifikasikan sebagai suatu peristiwa penghancuran atau pemusnahan, maka bencana alam adalah keniscayaan yang merupakan bagian dari siklus alam. Bahkan alam semesta termasuk bumi sebagai salah satu bagiannya, terbentuk atas peristiwa bencana alam besar, yaitu peristiwa *big bang*.

Dalam sejarah bumi, berbagai bencana alam telah sering terjadi, jauh sebelum peradaban manusia. Seperti pada peristiwa kepunahan besar *Permo-Trias* sekitar 250 juta tahun yang lalu, yang memusnahkan 95% spesies kehidupan di bumi. Atau pemusnahan besar pada akhir *Mesozoikum* sekitar 65 juta tahun yang lalu, yang menyebabkan punahnya keluarga binatang raksasa *Dinosaurus*.

Bencana alam adalah proses alamiah, yang nyaris tak dapat dicegah. Namun demikian, manusia dengan kelebihan nalar budinya dapat berupaya untuk meng-antisipasinya, setidaknya untuk mengurangi dampak korbannya.

Manusia sepanjang sejarah terus berupaya melakukan penanggulangan, melalui berbagai rekayasa ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus dikembangkan dan disempurnakan. Hal tersebut dilakukan sebagai bagian dari upaya untuk menciptakan lingkungan kehidupannya yang lebih baik. Walaupun tak jarang ketidak sempurnaan teknologi secara tak disengaja, justru memicu terjadinya bencana teknologi.

Pada sisi lain, naluri persaingan diantara manusia justru merangsang manusia untuk menciptakan bencana. Berbagai perang besar seolah tak pernah putus sepanjang peradaban manusia, dimana manusia justru berupaya menciptakan bencana bagi lawan-lawannya. Berbagai teknologi peralatan perang sengaja dirancang, di-produksi, dan dikembangkan dengan daya penghancur yang semakin besar.

Bencana akibat kesengajaan teknologi ini, secara teknis sangat mudah dicegah, namun naluri persaingan diantara manusialah yang menghalanginya.

Salah satu bencana besar perkembangan teknologi, terutama pasca *Revolusi Industri*, adalah bergesernya pola pikir manusia, dari pola pikir *Holistik* kearah *Transeden*. Yaitu dimana manusia tidak lagi mem-posisikan diri sebagai bagian dari alam lingkungan, akan tetapi memandang alam lingkungan dengan segala kandungan sumberdaya alam didalamnya sebagai obyek yang bebas untuk di-eksploitasi. Belakangan, pergeseran pola pikir tersebut mulai menuai bencana lingkungan, ketika lingkungan hidup mulai menunjukkan reaksinya atas eksploitasi sumberdaya alam yang tak terkendali. Tanah dan perairan mulai tercemar, demikian pula halnya dengan atmosfer, sehingga ber angsur-angsur semakin tidak mendukung kehidupan mahluk hidup terutama manusia. Kandungan *gas rumah kaca* di atmosfer semakin meningkat sehingga mengakibatkan terjadinya pemanasan global. Sementara itu peningkatan kandungan gas *CFC* di udara lambat laun melubangi lapisan *Ozon* di stratosfer, sehingga memungkinkan lebih banyak sinar *ultra-violet* yang berbahaya, menerobos mencapai permukaan bumi.

Bencana bagi kehidupan manusia dapat terjadi oleh proses alam, teknologi, atau sebagai akibat dari dinamika lingkungan. Ketiganya dapat terjadi sendiri-sendiri, namun dapat pula terkait satu dengan lainnya, sehingga diantara ketiganya merupakan *trilogi*.



Gambar 16.1 : Diagram *trilogi* bencana

Bencana alam erupsi gunung Tambora (1815) misalnya, telah mengakibatkan bencana lingkungan berupa tahun tanpa musim panas diberbagai tempat belahan bumi utara pada tahun 1816. Kegagalan teknologi yang menyebabkan runtuhnya bendungan St Francis di Amerika Serikat, memicu bencana alam banjir bandang di hilir bendungan. Sementara itu, bencana alam gempa - tsunami *Tohoku* (2011) telah mengakibatkan terjadinya bencana teknologi berupa ledakan pada reaktor nuklir *PLTN Fukushima Dai-ichi - Jepang*, dan berpotensi menyebabkan bencana lingkungan, berupa tercemarnya perairan sekitarnya oleh unsur-unsur radioaktif. Dan masih banyak lagi contoh-contoh bencana yang menunjukkan keterkaitan antara proses alam, teknologi dan dinamika lingkungan.

Daftar Pustaka

- A. A. Kerciku, S. Bhattacharya, Z. A. Lubkowski, and H. J. Burd (2008) : "FAILURE OF SHOWA BRIDGE DURING THE 1964 NIIGATA EARTHQUAKE: LATERAL SPREADING OR BUCKLING INSTABILITY?". The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China, FAILURE OF SHOWA BRIDGE DURING THE 1964 NIIGATA. Email: adri.kerciku@gmail.com,S.Bhattacharya@bristol.ac.uk,
- Akbar Bhayu Tamtomo (2018) : "INFOGRAFIK: Gempa Lombok 5 Agustus 2018". Kompas.com - 06/08/2018, 13:29 WIB.
- Alan Pierce (2012) : "How the Amazon Rainforest is Becoming the Latest Global Warming Threat". PACHAMAMA ALLIANCE, 20th Anniversary, December 13th, 2012.
- Andersen, S. O. and K. M. Sarma. (2002) : " Protecting the Ozone Layer: the United Nations History". Earthscan Press. London.
- Andersen, S. O., K. M. Sarma and K. N. Taddonio. (2007) : "Technology Transfer for the Ozone Layer". Lessons for Climate Change. Earthscan Press, London.
- Andersen, O.L., 2011 (30 October) : "Mt. Kelud Volcano, Indonesia, 30 October 2011".(URL:<http://www.oysteinlundandersen.com/Volcanoes/Kelud/Kelud-Volcano-Indonesia-October-2011.html>).
- Andersen, O.L., 2014 (22 February) : "Kelud Volcano, East-Java, Indonesia". (URL: <http://www.oysteinlundandersen.com/Volcanoes/Kelud/Kelud-Volcano-Indonesia-February-2014.html>)
- Anonim (2004) : "Tsunamis in Indonesia". [Online] Available at : http://www.drs.dpri.kyotou.ac.jp/eqtap/report/indonesia/tsunamis_in_indonesia/tsunamis_in_indonesia.htm. [Accessed 4 July 2015].
- Asdak, Chay. (1995) : "Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai". Yogyakarta: UGM Press.

- Asri Muspita Sari (2017)* : “Sejarah Kelam Agent Orange dalam Perang Vietnam”. <https://diamma.com/2017/02/07/sejarah-kelam-agent-orange-dalam-perang-vietnam/>
- Ayat S Karokaro, (December 20, 2014 Simeulue)* : “Kearifan Lokal Selamatkan Warga Simeulue dari Amukan Tsunami (bagian 1)”. MONGABAY INDONESIA, Situs Berita Informasi Lingkungan.
- Benedick, Richard E. (1991)* : “Ozone Diplomacy”. Harvard University Press. ISBN 0-674-65001-8 (Ambassador Benedick was the Chief U.S. Negotiator at the meetings that resulted in the Protocol).
- BMKG* : “Indonesia Tsunami Early Warning System - InaTEWS (4)”. <https://inatews.bmkg.go.id/>
- Brand, E.W. (1984)* : “Landslides in Southeast Asia: a state-of-the-art report”. In Proceedings, 4th Int'l. Symposium on Landslides 1:17-59. Toronto: Canadian Geotechnical Society.
- BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (2009)* : “Landslides around the world”. Highway 64 rock slide Tennessee, 2009. (Source: WDEF news) <https://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/landslides/world.html>
- Bruce Jaffe, Eric Geist, and Helen Gibbons (Dec. 2004 / Jan. 2005)* : “Indian Ocean Earthquake Triggers Deadly Tsunami”. Sound Waves monthly newsletter. Coastal and Marine News from Across the USGS.
- Croddy, Eric (2001)* : “Chemical and Biological Warfare”. Copernicus. ISBN 0-387-95076-1
- C. ALWMARK , S. ALWMARK-HOLM, J. ORM€O, and E. STURKELL (2014)* : “Shocked quartz grains from the Malingen structure, Sweden—Evidence for a twin crater of the Lockne impact structure”. The Meteoritical Society, Meteoritics & Planetary Science 49, Nr 6, 1076-1082 (2014) doi: 10.1111/maps.12314. Corresponding author. E-mail: carl.alwmark@geol.lu.se (Received 21 October 2013; revision accepted 19 April).
- Casagrande, Arthur (1976)*. "Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review". Harvard Soil Mechanics Series No. 88.
- Cass R. Sunstein (8/2008)* : “Of Montreal and Kyoto : A Tale of Two Protocols”. 38 ELR 10566.

- Carey, S., and Sigurdsson, H. (1987) : "Temporal variations in column height and magma discharge rate during the 79 A.D. eruption of Vesuvius". Geological Society of America Bulletin, v. 99, p. 303-314.
- Cohen, B. L., (1982) : "Concept of Nuclear Physics", Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi (1982).
- Colin Schultz (2013) : "The Amazon Rainforest Should Deal With Climate Change Better Than We Thought". Contrary to previous research, tropical rainforests should be able to stand up to climate change. Smithsonian.com. March 11, 2013.
- Cruden, D.M. and D.J. Varnes (1996) : "Landslide types and processes. Chapter 3 in A.K. Turner and R.L. Schuster (eds.), Landslides Investigation and Mitigation". Transportation Research Board Special Report 247:36-75. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
- D.B. Rao (2001) : "Biological Warfare". Discovery Publishing House. ISBN 978-81-7141-597-7.
- Departemen Pekerjaan Umum (1987) : "Petunjuk Perencanaan Penanggulangan Longsor". SKBI - 2.3.06., Yayasan Badan Penerbit PU.
- Department of Earth and Planetary Science, Northweste University : " Long period seismic moment of the 2004 Sumatra earthquake and implications for the slip process".
- Educational Foundation for Nuclear Science, Inc. (1964) : "Fas statement on biological and chemical warfare". Bulletin of the Atomic Scientists. 20 (8): Page: 46.
- Elizabeth May, Zoe Caron (November 2008) : "Global Warming For Dummies". ISBN: 978-0-470-84098-6, Paperback, 384 pages.
- Encyclopædia Britannica. "Plastic pollution". Diakses tanggal 1 August 2013.
- Eric Vega : "The Worst Landslides in History".
<https://www.ranker.com/list/worst-landslides-in-history/eric-vega>
- Ervan Hardoko (2017) : "Pada 17 Mei 1943, judul "Hari Ini dalam Sejarah : AU Inggris Gelar Operasi"Dambuster".
<https://internasional.kompas.com/read/2017/05/17/21352531/hari.ini.dalam.sejarah.au.inggris.gelar.operasi.dambuster.?page=all>

- Fridleifsson, Ingvar B.; Bertani, Ruggero; Huenges, Ernst; Lund, John W.; Ragnarsson, Arni; Rybach, Ladislaus (2008-02-11) : "The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change (pdf)". Luebeck, Germany, pp. 59-80*
- Gates, A.E. and Ritchie, D.(2007) : "Encyclopedia of Earthquakes and Volcanoes". Third Edition : New York, NY, Checkmark Books, 346 p.*
- GEOMAGZ 27/05/2016 : "Misteri Patahan Sumber Gempa Yogya 2006". <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/misteri-patahan-sumber-gempa-yogya-2006/>*
- GEOMAGZ, (30/5/2016) : "MITIGASI BENCANA GEMPA DI KAWASAN PRAMBANAN".*
- GianlucaNorini^a..Maria ClaraZuluaga^b. Iris JillOrtiz^c. Dakila T.Aquino^c..Alfredo Mahar F.Lagmay (2016) : "Delineation of alluvial fans from Digital Elevation Models with a GIS algorithm for the geomorphological mapping of the Earth and Mars". Elsevier, Geomorphology Vol.273, pp 134-149.*
- Hamilton, W.B.(1979) : "Tectonics of The Indonesian Region". Departemen Pertambangan Indonesia-United States Agency for International Development, 1979.*
- Hansen, Chuck, (1988): "U.S. nuclear weapons: The secret history". (Arlington, TX: Aerofax, 1988). ISBN 0-517-56740-7*
- Hary Tirto Djatmiko (07 Des 2016) : "Gempabumi Kuat M=6.5 Guncang Pidie Jaya, Provinsi Aceh Dipicu Akibat Aktivitas Sesar Aktif". Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Press Release.*
- Hary Tirto Djatmiko, (2018) : "Penjelasan Singkat Terkait Sarasehan IKAMEGA "Gempabumi Megathrust Magnitudo 8.7, Siapkah Jakarta?". Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 02 Mar 2018.*
- Henry Hafidz : "Sejarah Perang Vietnam Vs Amerika yang Melegenda". [https : //sejarahlengkap.com/dunia/sejarah-perang-vietnam](https://sejarahlengkap.com/dunia/sejarah-perang-vietnam)*
- Imam Subekti (2017) : "Geologi Teknik". TEKNOSAIN, ISBN : 978-602-6324-27-6.*
- Imam Subekti (2018) : "Geologi Lingkungan". MOBIUS, ISBN : 978-602-51321-5-5.*

- Imam Subekti (2019) : " Mengenal Siklus Alam ". Mobius, ISBN : 978-602-5874-11-6.*
- Imam Subekti (2019) : "Geologi dan Bencana Alam". TEKNOSAIN, ISBN : 978-623-7110-56-9.*
- Imbo, G. (1965) : "Catalog of Active Volcanoes of the World". Rome: IAVCEL, 18, 72 p.*
- John A. Kilpatrick and Sofia Dermisi (2007) : "Aftermath of Katrina : Recommendations for Real Estate Research". Journal of Real Estate Literature, Spring, 2007.*
- Katili, J. (1974) : "Cretaceous - Recent Magmatic Arc / Subduction Zone Indonesian Archipelago". Bibliography of Indonesian Geology, 2013. www.vangorselslist.com*
- Kenji Ishihara, Yasuyuki Koga (1981). : "CASE STUDIES OF LIQUEFACTION IN THE 1964 NIIGATA EARTHQUAKE". J-STAGE JOURNALS 1981 Volume 21 Issue 3 Pages 35-5, SOILS AND FOUNDATIONS, Print ISSN : 0385-1621.*
- KenRubin (2013): "The Formation of the Hawaiian Islands". krubin@soest.hawaii.edu. Scientists: Earthquakes causing Red Sea to part MSNBC - July 19, 2006.*
- Krynine, D.P. & Judd, W.R. (1957) : "Principles of Engineering Geology and Geotechnics". McGraw - Hill, New York, 730 pp.*
- "Landslide Types and Processes". U.S.Department of the Interior. U.S. Geological Survey Fact, Sheet 2004-3072, July 2004.*
- LANDSLIDES SCIENCE AND TYPE. gsa.state.al.us/gsa/geologichazard/landslides.html*
- Malkasian, Carter (2001) : " The Korean War: Essential Histories". Osprey Publishing.*
- Mark Duff (2013), : "Italy Vajont anniversary: Night of the 'tsunami'", BBC News, Longarone , 10 October 2013, From the section Europe*
- Maryono, A., (2007) : "Restorasi Sungai". Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.*
- Meilano Irwan, Yasaku Oota, Dudy Darmawan, Heri Andreas, Hasannudin Z. Abidi , Mipi A. Kusuma, Didik Sugiyanto, Agustan , Takeo Ito, Takao Tabei, Fumiaki Kimata, (2006) : " GPS measurement of coseismic displacement in Aceh province after the 2004 Aceh-Andaman earthquake".*

International Seminar for Mitigation and Rehabilitation of Tsunami in Banda Aceh Region, Join Seminar Between Syiah Kuala University and Nagoya University, Banda Aceh.

Michel Chossudovsky. Prof (2017) : "Fukushima: A Nuclear War without a War: The Unspoken Crisis of Worldwide Nuclear Radiation". ONLINE READER, Global Research, July 15, 2017, Global Research 25 January 2012. Theme: Environment, I-BOOKS SERIES, Science and Medicine.

Niken Purnamasari, Eva Savitri (2018) : "Sejarah Gempa dan Tsunami Hantam Donggala-Palu, Terdahsyat pada 1938". - detikNews, Sabtu 29 September 2018, 15:34 WIB <https://news.detik.com/berita/4234461/sejarah-gempa-dan-tsunami-hantam-donggala-palu-terdahsyat-pada-1938>

Pasaribu, Saut (2009) : "Sejarah Perang Dunia : Awal Mula dan Berakhirnya Perang Dunia I dan II. Yogyakarta : Locus.

Patrick Donnelly-Shores (2013) : "New study of carbon-efficacy of wind energy in the UK has implications across the pond". Berkeley Energy & Resources Collaborative.

Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 05 tahun 2012, tentang Jenis Rencana Usaha dan/atau Kegiatan yang wajib memiliki ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN HIDUP

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 03 tahun 2013, tentang AUDIT LINGKUNGAN.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 43 tahun 2008, tentang Air Tanah.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 27 tahun 2012, tentang Izin Lingkungan.

Rasheed Gunawan : "27-3-1964: Gempa Dahsyat dan Tsunami Melanda Alaska". Liputan6.com. <https://www.liputan6.com/global/read/2899869/27-3-1964-gempa-dahsyat-dan-tsunami-melanda-alaska>

Rifan Sambodo (2011) : "Perang Punisia". CATEGORIES: LABEL: PERANG DI EROPA <http://warofweekly.blogspot.com/2011/01/perang-punisia.html>

Roger Andrews (2014) : "Difference between global warming and climate change. The Connection Between Greenhouse Gases, Climate

Change, and Global Warming". July 31, 2017. <http://global-safety-culture.com/GlobalClimateChange/difference-between-global-warming-and-climate-change>

Sato, H.; Yoshida T.; Takaya I.; Sato T.; Ikeda Y. & Umino N. (2004). : "Late Cenozoic tectonic development of the back arc region of central northern Honshu, Japan, revealed by recent deep seismic profiling". *Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology*. 69 (2): 145–154. ISSN 0370-9868. Archived from the original on 2 March 2012. Retrieved 10 June 2010.

Scott Harrison (2016), : " St Francis Dam collapse left a trail of death and destruction", Los Angeles Times, WEDNESDAY OCT. 5, 2016.

Seed et al. (2003) : "Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework". 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, California, April 30, 2003, Earthquake Engineering Research Center PDF.

Sigurdsson, H., Carey, S., Cornell, W., and Pescatore, T. (1985) : "The eruption of Vesuvius in A.D. 79". *National Geographic Research*, v. 1, no. 3, p. 332-387.

Simkin, T., and Siebert, L. (1994) : "Volcanoes of the World". Geoscience Press,

Simandjuntak & Barber, (1996) : "Tipe-tipe jalur orogen Neogen Indonesia", *The Geology of Indonesia/Sumatra < The Geology of Indonesia*. Contributors : A. Pulunggono, B. Situmorang, H. Darman. https://en.wikibooks.org/wiki/The_Geology_of_Indonesia/Sumatra.

Simkin, T., and Siebert, L. (1994) : "Volcanoes of the World". Geoscience Press,

Stokesbury, James L (1990) : " A Short History of the Korean War". New York : Harper Perennial. ISBN 0688095135.

Subhamoy Bhattacharya and Malcolm Bolton (2004) : "BUCKLING OF PILES DURING EARTHQUAKE LIQUEFACTION". 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 95

Susan Solomon; Anne R. Douglass; Paul A. Newman (July 2014) : "The Antarctic ozone hole : An update". *Physics today*. Retrieved 18 September 2014.

The Nuclear Weapon Archive : "Big Ivan - The Tsar Bomba ("King of Bombs")". <http://nuclearweaponarchive.org/Russia/TsarBomba.html>

The Siberian Times reporter, 16 September 2013 : " A new perfection found in diamonds created by an asteroid in Siberian crater 35 million years ago". *The Siberian Times* - <http://siberiantimes.com/science/casestudy/features/a-new-perfection-found-in-diamonds-created-by-an-asteroid-in-siberian-crater-35-million-years-ago/>

Undang-undang No. 23 Tahun 1992 tentang Kesehatan

Undang-undang No. 24 Tahun 1992 tentang Penataan Ruang

Undang-undang No. 6 Tahun 1994 tentang ratifikasi Kerangka Konvensi PBB mengenai Perubahan Iklim

Undang-undang No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran

Undang-undang Nomor 3 Tahun 2002 tentang Pertahanan Negara

Undang-undang Nomor 7 Tahun 2004, tentang Sumber Daya Air.

Undang-undang Nomor 25 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana

Undang-undang Nomor 9 Tahun 2008 tentang Penggunaan Bahan Kimia dan Larangan Penggunaan Bahan Kimia Sebagai Senjata Kimia.

Undang-Undang No. 32 tahun 2009, tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Undang-undang Nomor 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah

UNEP (10 September 2014) : "Ozone Layer on Track to Recovery : Success Story Should Encourage Action on Climate". *UNEP* Retrieved 18 September 2014.

UNIVERSITY OF ALASKA FAIRBANK, ALASKA EARTHQUAKE CENTER : "A New Perspective on Seismic Hazards in the Shumagin Gap". *Earthquakes, Tsunamis, Volcanoes, Seismic Network*, August 03, 2017.

<https://earthquake.alaska.edu/new-perspective-seismic-hazard-shumagin-gap>.

USGS (2010) : "Historic Earthquakes - Niigata, Japan 1964 June 16 04:01 UTC Magnitude 7.5". *Archived from the original on 28 January 2010*.

- Van Bavel J (2013) : "The world population explosion: causes, backgrounds and -projections for the future". Facts Views Vis Obgyn (2013).*
- Vesuvius in A.D. 79". National Geographic Research, v. 1, no. 3, p. 332-387.*
- "Volcanoes of Indonesia".www.volcanodiscovery.com.indonesia.html.*
- Wiku Adisasmito, Prof, Drh, M Sc, Ph D. : " Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL)". Departemen Administrasi & Kebijakan Kesehatan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia.*
- Wortel, M.J.R. and Spakman, W. (2000) : " Subduction and Slab Detachment in the Mediterranean-Carpathian Region". Science, v. 290, n. 5498, p. 1910-1917. Review (full text upon subscription).*
- Zen, M.T., and D. Hadikusumo, (1965) : "The future danger of Mt. Kelut (eastern Java-Indonesia)". Bulletin Volcanologique, ser. 2:28:275-282.*
- Berbagai Artikel Terseleksi Dari Berbagai Website, Tanpa Identifikasi. (Various Selected Articles, From Non-Identified Website).*

TRILOGI BENCANA

Pada bagian awal diuraikan betapa bencana alam sesungguhnya telah terjadi dalam sejarah bumi, bahkan jauh sebelum munculnya peradaban manusia, dimana bencana alam telah menyebabkan kepunahan berbagai spesies kehidupan. Kemudian pada sejarah peradaban manusia, bencana alam telah berkali-kali terjadi.

Berkutnya diuraikan, betapa kemajuan sains (teknologi), terutama pasca Revolusi Industri, telah membuat pada kehidupan manusia. Perubahan pola ini di samping meningkatkan kehidupan yang lebih baik, pada sisi lain juga memicu terjadinya bencana. Bencana teknologi terjadi, baik disebabkan oleh kurangnya kemampuan teknologi itu sendiri, juga disebabkan oleh faktor kesengajaan. Namun bencana manusia telah memicu terjadinya perang besar, dan teknologi pemukiman sendiri dikembangkan untuk melindungi bencana badai lawan.

Pada bagian akhir diuraikan, betapa dinamika lingkungan bencana atas perubahan perubahan yang terjadi, baik oleh karena proses alam maupun pengembangan teknologi. Tak jarang risiko lingkungan justru berakibat menimbulkan bencana atau dampak yang justru merugikan manusia. Namun dengan kesadaran, peran budidaya manusia, manusia sendiri menyadari bahwa bencana bisa berbagai sebab dapat terjadi selagi saat. Sehingga kesadaran ini berbuah pada berbagai upaya kolektif untuk menanggapinya.

BIODATA PENULIS



Irwan Salsabil, Lahir di Bandung, tanggal 27 Agustus 1983. Siroteknik dan pada tahun 2010 di ST Teknologi Telkom. Ia, tahun 2010-2011 dan 2012 pernah menjadi Mahasiswa Asisten dan Ketua Himpun dan tahun 2015-2016 melakukan penelitian program magister di Geographical University Philipps International Institute of Advanced Science and Earth Science (GTC) Di Gießen, Hefenheim, Jerman. Ia, juga pernah sebagai dosen dan Pembantu dosen di IAIN Sunan Gunung Djati Bandung 2014-2018.



Rizki Rizkyawati, lahir di Bandung, tanggal 31 Desember 1983. Persekolahan di universitas pada tahun 1999-2003 pada ST Teknik Sipil STT IPJ, pada tahun 2004-2011 Di outsourcing pada PT ALM (Persero) Area Cendekasi, 2011-2012 di STT PLN dan 2012-2016 di Manajemen Logistik Universitas Trilogi pada tahun 2015-2019. Pada tahun 2019 pernah bekerja sebagai dosen STT PLN dengan mata kuliah Ilmu Lingkungan, Statistika dan probabilitas, serta perantara STT PLN menjadi STT PLN pada Fakultas Teknologi Informatika dan Konektivitas dengan tugas mengajar Ekosistem, Mikrobiologi Perikanan dan Perikanan, Teknik, 5. Saat ini dia berkecimpung dalam dunia manajemen Proyek Konstruksi.



Peneliti

INSTITUT TEKNOLOGI PLN

Jalan P. H. H. Lingkar Laut 1144,
Duri Kowambi, Duri Kowambi, Jakarta Barat 1753
Telp. (021) 514-5140, 511-0014

