



Penerbit :  
INSTITUT TEKNOLOGI PLN

*Mengenal*

# SUMBER-SUMBER ENERGI TERBARUKAN (RENEWABLE ENERGY)

IMAM SUBEKTI  
RANTI HIDAYAWANTI  
Rr. MEKAR AGENG KINASTI

---

**Mengenal**  
**SUMBER-SUMBER**  
**ENERGI TERBARUKAN**  
**(*RENEWABLE ENERGY*)**

---

---

**Mengenal**  
**SUMBER-SUMBER**  
**ENERGI TERBARUKAN**  
**(RENEWABLE ENERGY)**

---

Imam Subekti  
Ranti Hidayawanti  
Rr. Mekar Ageng Kinasti



Penerbit :

**INSTITUT TEKNOLOGI PLN**

**2021**

## **Mengenal SUMBER-SUMBER ENERGI TERBARUKAN (RENEWABLE ENERGY)**

Oleh : **Imam Subekti  
Rizki Hidayawanti  
Rr. Mekar Ageng Kinasti**

Penerbit : **INSTITUT TEKNOLOGI PLN**  
Alamat : Mendia PLN, Jl. Lengkong Luar Barat,  
Dun Kosambi, Cempoko-emp.  
Jakarta Barat, 11750  
Telp/Fax : (021) 644 0342, 577 0344  
Email : -

Hak Ciptang 2027 pada Penerbit

---

Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang Pasal 72 ayat 1,2 dan 3 Undang-Undang Republik Indonesia No. 19 tahun 2002. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyediaan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit INSTITUT TEKNOLOGI PLN

---

Cetakan Pertama, Januari 2027

Editor : **Rr. Mekar Ageng Kinasti**

Design & Layout : **Akhmad Fauzi**

ISBN : **978-623-95763-2-2**  
**978-623-95763-3-9 (PDF)**

# Kata Sambutan



**Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana, K., MT**

*Rektor Institut Teknologi PLN  
Guru Besar Fakultas Teknik  
Universitas Indonesia*

Dengan mengucapkan puji syukur ke hadirat Allah SWT, buku “Menenal Sumber-Sumber Energi Terbarukan (*Renawable Energy*) ini dapat diterbitkan.

Salah satu sumber daya alam yang berperan serta dalam usaha mensejahterakan masyarakat adalah sumber daya energi, yang digolongkan menjadi dua bagian besar, yaitu sumber daya energi tak terbarukan dan sumber daya energi terbarukan. Sumber daya energi tak terbarukan cadangannya sangat banyak namun karena selalu dieksploitasi terus-menerus akhirnya menjadi langka dan habis. Dewasa ini, energi terbarukan (*renewable energy*) merupakan kebutuhan yang sangat penting dan tidak bisa ditunda lagi. Kita tidak bisa lagi terus-menerus bergantung pada energi fosil yang semakin menipis. Menurut ahli, dengan pola konsumsi seperti sekarang, dalam waktu sekitar puluhan tahun cadangan bahan bakar fosil akan habis. Oleh karena itu, demi keberlangsungan kehidupan dan mengantisipasi kelangkaan energi, penelitian ilmiah pengolahan energi terbarukan adalah pilihan terbaik untuk dilakukan.

Pada buku ini menjelaskan sumber-sumber energi seperti matahari, air, panas bumi dan angin yang dapat di konversi serta bagaimana cara mengkonversinya sehingga menjadi nilai terbarukan (*renewable energy*). Sumber-sumber energi tersebut merupakan sumber daya yang jumlahnya tidak mungkin habis, sehingga cocok sebagai sumber energi masa depan dan ramah lingkungan. Tentu teknologi dan pengembangannya turut mendukung terciptanya energi terbarukan.

Semoga dengan dipublikasikannya buku ini dapat menjadi sumber informasi dan acuan bagi pembaca baik akademisi maupun masyarakat pada umumnya terkait energi terbarukan.

Saya menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada tim penulis serta semua pihak yang telah memberi dukungan dan bantuan sehingga buku ini bisa diterbitkan.

Jakarta, Januari 2021

**Iwa Garniwa**

# Kata Pengantar

Energi terbarukan atau yang populer dengan sebutan *renewable energi*, merupakan istilah yang semakin menjadi topik pembicaraan akhir-akhir ini. Secara kebetulan hal tersebut tumbuh bersamaan dengan isu-isu lain, seperti isu pemanasan global dan perubahan iklim, isu semakin menipisnya cadangan energi *konvensional*, dan berbagai isu lainnya.

Tak dapat dipungkiri, isu-isu tersebut memang saling terkait satu dengan lainnya, baik secara langsung maupun tak langsung. Sehingga menimbulkan kerancuan pengertian diantara satu dengan lainnya.

Buku ini disusun untuk dapat memberikan pengertian tentang energi terbarukan (*renewable energy*). Yaitu mulai dari sumber-sumber utamanya, proses konversi, serta siklus keterbaruannya. Dan juga diuraikan secara ringkas dalam buku ini, sumber-sumber energi fosil yang dinilai tak terbarukan (*non-renewable*) sebagai bahan perbandingan.

Peran perkembangan teknologi pemanfaatan sumber-sumber energi, juga disinggung dalam buku ini. Oleh karena bagaimanapun teknologi beserta perkembangannya, tentu sangat berperan dalam menentukan status keterbaruan suatu sumber energi.

Maka buku ini disusun, diantaranya untuk menghapus atau setidaknya mengurangi kerancuan pengertian tentang energi terbarukan dengan pengertian tentang berbagai isu terkait lainnya, yang secara kebetulan tumbuh berkembang bersamaan dengan isu tentang energi terbarukan.

Jakarta, Januari 2021

**Penulis**

# Daftar Isi

<b>Kata Sambutan</b> .....	i
<b>Kata Pengantar</b> .....	ii
<b>Daftar Isi</b> .....	iii
<b>Daftar Tabel</b> .....	vii
<b>Daftar Gambar</b> .....	ix
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Konsep Kekekalan Energi .....	2
1.2. Biosfer .....	3
1.3. Istilah - Istilah Terkait .....	5
<b>2. ENERGI ALAM SEMESTA</b> .....	9
2.1. Proses Pembentukan Bumi dan Alam Semesta .....	9
2.2. Teori "Big Bang" .....	10
2.3. Pembentukan Sistem Tata Surya .....	13
2.4. Energi Matahari .....	15
2.4.1. Struktur dan Komposisi Matahari .....	16
2.4.2. Reaksi Fusi Nuklir Matahari .....	18
2.5. Proses Pembentukan Bumi .....	21
2.5.1. Struktur Interior Bumi .....	22
2.5.2. Struktur Eksterior Bumi .....	24
<b>3. PEREDARAN ENERGI DALAM SISTEM BIOSFER</b> .....	27
3.1. Sumber Energi Primer .....	27
3.1.1. Energi Matahari .....	27
3.1.2. Energi Inti Bumi .....	29
3.2. Peredaran Energi Internal Biosfer .....	30
3.2.1. Siklus Energi Biosfer .....	31
3.2.2. Energi Pergerakan Udara (Angin) .....	32
3.2.3. Energi Pergerakan Air .....	35
3.3. Intervensi Energi Eksternal .....	37
3.3.1. Tumbukan Benda Angkasa .....	37
3.3.2. Energi Gravitasi Bulan .....	41
3.3.3. Energi Eksternal dari dalam Bumi .....	43

<b>4.</b>	<b>INTERVENSI MANUSIA DAN REVOLUSI INDUSTRI .</b>	<b>55</b>
4.1.	Revolusi Industri .....	56
4.1.1.	Latar Belakang dan Perkembangan Revolusi Industri .....	57
4.1.2.	Eksplorasi Sumberdaya Energi .....	60
4.1.3.	Dampak Revolusi Industri .....	62
4.2.	Intervensi Manusia .....	64
4.3.	Pemanasan Global & Protokol Kyoto .....	66
4.3.1.	Pemanasan Global dan Dampaknya .....	66
4.3.2.	Protokol Kyoto .....	71
4.4.	Lubang Ozon dan Protokol Montreal .....	73
4.4.1.	Mekanisme Perusakan Lapisan Ozon .....	74
4.4.2.	Protokol Montreal .....	76
<b>5.</b>	<b>TENAGA AIR .....</b>	<b>81</b>
5.1.	Sejarah Pemanfaatan Tenaga Air .....	81
5.2.	Siklus Hidrologi .....	83
5.3.	Analisa Hidrologi .....	86
5.3.1.	Daerah Tangkapan Hujan (Catchment Area) ...	86
5.3.2.	Intensitas Hujan .....	87
5.3.3.	Koefisien Limpasan (Run off Coefficient) .....	90
5.4.	Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) .....	91
5.4.1.	PLTA Sistem Run off .....	92
5.4.2.	PLTA Sistem Waduk (Reservoir) .....	93
5.4.3.	PLTA Sistem Pump Storage .....	94
5.4.4.	PLTA Pasang Surut (Tidal Power Plant) .....	95
5.5.	Kendala dan Aspek Lingkungan .....	96
5.6.	Potensi Tenaga Air Dunia .....	99
5.7.	Potensi Tenaga Air Indonesia .....	100
<b>6.</b>	<b>TENAGA PANAS BUMI (GEOTHERMAL) .....</b>	<b>107</b>
6.1.	Sejarah Teknologi Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi .....	107
6.2.	Potensi Energi Panas Bumi .....	109
6.2.1.	Sumber Energi Panas Bumi .....	111
6.2.2.	Panas Bumi dan Vulkanologi .....	112
6.2.3.	Sistem Panas Bumi .....	114
6.3.	Lapangan Panas Bumi .....	117

6.4.	Perhitungan Potensi Energi Panas Bumi .....	122
6.5.	Teknologi Panas Bumi .....	124
6.5.1.	Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Konvensional .....	128
6.5.2.	Pengembangan Teknologi Panas Bumi (EGC-Enhanced Geothermal System) .....	132
6.6.	Keekonomian Panas Bumi .....	138
6.7.	Prospek Pengembangan Energi Panas Bumi .....	140
<b>7.</b>	<b>TENAGA ANGIN .....</b>	<b>145</b>
7.1.	Potensi Tenaga Angin .....	146
7.2.	Perhitungan Potensi Tenaga Angin .....	149
7.3.	Teknologi Pembangkitan Listrik Tenaga Angin (PLTB) .....	151
7.4.	Kendala dan Aspek Lingkungan .....	153
7.5.	Perkembangan PLTB .....	155
<b>8.</b>	<b>TENAGA MATAHARI .....</b>	<b>159</b>
8.1.	Pemanfaatan Tenaga Matahari .....	160
8.2.	Potensi Tenaga Surya .....	163
8.3.	Pengembangan Potensi Tenaga Surya di Indonesia ....	165
<b>9.</b>	<b>SUMBER ENERGI BIOMASSA .....</b>	<b>167</b>
9.1.	Siklus Energi Biomassa .....	168
9.2.	Biofuel .....	170
9.3.	Teknologi Pemanfaatan Energi Biomassa .....	173
9.4.	Pembakaran Langsung (Direct Combustion) .....	174
9.5.	Konversi Thermokimia .....	176
9.5.1.	Pengarangan (Karbonisasi) .....	176
9.5.2.	Pirolisis .....	178
9.5.3.	Gasifikasi .....	179
9.5.4.	Likuifaksi .....	181
9.5.5.	Esterifikasi / Transesterifikasi .....	183
9.6.	Konversi Biokimia .....	185
9.6.1.	Anaerobic Digestion .....	185
9.6.2.	Hidrolisis - Fermentasi .....	188

<b>10. SUMBER ENERGI BIOMASSA FOSIL (NON-RENEWABLE)</b> .....	193
10.1. Batubara .....	194
10.1.1. Sejarah Pemanfaatan Batubara .....	195
10.1.2. Genesa Batubara .....	196
10.1.3. Klasifikasi Batubara .....	199
10.1.4. Sebaran Endapan Batubara .....	203
10.1.5. Potensi Sumberdaya Batubara Indonesia .....	205
10.1.6. Kendala dan Aspek Lingkungan Penambangan Batubara .....	207
10.2. Minyak dan Gas Bumi .....	213
10.2.1. Sejarah Pemanfaatan Minyak Bumi .....	213
10.2.2. Genesa Minyak dan Gas Bumi .....	215
10.2.3. Perangkap Minyak dan Gas Bumi (Oil & Gas Trap) .....	218
10.2.4. Cadangan Minyak dan Gas Bumi Dunia .....	222
10.2.5. Serpih Minyak (Oil Shale) .....	223
<b>11. ENERGI NUKLIR</b> .....	227
11.1. Sejarah Pemanfaatan Energi Nuklir .....	228
11.2. Reaksi Nuklir .....	230
11.3. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) .....	232
11.4. Produksi Uranium dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir .....	238
11.5. Aspek Lingkungan Tenaga Nuklir .....	241
11.6. Bahan Bakar Nuklir Thorium .....	245
11.6.1. Tentang Unsur Radioaktif Thorium .....	246
11.6.2. Sejarah Reaktor Nuklir Thorium .....	248
11.6.3. Radioaktivitas Thorium (Th-232) .....	249
11.6.4. Mineralogi Thorium .....	251
11.6.5. Cadangan Uranium – Thorium Indonesia .....	253
<b>CATATAN PENUTUP</b> .....	255
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	257

# Daftar Tabel

Tabel 2.1. :	Sifat fisik dan komposisi Matahari .....	17
Tabel 2.2. :	Spektrum sinar Matahari .....	20
Tabel 3.1. :	Daftar kawah meteorit dengan diameter > 25 km ..	38
Tabel 5.1. :	Koefisien Limpasan untuk jenis2 permukaan lahan	90
Tabel 5.2. :	Daftar bendungan di dunia dengan luas genangan melebihi 5 000 km <sup>2</sup> .....	97
Tabel 5.3. :	Daftar keruntuhan bendungan yang menimbulkan kerugian besar .....	98
Tabel 5.4. :	Sungai2 besar dunia, dengan panjang, <i>drainage area</i> dan debit rata-ratanya .....	99
Tabel 5.5. :	10 negara produsen listrik tenaga air terbesar dunia .....	100
Tabel 5.6. :	Potensi tenaga air di Indonesia .....	100
Tabel 6.1. :	Mineral-mineral <i>hydrothermal</i> dengan temperatur pembentukannya .....	121
Tabel 6.2. :	Berbagai jenis fluida kerja pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner .....	133
Tabel 6.3. :	Perbandingan biaya produksi tenaga listrik berbagai jenis pembangkit .....	138
Tabel 6.4. :	Kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi dunia .....	142
Tabel 7.1. :	Daftar 10 negara produsen terbesar listrik tenaga angin .....	149
Tabel 7.2. :	Daftar potensi tenaga angin Indonesia per provinsi	156
Tabel 8.1. :	Daftar 10 negara utama produsen listrik tenaga surya .....	165
Tabel 9.1. :	Komposisi dan kandungan energi material Biomassa .....	173
Tabel 9.2. :	Limbah biomassa yang dapat diolah menjadi gas sintetik .....	181
Tabel 10.1.:	Klasifikasi ( <i>rank</i> ) batubara, <i>ASTM D-388</i> .....	200
Tabel 10.2.:	Cadangan batubara di berbagai negara, status pada akhir tahun 2006 .....	205

Tabel 10.3.:	Daftar peristiwa kecelakaan terburuk pada tambang batubara bawah tanah .....	211
Tabel 10.4.:	Cadangan dan produksi minyak bumi dunia, dari 17 negara produsen utama minyak bumi ( <i>status tahun 2012</i> ) .....	223
Tabel 11.1.:	Daftar mineral yang mengandung Uranium .....	238
Tabel 11.2.:	Produksi Uranium Dunia dari tahun ke tahun, s/d tahun2010 .....	239
Tabel 11.3.:	Insiden instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir besar s/d 2009 .....	244
Tabel 11.4.:	Karakteristik unsur radioaktif Thorium .....	246

# Daftar Gambar

Gambar 1.1. :	Diagram peredaran energi di Biosfer .....	4
Gambar 2.1. :	Diagram <i>Big Bang &amp; Big Crunch</i> .....	12
Gambar 2.2. :	Diagram siklus <i>Big Bang</i> .....	12
Gambar 2.3. :	Diagram <i>hipotesis nebula</i> , pembentukan sistem tata surya matahari .....	14
Gambar 2.4. :	Sistem tata surya Matahari .....	15
Gambar 2.5. :	Diagram Struktur Interior Matahari .....	18
Gambar 2.6. :	Diagram proses reaksi <i>fusi nuklir</i> pada Matahari .....	19
Gambar 2.7. :	Perbandingan Spektra Energi radiasi sebagai fungsi panjang gelombang dari matahari untuk kondisi tepat diatas atmosfer bumi, blackbody, dan pada permukaan bumi. (Sumber: wikipedia) .....	20
Gambar 2.8. :	Diagram Struktur Interior Bumi .....	22
Gambar 2.9. :	Struktur atmosfer bumi .....	25
Gambar 3.1. :	Diagram radiasi surya ( <i>insolasi</i> ) pada permukaan bumi .....	28
Gambar 3.2. :	Diagram siklus arus konveksi dalam mantel dan pergerakan <i>lithosfer</i> .....	29
Gambar 3.3. :	Pecahan kerak bumi menjadi lempeng-lempeng tektonik ( <i>tectonic plates</i> ) .....	30
Gambar 3.4. :	Contoh energi angin dalam pembentukan bentang alam <i>Mushroom Rock</i> .....	32
Gambar 3.5. :	Diagram siklus peredaran posisi matahari terhadap permukaan bumi .....	33
Gambar 3.6. :	Pergerakan <i>Angin Muson</i> di kepulauan Indonesia .....	34
Gambar 3.7. :	Diagram sinergi antara energi Surya dan energi Panas Bumi .....	36
Gambar 3.8. :	Kawah meteorit Wilkes di benua Antartika .....	39
Gambar 3.9. :	Kawah meteorit Chicxulub di semenanjung Yucatán .....	41
Gambar 3.10.:	Diagram posisi matahari dan bulan terhadap bumi, yang menyebabkan pasang laut .....	42

Gambar 3.11.:	Kompleks gunung api Rinjani Samalas, Lombok	44
Gambar 3.12.:	Kaldera Samalas (Segara Anak), dengan gunung Barujari dan Rinjani .....	44
Gambar 3.13.:	Lokasi Gunung Tambora di Semenanjung Sanggar - Pulau Sumbawa .....	46
Gambar 3.14.:	Kaldera Gunung Tambora .....	47
Gambar 3.15.:	Gunung Krakatau (Anak Krakatau) dengan ekosistemnya (2014), tumbuh dari bawah laut dalam waktu < 100 tahun .....	49
Gambar 3.16.:	Lokasi Kaldera <i>Yellowstone Supervolcano</i> .....	51
Gambar 3.17.:	Panorama dataran <i>Kaldera Yellowstone</i> .....	51
Gambar 3.18.:	Perspektif danau Toba, yang merupakan Kaldera Toba <i>Supervolcano</i> .....	53
Gambar 3.19.:	Sketsa Peta Geologi Struktur Kaldera Toba <i>Supervolcano</i> .....	54
Gambar 3.20.:	Diagram proses terbentuknya Kaldera Danau Toba .....	54
Gambar 4.1. :	Pertumbuhan penduduk dunia sebelum dan sesudah Revolusi Industri .....	55
Gambar 4.2. :	Mesin uap karya <i>James Watt (1769)</i> .....	59
Gambar 4.3. :	Grafik peningkatan temperature bumi sejak tahun 1880 .....	65
Gambar 4.4. :	Diagram intervensi CFC pada <i>Siklus Ozon</i> .....	75
Gambar 4.5. :	Konsentrasi lapisan <i>Ozon</i> di <i>atmosfer</i> .....	75
Gambar 4.6. :	Trend pengurangan gas-gas perusak <i>Ozon</i> sampai dengan tahun 2008 .....	77
Gambar 4.7. :	Perkembangan lubang <i>Ozon</i> diatas benua <i>Antartika</i> .....	78
Gambar 4.8. :	Grafik perkembangan lubang <i>Ozon</i> di Belahan Bumi Selatan sampai dengan tahun 2014 .....	79
Gambar 5.1. :	Replika lesung air penumbuk padi .....	82
Gambar 5.2. :	Siklus Hidrologi Umum .....	83
Gambar 5.3. :	Diagram daerah tangkapan hujan ( <i>catchment area</i> ).....	87
Gambar 5.4. :	<i>Ombrometer</i> - alat pengukur curah hujan s manual .....	88

Gambar 5.5. :	Contoh pencatatan intensitas curah hujan rata-rata bulanan dan 10 harian, periode tahun 2001 - 2010, pada pos pencatatan Kalianget - Jawa Tengah .....	88
Gambar 5.6. :	Contoh peta <i>Isohyet</i> tahunan, daerah tangkapan hujan sungai Kuiseb - Namimbia .....	89
Gambar 5.7. :	Diagram PLTA sistem <i>Run-off</i> .....	93
Gambar 5.8. :	Diagram PLTA sistem Waduk ( <i>Reservoir</i> ).....	94
Gambar 5.9. :	Diagram PLTA sistem <i>Pump Storage</i> .....	95
Gambar 5.10.:	Diagram PLTA Pasang Surut ( <i>Tidal Power Plant</i> )..	96
Gambar 5.11.:	Status dan sebaran PLTA Indonesia berdasarkan data statistik (2014) .....	101
Gambar 6.1. :	Generator listrik tenaga uap panas bumi pertama di <i>Lardelerro</i> .....	107
Gambar 6.2. :	Grafik gradien panas bumi untuk kerak samudera dan kerak benua .....	110
Gambar 6.3. :	Diagram aliran panas, yang mendekati dan menerobos permukaan bumi .....	111
Gambar 6.4. :	Peta wilayah-wilayah potensial panas bumi dunia .....	112
Gambar 6.5. :	Sketsa proses pembentukan gunung api .....	112
Gambar 6.6. :	Peta Gunung Api dunia, menggambarkan hubungan antara batas lempeng kerak bumi dengan sebaran gunung api dan titik-titik panas ( <i>hot spot</i> ) .....	113
Gambar 6.7. :	Contoh diagram model panas bumi ( <i>Dickson &amp; Fanelli, 2004</i> ) .....	115
Gambar 6.8. :	Manifestasi semburan uap air panas (Cisolok - Banten) .....	119
Gambar 6.9. :	Manifestasi endapan <i>travertin</i> (pemandian air panas Tirta Sayaga - Bogor) .....	120
Gambar 6.10.:	Diagram perbandingan prinsip kerja PLTU dengan PLTP .....	126
Gambar 6.11.:	Lay out PLTP .....	128
Gambar 6.12.:	Diagram Pembangkit Uap Kering ( <i>dry steam</i> ) .....	129
Gambar 6.13.:	Diagram pembangkit <i>single flash steam</i> .....	130
Gambar 6.14.:	Diagram pembangkit <i>double flash steam</i> .....	131
Gambar 6.15.:	Diagram pembangkit Siklus Biner ( <i>binary cycle</i> ) .	132

Gambar 6.16.:	Proses <i>hydraulic fracturing</i> .....	135
Gambar 6.16.:	Contoh visualisasi proses <i>hydraulic fracturing</i> .....	136
Gambar 6.17.:	Diagram pemanfaatan tenaga panas bumi dengan teknologi <i>Fracking</i> .....	137
Gambar 6.18.:	Perbandingan emisi gas CO <sub>2</sub> panas bumi dengan berbagai bahan bakar fosil .....	140
Gambar 6.19.:	Produksi tenaga listrik panas bumi tahun 2010, dan zonasi potensi panas bumi dunia .....	141
Gambar 6.20.:	Peta pengembangan potensi panas bumi Indonesia (2016) .....	143
Gambar 7.1. :	Pergerakan angin yang dipengaruhi oleh peredaran matahari .....	147
Gambar 7.2. :	Peta kecepatan angin rata-rata tahunan dunia ...	148
Gambar 7.3. :	Peta potensi tenaga angin dunia .....	148
Gambar 7.4. :	Grafik hubungan antara energi dan kecepatan angin .....	151
Gambar 7.5. :	Skema pemangkitan listrik tenaga angin .....	151
Gambar 7.6. :	Bagan alir proses pembangkitan listrik tenaga angin .....	152
Gambar 7.7. :	Diagram Turbin Angin beserta komponen-komponennya .....	152
Gambar 7.8. :	Ladang angin ( <i>wind farm</i> ) San Gorgonio Pass - Amerika Serikat .....	154
Gambar 7.9. :	PLTB Sidrap di Sulawesi Selatan .....	157
Gambar 8.1. :	Diagram pemanasan air dengan tenaga surya ....	161
Gambar 8.2. :	Diagram proses konversi tenaga surya menjadi arus listrik .....	162
Gambar 8.3. :	Diagram sistem <i>Photovoltaic</i> rumah tangga .....	163
Gambar 8.4. :	Peta Potensi Tenaga Matahari ( <i>Insolasi</i> ).....	164
Gambar 8.5. :	Ladang PLTS Sikupang, Desa Wineru, Kecamatan Likupang Timur, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara .....	166
Gambar 9.1. :	Diagram Siklus Materi Karbohidrat .....	169
Gambar 9.2. :	Metoda-metoda pemanfaatan energi Biomassa ..	174
Gambar 9.3. :	Grafik peningkatan kadar CO <sub>2</sub> di atmosfer & pengurangan luas hutan .....	175
Gambar 9.4. :	Contoh sederhana proses pembuatan arang kayu .....	177

Gambar 9.5. :	Diagram proses pirolisis .....	178
Gambar 9.6. :	Prinsip Proses Gasifikasi .....	179
Gambar 9.7. :	Lay Out Teknologi Konversi Thermokimia Gasifikasi .....	180
Gambar 9.8. :	Proses <i>Indirect Liquefaction</i> dalam Konversi Thermokimia Gasifikasi .....	182
Gambar 9.9. :	Struktur kimia umum <i>Ester Karboksilat</i> .....	183
Gambar 9.10.:	Reaksi kimia pembentukan Ester ( <i>Biodiesel</i> ) .....	184
Gambar 9.11.:	Diagram proses <i>Transesterifikasi</i> pembuatan senyawa Ester ( <i>Biodiesel</i> ).....	184
Gambar 9.12.:	Diagram proses pembuatan <i>Biogas (CH<sub>4</sub>)</i> dengan cara <i>Anaerobic digestion</i> .....	186
Gambar 9.13.:	Contoh instalasi <i>Anaerobic Digester</i> berskala besar .....	188
Gambar 9.14.:	Diagram pembentukan <i>Etanol</i> melalui proses <i>Hidrolisis</i> dan <i>Fermentasi</i> .....	190
Gambar 9.15.:	Reaksi kimia proses-proses <i>Fermentasi Etanol</i> .....	191
Gambar 9.16.:	Pabrik Biodiesel ( <i>Etanol</i> ) di Illinois, Amerika Serikat .....	192
Gambar 10.1.:	Peredaran Biomassa dalam Siklus Biosfer & Siklus Geologi .....	194
Gambar 10.2.:	Diagram proses pembentukan batubara .....	197
Gambar 10.3.:	Jenis-jenis batubara .....	198
Gambar 10.4.:	Sebaran endapan batubara di dunia .....	204
Gambar 10.5.:	Diagram penambangan permukaan ( <i>surface mining</i> ) dan bawah tanah ( <i>underground mining</i> ) ..	208
Gambar 10.6.:	Tambang batubara terbuka <i>The Welzow-Sued open-pit coal mining - Germany</i> .....	209
Gambar 10.7.:	Tambang batubara bawah tanah ( <i>underground coal mine</i> ) – <i>West Virginia, USA</i> .....	210
Gambar 10.8.:	Diagram proses migrasi minyak dan gas bumi menuju perangkap pada batuan penyimpan ( <i>reservoir rock</i> ) .....	219
Gambar 10.9.:	Diagram jenis-jenis perangkap ( <i>trap</i> ) minyak dan gasbumi .....	220
Gambar 10.10.:	Diagram proses ekstraksi serpih minyak ( <i>oil shale</i> ) secara pemrosesan dipermukaan dan <i>in situ retorting</i> .....	225

Gambar 10.11.: Peta penyebaran cekungan <i>oil shale</i> , status assesment tahun 2013 .....	226
Gambar 11.1.: Pembangkit Tenaga Listrik dan generator Nuklir pertama dunia Calder Hall - Inggris .....	230
Gambar 11.2.: Contoh reaksi nuklir berupa <i>fisi</i> atom Uranium, menghasilkan pelepasan energi sebesar 200 MeV .....	231
Gambar 11.3.: Diagram Reaktor Air Didih ( <i>BWR-Boiling Water Reactor</i> ).....	233
Gambar 11.4.: Diagram Reaktor Air Tekan ( <i>PWR-Pressurized Water Reactor</i> ).....	234
Gambar 11.5.: Diagram Reaktor Air Berat ( <i>HWR-Heavy Water Reactor</i> ), CANDU ( <i>Canadian Deuterium Uranium</i> )	235
Gambar 11.6.: Diagram Reaktor Magnox ( <i>MR-Magnox Reactor</i> ).	236
Gambar 11.7.: Diagram Reaktor Temperatur Tinggi ( <i>HTR-High Temperature Reactor</i> ).....	237
Gambar 11.8.: Negara-negara utama dunia produsen Uranium, dan listrik tenaga nuklir .....	240
Gambar 11.9.: Siklus bahan bakar nuklir, dari penambangan sampai dengan proses pembuangan limbahnya	241
Gambar 11.10.: Tambang terbuka ( <i>open pit mine</i> ) Uranium di Northern Territory-Australia .....	245
Gambar 11.11.: Perbandingan proses fisi U-235 dengan pembiakan Th-232 .....	250
Gambar 11.12.: Sebaran endapan Thorium Dunia .....	252
Gambar 11.13.: Sebaran potensi cadangan Uranium dan Thorium di Indonesia .....	253

# 1

## Pendahuluan

Tidak bisa dipungkiri bahwa keseharian hidup manusia tidak akan pernah dapat terlepas dari kebutuhan akan sumberdaya energi. Hampir seluruh aktivitas kegiatan manusia memerlukan sumberdaya energi, baik terbarukan ataupun tidak.

Definisi umum dari sumber energi terbarukan, adalah sumber energi yang dapat dengan cepat dipulihkan kembali secara alami. Energi terbarukan berasal dari proses alam yang berkelanjutan, seperti tenaga surya, tenaga angin, siklus hidrologi, dan panas bumi. Maka semua sumber energi terbarukan juga merupakan sumber energi yang berkelanjutan, oleh karena pasokannya senantiasa tersedia di alam dalam jumlah besar untuk waktu yang relatif sangat panjang, sehingga tidak perlu dikhawatirkan akan habis, kecuali apabila terjadi peristiwa alam luar biasa yang di kategorikan sebagai *forst majeure*.

Namun demikian, ketersediaan sumber energi terbarukan umumnya bergantung pada siklus alam. Beberapa jenis sumber energi terbarukan, walaupun tersedia dalam jumlah yang sangat besar, sangat dipengaruhi oleh siklus musim, seperti halnya tenaga surya antara siang dan malam, tenaga air antara musim penghujan dan kemarau, demikian pula dengan tenaga angin yang dipengaruhi oleh peredaran matahari.

Pada awalnya, kehidupan manusia sepenuhnya bergantung pada sumber energi alamiah yang terbarukan. Namun perkembangan teknologi, terutama pasca Revolusi Industri yang memerlukan lebih banyak energi, memicu terjadinya eksploitasi besar-besaran sumber energi alam lainnya yang tak terbarukan. Sehingga sumber-sumber energi alam yang seyogyanya terbarukan, berangsur-angsur ditinggalkan bahkan di kategorikan sebagai sumber energi *non-*

*konvensional*, sampai kemudian cadangan sumber energi alam yang tak terbarukan mulai menipis.

Konsep energi terbarukan mulai dikenal pada tahun 1970-an, sebagai upaya untuk mengimbangi perkembangan cadangan sumberdaya energi berbahan bakar fosil yang semakin menipis. Dipicu pula oleh penggunaan energi fosil yang terlalu massif, yang mulai berdampak pada kerusakan lingkungan alam sekitarnya bahkan global. Dimana hasil buangan energi fosil telah mulai menciptakan polusi lingkungan, dan bahkan secara akumulatif mulai menimbulkan pemanasan global, menyadarkan masyarakat dunia untuk mulai beralih kembali kepada sumberdaya energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan.

## **1.1. Konsep Kekekalan Energi**

Dalam ilmu fisika - kimia, hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi total suatu sistem yang terisolasi adalah tetap, seperti yang dinyatakan oleh *Émilie du Châtelet*, yang berarti energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, namun hanya dapat diubah atau ditransfer dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Hal yang sama juga dinyatakan oleh *James Prescott Joule*, penemu hukum kekekalan energi dalam pernyataannya bahwa "*Jumlah energi dari sebuah sistem tertutup itu tidak berubah, ia akan tetap sama. Energi tersebut tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, namun ia dapat berubah dari satu bentuk energi ke bentuk energi lain*".

Apabila biosfer sebagai habitat hidup manusia dan berbagai organisme lainnya dianggap sebagai suatu sistem tertutup, maka semua energi yang terkait adalah energi terbarukan, oleh karena tidak akan pernah berkurang atau bertambah, hanya berubah bentuk dalam suatu siklus. Walaupun oleh sebab peristiwa luar biasa, atau adanya intervensi dari luar sistem, siklus tersebut dapat saja berputar semakin cepat atau melambat, atau bahkan terputus, namun alam akan selalu menemukan jalan untuk memulainya kembali, atau menciptakan siklus yang baru.

Ketika siklus energi alamiah berubah, dan berdampak bagi makhluk hidup terutama manusia, maka energi tersebut dikatakan sebagai tak lagi terbarukan (*non-renewable*). Hal tersebut dapat terjadi

oleh suatu peristiwa alam yang luar biasa, atau dapat juga oleh ulah manusia. Dimana dengan kelebihan daya nalar dan pikirannya, manusia dapat mempengaruhi siklus energi, walaupun pada skala yang terbatas.

## 1.2. Biosfer

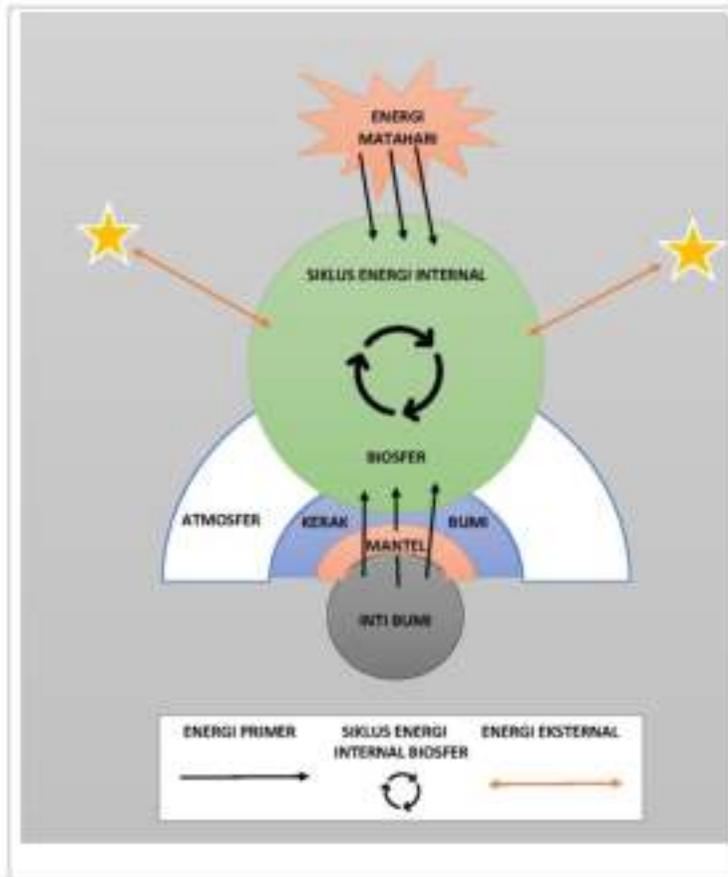
Biosfer adalah bagian dari bumi yang menjadi habitat hidup manusia beserta berbagai organisme lainnya. Yaitu meliputi bagian terluar dari bola bumi yang disebut kerak bumi yang padat (*lithosfer*), badan-badan air di permukaan bumi (*hidrosfer*), beserta lapisan gas atau udara yang menyelimutinya (*atmosfer*). Sedangkan energi yang merupakan penggerak, sehingga siklus kehidupan dapat terus berputar, dipasok dari dalam bumi sendiri sebagai panas bumi (*geothermal*), dan dari luar bumi berupa energi radiasi matahari (*solar energy*).

Apabila biosfer dianggap sebagai suatu sistem tertutup, maka energi matahari dan panas bumi merupakan sumber *energi primer* pemasok utama *energi internal* biosfer, dengan jumlahnya yang nyaris tak terbatas merupakan sumberdaya energi terbarukan (*renewable*). Keduanya saling berinteraksi, menggerakkan berbagai siklus energi turunannya, seperti siklus hidrologi, udara (angin), biomassa dan sebagainya.

Energi radiasi matahari dan panas bumi adalah sumber *energi primer* yang terus menerus memberikan pasokan energi bagi biosfer. Pasokan energi dari keduanya, kemudian terkonversi menjadi berbagai bentuk *energi internal* yang beredar dalam lingkup biosfer, dan menggerakkan proses kehidupan didalamnya.

Siklus-siklus energi turunan dari keduanya dalam sistem tertutup biosfer, yang secara alamiah berada dalam keseimbangan, pada dasarnya merupakan sumber energi yang selalu terbarukan pula (*renewable*). Dimana pada setiap berkurangnya salah satu bentuk energi oleh karena berubah bentuk menjadi bentuk lainnya, secara alamiah akan selalu tergantikan kembali melalui suatu siklus. Namun disamping intervensi dari luar sistem, aktivitas manusia dalam mengeksploitasi sumber energi secara berlebihan dapat pula menyebabkan perubahan pada keseimbangan siklus energi alamiah

tersebut, sehingga beberapa jenis sumber energi yang pada awalnya terbarukan menjadi tak lagi terbarukan.



*Gambar 1.1. : Diagram peredaran energi di Biosfer*

Sebagai salah satu dari triliunan benda angkasa yang tersebar di alam semesta, interaksi bumi dengan berbagai benda langit lainnya adalah keniscayaan. Maka intervensi *energi eksternal* dari luar sistem biosfer sangat mungkin terjadi, yang meskipun hanya sesekali (*intermitten*), namun hal tersebut tentu mempengaruhi keseimbangan siklus energi dalam sistem biosfer. Identifikasi sejarah geologi menunjukkan bahwa hal tersebut pernah terjadi pada masa lalu dalam kurun waktu geologi, yang mengakibatkan pengaruh yang signifikan bagi lingkungan biosfer pada masanya.

### 1.3. Istilah – Istilah Terkait

Isu tentang energi terbarukan (*Renewable Energy*) yang mulai muncul pada tahun 1970an, yang sejatinya tumbuh bersama dengan semakin menipisnya cadangan sumber energi *konvensional* yang umum dipakai. Sejalan pula dengan berkembangnya masalah lingkungan berupa pemanasan global, sebagai dampak dari massifnya penggunaan energi fosil (*konvensional*), sehingga mengungkit kesadaran akan perlunya pemanfaatan sumber energi yang ramah lingkungan (*Environmentally Sustainable Energy*). Meskipun masing-masing mempunyai subyek kepentingan berbeda, namun ketiganya bersinergi, saling terkait satu dengan lainnya. Oleh karena energi fosil yang digunakan secara *konvensional* dan semakin menipis cadangannya, secara kebetulan merupakan sumber energi yang tak terbarukan (*non renewable*), dan juga merupakan energi yang tak ramah lingkungan (*Environmentally Non- Sustainable Energy*).

**Berikut adalah pengertian dari istilah-istilah terkait :**

- ***Energi Fosil***

Energi fosil adalah energi tak terpakai yang tersimpan dalam bumi, dan terawetkan. Energi ini merupakan energi internal, yang oleh proses geologi terkonversikan menjadi sumber energi potensial yang tersimpan dalam bumi. Konversi tersebut terjadi dalam kurun waktu geologi yang berlangsung jutaan tahun, sehingga dapat terakumulasi dalam jumlah yang sangat besar, walaupun bukan berarti tak terbatas.

- ***Energi Terbarukan (Renewable) vs Tak Terbarukan (Non Renewable)***

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa sumber energi di alam tidak akan pernah habis, namun hanya akan berubah bentuk, yang berarti bahwa pada saatnya energi akan dapat kembali kepada bentuknya semula. Dengan kata lain, energi akan selalu terbarukan (*renewable*) walaupun melalui siklus waktu yang panjang, seperti halnya energi batubara yang pembentukannya memerlukan waktu puluhan juta tahun, atau minyak bumi yang memerlukan waktu jutaan tahun. Maka keseimbangan siklus akan terganggu manakala eksploitasi

dilakukan secara berlebihan sehingga cadangan energi potensial yang tersedia menjadi cepat habis, sementara pembentukannya kembali masih memerlukan waktu yang lama. Maka dalam kondisi seperti ini, sumber energi disebut menjadi tak terbarukan (*non-renewable*). Sementara itu, sumber energi yang terus menerus terpancar tanpa batas, seperti sinar matahari, panas bumi, angin ataupun aliran air, di kategorikan sebagai sumber energi yang terbarukan (*renewable*). Demikian pula dengan sumber energi yang ber siklus pendek seperti halnya biomassa, walaupun sumber energi tersebut dapat saja berubah menjadi tak terbarukan (*non-renewable*), manakala eksploitasi dilakukan secara berlebihan tak terkendali, sehingga melampaui kecepatan kemampuan alam untuk memperbaharainya. Intervensi dari luar sistem, yang walaupun terjadi secara insidental, dapat pula mempengaruhi siklus pembaharuan energi, seperti halnya singgungan atau bahkan tumbukan benda-benda angkasa ke dalam sistem bumi.

#### - *Energi Konvensional vs Non Konvensional*

Sumber energi konvensional adalah jenis sumber energi yang dimanfaatkan secara global, sehingga sebagian besar sektor kehidupan manusia bergantung kepadanya. Maka setiap perubahan yang terjadi pada pasokan energi konvensional, akan memberikan pengaruh signifikan pada perubahan dunia. Hal tersebut berbeda dengan sumber energi non konvensional, yang pemanfaatannya spesifik dan tidak terlalu meluas, sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap fluktuasi perekonomian global. Namun demikian, posisi sumber energi *konvensional vs non konvensional* akan dapat berubah dengan waktu dan perkembangan teknologi. Seperti saat ini dimana bahan bakar minyak merupakan sumber energi konvensional, dapat saja kedepan digantikan oleh tenaga listrik dari berbagai sumber, dengan semakin pesatnya perkembangan teknologi otomotif bertenaga listrik. Sementara itu, jauh sebelum ditemukannya cadangan minyak bumi dalam jumlah yang besar, kayu bakar dan batubara telah terlebih dahulu menjadi sumber energi konvensional, yang kemudian tergantikan oleh bahan bakar minyak.

- *Energi Ramah Lingkungan (Environmentally Sustainable)*

Suatu sumber energi dikatakan sebagai ramah lingkungan, manakala limbah yang dihasilkannya tidak mencemari lingkungan, baik dalam jangka pendek maupun secara akumulatif dalam jangka panjang. Pembakaran sumber energi berbasis senyawa hidrokarbon misalnya, menghasilkan limbah berupa gas oksida karbon (CO & CO<sub>2</sub>), yang merupakan senyawa yang mencemari lingkungan, yang secara akumulatif memicu pemanasan global. Namun perkembangan kemajuan teknologi dapat saja mengeliminasi menjadi ramah lingkungan. Maka status ramah/tidak ramah lingkungan suatu sumber energi, dapat saja berubah dengan kemajuan teknologi dalam pengendalian pemanfaatannya.

Secara kebetulan, isu tentang energi terbarukan berkembang bersamaan dengan isu semakin menipis cadangan energi konvensional, bersamaan pula dengan isu peningkatan pencemaran lingkungan yang diakibatkannya. Sehingga, meskipun diantara ketiganya mempunyai substansi yang berbeda, namun saling menunjang diantara satu dengan lainnya.



# 2

## Energi Alam Semesta

Sebagai habitat hidup manusia dan berbagai organisme lainnya, bumi hanya merupakan salah satu benda langit diantara triliunan benda langit lainnya. Bumi berrotasi pada porosnya, dan beredar mengelilingi matahari bersama dengan planet-planet lainnya dalam sistem tata surya matahari. Sistem tata surya matahari sendiri, beserta sistem tata surya lainnya, beredar dalam gugusan galaksi, yang juga hanya merupakan salah satu dari sejumlah gugusan galaksi lainnya yang beredar di alam semesta. Maka, bumi beserta benda-benda lainnya, beredar di alam semesta oleh karena adanya energi penggerakannya, yaitu energi alam semesta.

Alam semesta sebagai suatu sistem, tentu terikat pula oleh hukum kekekalan energi. Bahkan *Albert Einstein* dalam teori relativitasnya, menyatakan bahwa materi dan energi berada dalam keseimbangan yang kekal, dimana materi dalam keadaan tertentu dapat berubah menjadi energi ( $E = mC^2$ ), dan sebaliknya.

Energi alam semesta inilah yang menjadi sumber energi penggerak proses-proses di bumi, termasuk proses-proses konversinya dalam lingkup biosfer. Maka sejatinya, proses kehidupan dalam lingkup biosfer tak akan pernah kehabisan energi untuk terus berlanjut. Walaupun keseimbangannya dapat berubah mengikuti keseimbangan energi, namun proses alam akan selalu dapat beradaptasi, dan menemukan jalan untuk melanjutkan kehidupannya kembali.

### 2.1. Proses Pembentukan Bumi dan Alam Semesta

Bumi sebagai bagian dari tata surya matahari, hanyalah merupakan salah satu noktah kecil dari triliunan benda angkasa yang

melayang di alam semesta, bahkan sistem tata surya mataharipun hanya bagian yang sangat kecil dari sistem alam semesta. Maka, proses pembentukan dan perkembangan bumipun tak terlepas dari proses pembentukan alam semesta, termasuk sistem tata surya matahari di dalamnya.

Bumi beserta planet-planet lain dalam sistem tata surya matahari, diperkirakan terbentuk pada sekitar 4,54 miliar ( $4.54 \times 10^9$ ) tahun yang lalu, melalui akresi dari nebula matahari. Pelepasan gas vulkanik diduga menciptakan atmosfer tua yang nyaris tidak mengandung Oksigen ( $O_2$ ), dan beracun bagi sebagian besar makhluk hidup masa kini. Namun sebagian besar permukaan bumi meleleh oleh karena aktivitas vulkanik yang ekstrem, dan berbagai tumbukan dengan benda-benda angkasa lainnya. Sebuah tumbukan besar diduga menyebabkan kemiringan sumbu bumi dan menghasilkan bulan.

Seiring waktu, maka bumipun mulai mendingin walaupun masih menyisakan energi panas yang besar dalam intinya, dan membentuk kerak padat yang memungkinkan cairan tercipta pada permukaannya. Maka bentuk-bentuk kehidupan pertama mulai muncul pada sekitar 2,8 dan 2,5 miliar tahun yang lalu.

## 2.2. Teori "Big Bang"

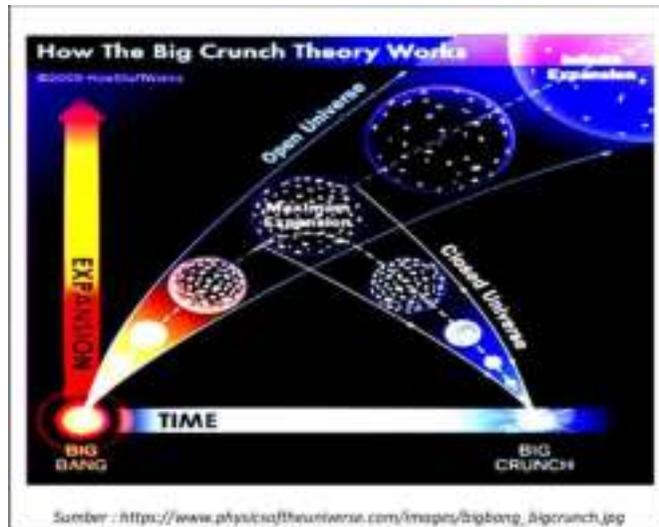
Teori *big bang* sejauh ini adalah teori tentang awal terbentuknya alam semesta yang diakui dan disepakati oleh para ahli. Teori ini dikembangkan berdasarkan pengamatan pada struktur alam semesta beserta pertimbangan teoritisnya. Dimana *Vesto Slipher (1912)* adalah orang pertama yang mengukur *efek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

Pengukuran *Edwin Hubble* (1924) terhadap jarak *nebula spiral* terdekat, menunjukkan bahwa nebula tersebut sesungguhnya merupakan galaksi lain. Selanjutnya, *Georges Lemaître* (1927) secara independen 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.

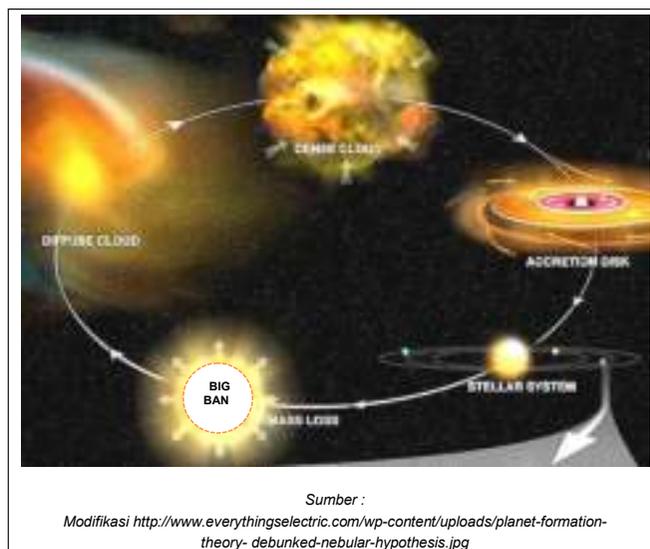
Bukti penting lain dari teori *big bang* adalah adanya sejumlah hidrogen dan helium di ruang angkasa. Dalam berbagai penelitian, diketahui bahwa konsentrasi hidrogen-helium di alam semesta bersesuaian dengan perhitungan teoritis konsentrasi hidrogen-helium sisa peninggalan peristiwa *big bang*. Apabila alam semesta tidak memiliki permulaan, dan apabila 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 menemukannya tanpa sengaja. 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*.

Teori *big bang* memang menyatakan bahwa alam semesta ini dimulai dengan meledaknya suatu masa padat raksasa, sehingga

hancur menjadi partikel-partikel gas yang tersebar. Namun teori *big bang* juga menjelaskan bahwa alam semesta memiliki siklus yang berulang, dimana pada suatu titik alam semesta akan berhenti mengembang dan mulai menyusut. Dimana semua materi akan ditarik dan menyisakan lubang hitam besar yang disebut sebagai *big crunch*, yang merupakan kelanjutan teori dari *big bang*.



Gambar 2.1. : Diagram Big Bang & Big Crunch



Gambar 2.2. : Diagram siklus Big Bang

Alam semesta akan mengembang sebagai konsekuensi dari *big bang*. Namun, pengembangan tidak akan terus-menerus terjadi, dimana pada suatu titik alam semesta ini akan berhenti mengembang dan mulai menyusut. Maka, menurut teori *big crunch*, alam semesta tidak akan mengalami akhir oleh karena membentuk sebuah siklus. Ia akan meledak, mengembang, menyusut, memadat, kembali meledak dan seterusnya. Walaupun demikian teori *big bang* maupun *big crunch* tidak menjelaskan bagaimana dan dari mana materi masa padat tersebut berasal.

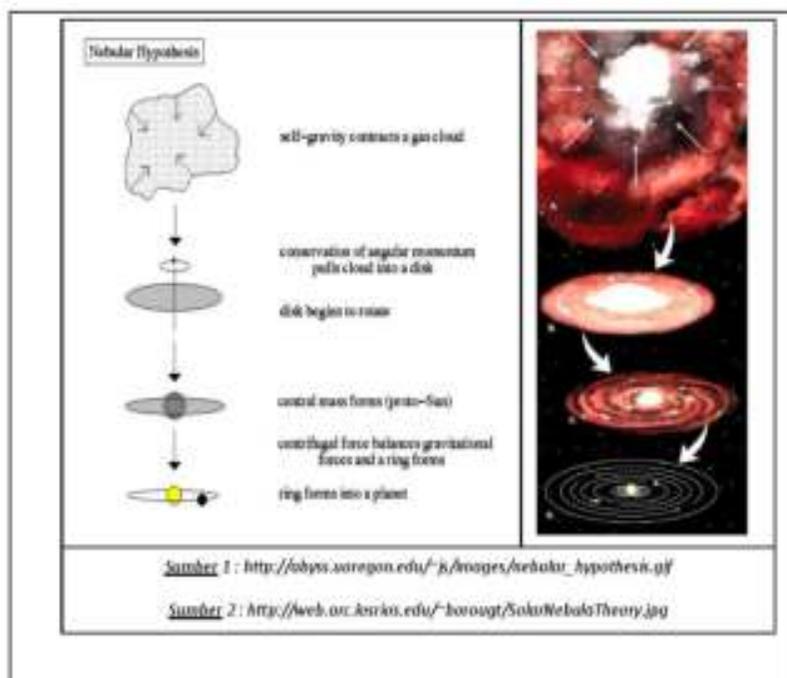
Pada sisi lain, berbagai teori yang bersumber pada *Hipotesis Nebula* menunjukkan bahwa terbentuknya sistem tata surya beserta planet-planet yang beredar mengitarinya, adalah berasal dari gas-gas kosmik yang berputar menggumpal menjadi kabut (*nebula*) dan memadat. Maka kemudian ditafsirkan bahwa bukan sekedar planet-planet, namun sistem tata surya dan galaksi pun ber-angsur angsur akan menggumpal dan memadat, dan akhirnya meledak (*big bang*), dan seterusnya seperti *siklus big bang*.

### **2.3. Pembentukan Sistem Tata Surya**

Proses pembentukan sistem tata surya berawal puluhan milyar tahun yang lalu, dimana terdapat 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. Suatu saat, gumpalan nebula raksasa tersebut meledak dengan dahsyat (*big bang*) membentuk nebula-nebula yang terpecah. 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 termasuk sistem tata surya matahari.

Berbagai hipotesa tentang proses pembentukan gugusan benda-benda langit di alam semesta, termasuk sistem tata surya matahari beserta bumi didalamnya, telah dikemukakan oleh banyak peneliti. Namun pada umumnya sepakat bahwa *hipotesa nebula* (teori kabut) adalah proses yang dianggap benar, walaupun ada beberapa perbedaan dalam proses rincinya.

Teori kabut atau disebut juga *hipotesis nebula* 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* pada tahun 1796. Teori ini, yang lebih dikenal dengan *teori Nebula Kant-Laplace*, menyebutkan bahwa pada tahap awal, tata surya masih berupa kabut atau nebula raksasa. Kabut ini terbentuk dari debu, es, dan gas yang disebut nebula, dan unsur gas yang sebagian besar hidrogen. Dalam teori ini dikemukakan bahwa di alam semesta terdapat gas yang kemudian berkumpul menjadi kabut (*nebula*). Gaya tarik-menarik antar gas ini membentuk kumpulan *nebula* yang sangat besar dan berputar semakin cepat. Dalam proses perputaran ini, materi *nebula* bagian *equator* terlempar memisah dan memadat oleh karena mendingin, kemudian menjadi planet-planet dalam tata surya. Sedangkan materi *nebula* yang tidak terpadatkan menyelimutinya sebagai selimut *atmosfer*. Sementara itu, bagian inti *nebula* yang tidak terlempar keluar, kemudian menjadi matahari yang merupakan pusat sistem tata surya, dimana planet-planet beredar mengitarinya.



**Gambar 2.3. : Diagram hipotesis nebula, pembentukan sistem tata surya matahari**



### 2.4.1. Struktur dan Komposisi Matahari

Matahari atau Surya yang berbentuk mendekati bulat sempurna, terdiri dari plasma panas yang bercampur dengan medan magnet. Mempunyai keliling pada bagian equator sekitar 4.379 juta km, atau sekitar 109 kali keliling khatulistiwa bumi, dengan massa sekitar  $2 \times 10^{30}$  kilogram atau 330.000 kali massa bumi, mewakili kurang lebih 99,86 % dari total massa Tata Surya. Sedangkan volume matahari adalah  $1.412 \times 10^{18}$  km<sup>3</sup> atau sekitar 1.300.000 kali volume bumi. Sementara itu luas permukaannya adalah  $6.0877 \times 10^{12}$  km<sup>2</sup> atau setara dengan 11.990 kali luas permukaan bumi.

Secara kimiawi, sebagian besar atau hampir seluruhnya massa matahari terdiri dari gas Hidrogen (73,46%) dan gas Helium (24,85%). Sedangkan sisanya (1,69%) terdiri dari berbagai unsur, seperti Oksigen, Karbon, Neon, dan sebagainya.

Namun demikian komposisi Hidrogen dan Heliumnya akan terus berubah, sejalan dengan reaksi fusi nuklir yang terus terjadi pada isotop gas Hidrogen, sehingga membentuk gas-gas Helium yang baru.

Struktur matahari meliputi struktur interior yang terdiri dari lapisan *Inti* dan *Fotosfer*, serta selimut atmosfer yang terdiri dari *Kromosfer* dan *Korona*. Namun oleh karena terbentuk dari gas, maka batas antar lapisan-lapisan matahari tersebut menjadi kabur.

Tabel 2.1. : Sifat fisik dan komposisi Matahari

Ciri-ciri fisik Matahari		Komposisi <u>Intosfer</u> (menurut massa)	
Diameter rata-rata	$1.392688 \times 10^7$ km	<u>Hydrogen</u>	73.48%
<u>Radius Matahari</u>	$6.96342 \times 10^6$ km (109 = Bumi)	<u>Helium</u>	24.85%
<u>Radius Matahari</u>	$4.379 \times 10^6$ km (109 = Bumi)	<u>Oxygen</u>	0.77%
<u>Kepadatan</u>	$9 \times 10^8$	<u>Karbon</u>	0.29%
<u>Luas permukaan</u>	$6.0877 \times 10^{17}$ km <sup>2</sup> (1190 = Bumi)	<u>Nasi</u>	0.18%
<u>Volume</u>	$1.412 \times 10^{29}$ km <sup>3</sup> (130000 = Bumi)	<u>Neon</u>	0.12%
<u>Massa</u>	$1.9891 \times 10^{30}$ kg (333000 = Bumi)	<u>Sulfur</u>	0.09%
<u>Kepadatan rata-rata</u>	$1.408 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>	<u>Silikon</u>	0.07%
<u>Kepadatan</u>	Padat (model) $1.522 \times 10^7$ kg/m <sup>3</sup> Panas dalam: $2 \times 10^8$ kg/m <sup>3</sup> Kromatol dalam: $5 \times 10^8$ kg/m <sup>3</sup> Korona (H) $1 \times 10^{-12}$ kg/m <sup>3</sup>	<u>Magnesium</u>	0.06%
<u>Gravitasi permukaan</u>	274.0 m/s <sup>2</sup>	<u>Berang</u>	0.04%
<u>Ketebalan</u>	27.94 g (714) 24 g (8 = Bumi)		

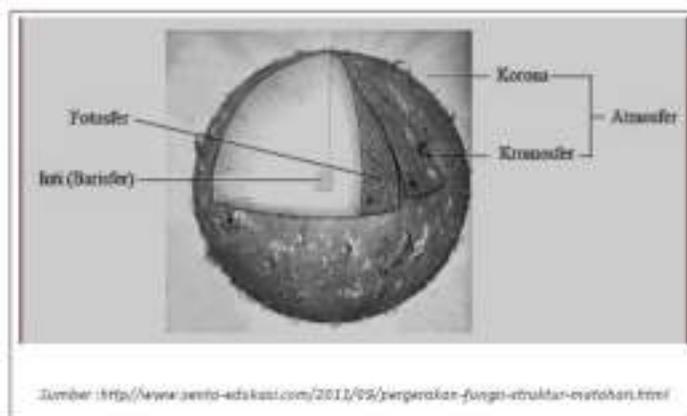
Sumber : <https://id.wikipedia.org/wiki/Matahari>

### Interior Matahari

- **Inti** matahari merupakan bagian terdalam dari matahari, berbentuk bola panas dengan suhu sekitar  $15,7^0 \times 10^6$  Kelvin (K), meliputi radius sekitar 20–25% dari radius matahari. Pada inti inilah dihasilkan energi yang memancar ke segala arah.
- **Fotosfer** merupakan lapisan gas dengan suhu  $5800^0$  K yang menyelimuti inti matahari setebal sekitar 320 Km.

## Atmosfer Matahari

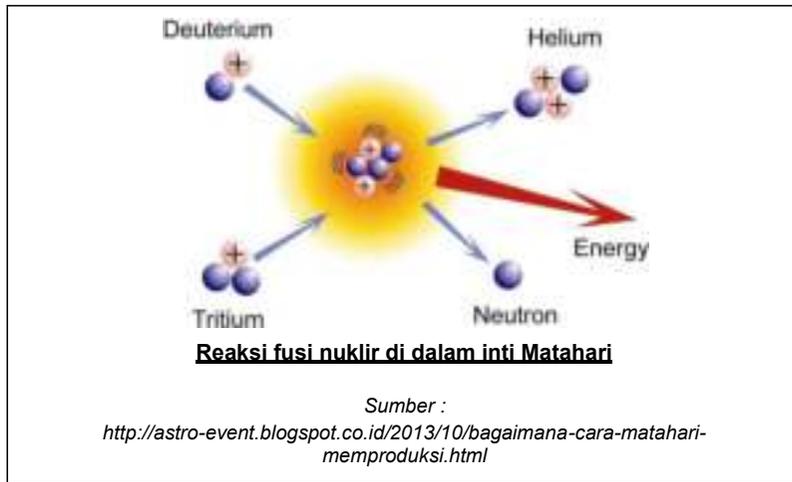
- **Kromosfer** adalah lapisan gas yang mengelilingi matahari. Lapisan ini memiliki ketebalan sekitar 16 000 Km. Lapisan ini tampak jelas ketika terjadi gerhana matahari total. Lapisan ini mempunyai suhu sekitar 20 000<sup>o</sup>K sampai 60 000<sup>o</sup>K.
- **Korona** adalah sinar yang mengelilingi matahari. Lapisan ini memiliki tebal sekitar 2.500.000 Km. Pada saat terjadi gerhana, Korona dapat tampak terlihat jelas. Terkadang terlihat pula bercak-bercak gelap pada permukaan matahari, yang disebut sebagai Bintik Matahari. Bintik Matahari merupakan daerah dengan suhu lebih rendah pada fotosfer, yaitu sekitar 2800<sup>o</sup>K. Bintik hitam hanya terjadi dalam beberapa saat, dapat terjadi satu hari, dua hari atau maksimum 11 bulan.



**Gambar 2.5. : Diagram struktur interior Matahari**

### **2.4.2. Reaksi Fusi Nuklir Matahari**

*Reaksi fusi nuklir* adalah proses penggabungan inti-inti atom sehingga menghasilkan satu inti atom yang baru. Pada matahari fusi nuklir terjadi ketika inti dari isotop-isotop atom Hidrogen, yaitu inti atom *Deuterium (D-2)* bergabung dengan *Tritium (T-3)*, menghasilkan inti atom *Helium (He-4)* dan melepaskan 1 unit *neutron*, serta melepaskan energi sebesar 3.2 MeV sebagai akibat dari berkurangnya jumlah total massanya. Reaksi *fusi* nuklir ini terjadi secara berantai terus menerus, sehingga menjadikan matahari sebagai sumber energi yang selalu terbarukan (*renewable*).



*Gambar 2.6. : Diagram proses reaksi fusi nuklir pada Matahari*

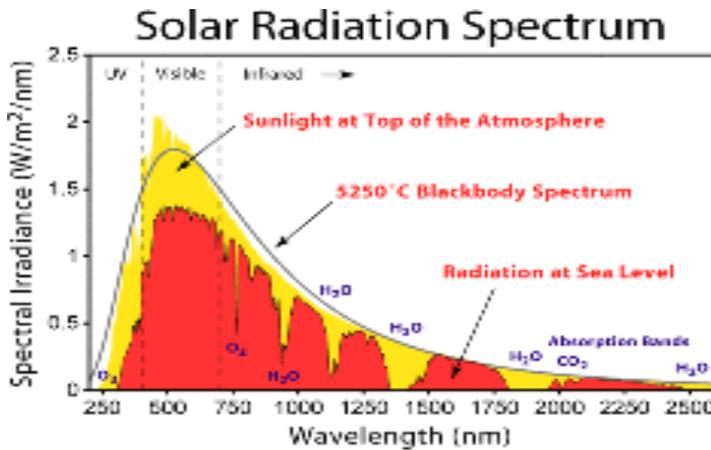
Reaksi *fusi nuklir* berantai ini terjadi sekitar  $9.2 \times 10^{37}$  kali per detik pada inti matahari. Reaksi ini mengubah  $3,7 \times 10^{38}$  proton menjadi partikel *alpha* (*nukleus Helium*) setiap detiknya (dari total  $\sim 8,9 \times 10^{56}$  proton bebas di Matahari, atau sekitar  $6,2 \times 10^{11}$  kg per detik. Dalam proses *fusi* inti Hidrogen menjadi inti Helium ini, sekitar 0,7% dari total massa terfusi dalam bentuk energi. Massa ini tidak dihancurkan untuk menciptakan energi, melainkan diubah menjadi setara energi. Maka dalam hal ini, matahari melepaskan energi dengan tingkat konversi massa-energi sebesar 4,26 juta metrik ton per-detik, yaitu sebesar 384,6 yotta watt ( $3.846 \times 10^{26}$  W), atau setara  $9,192 \times 10^{10}$  megaton TNT per-detik. Energi tersebut disebarkan ke segala arah di ruang angkasa, sebagian kecil diantaranya menuju dan memanaskan permukaan bumi.

Matahari memancarkan radiasi energinya dalam bentuk gelombang elektromagnetik dalam berbagai panjang gelombang, mulai dari ultraviolet, cahaya tampak, sampai infrared dari spektrum elektromagnetik. Radiasi ini timbul sebagai akibat dari permukaan matahari yang mempunyai temperatur sekitar 5800 K ( $\sim 5500$  C) sehingga spektrum yang dipancarkan matahari sama dengan spektrum dari *blackbody* pada temperatur yang sama. Dimana *blackbody* didefinisikan sebagai objek yang menyerap secara sempurna semua radiasi elektromagnetik, dan juga mampu memancarkan radiasi dengan distribusi energi tergantung kepada temperaturnya.

Tabel 2.2. : Spektrum sinar Matahari

Peneraian	Panjang Gelombang		Frekuensi, Hz	Bilangan Gelombang, cm <sup>-1</sup>
	Satuan Usman	Meter		
Sinar-X	10 <sup>0</sup> – 10 <sup>1</sup> Å	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>16</sup> – 10 <sup>18</sup>	
Ultra Ungu Jauh	10 – 200 nm	10 <sup>-10</sup> – 2 x 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>16</sup> – 10 <sup>15</sup>	
Ultra Ungu Dekat	200 – 400 nm	2 x 10 <sup>-7</sup> – 4,0 x 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>15</sup> – 7,5 x 10 <sup>14</sup>	
Sinar Tampak	400 – 750 nm	4,0 x 10 <sup>-7</sup> – 7,5 x 10 <sup>-7</sup>	7,5 x 10 <sup>14</sup> – 4 x 10 <sup>14</sup>	25.000 – 13.000
Inframerah Dekat	0,75 – 2,5 µm	7,5 x 10 <sup>-7</sup> – 2,5 x 10 <sup>-6</sup>	4 x 10 <sup>14</sup> – 1,2 x 10 <sup>14</sup>	13.000 – 4.000
Inframerah Pertengahan	2,5 – 50 µm	2,5 x 10 <sup>-6</sup> – 5,0 x 10 <sup>-5</sup>	1,2 x 10 <sup>14</sup> – 4 x 10 <sup>13</sup>	4.000 – 200
Inframerah Jauh	50 – 1.000 µm	5,0 x 10 <sup>-5</sup> – 1 x 10 <sup>-3</sup>	6 x 10 <sup>13</sup> – 10 <sup>11</sup>	200 – 10
Gelombang Mikro	0,1 – 100 cm	1 x 10 <sup>-2</sup> – 1	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>9</sup>	10 – 10 <sup>-2</sup>
Gelombang Radio	1 – 1.000 m	1 – 10 <sup>3</sup>	10 <sup>8</sup> – 10 <sup>6</sup>	

Sumber:  
<http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle/123456789/27752/Chapter%2011.pdf?sequence=3&isAllowed=y>



Gambar 2.7. : Perbandingan Spektra Energi radiasi sebagai fungsi panjang gelombang dari matahari untuk kondisi tepat diatas atmosfer bumi, blackbody, dan pada permukaan bumi. (Sumber: wikipedia)

Energi radiasi yang diterima dari matahari per-satuan luas per-satuan waktu merupakan fungsi dari panjang gelombang. Pada permukaan matahari energi radiasi yang dipancarkan sebesar 62 MW/m<sup>2</sup>, dan diatas atmosfer bumi radiasinya berkurang menjadi sebesar 1353 W/m<sup>2</sup>. Untuk radiasi *blackbody*, semakin tinggi temperatur objek *blackbody* tersebut maka semakin besar energi radiasinya. *Blackbody* pada temperatur rata-rata bumi yaitu 300<sup>0</sup> K, terkuat memancar pada gelombang infrared yang radiasinya tidak dapat tertangkap oleh mata. Untuk matahari, dengan temperatur sekitar 5800<sup>0</sup> K, radiasi terkuat berada pada gelombang cahaya tampak (*visible*) dengan panjang gelombang sekitar 300 – 800 nanometer (nm).

## 2.5. Proses Pembentukan Bumi

Sejarah bumi berkaitan dengan perkembangan planet bumi sejak awal pembentukannya sampai sekarang, dimana usia bumi diperkirakan sepertiga dari usia alam semesta. Bumi terbentuk sekitar 4,54 miliar ( $4.54 \times 10^9$ ) tahun yang lalu melalui akresi dari *nebula* matahari. Pelepasan gas vulkanik diduga berkontribusi 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.

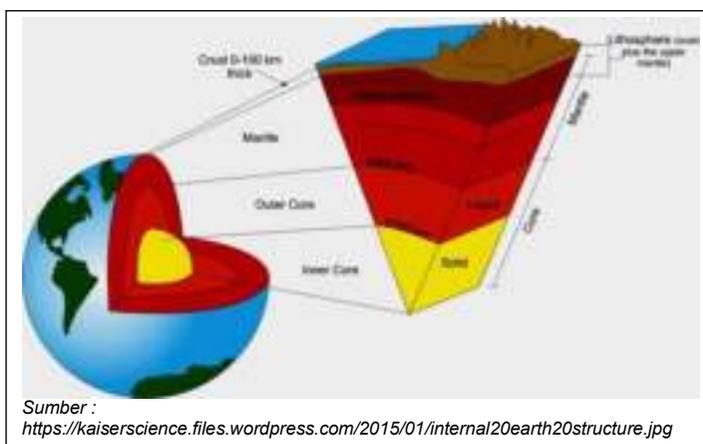
Bumi sebagai planet yang baru, terus bertumbuh sampai suhu interiornya cukup panas untuk melelehkan logam, sehingga dengan masa jenisnya yang lebih tinggi dari silikat berangsur tenggelam kedalam inti bumi. Peristiwa yang disebut sebagai *katastrofe besi* tersebut mengakibatkan pemisahan mantel primitif dengan inti yang metalik. Proses ini terjadi sekitar 10 juta tahun setelah bumi mulai terbentuk, dan menghasilkan struktur bumi yang berlapis- lapis serta 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  $100^\circ \text{C}$  per miliar tahun). Ekstrapolasi dari pengamatan ini memperkirakan bahwa inti terbentuk pada masa 2-4 miliar tahun yang lalu.

Semakin mendinginnya bumi memungkinkan cairan berupa air terbentuk pada permukaannya, yang lama kelamaan terakumulasi 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 ber-evolusi, 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.

### 2.5.1. Struktur Interior Bumi

Permukaan bumi, seluruhnya tertutup oleh batuan kerak bumi atau *lithosfer*, yang ketebalannya mencapai puluhan kilometer. Kecuali tentunya pada bagian-bagian dimana kerak bumi terpecah oleh pembebaran arus konveksi. Demikianpun rekahan-rekahan tersebut segera tertutup kembali oleh cairan mantel yang keluar, yang kemudian membeku membentuk kerak bumi baru. Sehingga tidak diketahui dengan pasti komposisi bagian dalam perut bumi, oleh karena belum pernah ada kegiatan artificial manusia yang pernah menembus kerak bumi sampai kedalam lapisan mantel. Susunan interior bumi di-identifikasi berdasarkan sifat-sifat fisika bumi, seperti gaya tarik atau gravitasi, kemagnetan, atau sifat-sifat rambatan gelombang seismik. Hipotesa susunan interior bumi, kemudian juga dilengkapi dari penafsiran atas material-material meteor, yang boleh dianggap berasal dari planet lain yang diduga serupa dengan planet bumi.



Gambar 2.8. : Diagram Struktur Interior Bumi

Berdasarkan hipotesa, antara lain dari hasil pengamatan rambatan gelombang seismik, maka disimpulkan struktur interior bumi (jari-jari sekitar 6371 Km) sebagai berikut :

- **Inti Bumi** : Merupakan bagian terdalam dari bola bumi dengan jari-jari sekitar 3300 Km, dan menjadi pusat dari massa bumi yang sangat padat, dan merupakan dapur dari energi panas bumi. Pada lapisan inilah terdapat aktivitas magnetik dan gravitasi bumi.

**Inti bumi terdiri dari :**

- ***Inner core*** : berbentuk bola padat dengan densitas  $10 - 13 \text{ g/cm}^3$ , dengan jari-jari sekitar 1100 Km, terdiri dari campuran besi - nikel, dan suhu mencapai  $9000^{\circ}$  sampai  $13000^{\circ}$  F.
  - ***Outer core*** : dengan ketebalan sekitar 2200 Km, merupakan sabuk bola yang menyelimuti *inner core*, terdiri dari logam besi dan nikel yang cair dan sangat panas. Meski cair, tingkat kepadatan lapisan ini sangat tinggi, dengan suhu antara  $8000^{\circ}$  sampai  $11000^{\circ}$  F.
- **Astenosfer** atau **mantel** : Massa cair-padat yang menyelimuti inti bumi setebal sekitar 2900 Km, dengan densitas sekitar  $3.4 \text{ g/cm}^3$ . Lapisan mantel bumi ini merupakan lapisan yang paling tebal dari bumi, menyelimuti *inti bumi*, terdiri dari besi, aluminium, kalsium, magnesium, silikon dan juga oksigen. Suhu pada mantel bumi ini mencapai  $1600^{\circ}$  sampai  $4000^{\circ}$  F. Bagian atasnya merupakan batuan bersifat lunak sampai dengan cair kental oleh karena sudah mendekati titik cairnya, sehingga dapat mengalir mengikuti arus konveksi. Namun pada bagian yang lebih dalam (kedalaman lebih dari 660 Km), oleh karena tekanan dan temperatur yang sangat tinggi, bersifat kaku dan tak dapat mengalir mengikuti arus konveksi.
  - **Lithosfer** atau **kerak bumi** : Massa padat dengan ketebalan 5 - 200 Km, terdiri dari : Kerak Benua, densitas sekitar  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , batuan silikat asam (granitis) dengan komposisi utama Silicium & Aluminium (SiAl), ketebalan 15 - 70 Km, dan dapat mencapai 100 Km didaerah sabuk pegunungan seperti Himalaya.

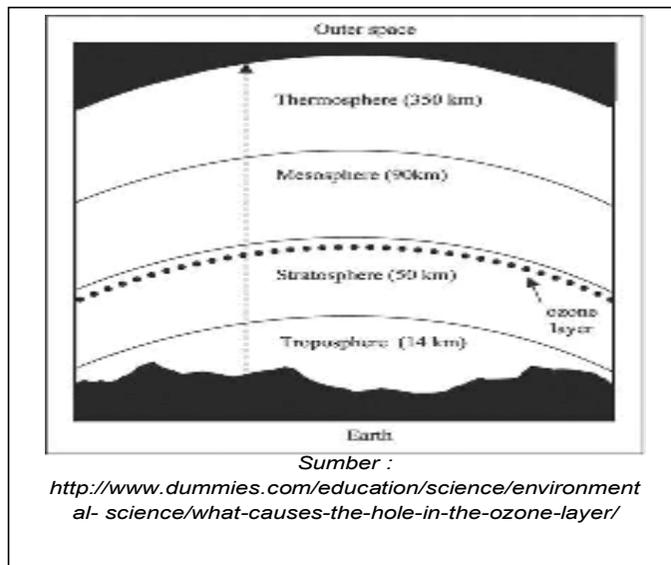
Kerak Samudera, densitas sekitar  $3.0 \text{ g/cm}^3$ , batuan silikat basa (basaltis) dengan komposisi utama Silicium & Magnesium (SiMa), ketebalan 5 - 10 Km.

Secara keseluruhan, Ukuran fisik bola bumi adalah :

- Volume bumi :  $1,0832073 \times 10^{12} \text{ Km}^3$
- Massa bumi :  $5,9736 \times 10^{24} \text{ Kg}$
- Massa jenis rata-rata :  $5,5153 \text{ g/cm}^3$
- Percepatan gravitasi permukaan di khatulistiwa :  $9,780327 \text{ m/sec}^2$
- Keliling khatulistiwa : 40 075,02 Km
- Luas permukaan bumi :  $510\,072\,000 \text{ Km}^2$  terdiri dari 29,2 % daratan ( $148\,940\,000 \text{ Km}^2$ ), 70,8 % lautan ( $361\,132\,000 \text{ Km}^2$ ).

### **2.5.2. Struktur Eksterior Bumi**

Atmosfer adalah bagian dari debu dan gas-gas dari gumpalan kabut yang terpisah dari gumpalan kabut matahari sebagai gumpalan induknya, namun tidak ikut terpadatkan bersama dengan bola bumi, sehingga masih melayang menyelimuti bola bumi, dan disebut sebagai bagian dari eksterior bumi. Komposisi atmosfer secara umum terdiri dari gas-gas Nitrogen ( $\text{N}_2$ ) 78.08 %, Oksigen ( $\text{O}_2$ ) 20.95 %, Argon 0.93 %, Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) 0.04 %, Uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sekitar 1 % dan bervariasi sesuai iklim, serta gas-gas lainnya dalam jumlah kecil. Namun komposisi tersebut tidak tersebar merata pada seluruh lapisan atmosfer.



*Gambar 2.9. : Struktur atmosfer bumi*

Atmosfer terdiri dari lapisan-lapisan sebagai berikut :

- ***Troposfer*** adalah lapisan atmosfer terbawah, dari permukaan bumi sampai dengan ketinggian sekitar 14 Km. Pada lapisan inilah gas-gasnya mempunyai komposisi yang ideal untuk menunjang kehidupan. Pada lapisan inilah terjadi hampir semua jenis cuaca, perubahan suhu, angin, kelembaban udara serta gumpalan awan dan iklim yang mempengaruhi permukaan bumi. Semakin keatas suhu akan berkurang secara berangsur-angsur dari sekitar 17<sup>0</sup>C sampai sekitar -52<sup>0</sup>C, meskipun pada permukaan bumi tertentu, seperti daerah pegunungan dan dataran tinggi dapat saja terjadi anomali terhadap gradien tersebut.
- ***Stratosfer*** adalah lapisan atmosfer diatas troposfer, namun perubahannya tidaklah mempunyai batas yang mendadak. Stratosfer dimulai pada ketinggian sekitar 11 Km sampai dengan 50 Km, dengan suhu relatif sangat dingin sekitar -57<sup>0</sup>C, tiupan angin umumnya mempunyai pola tertentu, gumpalan awan kadang-kadang masih dijumpai pada bagian terbawah, namun tidak ada pola cuaca yang signifikan pada lapisan ini, sehingga sering menjadi pilihan jalur terbang bagi pesawat terbang. Dari bagian tengah keatas lapisan stratosfer, pola suhu berubah

meningkat semakin naik, oleh karena konsentrasi dari ozon ( $O_3$ ). Lapisan ozon inilah yang menyerap radiasi sinar ultraviolet dari matahari, sehingga tidak langsung mencapai permukaan bumi. Namun molekul ozon ini bersifat tidak stabil, sangat mudah berubah menjadi molekul oksigen ( $O_2$ ). Maka apabila kandungan oksigen pada lapisan troposfer berkurang secara signifikan, misalnya berubah menjadi karbon dioksida ( $CO_2$ ) oleh sebab proses pembakaran yang berlebihan, maka molekul-molekul ozon akan terserap berubah menjadi molekul oksigen. Apabila hal ini terjadi, seperti yang diduga telah terjadi, maka akan membuat lubang-lubang ozon yang memungkinkan radiasi sinar ultraviolet menembus sampai ke permukaan bumi. Hal tersebut akan dapat meningkatkan suhu dipermukaan bumi, atau menyebabkan pemanasan global. Hal ini tentu akan mempengaruhi sistem iklim di bumi.

- Mesosfer adalah lapisan diatas stratosfer sampai dengan ketinggian sekitar 90 Km. Suhu semakin menurun mencapai sekitar  $-140^{\circ}C$ , sehingga memungkinkan terbentuknya awan *noctilucent*, yaitu gumpalan awan yang terbentuk dari kristal-kristal. Hal inilah yang menyebabkan meteor-meteor yang memasuki atmosfer terbakar hancur, sehingga tidak mencapai permukaan bumi. Meskipun sisa-sisa meteor yang tidak terbakar dapat saja mencapai permukaan bumi apabila ukuran meteor tersebut cukup besar sehingga tidak terbakar habis.
- Thermosfer - Ionosfer terdapat pada ketinggian 90 Km sampai dengan sekitar 350 Km. Dinamakan thermosfer oleh karena terjadi kenaikan suhu sehingga mencapai sekitar  $980^{\circ}C$  sebagai akibat dari akumulasi serapan radiasi sinar ultraviolet. Radiasi menyebabkan reaksi kimia membentuk lapisan bermuatan listrik, dimana pada lapisan ini gas-gas ter ionisasi. Maka lapisan ini disebut juga sebagai lapisan Ionosfer. Lapisan ini mampu memantulkan gelombang radio, sehingga bermanfaat untuk memancarkan gelombang radio jarak jauh.
- Eksosfer adalah lapisan terluar atmosfer pada ketinggian dari 350 Km sampai dengan antariksa yang tak terbatas, dimana partikel debu meteorit berterbangan secara bebas.

# 3

## Peredaran Energi Dalam Sistem Biosfer

Biosfer adalah bagian kerak bumi yang sejauh ini dikenal sebagai satu satunya habitat alam yang memungkinkan bertumbuh kembangnya kehidupan. Hal tersebut ditunjang oleh tersedianya pasokan energi terus menerus yang selalu terbarukan (*renewable*), sehingga siklus kehidupan berbagai organisme dapat terus berjalan.

Pasokan energi terus menerus diperoleh dari sumber *energi primer*, yang terbentuk sejak awal terbentuknya alam semesta. Yaitu berupa radiasi sinar matahari (*solar energy*), sisa panas dari inti bumi (*geothermal*), serta pergerakan rotasi bumi dan peredaran bumi mengitari matahari. Ketiga *energi primer* tersebut saling ber interaksi dan ber sinergi, sehingga terkonversi menjadi berbagai bentuk energi internal biosfer, yang memungkinkan berputarnya siklus kehidupan di bumi.

Sesekali intervensi energi eksternal dari luar sistem tata surya matahari mengganggu keseimbangan siklus energi internal biosfer. Namun proses alam akan selalu menemukan jalan untuk menyeimbangkannya kembali, atau membangun siklus internal baru untuk menyeimbangkannya. Demikian pula halnya dengan intervensi artifisial manusia yang mengakibatkan gangguan pada keseimbangan sistem energi internal biosfer tersebut.

### 3.1. Sumber Energi Primer

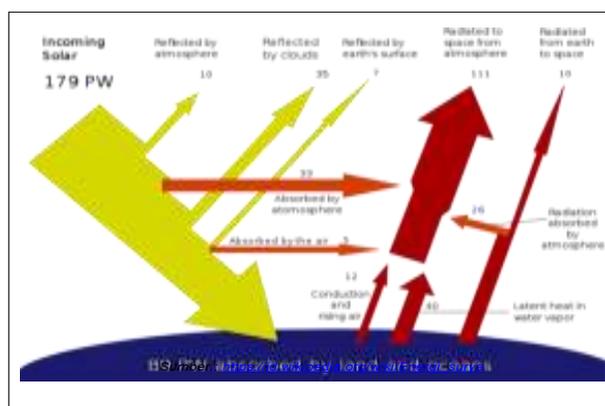
#### 3.1.1. Energi Matahari

Matahari menyebarkan sejumlah besar energi radiasi (*insolasi*) kesegala arah, yang sebagian darinya mengarah ke bumi. Maka bumi

menerima sebesar 179 Pentawatt (PW) radiasi surya (*insolasi*) pada bagian atas 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, sedangkan sebagian kecil lainnya berada pada rentang ultraviolet dekat.

Tidak semua radiasi matahari yang sampai dipermukaan atmosfer mencapai permukaan bumi, oleh karena mengalami proses penghamburan oleh awan atau juga partikel-partikel lain dalam atmosfer bumi. Radiasi dengan panjang gelombang kurang dari 300 nm dan cahaya tampak, akan tersaring oleh atom-atom dan molekul-molekul Oksigen (O<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>), dan Nitrogen (N<sub>2</sub>). Sedangkan air (H<sub>2</sub>O) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) umumnya menyerap cahaya pada kisaran gelombang infra-merah, yang merupakan sebab penurunan secara drastis pada spektra radiasi pada panjang gelombang lebih dari 900 nm.

Total energi matahari yang diserap oleh atmosfer, lautan, dan daratan bumi sekitar 3.850.000 Eksajoule (EJ) per-tahun, dimana *fotosintesis* menyerap sekitar 3.000 EJ diantaranya dalam bentuk *biomassa*.



Gambar 3.1. : Diagram radiasi surya (*insolasi*) pada permukaan bumi

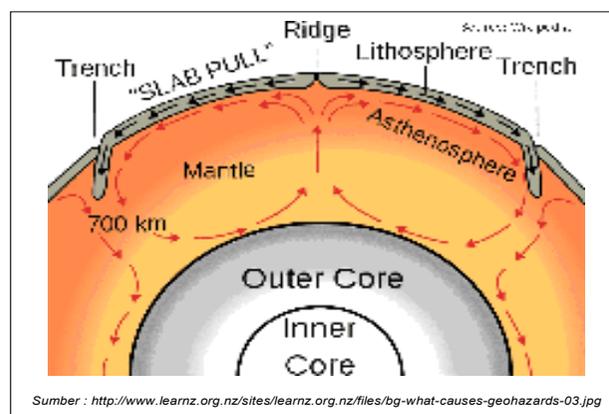
Radiasi energi matahari bagaimanapun adalah komponen utama penggerak kehidupan di bumi. Sehingga sulit untuk dapat menggambarkan perkembangan kehidupan berbagai organisme di

muka bumi tanpa peran radiasi matahari. Berbagai siklus alam, seperti proses meteorologi dan iklim, siklus air, dan juga siklus dalam tumbuhan yaitu *fotosintesis*. Namun semua yang melibatkan peran energi matahari tersebut, tersaring oleh lapisan atmosfer sebelum mencapai permukaan bumi, terpengaruh pula oleh dinamika posisi matahari terhadap permukaan bumi, yang disebabkan oleh rotasi bumi dan peredarannya mengitari matahari.

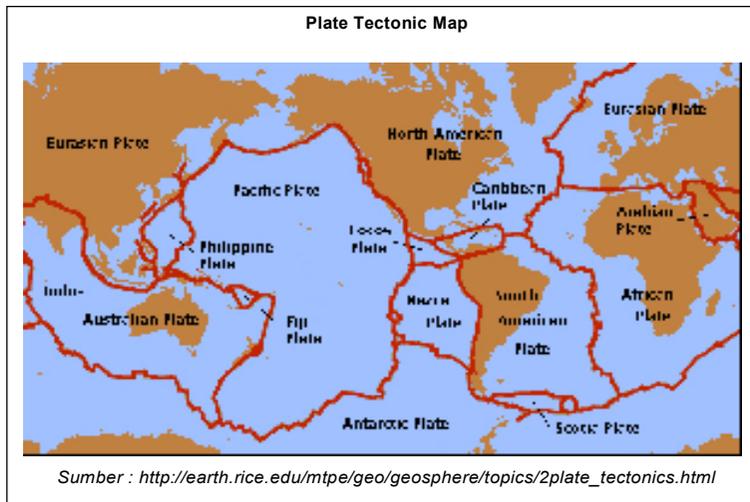
### 3.1.2. Energi Inti Bumi

Inti bumi padat yang terbentuk dari campuran logam besi - nikel, dengan suhu mencapai  $9000^{\circ}$  -  $13000^{\circ}$ F pada bagian dalam, dan  $8000^{\circ}$  -  $11000^{\circ}$  F pada bagian luarnya, adalah sumber energi panas dari dalam perut bumi. Energi panas ini memanaskan massa cair-padat mantel yang menyelimuti inti bumi setebal sekitar 2900 Km, memanaskannya hingga mencapai suhu  $1600^{\circ}$ – $4000^{\circ}$ F. Panas pada permukaan mantel berinteraksi dengan atmosfer yang lebih dingin sehingga mendingin, membentuk kerak padat (*lithosfer*) pada permukaannya.

Pemanasan oleh inti bumi, menyebabkan pula terjadinya arus konveksi pada massa cair mantel. Pergerakan arus konveksi yang memberai pada permukaan mantel, menggeser selimut kerak bumi padat, sehingga terpecah pecah, saling memberai, saling bertumbukkan dan saling bergesekkan. Maka terjadilah perubahan-perubahan pada permukaan bumi, berupa pengangkatan, pelipatan, penunjaman dan sebagainya, mengikuti *siklus tektonik*.



Gambar 3.2. : Diagram siklus arus konveksi dalam mantel dan pergerakan lithosfer



*Gambar 3.3. : Pecahan kerak bumi menjadi lempeng-lempeng tektonik (tectonic plates).*

### **3.2. Peredaran Energi Internal Biosfer**

Bumi yang terbentuk sekitar 5 milyar tahun yang lalu, pada awalnya diselubungi oleh atmosfer, yang hampir tak mengandung oksigen bebas ( $O_2$ ), namun dipenuhi oleh gas oksida karbon ( $CO_2$ ), sehingga tidak memungkinkan berkembangnya kehidupan.

Dengan terbentuknya air dipermukaan bumi pada sekitar 4,5 milyar tahun yang lalu, melalui pendinginan dan diferensiasi magma yang menghasilkan air Juvenil, maka mulai muncul kehidupan sederhana. Yaitu molekul-molekul organik senyawa Karbohidrat, berupa tumbuhan ber klorofil, sebagai hasil reaksi fotosintesa antara air ( $H_2O$ ) dan oksida karbon ( $CO_2$ ) di atmosfer, dengan bantuan radiasi sinar matahari. Reaksi fotosintesa ini juga menghasilkan oksigen ( $O_2$ ) yang terbebaskan ke atmosfer. Maka gas oksigen mulai terbentuk diudara, dan ber angsur angsur semakin bertambah dengan semakin berkembangnya tumbuhan dibumi. Sebaliknya, kandungan oksida karbon ( $CO_2$ ) diudara semakin berkurang.

Proses berikutnya memungkinkan terbentuknya Ozon ( $O_3$ ) pada lapisan atas atmosfer (stratosfer), sehingga melindungi permukaan bumi dari radiasi sinar ultraviolet matahari, yang mematikan

kehidupan. Maka kehidupanpun makin berkembang, dengan munculnya organisme yang memerlukan O<sub>2</sub> untuk hidup, yaitu golongan hewan. Demikian seterusnya, kehidupan di bumi yang meliputi tetumbuhan dan hewan semakin berkembang dan bervariasi.

### **3.2.1. Siklus Energi Biosfer**

Siklus kehidupan dalam sistem biosfer dapat berjalan dan bertumbuh kembang, oleh karena mendapat pasokan energi penggerak secara terus menerus, yaitu energi radiasi sinar matahari, dan panas yang berasal dari inti bumi.

Siklus energi Biosfer dalam hal ini akan terus berjalan, dan akan selalu terbarukan, mengikuti siklus Karbohidrat sebagai materi utama kehidupan. Pasokan energi fotosintesa matahari yang tak terbatas menjamin energi potensial ikatan Hidrokarbon dalam Karbohidrat tetap tersedia, dan akan selalu terbarukan kembali (*renewable*) manakala berubah menjadi bentuk energi lainnya. Kelebihan energi, dalam hal ini akan tersimpan dan terawetkan menjadi cadangan energi fosil, yang pada saatnya akan kembali memasuki siklus biosfer, setelah melalui proses dan kurun waktu geologi jutaan tahun.

Eksplorasi sumber energi Biomassa biasanya dilakukan atas materi berupa produk-produk vegetasi, hewan, termasuk limbah-limbah organiknya. Eksploitasi tersebut tidak mengganggu siklus, sejauh tidak dilakukan secara berlebihan. Bagaimanapun proses penguraian limbah oleh mikroba pengurai memerlukan waktu, yang sejauh ini belum dapat diintervensi secara artifisial. Sehingga apabila dilakukan secara berlebihan dan terlalu cepat, akan mengganggu keseimbangan proses reproduksi materi Karbohidrat, yang dampak lebih lanjutnya akan mengakibatkan menjadi tidak lagi terbarukan (*non renewable*).

Dalam hal eksploitasi sumber energi Hidrokarbon yang merupakan fosil dari materi Biomassa, eksploitasi berlebihan akan mengakibatkan cadangan sumber energi tersebut semakin menipis dan habis, oleh karena proses reproduksinya memerlukan waktu jutaan tahun dalam skala waktu geologi, yang sejauh ini belum dapat diintervensi secara artifisial untuk dipercepat. Maka, sumber energi Hidrokarbon fosil (Batubara & Minyak Bumi) di kategorikan sebagai sumber energi yang tak terbarukan (*non renewable*).

### 3.2.2. Energi Pergerakan Udara (Angin)

Proses pembentukan alam semesta masih menyisakan energi, yang menggerakkan peredaran bumi mengitari matahari, dan berrotasi pada porosnya. Bumi beredar mengitari matahari sebagai pusat tata surya matahari dengan periode 365 hari, dan berrotasi dengan periode 24 jam. Proses-proses tersebut mempengaruhi variasi intensitas radiasi sinar matahari ke permukaan bumi, sehingga menyebabkan pergerakan pada lapisan atmosfer yang menyelimutinya.

Pergerakan materi udara yang disebut angin tersebut tentu memiliki energi kinetik, sehingga dapat disimpulkan bahwa energi radiasi matahari ber sinergi dengan energi pergerakan bola bumi, dan terkonversi menjadi energi angin. Maka, selama bumi masih berrotasi dan beredar mengitari matahari, dan matahari masih memancarkan radiasinya, energi angin akan menjadi sumber energi yang selalu terbarukan (*renewable*), meskipun dengan intensitas dan arah yang berubah ubah.



Sumber : <http://quiinyta90.blogspot.com/2011/03/pengaruh-erosi-angin-terhadap.html>

**Gambar 3.4. : Contoh energi angin dalam pembentukan bentang alam Mushroom Rock**

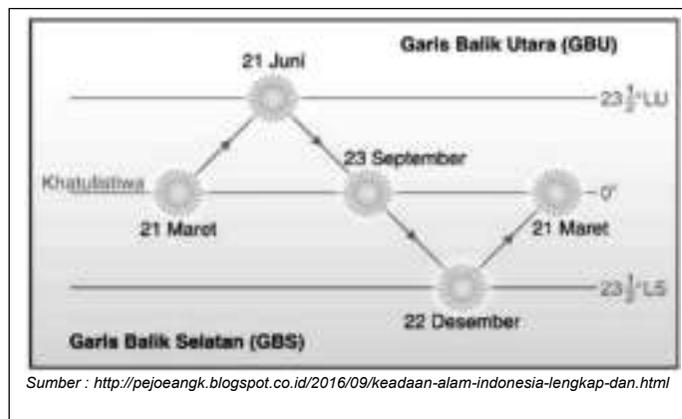
Perubahan posisi matahari terhadap permukaan bumi, adalah penyebab terjadinya aliran udara atau angin, yang berubah ubah pula, mengikuti perubahan posisi matahari terhadap permukaan bumi, yaitu mengikuti rotasi bumi dan perubahan musim. Pemanasan matahari menyebabkan udara merenggang dan bertekanan rendah, sehingga memicu mengalirnya angin dari wilayah udara yang bertekanan lebih tinggi.

- **Angin Darat vs Angin Laut**

Pemanasan matahari pada siang hari memanaskan udara diatas daratan maupun lautan, dimana daratan bersifat cepat panas dan cepat mendingin, sedangkan lautan bersifat lambat panas dan lambat mendingin. Maka pada malam hari, daratan lebih cepat mendingin sementara lautan masih tetap panas, sehingga angin bertiup dari daratan kearah lautan disebut sebagai *angin darat*. Sebaliknya ketika memasuki siang hari, daratan lebih cepat memanaskan sementara lautan masih tetap dingin, maka angin bertiup dari arah lautan menuju daratan disebut sebagai *angin laut*. Fenomena ini dimanfaatkan oleh nelayan di pesisir pantai secara tradisional, yang pergi melaut pada awal malam dengan memanfaatkan energi *angin darat*, dan kembali ke darat pada pagi hari dengan memanfaatkan energi *angin laut*.

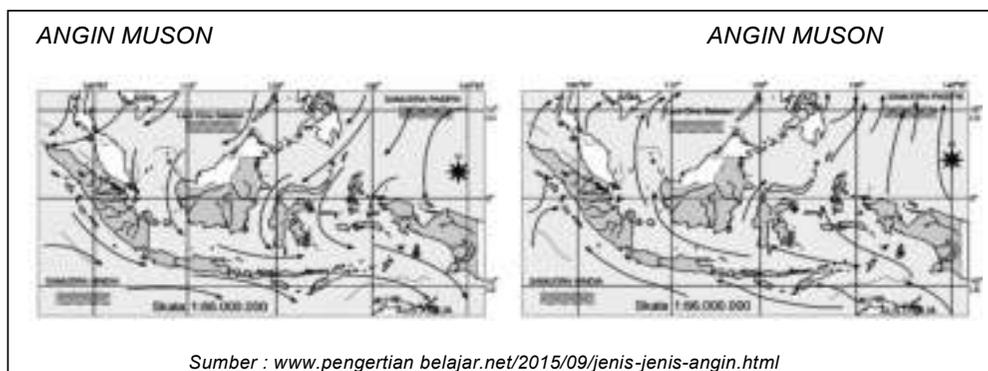
- **Angin Muson**

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 3.5. : Diagram siklus peredaran posisi matahari terhadap permukaan bumi**

Pergeseran posisi matahari terhadap permukaan bumi, juga mempengaruhi pergerakan udara atau angin secara periodik musiman, yaitu yang disebut dengan angin *muson*, dimana kata *muson* berasal dari bahasa Arab (*mosem*) yang berarti musim. 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 berhembusnya angin *muson*. 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.



**Gambar 3.6. : Pergerakan Angin Muson di kepulauan Indonesia**

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*. Angin *muson barat* terjadi antara bulan Oktober - Februari oleh karena 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 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 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, sehingga pada masa tersebut musim hujan terjadi pada sebagian besar wilayah Indonesia.

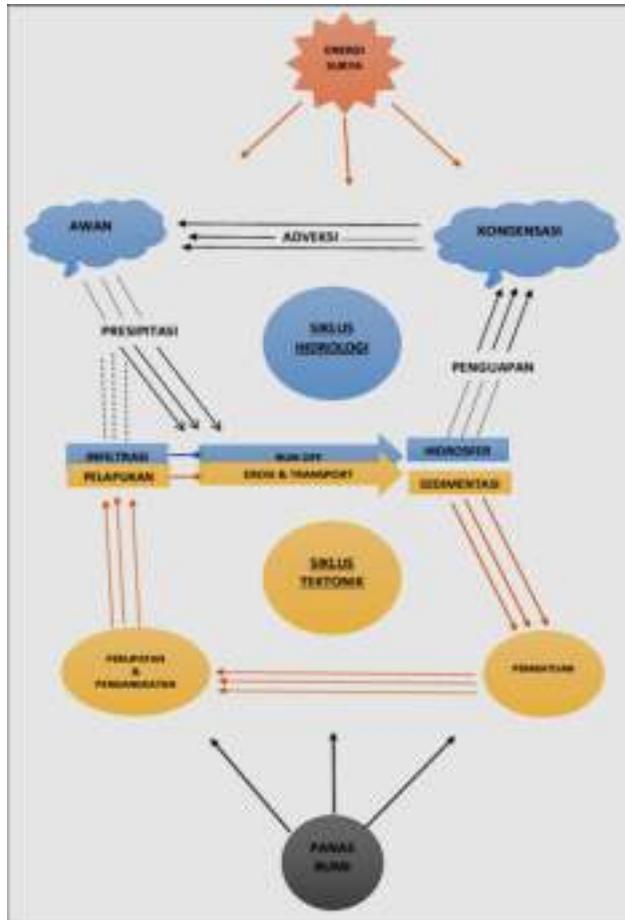
*Angin muson timur* disebut juga *angin muson tenggara*, bertiup antara bulan April sampai dengan Agustus oleh karena posisi matahari pada 21 Maret sampai dengan 23 September berada pada belahan bumi utara sampai dengan lintang  $23\frac{1}{2}^{\circ}$  LU (pada 21 Juni). Maka intensitas penyinaran matahari di benua Asia menjadi lebih tinggi daripada benua Australia, sehingga tekanan udara di benua Asia lebih rendah daripada 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.

### **3.2.3. Energi Pergerakan Air**

Air sebagai fluida cair yang memiliki viskositas, mempunyai kemampuan untuk mengalir mengikuti gaya gravitasi bumi. Air juga dapat berubah bentuk menjadi uap air, oleh pemanasan energi matahari. Maka air dalam reservoir yang besar (hidrosfer) seperti lautan, akan dapat berubah menjadi uap air oleh energi radiasi matahari, ter kondensasi menjadi titik-titik air di udara, terbawa oleh angin dan kemudian turun ke permukaan bumi sebagai hujan (*presipitasi*). Di permukaan bumi air akan mengalir menuju tempat yang lebih rendah sebagai aliran permukaan (*run off*) sampai kemudian berkumpul kembali dalam reservoir, demikian seterusnya membentuk Siklus Hidrologi.

Pada sisi lain, energi panas dari dalam bumi menggerakkan arus konveksi dalam mantel, menggerakkan pula lapisan kerak bumi di atasnya, melipat, mengangkat dan menunjammkannya dalam suatu siklus tektonik. Maka terbentuklah roman muka bumi yang bergunung gunung, lembah-lembah, bahkan jurang-jurang, dan palung-palung laut yang terjal dan dalam. Perbedaan elevasi muka

bumi inilah yang memungkinkan air permukaan mengalir mengikuti gaya gravitasi bumi. Aliran air permukaan (*run off*) tersebut tentunya memiliki kandungan energi kinetik.



Gambar 3.7. : Diagram sinergi antara energi Surya dan energi Panas Bumi

Maka dapat dikatakan, bahwa energi panas bumi yang terkonversi menjadi siklus tektonik, bersinergi dengan energi matahari yang terkonversi menjadi siklus hidrologi, menjadi energi kinetik dalam bentuk aliran air permukaan (*run off*). Energi pergerakan air ini akan selalu ada dan terbaharui (*renewable*) selama pasokan energi primer matahari dan panas bumi masih berlanjut, walaupun intensitasnya dapat berfluktuasi mengikuti perubahan musim.

### **3.3. Intervensi Energi Eksternal**

Sebagai satu dari sejumlah besar benda langit di alam semesta, maka interaksi dengan berbagai benda lainnya adalah keniscayaan, walaupun terjadi secara insidental. Maka intervensi energi terhadap biosfer dapat terjadi, dan disebut sebagai *intervensi energi eksternal*.

Intervensi energi juga dapat terjadi oleh peristiwa luar biasa dari dalam bumi maupun matahari sebagai pemasok energi primer bagi biosfer, seperti terjadinya erupsi *super volcano* di bumi, ataupun ledakan-ledakan pada korona matahari. Keduanya juga dapat dikategorikan sebagai *intervensi energi eksternal*.

#### **3.3.1. Tumbukan Benda Angkasa**

Tumbukan benda angkasa yang berpengaruh besar dalam sejarah manusia memang belum tercatat pernah terjadi. Namun dalam sejarah bumi yang sudah berumur 4,5 milyar tahun telah sering terjadi, dan meninggalkan jejak-jejaknya. Beberapa diantaranya bahkan telah merubah konfigurasi kehidupan dalam sistem biosfer, sehingga digunakan sebagai rujukan dalam menentukan skala waktu geologi.

Peristiwa tumbukan benda langit seringkali terjadi pada planet-planet dalam sistem tata surya matahari. Permukaan bulan, planet Mars dan Merkurius misalnya, dimana proses-proses geologinya sudah terhenti sejak lama, dipenuhi dengan jejak-jejak tumbukan tersebut.

Bumipun dalam sejarah perkembangannya sering pula mengalami tumbukan benda-benda langit. Namun jejak-jejak berupa kawah-kawah meteoritnya secara terus-menerus terkikis oleh erosi, perubahan struktur bumi, aktivitas gunung berapi dan berbagai aktivitas tektonik lainnya. Kawah meteor di Arizona (dikenal dengan *Barrington Crater*) adalah kawah meteorit yang pertama kali teridentifikasi. Dimana pada tahun 1920 ditemukan serpihan-serpihan meteor yang menemukannya dalam kawah tersebut. Pada beberapa kawah meteorit lainnya yang lebih kecil juga ditemukan fragmen-fragmen benda langit yang menemukannya.

Bagaimanapun, energi kinetik tumbukan benda langit berukuran besar yang bergerak dengan kecepatan tinggi, akan mempengaruhi evolusi pada permukaan bumi, dan dapat pula menimbulkan bencana bagi perkembangan kehidupan dalam sistem biosfer di muka bumi.

Tabel 3.1. : Daftar kawah meteorit dengan diameter > 25 km

Daftar kawah tumbukan benda langit dengan diameter > 25 km							
No	Nama	Lokasi	Ma	Radius	Ukuran	Terlihat	
1	Vredefort	Afrika Selatan	300	270-280	27.8	27.3	ya
2	Sudbury	Ontario, Kanada	250	181-191	40.18	40.00	ya
3	Charcoabali	Yucatan, Meksiko	180	89.75-91.91	49.70	31.10	tidak
4	Mancosgan	Quebec, Kanada	100	113.215	48.70	51.18	ya
5	Popigai	Rusia	100	10-42	111.87	71.87	tidak
6	Acraman	Australia Selatan	90	410	120.40	40.20	ya
7	Chesapeake Bay	Virginia, Amerika Serikat	85	16.8-18.1	38.00	37.88	tidak
8	Pachy-Katankil	Rusia	80	172.076	43.58	37.10	tidak
9	Maree/Kroon	Afrika Selatan	70	144.3-193.4	32.93	36.43	tidak
10	Kara	Rusia	65	43.04	48.00	48.00	tidak
11	Beaverhead	Montana, Amerika Serikat	60	116.070	32.00	44.00	ya
12	Troakanooka	Queensland, Australia	55	110.110	32.84	47.12	tidak
13	Charleyevic	Quebec, Kanada	54	142.072	30.00	47.88	ya
14	Kam-Kul	Tajikistan	52	4	39.44	46.00	ya
15	Iljanz	Swedia	52	140.0-149.1	34.87	41.00	ya
16	Morrington	SNova Scotia, Kanada	45	49.34-51.10	44.12	43.98	tidak
17	Angren/da Dama	Iran	40	241.4-283.4	42.44	46.78	ya
18	Mjabie	Sorwegia	40	123.000	28.27	33.88	tidak
19	Scott Martin	Manitoba, Kanada	40	109.022	48.13	31.78	ya
20	Carwell	Saskatchewan, Kanada	39	108.123	48.80	34.40	ya
21	Clearwater West	Quebec, Kanada	38	219.000	34.00	34.00	ya
22	Manson	Iowa, Amerika Serikat	35	73.00-76.7	44.11	42.18	tidak
23	Arara	Sparyel	30	10.44	40.00	42.17	ya
24	Borovoiok	Australia Barat	30	1420-1500	33.98	38.87	ya
25	Ikara Inland	Ontario, Kanada	30	400-500	41.00	48.00	ya
26	Milutin	Newfoundland Labrador, Kanada	28	14-42	40.00	35.00	ya
27	Clearwater East	Quebec, Kanada	26	270-330	34.12	34.00	ya

Ma = Umur dalam jutaan tahun  
 Terlihat = Jejak2 nya masih terlihat di permukaan bumi  
 Sumber : [http://www.wikipedia.org/wiki/Impact\\_crater](http://www.wikipedia.org/wiki/Impact_crater)

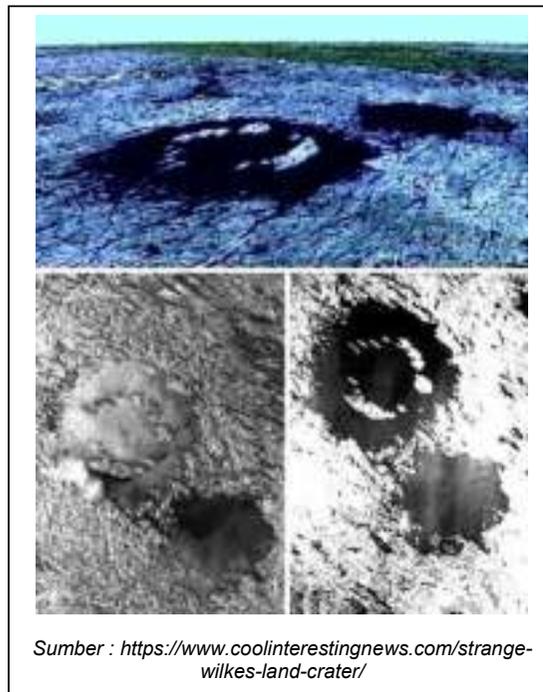
Setidaknya dalam sejarah geologi bumi, dikenal 2 peristiwa katastrofik besar yang merubah konfigurasi kehidupan dalam sistem biosfer. Yaitu yang disebut sebagai *Kepunahan Permo-Trias*, dan *Kepunahan Dinosaurius*.

- *Kepunahan Permo-Trias*

Peristiwa ini terjadi pada sekitar 250 juta tahun yang lalu, merupakan peristiwa kepunahan besar yang terekam dalam jejak

fosil, yaitu dimana sekitar 95% spesies kehidupan yang ada di bumi punah. Sehingga dalam penentuan skala waktu geologi diidentifikasi sebagai batas waktu antara masa *Paleozoikum* dengan *Mesozoikum*. Peristiwa kepunahan ini diduga diakibatkan oleh kombinasi antara erupsi gunung api di *Trap Siberia*, gasifikasi metana hidrat, fluktuasi permukaan air laut, dan peristiwa besar lainnya, yang salah satunya adalah tumbukan *asteroid*.

Keberadaan *Kawah Meteorit Wilkes* di benua Antartika atau *struktur Bedout* di baratdaya pesisir Australia mengindikasikan hubungan antara tumbukan benda langit dengan kepunahan *Permo-Trias*, namun masih ada sisa-sisa kehidupan yang bertahan.



**Gambar 3.8. : Kawah meteorit Wilkes di benua Antartika**

Keberadaan *Kawah Meteorit Wilkes* di benua Antartika atau *struktur Bedout* di baratdaya pesisir Australia mengindikasikan hubungan antara tumbukan benda langit dengan kepunahan *Permo-Trias*, namun masih ada sisa-sisa kehidupan yang bertahan.

- **Kepunahan Dinosaurus**

Pasca kepunahan *Permo-Trias* 250 juta tahun yang lalu, kehidupan dalam sistem biosfer berangsur-angsur mulai kembali tumbuh dan berkembang. Dan mencapai puncaknya dengan berkembangnya kelompok binatang raksasa *Dinosaurus* yang merupakan nenek moyang binatang reptilia, yang mendominasi binatang vertebrata di bumi. Namun pada sekitar 65 juta tahun yang lalu kelompok binatang raksasa tersebut mendadak punah, menandai berakhirnya masa *Mesozoikum*, serta dimulainya masa *Kenozoikum* dalam skala waktu geologi.

Sebuah *asteroid* berukuran 10 kilometer (6,2 mil) diduga telah 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* tersebut.

Sekitar 300 ribu tahun kemudian, setelah tumbukan *asteroid* yang menyisakan jejak berupa *kawah Chicxulub*, benda langit berdiameter 40 kilometer kembali membentur lautan lepas pantai bagian barat India, dan menyebabkan terbentuknya *kawah meteorit* berdiameter 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 tersebut diduga telah 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*), dan melepaskan gas beracun, tsunami raksasa, dan meluapkan banjir lava. Hal tersebut semakin memperluas cakupan kepunahan spesies-spesies makhluk hidup di bumi



*Gambar 3.9. : Kawah meteorit Chicxulub di semenanjung Yucatán*

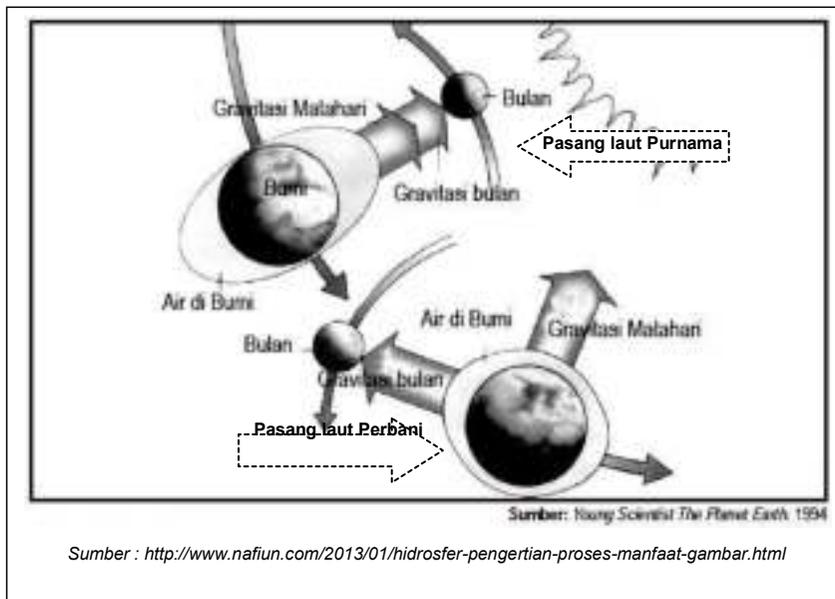
### **3.3.2. Energi Gravitasi Bulan**

Bulan adalah benda langit terbesar yang terdekat dengan bumi, juga merupakan satelit bumi yang beredar mengitari bumi dan berrotasi pada porosnya. Sebagaimana dengan bumi dan matahari, bulan juga memiliki gaya gravitasi.

Energi gaya gravitasi pada dasarnya berbanding lurus dengan massa, dan berbanding terbalik terhadap jarak. Sehingga, meskipun ukuran bulan lebih kecil dari matahari, namun pengaruh gaya gravitasi bulan lebih besar daripada matahari. Namun pada posisi tertentu terhadap bumi, energi gaya gravitasi bulan dan matahari dapat saling bersinergi, sehingga memberikan dampak yang signifikan terhadap permukaan bumi, dimana hidrosfer sebagai massa cair di permukaan bumi merupakan materi yang sangat terpengaruh.

Pasang laut (*tide*) adalah proses naik atau turunnya posisi permukaan perairan atau lautan, yang disebabkan oleh pengaruh gaya gravitasi bulan dan matahari, yang disebabkan oleh interaksi diantara 3 unsur, yaitu perairan laut, matahari, dan bulan. Pasang laut tersebut menyebabkan perubahan kedalaman sementara perairan dan

mengakibatkan arus pusaran yang dikenal sebagai arus pasang, yaitu pasang naik dan pasang surut. Dimana beberapa bagian pantai akan tergenang sewaktu pasang naik dan terpapar sewaktu pasang surut.



**Gambar 3.10. : Diagram posisi matahari dan bulan terhadap bumi, yang menyebabkan pasang laut.**

Pasang laut merupakan dampak dari gaya gravitasi dan efek sentrifugal, yang mengakibatkan dorongan ke arah luar pusat rotasi bumi, sehingga mengangkat permukaan laut disuatu tempat, dan menarik surut ditempat lainnya.

Pasang surut laut merupakan suatu fenomena pergerakan naik turunnya permukaan air laut yang diakibatkan oleh kombinasi gaya gravitasi dan gaya tarik menarik dari benda-benda langit, terutama matahari, bumi dan bulan, sedangkan pengaruh benda angkasa lainnya dapat diabaikan oleh karena jaraknya yang lebih jauh atau ukurannya yang lebih kecil. Sehingga waktu kejadiannya dapat di prediksi dengan tepat, oleh karena berlangsung secara periodik, tergantung kepada posisi antara matahari, bumi dan bulan.

Berdasarkan pada posisi diantara ketiga benda langit tersebut, maka pasang laut dapat dibagi menjadi :

- **Pasang laut purnama (*spring tide*)** terjadi ketika posisi bumi, bulan dan matahari berada dalam satu garis lurus. Pada saat itu akan dihasilkan pasang naik yang sangat tinggi dan pasang surut yang sangat rendah. Pasang laut purnama ini terjadi pada saat bulan baru dan bulan purnama.
- **Pasang laut perbani (*neap tide*)** terjadi ketika posisi bumi, bulan dan Matahari membentuk sudut tegak lurus. Pada saat itu akan dihasilkan pasang naik yang rendah dan pasang surut yang tinggi. Pasang laut perbani ini terjadi pada saat bulan kuartier pertama dan kuartier ketiga.

Pasang laut adalah proses yang diakibatkan oleh intervensi dari energi eksternal, yang termasuk dalam kategori energi terbarukan (*renewable*), oleh karena terjadi terus menerus secara periodik. Bahkan berpotensi untuk dapat di eksploitasi.

### **3.3.3. Energi Eksternal dari dalam Bumi**

Panas bumi adalah sumber *energi primer* bagi siklus energi internal dalam sistem biosfer, yang terus menerus memberikan pasokan energi. Namun secara insidental energi panas dari dalam bumi terlepas meledak ke permukaan bumi, sehingga mempengaruhi keseimbangan siklus energi dalam sistem biosfer. Dalam keadaan demikian pelepasan energi tersebut dapat di kategorikan sebagai *intervensi energi eksternal*, terutama yang ber skala besar dan memberi dampak signifikan pada biosfer dalam waktu yang lama.

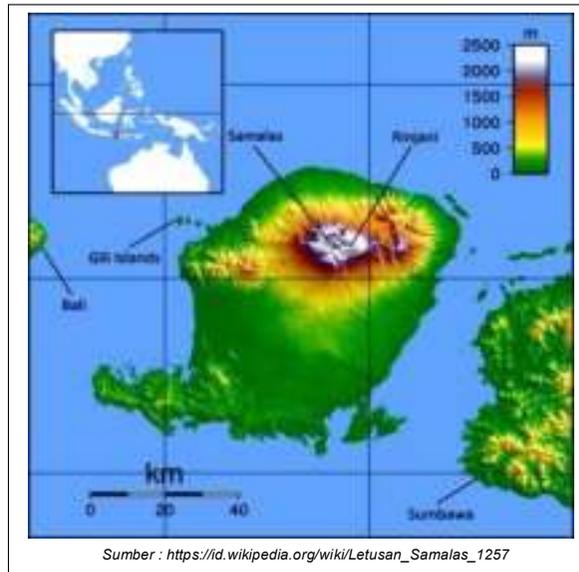
Manifestasi *intervensi energi eksternal* tersebut, yang dapat dikenali adalah peristiwa gempa bumi dan erupsi gunung api. Namun gempa bumi umumnya tidak melepaskan materi secara signifikan, sehingga jejak-jejaknya pada masa lalu sulit untuk di identifikasi. Berbeda dengan gempa bumi, erupsi gunung api disamping melepaskan sejumlah besar energi juga melontarkan sejumlah material, sehingga jejak-jejak dan dampaknya terkadang masih dapat diidentifikasi.

Dengan mengacu pada konsep :

*“The Past and Present are the keys for the future”*

Maka peristiwa-peristiwa tersebut dapat menjadi pedoman untuk masa depan. Peristiwa erupsi gunung api besar masa lalu yang teridentifikasi diantaranya adalah :

- *Erupsi Gunung Samalas*



*Gambar 3.11. : Kompleks gunung api Rinjani Samalas, Lombok*



*Gambar 3.12. : Kaldera Samalas (Segara Anak), dengan gunung Barujari dan Rinjani*

Gunung Samalas yang juga dikenal sebagai gunung Rinjani Tua, adalah induk dari gunung api Rinjani, yang berada di pulau Lombok, yang terletak dalam suatu kompleks gunung api yang disebut sebagai kompleks gunung api Rinjani, dimana didalamnya terdapat gunung api aktif Rinjani dan Barujari, dan danau kaldera Segara Anak.

Erupsi eksplosif *cataclysm* yang terjadi antara tahun 1257-1258, diperkirakan telah membentuk kaldera Segara Anak, namun tak ada laporan visual ilmiah tentang hal tersebut. Informasi tentang peristiwa tersebut pada awalnya diperoleh dari naskah kuno Babad Lombok yang dituliskan pada *Lontar Jatiswara*.

Erupsi Gunung Samalas (1257) yang diperkirakan berkekuatan skala VEI = 7, merupakan salah satu erupsi terbesar pada masa *Holosen*. Setara dengan erupsi-erupsi vulkanik *Danau Kurile* di *Kamchatka - Russia* (abad ke-7 SM), gunung *Mazama* yang menghasilkan *Danau Crater* di *Oregon - Amerika Serikat* (abad ke-6 SM), gunung *Minoa* di *Santorini - Yunani* (1627 - 1600 SM), serta erupsi *Tierra Blanca Joven* yang menyisakan *Danau Ilopango - El Salvador* (abad ke-6 M).

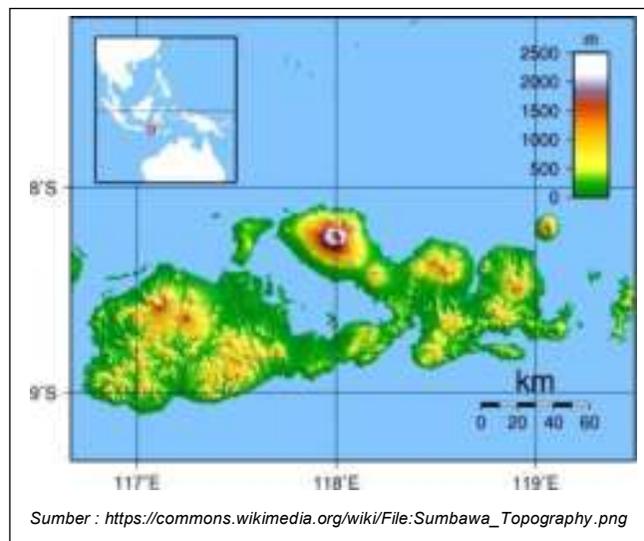
Diperkirakan energi erupsi gunung Samalas (1257) telah menyemburkan 55 juta ton gas sulfurdioksida (SO<sub>2</sub>) di atmosfer, yang bereaksi dengan butir-butir uap air membentuk *aerosol* asam sulfat. Masa *aerosol* asam sulfat sejumlah 370 juta ton, bersama debu vulkanik membentuk tabir surya alamiah pada lapisan stratosfer, sehingga mereduksi kuantitas penyinaran matahari ke bumi. Maka suhu udara rata-rata permukaan bumi menurun, paparan salju dan es meluas, dan tingkat penguapan air pun menurun. Akibatnya tanaman pangan terpengaruh, produksi pangan merosot, kelaparan merebak, sanitasi memburuk, dan berbagai penyakitpun berkembang pesat.

Catatan-catatan sejarah dari Eropa melaporkan terjadinya hujan deras diluar musim sepanjang musim panas dan gugur pada tahun 1257 dan 1258, sehingga menghancurkan lahan pertanian di Inggris, Jerman bagian barat, Perancis dan Italia bagian utara, dan korban jiwaupun berjatuhan. Sementara itu di luar Eropa, bencana kelaparan tercatat terjadi di kawasan Asia Barat, seperti Irak, Suriah dan Turki tenggara. Bahkan sampai dengan bulan

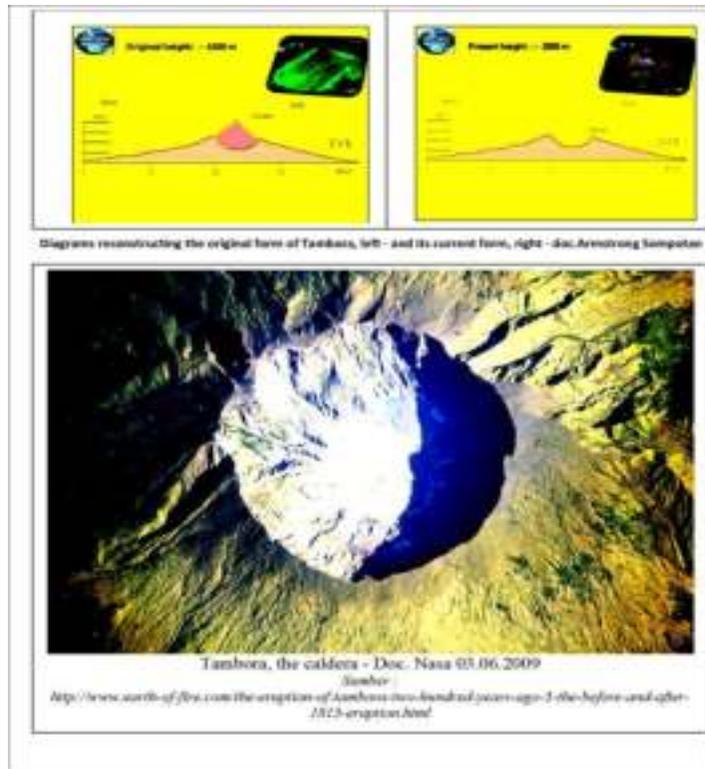
April tahun 1259, wabah penyakit diketahui telah berkecamuk di London - Inggris, Paris - Perancis, Italia serta Austria, tanpa diketahui penyebabnya saat itu.

- **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. 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 km<sup>3</sup> material *pyroclastic* berkomposisi *trachyandesite* dikeluarkan dengan perkiraan massa 1,4 X 10<sup>14</sup>kg. Hal ini meninggalkan kaldera dengan ukuran 6 - 7 km, dengan kedalaman 600 - 700 meter.



**Gambar 3.13. : Lokasi Gunung Tambora di Semenanjung Sanggar - Pulau Sumbawa**



**Gambar 3.14. : Kaldera Gunung Tambora**

Erupsi gunung Tambora tahun 1815, setidaknya telah merengut korban jiwa 71000, dimana 11000 – 12000 diantaranya merupakan korban langsung. Peristiwa ini melenyapkan *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*.

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.

- **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 explosif 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 di langit 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.

Namun gunung Anak Krakatau terbentuk pasca erupsi dahsyat gunung Krakatau yang merupakan induknya pada tahun 1883, 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 terus tumbuh mencapai ketinggian 338 meter.

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. Energi erupsi vulkanik 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](http://visitbanten.com/wp-content/uploads/2014/09/KRA.jpg)

**Gambar 3.15. : Gunung Krakatau (Anak Krakatau) dengan ekosistemnya (2014), tumbuh dari bawah laut dalam waktu < 100 tahun.**

Erupsi vulkanik, juga telah sering terjadi bahkan sebelum era peradaban manusia, sehingga tak ada catatan peristiwa yang tercatat. Namun demikian beberapa jejak yang ditinggalkan oleh erupsi besar *supervolcano* masih dapat diidentifikasi, dan dapat diperkirakan dampaknya terhadap peredaran energi internal biosfer, dengan membandingkannya dengan dampak erupsi gunung api yang tercatat selama peradaban manusia.

- *Erupsi Yellowstone Supervolcano (Amerika Serikat)*

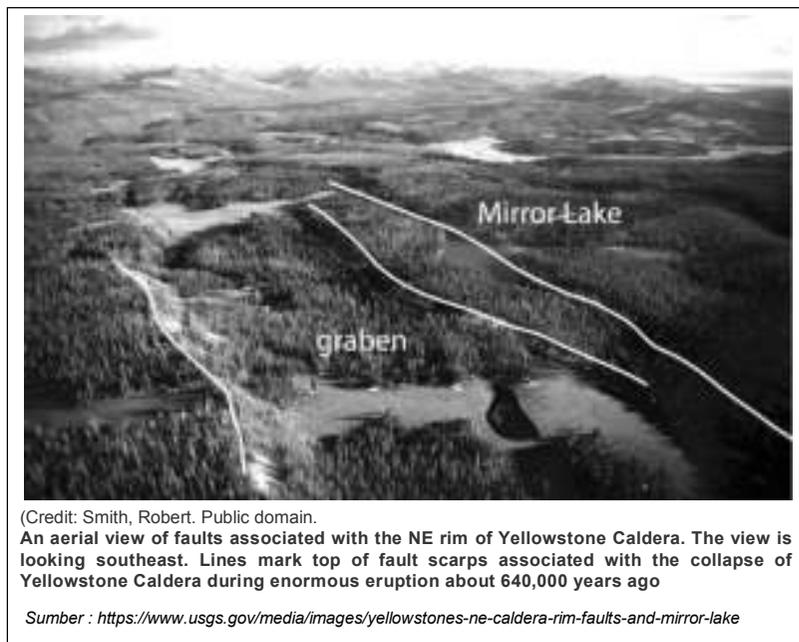
Yellowstone adalah kawasan kaldera vulkanik yang terletak di Taman Nasional Yellowstone - Amerika Serikat, yang dalam pembahasan vulkanologi disebut juga sebagai *Yellowstone Supervolcano*. Yaitu terletak di negara bagian Wyoming, Montana, dan Idaho.

Yellowstone adalah sebuah gunung api yang bukan gunung berapi biasa, akan tetapi merupakan dataran kaldera pada pegunungan Rocky (*Rocky Mountains*), dimana Taman Nasional Yellowstone tepat berada di atasnya. Kaldera tersebut, dengan puncak tertingginya Gunung Sheridan (3142 m dpl), meskipun sudah tidak menunjukkan bentuk yang jelas, merupakan dataran luas berukuran sekitar 85 X 45 km<sup>2</sup>, yang terbentuk selama sekitar 2,1 juta tahun, setidaknya oleh 3 kali erupsi vulkanik besar.

Erupsi besar pada 2,1 juta tahun lalu diperkirakan telah membentuk sebuah cekungan di permukaan bumi sekitar tiga kali luas danau Toba. Berikutnya terjadi erupsi besar pada 1,3 juta tahun yang lalu, dengan kekuatan yang lebih kecil, dan erupsi besar terakhir pada 640 ribu tahun yang lalu, yang diidentifikasi sebagai erupsi *Lava Creek* dengan kekuatan erupsi skala VEI > 8.



**Gambar 3.16. : Lokasi Kaldera Yellowstone Supervolcano.**



**Gambar 3.17. : Panorama dataran Kaldera Yellowstone**

Energi erupsi besar yang teridentifikasi sebanyak 3 kali tersebut telah mengakibatkan punahnya sejumlah spesies flora fauna purba. Dan telah mampu meruntuhkan ruang- ruang magma raksasa dibawahnya, sehingga menghasilkan sebuah kawah raksasa sedalam 1 km, dengan panjang 85 km dan lebar 45 km.

- **Erupsi Toba Supervolcano (Sumatera Utara)**

Danau Toba di Sumatera Utara, dengan panjang sekitar 100 km dan lebar 30 km, dengan pulau Samosir ditengahnya, diidentifikasi sebagai kaldera besar hasil erupsi eksplosif dari gunung api *supervolcano* Toba. Dari ukuran kalderanya, maka energi dan volume material vulkanik yang dikeluarkannya sangatlah besar, jauh lebih besar dari energi dan volume material vulkanik yang dikeluarkan pada erupsi gunung Krakatau (1883), ataupun erupsi gunung Tambora (1815).

*Van Bemmelen (1939)* memperkirakan peristiwa tersebut terjadi pada sekitar 75000 tahun yang lalu pada awal peradaban manusia, dengan type *Ultra Plinian* dengan kekuatan VEI >8. Jejak-jejak material erupsinya ditemukan di Malaysia, bahkan juga sejauh 3000 km ke arah utara sampai teluk Benggala dan India Tengah. Sejauh ini tidak ada erupsi vulkanik besar didalam sejarah peradaban manusia yang sebanding dengan erupsi *supervolcano* Toba, kecuali erupsi *supervolcano* *Yellowstone* di Amerika Serikat, yang juga terjadi pada pra-peradaban manusia.

Lebih jauh, peneliti lain seperti *Verstappen (1961)*, *Yokoyama & Hehanussa (1981)* serta *Nishimura (1984)*, menafsirkan kaldera Toba terbentuk oleh beberapa kali erupsi, bahkan *Knight et al (1986)* dan *Chesner & Rose (1991)*, lebih rinci memperkirakan 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.

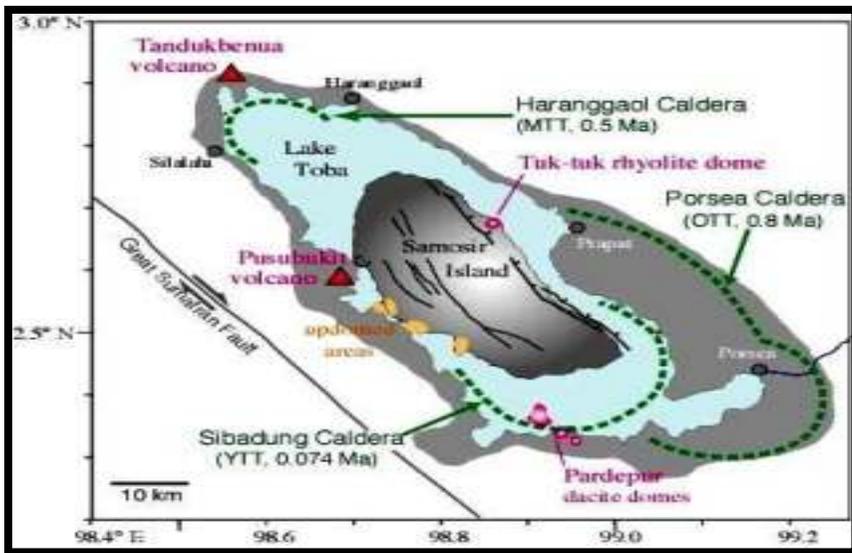
- Erupsi Ketiga terjadi pada sekitar 75 ribu tahun yang lalu adalah yang terbesar diantaranya, menghasilkan kaldera yang menjadi danau Toba sekarang, dengan pulau Samosir ditengahnya.

Luasnya danau kaldera Toba kurang lebih menggambarkan besarnya ekosistem yang dihilangkan oleh erupsi *supervolcano* 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



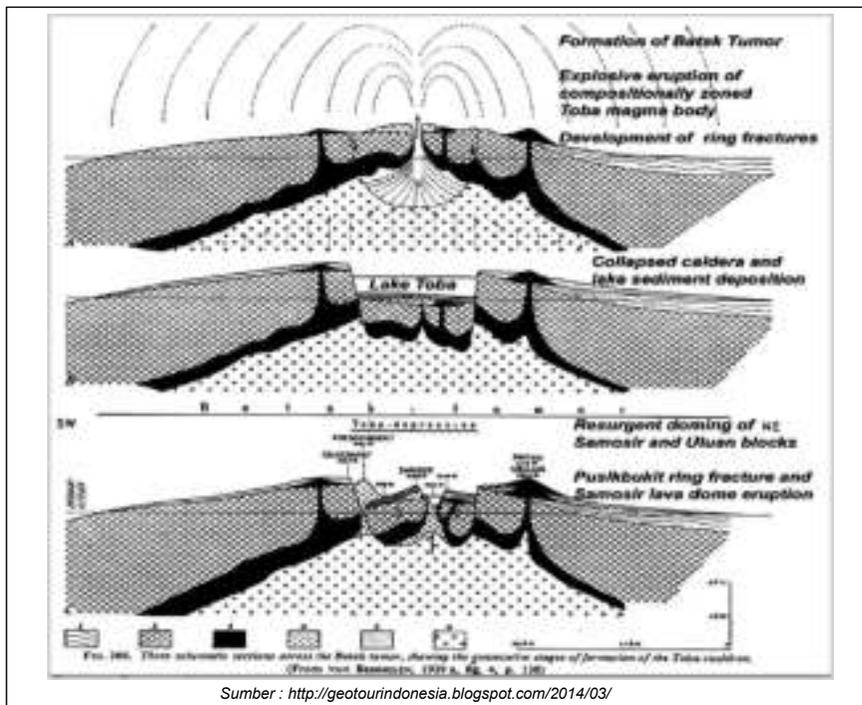
Sumber : [IndoCropCircles.wordpress.com](http://IndoCropCircles.wordpress.com)

**Gambar 3.18. : Perspektif danau Toba, yang merupakan Kaldera Toba Supervolcano**



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

Gambar 3.19. : Sketsa Peta Geologi Struktur Kaldera Toba Supervolcano



Sumber : <http://geotourindonesia.blogspot.com/2014/03/>

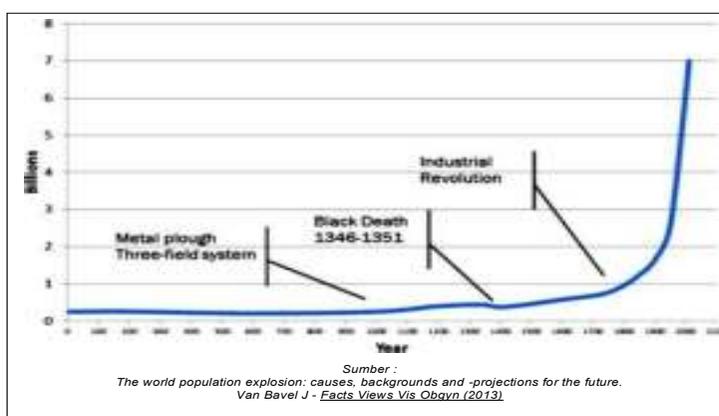
Gambar 3.20. : Diagram proses terbentuknya Kaldera Danau Toba

# 4

## Intervensi Manusia dan Revolusi Industri

Seperti halnya makhluk hidup lainnya, manusia juga memiliki daya adaptasi terhadap siklus lingkungan sekitarnya, dimana manusia juga beradaptasi, baik secara *somatik* maupun *genetik*. Namun manusia tidak sekedar memerlukan apa yang dibutuhkannya, yang pada dasarnya telah disediakan oleh lingkungan alam sekitarnya, akan tetapi manusia juga memerlukan apa yang diinginkan untuk kehidupannya yang lebih baik. Lebih dari itu, manusia dengan kelebihan nalar budinya juga mempunyai kemampuan untuk mengintervensi siklus alam lingkungan sekitarnya.

Revolusi Industri pada akhir abad ke 18 menunjukkan kemampuan daya nalar manusia untuk mengintervensi proses alam, sehingga diperoleh kualitas kehidupan manusia yang lebih baik. Yaitu ditunjukkan dengan peningkatan tajam populasi manusia di bumi setelah Revolusi Industri, dibandingkan sebelumnya.



**Gambar 4.1. : Pertumbuhan penduduk dunia sebelum dan sesudah Revolusi Industri**

Namun pertumbuhan populasi tentunya berdampak pula pada peningkatan kebutuhan sumberdaya pendukungnya. Dimana dibutuhkan sumberdaya berupa lahan untuk pemukiman, air bersih, sumberdaya hayati untuk makanan, dan juga sumberdaya energi. Sehingga dimulailah periode eksploitasi besar besaran terhadap berbagai sumberdaya alam di bumi termasuk sumberdaya energi, untuk memenuhi kebutuhan kehidupan manusia yang semakin meningkat, dan cadangan sumberdaya energi fosilpun mulai digali. Maka keseimbangan siklus rantai makanan alami yang ada di bumi perlahan lahan mulai terganggu, dan daya dukung biosferpun berangsur angsur mulai berkurang. Akibat lebih jauh, beberapa siklus alam penunjang biosfer mulai terpengaruh, dan lambat laun mulai menunjukkan reaksi.

#### **4.1. Revolusi Industri**

Revolusi Industri adalah suatu perubahan besar, secara cepat, dan radikal yang mempengaruhi corak kehidupan manusia. Walaupun istilah revolusi biasanya digunakan dalam perubahan politik atau sistem pemerintahan, namun Revolusi Industri di Inggris pada hakekatnya 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, dengan tenaga kerja yang minimal.

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, dan 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.

#### **4.1.1. 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 batubara, 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 hasil-hasil 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.

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).



Sumber : <https://www.bbvaopenmind.com/en/james-watt-full-steam-ahead/>

**Gambar 4.2. : Mesin uap karya James Watt (1769)**

Mesin uap merupakan inti dari Revolusi Industri sehingga *James Watt* sering dianggap sebagai Bapak Revolusi Industri I. Penemuan-penemuan baru selanjutnya, yang semakin lengkap dan sempurna merupakan hasil Revolusi Industri II dan III, seperti mobil, pesawat terbang, industri kimia dan sebagainya.

Lebih jauh, revolusi Industri juga merupakan masa perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang pesat, dengan temuan-temuan teknologi 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 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 1804 : *Richard Trevethick* membuat kapal 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.

#### **4.1.2. Eksploitasi Sumberdaya Energi**

Periode Revolusi Industri pada akhir abad ke-18 di Inggris, ditandai dengan terjadinya peralihan penggunaan tenaga kerja manusia dan hewan, digantikan oleh mesin-mesin industri yang berbasis manufaktur. Periode awal dimulai dengan dilakukannya mekanisasi terhadap industri tekstil, dan pengembangan teknik pembuatan besi. Maka kebutuhan akan energipun semakin meningkat. Berikutnya ekspansi perdagangan turut berkembang dengan dibukanya terusan *Suez*, perbaikan jalan raya dan rel kereta-api.

Riwayat penambangan dan penggunaan batubara tidak dapat dipungkiri terkait dengan Revolusi Industri, dimana batubara digunakan dalam produksi besi dan baja, transportasi kereta api dan kapal uap. Walaupun penggunaan batubara memiliki sejarah yang panjang dan beragam. Dimana ahli sejarah meyakini bahwa batubara telah digunakan secara komersial di Cina, berdasarkan laporan yang menyatakan adanya suatu tambang di timur laut Cina yang menyediakan batubara untuk mencairkan tembaga dan untuk mencetak uang logam, pada sekitar tahun 1000 SM.

Batubara juga digunakan untuk menghasilkan gas untuk lampu gas di banyak kota, yang disebut "kota gas". Proses pembentukan gas dengan menggunakan batubara ini menunjukkan pertumbuhan lampu gas di sepanjang daerah metropolitan pada awal abad ke- 19, terutama di London. Maka kegiatan eksplorasi dan penambangan batubara meningkat dengan pesat pasca Revolusi Industri I, sehingga disebut juga sebagai jaman keemasan batubara.

Seiring perkembangan jaman, mesin-mesin yang semula digerakan dengan bahan bakar batubara, mulai beralih kepada minyak bumi yang lebih praktis, terutama sejak diproduksi mobil untuk pertama kali pada tahun 1887 (*Daimler*). Maka minyak bumi sebagai sumber energi mulai diburu, oleh karena dianggap lebih praktis daripada batubara.

Pemboran minyak bumi, pertama kali tercatat dilakukan di Pennsylvania - Amerika Serikat, pada tahun 1859 oleh Edwin L. Drake, yang merupakan pelopor industri minyak bumi dunia. Maka sejak abad - 19, industri minyak modern tumbuh di Amerika dan negara-negara Eropa, diikuti eksplorasi dan eksploitasi besar-besaran, dan bahkan merambah ke wilayah jajahan di Asia maupun Afrika.

Pasca Perang Dunia II, konsumsi minyak dunia semakin meningkat dengan semakin berkembangnya industri otomotif. Penemuan minyak dalam skala besar tidak terbatas di Timur Tengah, namun juga di Afrika (Aljazair, Libya dan Nigeria) serta Venezuela. Pada tahun 1949, The National Iranian Oil Company (NIOC) dibentuk dengan saham Anglo-Iranian (40%) dan Socony, Mobil, Socal, Gulf dan Texaco (masing-masing 7%), Shell (17%), CFP (6%), kelompok perusahaan Amerika Independen (5%) yang meningkatkan produksi minyak dunia, sampai dengan revolusi Iran pada tahun 1973.

Gas alam sering juga disebut sebagai gas bumi atau gas rawa, adalah bahan bakar fosil berbentuk gas yang terutama terdiri dari senyawa metana ( $CH_4$ ). Gas alam dapat ditemukan di ladang minyak, ladang gas Bumi dan juga tambang batubara. Ketika gas yang kaya dengan metana diproduksi melalui pembusukan oleh bakteri anaerobik dari bahan- bahan organik selain dari fosil, maka disebut sebagai biogas.

Gas alam pada awalnya tidak dianggap sebagai sumber energi, akan tetapi dianggap sebagai gangguan, oleh karena sering ditemukan dalam proses penggalian sumur air tawar atau air garam. Gas alam kemudian mulai dikenal di Amerika pada awal abad 20, ketika digunakan sebagai pengganti "coal gas" (gas yang diproduksi dari pemanasan batubara) untuk bahan bakar sistem pemanas ruangan. Penemuan pipa *seamless* sebagai bahan pipa dan aplikasi metode pengelasan pipa, dalam hal ini telah memberikan kontribusi dalam mengatasi masalah transportasi gas alam. Kemajuan teknologi untuk

eksplorasi, eksploitasi dan pengolahan gas alam juga telah menjadi pemicu pertumbuhan penggunaan gas alam terutama untuk kebutuhan pembangkit tenaga listrik, industri domestik, transportasi, pupuk, dan sebagainya.

### **4.1.3. 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 Inggris.

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 yang ditandai dengan dimulainya era pertumbuhan pendapatan per-kapita, dan pertumbuhan ekonomi kapitalis, dapat dianggap sebagai peristiwa paling penting yang pernah terjadi dalam sejarah kemanusiaan, sejak domestikasi hewan dan tumbuhan pada masa *Neolitikum*.

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*. Namun, 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 negara-negara 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, memicu terjadinya urbanisasi, dimana banyak petani desa pergi ke kota untuk mendapatkan pekerjaan, sehingga mengakibatkan terabaikannya usaha kegiatan pertanian. Sementara itu dalam dunia industrialisasi, 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 kolonisasi, 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.

## - Dampak Lingkungan

Industrialisasi memerlukan lebih banyak energi untuk menggerakkan roda industrinya. Maka eksploitasi sumber energi fosil semakin meningkat mengikutinya, untuk mengisi kebutuhan akan energi, dan semakin banyak pula bahan bakar fosil yang dibakar.

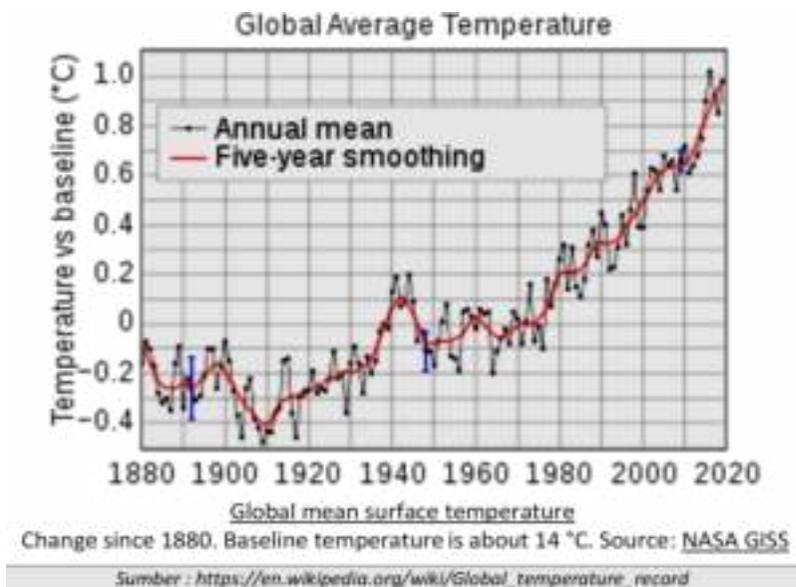
Pembakaran bahan bakar fosil yang berlebihan menghasilkan gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang memenuhi atmosfer, sementara itu luas lahan hutan yang menyerapnya semakin berkurang. Maka akumulasi gas tersebut di atmosfer lambat laun mulai membentuk selimut yang mengakibatkan efek rumah kaca, sehingga suhu permukaan bumi lambat laun meningkat.

Produksi gas *Chlorofluorocarbons* atau CFC sebagai gas pendorong dalam alat pemadam kebakaran, *hairspray*, *refrigerator coolant* dan sebagainya, yang bersifat stabil diudara dan tak mudah terurai, dari waktu ke waktu semakin meningkat konsentrasinya di atmosfer dan terus terdesak keatas mendekati lapisan stratosfer. Gas tersebut mulai meng-intervensi siklus Ozon, sehingga menipiskannya bahkan membentuk lubang Ozon yang memungkinkan sinar *ultraviolet* dari matahari menembus mencapai permukaan bumi sehingga mulai mencairkan es di Kutub Selatan. Kedua hal tersebut lambat laun mulai merubah keseimbangan energi internal biosfer. Dan masih banyak lagi intervensi manusia yang lambat laun mempengaruhi berbagai siklus yang ada di bumi.

## **4.2. Intervensi Manusia**

Dampak 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 menjadi transeden. Yaitu, manusia tidak lagi memposisikan dirinya sebagai bagian dari lingkungan (*holistik*), namun memandang alam lingkungan sebagai obyek untuk dieksploitasi (*transeden*). Maka sumberdaya alam dieksploitasi secara tak terkendali, tanpa menyadari bahwa bagaimanapun sumberdaya alam mempunyai keterbatasan.

Penggunaan minyak bumi sebagai sumber energi secara meluas, membentuk ketergantungan manusia akan bahan bahan bakar ini, pada satu sisi merubah konfigurasi *geopolitik* dunia, sehingga menjadikannya sebagai sumber energi *konvensional*. Namun pada sisi lain, bahan bakar fosil ini, yang jumlah cadangannya semakin menipis, juga merupakan sumber energi yang tak terbarukan (*non renewable*). Sementara itu gas CO<sub>2</sub> sebagai limbah pembakarannya mulai memenuhi atmosfer, dan meningkatkan suhu permukaan bumi. 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.



**Gambar 4.3. : Grafik peningkatan temperature bumi sejak tahun 1880**

Pada dekade tahun 1970an, isu-isu tersebut mulai muncul dalam waktu yang hampir bersamaan. Menipisnya cadangan sumber energi *konvensional* yang *non renewable* mendorong manusia untuk mencari alternatif sumber energi lain yang *non konvensional*, *renewable*, sekaligus ramah lingkungan pula (*environmentally sustainable*). Maka orang mulai mengalihkan perhatiannya pada alternatif sumber energi lainnya, seperti tenaga air, panas bumi (*geothermal*), tenaga angin, tenaga matahari, sumber energi biomassa, bahkan tenaga nuklir.

## 4.3. Pemanasan Global & Protokol Kyoto

### 4.3.1. Pemanasan Global dan Dampaknya

Temperatur rata rata global pada permukaan bumi telah meningkat sebesar  $0.74 \pm 0.18$  °C ( $1.33 \pm 0.32$  °F) pada seratus tahun terakhir. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* menyimpulkan bahwa, sebagian besar peningkatan temperatur global sejak pertengahan abad ke-20 diduga disebabkan oleh peningkatan konsentrasi 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 G8, walaupun terdapat sanggahan dari beberapa ilmuwan atas beberapa kesimpulan yang dikemukakan *IPCC* tersebut.

Dari model iklim yang dijadikan sebagai acuan dalam proyek *IPCC* ini, ditunjukkan bahwa temperatur permukaan global akan meningkat sekitar 1.1 - 6.4 °C (2.0 - 11.5 °F) antara tahun 1990 sampai 2100. Perbedaan angka perkiraan itu disebabkan oleh penggunaan skenario yang berbeda tentang emisi gas-gas rumah kaca pada masa mendatang, serta model sensitivitas iklim yang berbeda. Walaupun sebagian besar penelitian terfokus pada periode sampai dengan tahun 2100, pemanasan dan kenaikan muka air laut diperkirakan akan tetap berlanjut selama lebih dari seribu tahun, walaupun tingkat emisi gas rumah kaca telah stabil. Hal ini mencerminkan besarnya kapasitas kalor yang dimiliki lautan.

Meningkatnya temperatur global diperkirakan akan berdampak pada perubahan lainnya, seperti naiknya permukaan air laut, meningkatnya intensitas fenomena cuaca yang ekstrim, serta perubahan pada pola musim hujan. Akibat pemanasan global lanjutan lainnya adalah terpengaruhnya pertanian, hilangnya gletscher, dan punahnya berbagai jenis hewan.

Pemanasan global sendiri, setidaknya diakibatkan oleh hal-hal berikut :

- *Efek Rumah Kaca.*

Matahari adalah sumber energi primer 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 inframerah 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 berfungsi sebagaimana halnya gas dalam rumah kaca, dimana semakin meningkatnya konsentrasi gas-gas ini di atmosfer, semakin banyak 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 ini pada dasarnya sangat dibutuhkan oleh makhluk hidup yang ada di bumi, oleh karena tanpanya planet ini akan menjadi sangat dingin. Dengan temperatur rata-rata  $15\text{ }^{\circ}C$  ( $59\text{ }^{\circ}F$ ), permukaan bumi sebenarnya telah lebih panas  $33\text{ }^{\circ}C$  ( $59\text{ }^{\circ}F$ ) dari temperatur pada awalnya. Maka, tanpa efek rumah kaca temperatur permukaan Bumi hanya sekitar  $-18\text{ }^{\circ}C$ , sehingga es akan menutupi seluruh permukaan bumi. Namun sebaliknya, apabila gas-gas rumah kaca terakumulasi secara berlebihan di atmosfer, maka akan mengakibatkan pemanasan global.

- **Efek Umpan Balik.**

Pemanasan global juga dipengaruhi oleh berbagai proses umpan balik, seperti contoh pada penguapan air. Pada kasus pemanasan akibat bertambahnya gas rumah kaca seperti  $CO_2$ , 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.

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, kehidupan hewan liar dan kesehatan masyarakat.

#### - **Ketidakstabilan Iklim**

Diperkirakan selama pemanasan global, daerah bagian Utara dari Belahan Bumi Utara (*Northern Hemisphere*) akan memanaskan melebihi daerah lainnya di bumi. Sehingga sebagai akibatnya, gunung-gunung es akan mencair dan daratan akan menyempit. Akan lebih sedikit bongkahan es yang terapung di perairan Utara tersebut. Daerah-daerah yang sebelumnya mengalami musim salju ringan, kemungkinan tidak akan mengalaminya lagi. Pada 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 radiasi 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 ekstrim.

- **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 inci) 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 memengaruhi kehidupan di daerah pantai. Kenaikan 100 cm (40 inci) akan menenggelamkan 6% daerah Belanda, 17,5% daerah Bangladesh, dan banyak pulau lainnya. Erosi dari tebing, pantai, dan bukit pasir akan meningkat. Ketika tinggi lautan mencapai muara sungai, banjir yang diakibatkan air pasang akan meningkat di daratan. Sedikit saja kenaikan muka laut akan berdampak

mempengaruhi ekosistem pantai. Kenaikan 50 cm (20 inchi) akan menenggelamkan separuh dari rawa pantai di Amerika Serikat. Rawa-rawa baru juga akan terbentuk, walaupun tidak di area perkotaan dan daerah yang sudah dibangun. Kenaikan muka laut ini akan menutupi sebagian besar dari *Everglades, Florida*.

- **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 bermigrasi 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 bermigrasi 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 ini 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.

#### **4.3.2. Protokol Kyoto**

Protokol Kyoto adalah sebuah persetujuan internasional yang berkaitan dengan pemanasan global, dimana negara-negara yang meratifikasi protokol ini berkomitmen untuk mengurangi emisi gas karbon dioksida dan lima gas rumah kaca lainnya, atau bekerja sama dalam perdagangan emisi, jika mereka menjaga atau menambah emisi gas-gas yang dikaitkan dengan *pemanasan global*. Protokol Kyoto merupakan amandemen terhadap *Konvensi Rangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (UNFCCC)*, yang diadopsi dari *Pertemuan Bumi di Rio de Janeiro* pada tahun 1992.

Nama resmi persetujuan ini adalah *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (Protokol Kyoto mengenai Konvensi Rangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim). Tujuan utama Protokol Kyoto adalah pengendalian pemanasan global, dimana dengan keberhasilan implementasinya, diharapkan akan dapat mengurangi rata-rata temperatur global antara 0,02 °C sampai 0,28 °C pada tahun 2050.

Protokol ini dinegosiasikan di Kyoto pada bulan Desember 1997, dibuka untuk penanda-tanganan pada 16 Maret 1998 dan ditutup pada 15 Maret 1999. Persetujuan ini mulai berlaku pada 16 Februari 2005 setelah ratifikasi resmi yang dilakukan Rusia pada 18 November 2004.

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, dan 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.

Kerja sama internasional diperlukan untuk mensukseskan pengurangan gas rumah kaca. Dimana 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 menyerukan kepada 38 negara industri sebagai pemegang persentase paling besar dalam melepaskan gas rumah kaca, untuk mengurangi emisi gas rumah kaca mereka ke tingkat 5 persen di bawah emisi tahun 1990. Pengurangan ini harus dapat dicapai paling lambat tahun 2012. Pada mulanya Amerika Serikat mengajukan diri untuk melakukan pemotongan yang lebih ambisius, yaitu menjanjikan pengurangan emisi hingga 7 % di bawah tingkat 1990. Sedangkan Uni Eropa menginginkan perjanjian yang lebih keras, berkomitmen 8%, dan Jepang 6%. Sisa 122 negara lainnya, yang sebagian besar merupakan negara berkembang, tidak diminta untuk berkomitmen dalam pengurangan emisi gas rumah kaca.

Namun Protokol Kyoto tidak akan banyak berpengaruh apabila negara-negara industri yang bertanggung jawab menyumbang 55 % dari emisi gas rumah kaca pada tahun 1990 tidak meratifikasinya. Hal tersebut akhirnya itu berhasil terpenuhi ketika pada tahun 2004, Presiden Rusia Vladimir Putin meratifikasi perjanjian ini, dan memberikan jalan untuk berlakunya perjanjian ini mulai 16 Februari 2005.

Setelah tahun 1997, perwakilan dari penandatanganan Protokol Kyoto bertemu secara reguler untuk menegosiasikan 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 sukses, 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 bila sistem ini diterapkan. Pada tahun 1990 dalam kondisi ekonomi yang sangat parah dan memproduksi emisi gas rumah kaca sangat tinggi, Rusia berhasil memotong emisinya lebih dari 5 persen di bawah tingkat 1990. Maka Rusia berada dalam posisi untuk menjual kredit emisi ke negara-negara industri lainnya yang memerlukan, terutama yang berada di lingkungan Uni Eropa.

#### **4.4. Lubang Ozon dan Protokol Montreal**

Ozon adalah molekul-molekul oksigen  $O_3$ , yang melapisi atmosfer pada bagian stratosfer, sehingga menahan menerobos masuknya energi radiasi sinar *ultraviolet* ke permukaan bumi.

Penerobosan sinar *ultraviolet*, dalam hal ini merupakan intervensi energi eksternal terhadap siklus energi internal biosfer, yang dapat menimbulkan bencana bagi kehidupan di bumi. Diantaranya berupa berbagai gangguan kesehatan dan mencairnya lapisan es di kutub-kutub bumi, yang dapat terjadi manakala oleh sesuatu hal lapisan Ozon di stratosfer menipis atau bahkan bocor.

Pada tahun 1973, ahli kimia *Frank Sherwood Rowland* dan *Mario Molina* dari *University of California - Irvine*, mulai mempelajari dampak CFC di atmosfer Bumi, dan menemukan bahwa molekul CFC cukup stabil untuk tetap berada di atmosfer sampai ke tengah stratosfer. Selanjutnya molekul CFC akan terurai oleh radiasi *ultraviolet*, dengan membebaskan atom Clorin (Cl). Atom Clorin inilah yang diduga menjadi penyebab kerusakan lapisan Ozon di stratosfer.

*Chlorofluorocarbons* atau CFC sendiri mulai dikenal sejak tahun 1920an, sebagai gas pendorong dalam alat pemadam kebakaran, *hairspray*, *refrigerator coolant* dan sebagainya.

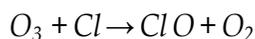
Gas tersebut pada dasarnya bersifat tidak aktif (*inert*) dan tidak beracun (*non-toxic*), dan dianggap tidak berbahaya. Namun gas ini bersifat stabil di udara dan tak mudah terurai, sehingga dari waktu ke waktu konsentrasinya di atmosfer semakin meningkat dan terus mendesak keatas.

Pada periode tahun 1980an, para peneliti atmosfer menemukan kondisi dimana terjadi penipisan pada lapisan Ozon diatas atmosfer Kutub Selatan. Pengamatan lebih lanjut mengidentifikasi bahwa penipisan tersebut disebabkan oleh polusi udara akibat aktivitas manusia, yaitu akibat dari semakin banyaknya konsentrasi molekul gas-gas aerosol yang disebut sebagai *chlorofluorocarbons* atau CFC.

#### **4.4.1. Mekanisme Perusakan Lapisan Ozon**

Dengan sifatnya yang stabil di udara, molekul-molekul CFC secara perlahan bergerak naik memasuki stratosfer pada ketinggian 5 - 10 km. Mendekati lapisan atas stratosfer, molekul- molekul gas CFC ini mulai terurai oleh radiasi sinar *ultraviolet* sehingga membebaskan kandungan atom *Chlorine* (*Cl*) didalamnya. Atom-atom *Chlorine* inilah yang kemudian meng- intervensi *siklus ozon*, sehingga mempercepat pembelahan molekul Ozon ( $O_3$ ), dan mulai merusak lapisan Ozon tersebut, sehingga menipis bahkan belubang.

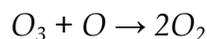
Intervensi atom *Chlorine* (*Cl*) menyebabkan reaksi kimia :

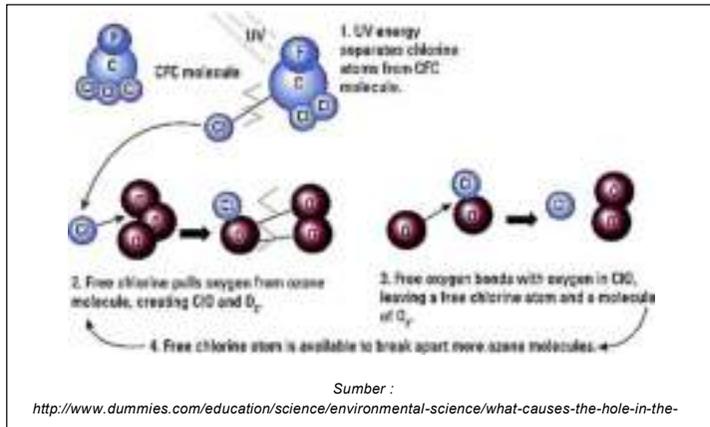


Sehingga reaksi kimia semula :

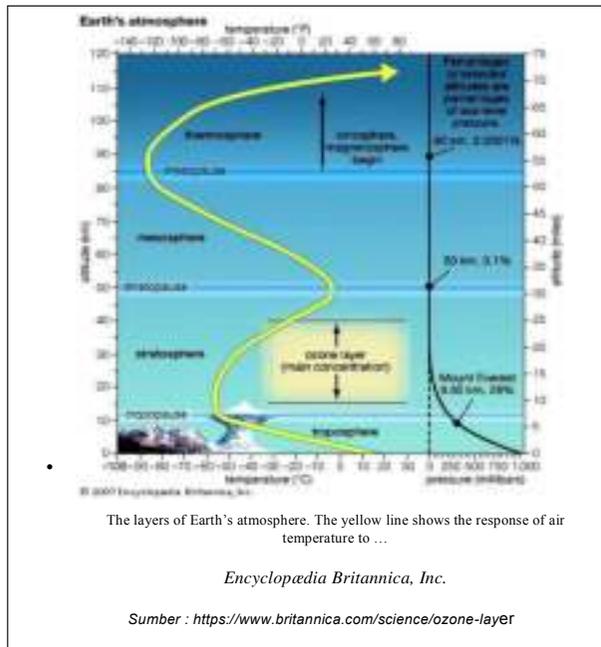


Bergeser menjadi :





**Gambar 4.4. : Diagram intervensi CFC pada Siklus Ozon**



**Gambar 4.5. : Konsentrasi lapisan Ozon di atmosfer**

Penipisan lapisan Ozon memungkinkan lebih banyak sinar *ultraviolet* 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 *ultraviolet*, dalam hal ini akan dapat menimbulkan bencana bagi kehidupan di Bumi.

Bahaya radiasi *ultraviolet* antara lain menimbulkan kanker kulit *melanoma maligna*, juga meniadakan fungsi vaksinasi. Sehingga berbagai penyakit yang telah dapat dihindari dengan vaksinasi, berpotensi untuk tumbuh kembali walau telah divaksinasi, sebagai akibat radiasi *ultraviolet*. Seperti contohnya penyakit-penyakit *TBC, campak, cacar air, herpes, malaria, kusta, infeksi jamur/candidiasis* dan *investasi parasit* seperti *leishmaniasis*. Bahkan radiasi *ultraviolet* juga dapat menyebabkan kebutaan akibat *katarak*.

#### **4.4.2. Protokol Montreal**

Protokol Montreal adalah sebuah perjanjian internasional yang dirancang untuk melindungi lapisan Ozon, dengan pentahapan keluar produksi berbagai zat diyakini bertanggungjawab terhadap penipisan lapisan Ozon. Perjanjian ini merupakan tindak lanjut dari Konvensi Wina (1985), yang merupakan pertemuan internasional pertama yang membahas tentang penipisan lapisan Ozon, dan telah telah diratifikasi oleh 196 negara.

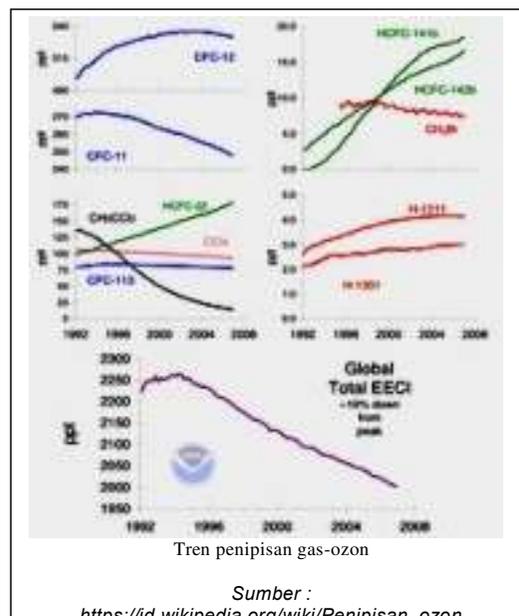
Perjanjian tersebut telah dibuka untuk ditandatangani pada tanggal 16 September 1987, dan diberlakukan pada tanggal 1 Januari 1989, diikuti oleh pertemuan pertama di Helsinki pada bulan Mei 1989. Maka, tanggal 16 September kemudian ditetapkan dan diperingati sebagai "*Hari Ozon Internasional*".

Sejak saat itu, kesepakatan dalam 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.

Protokol Montreal yang bertujuan untuk menyelamatkan lapisan Ozon yang melindungi bumi dari radiasi sinar *ultraviolet*, dengan mengurangi gas-gas yang merusak Ozon (*ODSs-Ozon Deplete*

*Substances*), merupakan produk kesepakatan internasional yang dinilai merupakan suatu sukses besar. Disamping telah diratifikasi oleh 196 negara penandatangan protokol, implementasi dari kesepakatan tersebut juga telah mulai menunjukkan hasil yang positif.

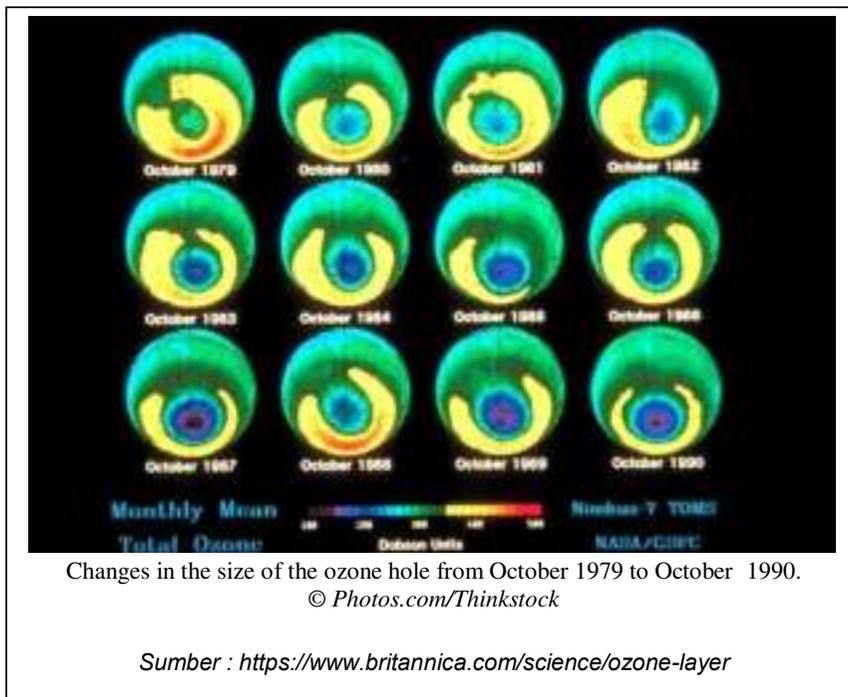
Implementasi Protokol Montreal telah menghasilkan pengurangan emisi ODSs, dimana konsentrasinya di atmosfer secara signifikan telah menurun. Konsentrasi zat ini secara bertahap berhasil dikurangi dari atmosfer, dimana sejak memuncak pada tahun 1994 tingkat *Effective Equivalent Chlorine (EECI)* di atmosfer telah menurun sekitar 10 % pada tahun 2008.



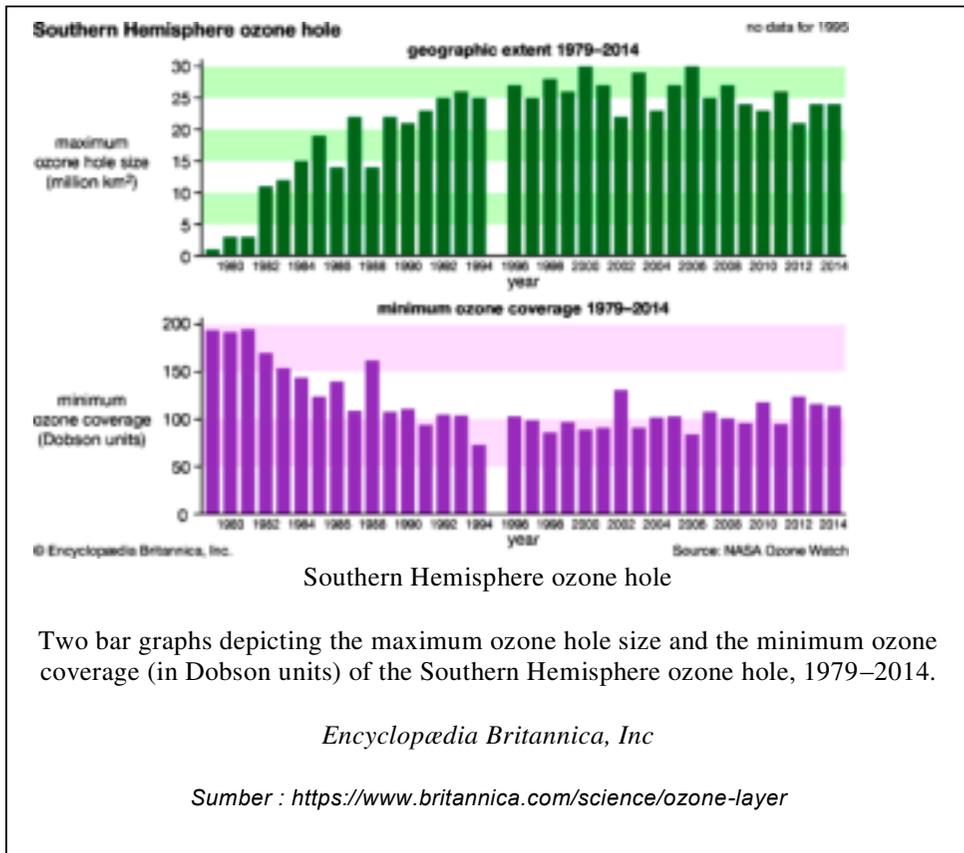
**Gambar 4.6. : Trend pengurangan gas-gas perusak Ozon sampai dengan tahun 2008**

Namun penurunan bahan kimia perusak Ozon juga dipengaruhi secara signifikan oleh penurunan 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. Namun apabila impementasi Protokol Montreal dilaksanakan dengan konsisten, maka penurunan konsentrasi zat perusak Ozon akan dapat memulihkan lapisan Ozon dalam beberapa dekade mendatang. Keberadaan lubang Ozon di Antartika diperkirakan masih tetap akan ada sampai beberapa dekade mendatang. Konsentrasi Ozon di lapisan stratosfer di atas Antartika, yang diperkirakan masih akan meningkat 5-10 % pada tahun 2020, dan akan kembali ke tingkat pra-1980 pada sekitar tahun 2060-2075.



**Gambar 4.7. : Perkembangan lubang Ozon diatas benua Antartika**



**Gambar 4.8. : Grafik perkembangan lubang Ozon di Belahan Bumi Selatan sampai dengan tahun 2014.**



# 5

## Tenaga Air

Tenaga air adalah energi yang diperoleh dari air yang bergerak mengalir. Pada dasarnya, air diseluruh permukaan bumi ini bergerak mengalir, baik melalui siklus hidrologi maupun proses-proses alam lainnya. Dimana dalam siklus hidrologi, air menguap, terkondensasi menjadi awan, jatuh kepermukaan bumi sebagai hujan setelah ia memiliki masa yang cukup, kemudian oleh gaya gravitasi mengalir dipermukaan dari ketinggian sehingga terakumulasi menjadi aliran sungai menuju kelaut.

Dilaut terdapat gerakan aliran air berupa gelombang pasang, ombak, dan arus laut. Gelombang pasang dipengaruhi oleh gravitasi bulan dan matahari, sedangkan ombak digerakkan oleh angin yang berhembus dipermukaan laut, dan arus laut disebabkan oleh perbedaan kerapatan masa jenis air, temperatur dan tekanan, serta rotasi bumi.

Pemanfaatan tenaga air yang umum diperoleh dari pengalihan aliran sungai untuk menggerakkan turbin, yang berfungsi mengubah energi kinetik dari gerakan aliran air menjadi energi mekanik yang dapat menggerakkan generator listrik, sehingga menghasilkan tenaga listrik.

### **5.1. Sejarah Pemanfaatan Tenaga Air**

Tenaga air telah dikenal sejak lama dan dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan, seperti menggiling gandum dan melakukan tugas lainnya. Sedangkan di Indonesia, khususnya Sumatera Barat, tenaga air secara tradisional telah lama digunakan menggerakkan lesung penumbuk padi.



REPLIKA lesung air yang pernah digunakan untuk menumbuk padi sekitar tahun 40-an.

Sumber :

[http://www.kosmo.com.my/kosmo/pix/2012/0929/Kosmo/Varia/va\\_01.2.jpg](http://www.kosmo.com.my/kosmo/pix/2012/0929/Kosmo/Varia/va_01.2.jpg)

**Gambar 5.1. : Replika lesung air penumbuk padi**

Pada pertengahan 1770-an, *Bernard Forest de Bélidor* dari Perancis mempublikasikan bukunya yang berjudul *Architecture Hydraulique*, yang menjelaskan kerja mesin hidrolis sumbu vertikal dan horizontal. Kemudian pada akhir abad ke-19, generator listrik mulai dikembangkan, yang saat ini dapat digabungkan dengan mesin hidrolis.

Pada tahun 1878, pembangkit listrik tenaga air (PLTA) pertama dunia dikembangkan di *Cragside, Northumberland-Inggris* oleh *William George Armstrong*, dimana pembangkit tersebut digunakan untuk menyalakan sebuah lampu busur pada galeri seninya.

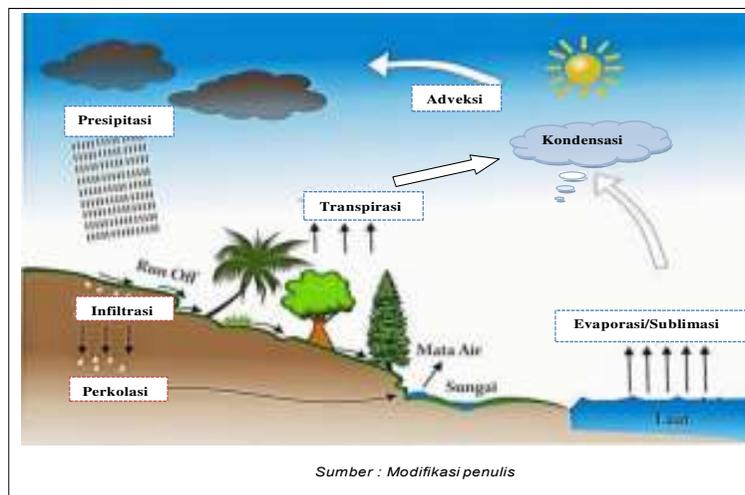
Pada tahun 1881, pembangkit *Schoelkopf No. 1*, dekat air terjun *Niagara* di Amerika Serikat mulai menghasilkan tenaga listrik. Sementara itu PLTA pertama buatan *Edison (Pembangkit Vulcan Street)*, di *Appleton Winconsin-Amerika Serikat*, mulai beroperasi pada 30 September 1882 dengan menghasilkan tenaga listrik sebesar 12,5 KW.

Pembangkit listrik tenaga air semakin berkembang pada abad ke-20. Bendungan PLTA *Hoover (Hoover Dam)*, yang mulai dioperasikan pada tahun 1936, merupakan pembangkit listrik tenaga air terbesar pada saat itu, dengan kapasitas daya pembangkit listrik terpasang sebesar 1 345 MW. Berikutnya Bendungan PLTA *Grand Coulee* dengan

kapasitas 6 809 MW pada tahun 1942, Bendungan PLTA *Itaipu* dengan kapasitas 14 000 MW pada tahun 1984 di Amerika Selatan, dan Bendungan PLTA *Three Gorge* di China dengan kapasitas 22 500 MW. Tenaga air kemudian menjadi sumber pembangkit tenaga listrik utama diberbagai negara, seperti Norwegia (96%), Brazil (63.2%), Kanada (58.3%), dan Venezuela (68.3%).

## 5.2. Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi adalah peredaran air secara umum, dari laut ke atmosfer melalui penguapan (*evaporasi*), kemudian jatuh kepermukaan bumi sebagai hujan (*presipitasi*), sebagian meresap kedalam tanah (*infiltrasi*) dan sebagian lainnya mengalir dipermukaan sebagai limpasan (*run-off*), kemudian berkumpul membentuk aliran sungai yang menuju ke laut.



Gambar 5.2. : Siklus Hidrologi Umum

Tahapan siklus hidrologi selengkapnya meliputi proses-proses *evaporasi*, *transpirasi*, (*evapotranspirasi*), *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 permukaan, 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 kebagian atas atmosfer bumi.

- **Transpirasi.**

Penguapan air dipermukaan 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 air permukaan maupun makhluk hidup, disebut sebagai *evapotranspirasi*.

- **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 yang tinggi dimana terdapat akumulasi es.

- **Kondensasi.**

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

- **Adveksi.**

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

- **Presipitasi.**

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

- **Run Off.**

Bagian dari air hujan yang mengalir di permukaan bumi menuju tempat yang lebih rendah disebut sebagai *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, akan meresap kebawah 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 terkondensasi dari uap air, membeku

membentuk kristal-kristal es, dan mengalami presipitasi sebagai hujan salju. Salju yang mengendap diatas permukaan bumi, akan membeku menjadi bongkahan es yang relatif diam tidak bergerak mengalir. Baru ketika musim dingin berakhir, bongkah-bongkah es tersebut mulai mencair dan bergerak mengalir.

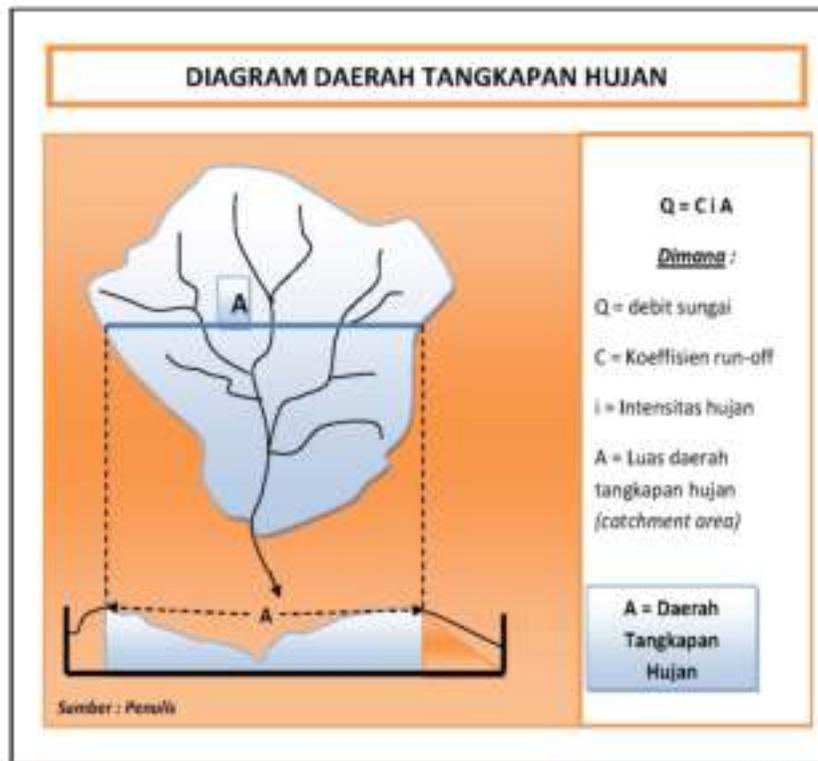
### **5.3. Analisa Hidrologi**

Analisa hidrologi untuk berbagai kepentingan, pada dasarnya adalah menghitung seberapa banyak air yang mengalir di permukaan bumi pada daerah tertentu. Air yang mengalir di permukaan tanah (*run-off*) disebut juga sebagai limpasan, umumnya merupakan bagian dari curah hujan yang jatuh kedalam suatu daerah tangkapan hujan (*catchment area*) di permukaan 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 di permukaan, yang di notasikan sebagai koefisien limpasan (*run-off coefficient*).

#### **5.3.1. 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 tetangganya.

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.

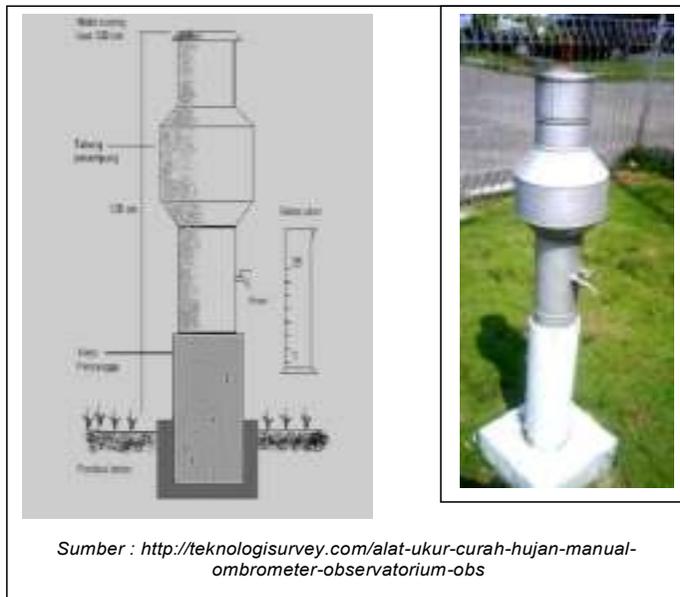


*Gambar 5.3. : Diagram daerah tangkapan hujan (catchment area)*

### **5.3.2. Intensitas Hujan**

Intensitas curah hujan pada daerah tangkapan hujan merupakan salah satu faktor penting yang turut 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 dinotasikan dalam satuan milimeter (mm), adalah identifikasi yang menunjukkan ketebalan air hujan yang terkumpul pada suatu tempat yang datar, tidak menguap, tidak meresap, dan tidak pula mengalir.



**Gambar 5.4. : Ombrometer – alat pengukur curah hujan s manual**



**Gambar 5.5. : Contoh pencatatan intensitas curah hujan rata-rata bulanan dan 10 harian, periode tahun 2001 – 2010, pada pos pencatatan Kaliangget – Jawa Tengah**



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.

### 5.3.3. Koefisien Limpasan (Run off Coefficient)

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

Tabel 5.1. : Koefisien Limpasan untuk jenis2 permukaan lahan

Koefisien Limpasan untuk Metoda Rasional   (McGuen, 1989 dalam Suripin 2003)		
No	Deskripsi Lahan / Karakter Permukaan	Koefisien C
1.	Bisnis	
	• Perkotaan • Pinggiran	0,70 – 0,95 0,50 – 0,70
2.	Perumahan	
	• rumah tunggal	0,30 – 0,50
	• multiburst terpisah, terpisah	0,40 – 0,60
	• multiburst, tergabung	0,60 – 0,75
	• perkampungan • apartemen	0,25 – 0,40 0,50 – 0,70
3.	Industri	
	• ringan • berat	0,50 – 0,80 0,80 – 0,90
	Perkerasan	
	• aspal dan beton • batu bata, paving	0,70 – 0,95 0,50 – 0,70
	Atap	0,75 – 0,95
	Halaman, tanah berpasir	
	datar 2%	0,05 – 0,10
	rata-rata 2 – 7% curam 7%	0,10 – 0,15 0,15 – 0,20
	Halaman tanah berat	
	datar 2%	0,13 – 0,17
	rata-rata 2 – 7% curam 7%	0,18 – 0,22 0,25 – 0,35
	Halaman kereta api	0,10 – 0,35
	Taman tempat bermain	0,20 – 0,35
	Taman, pekuburan	0,10 – 0,25
	Hutan	
	datar, 0 – 5%	0,10 – 0,40
	bergelombang, 5 – 10% berbukit 10 – 30%	0,25 – 0,50 0,30 – 0,60

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

Koefisien limpasan (*run-off coefficient*) 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.

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 yang terbuka 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.

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

#### **5.4. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)**

Potensi tenaga air pada dasarnya merupakan *energi potensial* yang tersimpan dalam massa air, yang selalu beredar mengikuti siklus hidrologi. Oleh gaya gravitasi, massa air bergerak menuruni ketinggian, sehingga *energi potensial* tersebut berubah menjadi *energi*

*kinetik* atau energi gerak. *Energi kinetik* inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan, diantaranya adalah menggerakkan turbin yang kemudian memutar generator untuk membangkitkan tenaga listrik.

Secara sederhana, daya listrik yang dihasilkan dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$P = 9,8 H Q$$

Dimana :

**P** = Daya listrik (kW)

**H** = Tinggi terjun (*head*) atau beda tinggi efektif (meter)

**Q** = Debit air yang mengalir (m<sup>3</sup>/detik)

**9,8** = Koefisien (factor gravitasi, gesekan, efisiensi turbin dsb)

Maka, potensi tenaga air dalam hal ini merupakan fungsi dari debit aliran dan beda tinggi efektif (*head*). Dimana dalam sistem aliran sungai, debit merupakan fungsi dari intensitas curah hujan, luas daerah tangkapan hujan (*catchment area*) dan koefisien limpasan (*run-off coefficient*). Sedangkan tinggi jatuh efektif (*head*) merupakan faktor dari gradien permukaan bumi, atau dapat juga dibentuk secara artifisial dengan membuat bendungan yang tinggi.

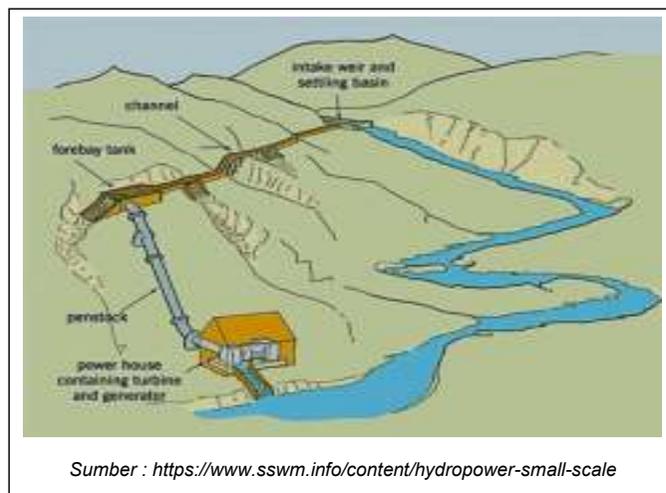
Bagaimanapun, debit aliran sungai tidak tetap sepanjang tahun, namun mengikuti musim, dimana pada daerah ber iklim tropis, debit air sungai akan meningkat pada musim hujan, dan menurun pada musim kering. Sedangkan pada daerah ber iklim sub-tropis, debit air sungai justru meningkat pada musim panas, disebabkan oleh mencairnya es.

Dari sistem pengoperasiannya, pembangkit listrik tenaga air (PLTA) terdiri dari beberapa sistem, yaitu : *Sistem Run-off*, *Sistem Waduk (Reservoir)* dan *Sistem Pump Storage*.

#### **5.4.1. PLTA Sistem Run off**

*PLTA Sistem Run off* adalah PLTA yang sepenuhnya mengandalkan pada debit aliran sungai alamiah. Dalam sistem ini, PLTA hanya dioperasikan manakala debit aliran sungai yang tersedia mencukupi untuk menggerakkan turbin. Oleh karena itu PLTA *Run-*

*off* hanya dapat beroperasi pada kondisi musim tertentu dalam setahun, sesuai dengan disain turbinnya. PLTA *Run-off* dapat beroperasi sepanjang tahun, apabila disain turbin yang digunakan disesuaikan dengan debit minimum tahunan dari aliran sungai. Namun demikian, produksi tenaga listriknya menjadi kurang optimal, oleh karena kelebihan debit air pada musim hujan tidak dapat dimanfaatkan. Maka sistem *Run-off* biasanya hanya diterapkan pada PLTA skala kecil, dengan mengandalkan tinggi terjun (*head*) alamiah, tanpa menggunakan konstruksi bangunan besar dan berat seperti halnya bendungan (*dam*). Bendung kecil (*weir*) dibuat hanya sekedar untuk menaikkan permukaan air sungai, agar dapat dialirkan kedalam saluran pembawa (*headrace channel*), untuk kemudian diterjunkan melalui pipa pesat (*penstock*) dan menggerakkan turbin.



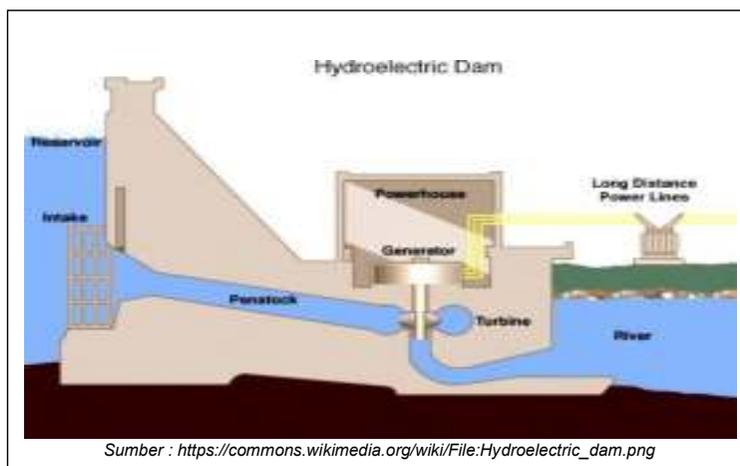
**Gambar 5.7. : Diagram PLTA sistem Run-off**

#### **5.4.2. PLTA Sistem Waduk (Reservoir)**

*PLTA Sistem Waduk* adalah PLTA dengan sistem penampungan air didalam suatu waduk, sebelum dialirkan melalui pipa pesat untuk menggerakkan turbin. Fungsi waduk dalam hal ini adalah sebagai penampung kelebihan air pada saat musim hujan, dimana intensitas curah hujannya tinggi, untuk kemudian dimanfaatkan pada saat musim kemarau dengan intensitas curah hujan yang rendah. Dengan cara ini maka akan dapat diperoleh daya kapasitas daya listrik yang optimal, dan dapat difungsikan pula sebagai pengendali banjir (*flood*

control). Untuk itu diperlukan waduk dengan kapasitas tampung air yang besar, sehingga perlu dibangun bendungan (*dam*) yang besar, yang tentunya dengan biaya yang besar. Maka, seyogyanya PLTA sistem waduk ini, direncanakan untuk kapasitas daya listrik yang besar pula, dan memerlukan kondisi medan yang spesifik.

Tinggi terjun (*head*) dalam sistem waduk ini, dapat diperoleh melalui perbedaan tinggi topografi alamiah atau secara artifisial dengan membangun bendungan yang tinggi. Namun bagaimanapun juga, PLTA sistem waduk memerlukan sarana konstruksi bangunan berat dan stabil, setidaknya berupa bendungan besar dan kuat, yang mampu menampung sejumlah besar masa air didalam waduk. Untuk itu, maka dalam penentuan lokasinya harus mempertimbangkan kondisi topografi dan geologi setempat, untuk memastikan kestabilannya.



Gambar 5.8. : Diagram PLTA sistem Waduk (Reservoir)

### 5.4.3. PLTA Sistem Pump Storage

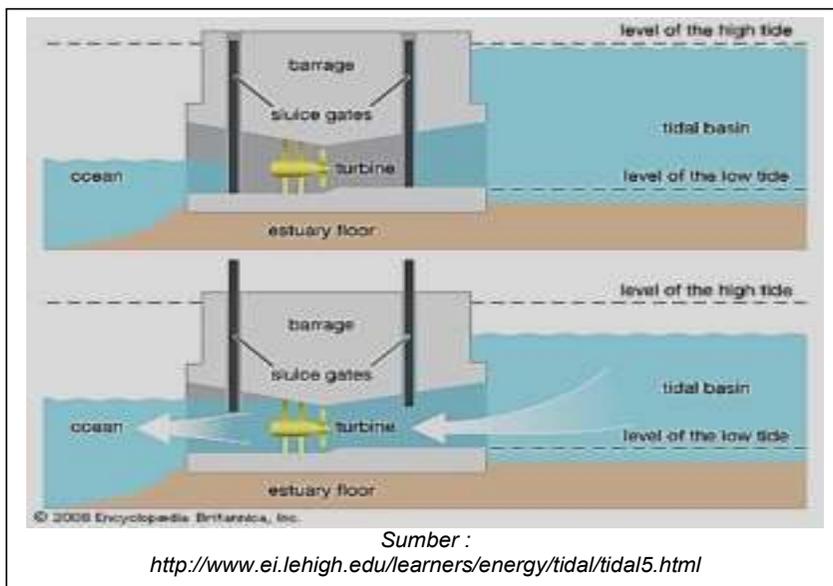
PLTA Sistem *Pump Storage* adalah pembangkit listrik dengan prinsip memompa air ke "waduk atas" saat kelebihan energi, yang kemudian akan digunakan untuk memutar turbin saat kekurangan energi listrik. Maka, PLTA ini hanya dapat dioperasikan dalam suatu sistem kelistrikan yang terpadu. Dimana dalam sistem tersebut, PLTA *pump storage* berfungsi juga sebagai media penyimpanan energi listrik seperti halnya baterai.



Maka, potensi tenaga pasang surut ini hanya akan terdapat pada muara- muara sungai di pantai.

Besarnya daya listrik yang dapat dibangkitkan, dalam hal ini akan tergantung kepada perbedaan tinggi permukaan air saat pasang naik dan pasang surut, dan kapasitas tampung dari “waduk atas”. Dimana perbedaan tinggi antara pasang naik dengan pasang surut, dalam hal ini akan menentukan besarnya tinggi terjun (*head*), sedangkan kapasitas tampung dari “waduk atas” akan menentukan besarnya debit air yang akan menggerakkan turbin.

Perbedaan tinggi yang signifikan dalam hal ini akan terjadi pada Pasang Purnama (*Spring Tide*) saat bulan purnama dan bulan mati, dan pada Pasang Perbani (*Neap Tide*) saat bulan kuartier pertama dan kuartier ketiga. Sementara itu, kapasitas tampung dari “waduk atas” tergantung kepada bentuk morfologi muara sungai.



Gambar 5.10. : Diagan PLTA Pasang Surut (Tidal Power Plant)

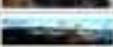
## 5.5. Kendala dan Aspek Lingkungan

Air adalah material cair di bumi yang paling dibutuhkan oleh manusia dan makhluk hidup lainnya, sehingga setiap upaya pengelolaan sumberdaya air, pasti akan berdampak pada berbagai

sektor kehidupan. Sumberdaya air bukan hanya dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan tenaga listrik, namun dibutuhkan pula sebagai sumber air bersih, pengairan dan lain sebagainya. Hal tersebut tentu berpotensi untuk menimbulkan berbagai konflik. Pada sisi lain, berbagai sungai besar di daratan benua mengalir melintasi batas negara, sehingga pengelolaan sumberdaya air, tentu berdampak terhadap politik antar negara pula.

Pengelolaan sumberdaya air untuk pembangkitan tenaga listrik, terutama pada PLTA sistem waduk, setidaknya akan merubah pola tata air yang ada. Terbentuknya genangan waduk, setidaknya akan merubah ekosistem, dari daratan menjadi perairan, yang tak jarang hal tersebut mencakup genangan yang sangat luas.

*Tabel 5.2. : Daftar bendungan di dunia dengan luas genangan melebihi 5 000 km<sup>2</sup>*

Name	Country	Dam	Outflow	Surface area	Ref	Image
				km <sup>2</sup> / mi <sup>2</sup>		
Lake Victoria <sup>1,2,3</sup>	 Kenya Tanzania Uganda	Owera Falls Dam	White Nile	66,400 / 25,600	[3]	
Inchek Reservoir-Lake Indragiri <sup>1,2</sup>	 Korea	Inchek Dam	Angara River	32,000 / 12,000	[3]	
Lake Winam <sup>1,2</sup>	 Canada	James Bay Dam	Nelson River	24,420 / 9,430	[3]	
Lake Volta	 Ghana	Akanmaha Dam	Volta River	8,500 / 3,300	[3]	
Smithand Reservoir	 Canada	Multiple	Churchill River	6,527 / 2,520	[3]	
Reservoir-Lake <sup>1,2</sup>	 Canada	Whitemud Dam	Red Deer River	6,500 / 2,500	[3]	
Kurbuk Reservoir	 Korea	Chicoll Dam	Yalu River	6,450 / 2,490	[3]	
Lake Kariba	 Zambia Zimbabwe	Kariba Dam	Zambesi River	5,580 / 2,150	[3]	
Bukharna Reservoir <sup>1,2</sup>	 Kazakhstan	Bukharna Dam	Irtish River	5,490 / 2,120	[3]	
Bratsk Reservoir	 Russia	Bratsk Dam	Angara River	5,470 / 2,110	[3]	
Lake Nasser	 Egypt	Assuan Dam	Nile	5,200 / 2,000	[3]	

Source: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_reservoirs\\_by\\_surface\\_area](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_reservoirs_by_surface_area)

Walaupun pembangunan suatu PLTA memerlukan biaya yang mahal, namun biaya produksi tenaga listriknya cukup rendah, oleh karena hanya memerlukan debit aliran air, yang secara alamiah bersifat terbarukan (*renewable*). Praktis pembangkitan listrik tenaga air tidak menimbulkan emisi CO<sub>2</sub> ataupun gas-gas lainnya, oleh karena tidak melalui proses pembakaran.

Namun demikian operasi PLTA rentan terhadap perubahan iklim yang tak terduga. Iklim kering yang ekstrim dapat berakibat pada berhentinya operasi pembangkit. Sementara itu musim dengan curah hujan yang ekstrim tinggi, dapat mengakibatkan pasokan air yang berlebihan sehingga melampaui kapasitas waduk. Bagaimanapun, akumulasi sejumlah besar masa air dalam waduk menyimpan potensi bencana besar manakala bendungannya runtuh.

**Tabel 5.3. : Daftar keruntuhan bendungan yang menimbulkan kerugian besar**

History of Dam Failure					
Dam/Reservoir	Location	Type	Year	Main reason	Death toll/Cost
Taum Sauk	USA	Concrete	2005	Overtopping	Damage avoided
Big Bay Dam	USA	Earthen	2004	N/A	100 homes destroyed
Folsom Dam	USA	Concrete	1995	Spillway	Damage avoided
Val di Stava Dam	Italy	Earthen	1985	Improper maintenance/ Design	268 people, €155 million in damage
Tous Dam	Spain	Rock-filled	1982	Insufficient spillway	20 people
Morvi River Dam	India	Earthen	1979	Overtopping	15,000 people
Laurel Run Dam	USA	Earthen	1977	Overtopping	40 ppl, \$5.3 million
Kelly Barnes Dam	USA	Embankment Earthen	1977	Piping	39 ppl, \$2.5 million
Teton Dam	USA	Earthen	1976	Foundation	14 ppl/ \$1 billion in property damage
Bangqao Dam	China	Embankment	1975	Overtopping	200,000 people
Baldwin Hills	USA	Earthen	1963	Ground movement from oil extraction	5 people
Maupassant Dam	France	Concrete Arch	1959	Overtopping/ foundation	450 people
St. Francis Dam	USA	Concrete Arch	1928	Foundation	450 people
Austin Dam	USA	Concrete	1911	Foundation	87 people

Sumber : <https://civil-engg-world.blogspot.co.id/2011/04/history-of-dam-failure.html>

## 5.6. Potensi Tenaga Air Dunia

Negara-negara daratan benua yang dilalui oleh sungai besar merupakan daerah yang memiliki potensi tenaga air besar. Bahkan beberapa negara benua memasok sebagian besar kebutuhan tenaga listriknya dari tenaga air, seperti Norwegia (96%), Venezuela (68.3%), Brazil (63.2 %), dan Kanada (58.3%), sementara Cina adalah produsen listrik tenaga air terbesar.

Bagaimanapun faktor yang menentukan besarnya potensi tenaga air adalah debit aliran air yang mengalir pada suatu sungai. Sedangkan besarnya debit aliran sungai merupakan fungsi dari intensitas curah hujan, dan luas daerah aliran sungai (*drainage area*) atau daerah tangkapan hujannya (*catchment area*).

Tabel 5.4. : Sungai2 besar dunia, dengan panjang, drainage area dan debit rata2nya.

No	River	Length (km)	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Average discharge (m <sup>3</sup> /sec)	Outflow	Countries in the drainage basin
1.	<a href="#">Amazon-Paraná-Aparimé</a>	6.992 (6.400)	7.050.000	209.000	Atlantic Ocean	Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela, Guyana, Suriname, Guiana, French Guiana, Suriname, Guiana, French Guiana
2.	<a href="#">Nile-Nubian<sup>2</sup> 2</a>	6.893 (6.490)	3.344.000	1.000	Mediterranean	Egypt, Sudan, Ethiopia, Democratic Republic of the Congo, South Sudan
3.	<a href="#">Yangtze (I Ching, Yang, Long River)</a>	6.300 (6.410)	3.300.000	11.000	East China Sea	China
4.	<a href="#">Mississippi-Missouri-Jefferson</a>	6.270	3.200.000	16.000	Gulf of Mexico	United States (90.7%), Canada (1.3%)
5.	<a href="#">Yanisei-Angara-Ekitana</a>	5.700	2.700.000	10.000	Arctic Sea	Russia (97%), Mongolia (3.0%)
6.	<a href="#">Yellow River (Huang He)</a>	5.464	1.410.000	1.110	Bohai Sea	China
7.	<a href="#">Cry-Argh</a>	5.400	3.000.000	12.000	Gulf of Ok	Russia, Kazakhstan, China, Mongolia
8.	<a href="#">Paraná-Rio de la Plata</a>	4.900	3.000.000	10.000	Rio de la Plata	Brazil (48.7%), Argentina (27.5%), Paraguay (12.5%), Bolivia (8.3%), Uruguay (3.0%)
9.	<a href="#">Congo-Chambali (Zaire)</a>	4.700	3.000.000	41.000	Atlantic Ocean	Democratic Republic of the Congo, Central African Republic, Angola, Republic of the Congo, Gabon, Equatorial Guinea, Cameroon, Zambia, Democratic Republic of the Congo
10.	<a href="#">Jantou-Argh (Huang He)</a>	4.644	3.000.000	11.400	Sea of Okhotsk	Russia, China, Mongolia
11.	<a href="#">Lena</a>	4.400	3.000.000	17.000	Laptev Sea	Russia
12.	<a href="#">Mekong (Lancang Yang)</a>	4.370	810.000	14.000	South China Sea	China, Myanmar, Laos, Thailand, Cambodia, Vietnam

Source: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_rivers\\_by\\_length](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rivers_by_length)

Tabel 5.5. : 10 negara produsen listrik tenaga air terbesar dunia

Country	Annual hydroelectric production (TWh)	Installed capacity (GW)	Capacity factor	% of total production
 China	1064	311	0.37	18.7%
 Canada	383	76	0.59	58.3%
 Brazil	373	89	0.56	63.2%
 United States	282	102	0.42	6.5%
 Russia	177	51	0.42	16.7%
 India	132	40	0.43	10.2%
 Norway	129	31	0.49	96.0%
 Japan	87	50	0.37	8.4%
 Venezuela	87	13	0.67	68.3%
 Iran	69	25	0.46	12.2%

Sumber : <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectricity>

## 5.7. Potensi Tenaga Air Indonesia

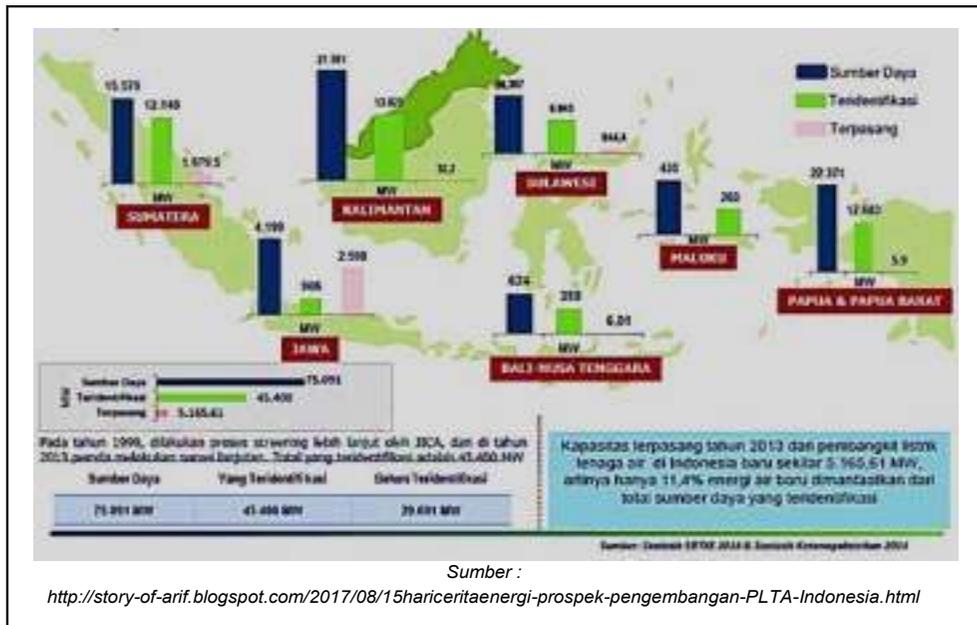
Kondisi iklim tropis yang basah, dengan curah hujan rata-rata mencapai 2500 mm/tahun, merupakan kondisi yang menunjukkan adanya potensi tenaga air yang cukup menjanjikan. Potensi tenaga air di Indonesia menurut hasil *Hydro Power Potential Study (HPPS)* pada tahun 1983 adalah sebesar 75.000 MW, dan angka ini dipertegas kembali pada *Hydro power inventory study* pada tahun 1993.

Tabel 5.6. : Potensi tenaga air di Indonesia

POTENSI TENAGA AIR		
NO	PULAU	POTENSI (MW)
1	Sumsatra	15.600
2	Jawa	4.200
3	Kalimantan	21.600
4	Sulawesi	10.200
5	Bali, NTT, NTB	620
6	Maluku	430
7	Papua	22.350
TOTAL		75.000

Sumber : Statistik EBRK, Ditjen Energi Nara Terbarukan dan Konservasi Energi  
 Status Data 2020  
 Status Update : 10 Maret 2021

Namun dalam laporan *Master Plan Study for Hydro Power Development in Indonesia* pada tahun 2011, potensi tenaga air ini di pilah-pilah lebih lanjut, sehingga diperoleh angka sebesar 26 321 MW, yang terdiri dari proyek yang sudah beroperasi (4 338 MW), proyek yang sudah direncanakan dan sedang dalam proses konstruksi (5 956 MW) dan potensi baru (16 027 MW).



**Gambar 5.11. : Status dan sebaran PLTA Indonesia berdasarkan data statistik (2014)**

Berdasarkan data yang dimiliki Kementerian ESDM, potensi tenaga air Indonesia cukup besar yaitu mencapai 75000 MW. Potensi sumber energi tenaga air tersebut tersebar diseluruh pulau-pulau, terutama pulau-pulau besar, yaitu sebesar 15 600 MW di Sumatera, 4 200 MW di Jawa, 21 600 di Kalimantan, 10 200 MW di Sulawesi, 620 MW di Bali-NTT-NTB, 430 MW di Maluku dan 22 350 MW di Papua. Namun demikian, lokasi berpotensi tersebut umumnya terletak jauh dari lokasi pusat beban, sehingga diperlukan jaringan transmisi yang cukup panjang untuk dapat memanfaatkannya. Disamping itu, kebutuhan air untuk kepentingan lain yang lebih penting, seperti pasokan air bersih / air minum dan irigasi, menyebabkan potensi tenaga air tersebut kurang dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Pengembangan PLTA di Indonesia telah berjalan cukup lama. Tercatat PLTA Ubrug di Sukabumi – Jawa Barat, merupakan PLTA tertua dan telah dioperasikan sejak tahun 1918.

**Berikut adalah daftar PLTA yang telah beroperasi di Indonesia :**

**- Pulau Jawa.**

- PLTA Ubrug, berada di Jawa Barat yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 17,1 MW.
- PLTA Cibadak, berada di Jawa Barat
- PLTA Cikalong, berada di kecamatan Pangalengan, kabupaten Bandung, Jawa Barat yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 19,2 MW.
- PLTA Saguling, berada di Jawa Barat yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 700 MW.
- PLTA Cirata, berada di Jawa Barat yang mempunyai total 8 unit dengan kapasitas 1.008 MW.
- PLTA Jatiluhur, berada di Jawa Barat yang mempunyai total 7 unit dengan kapasitas 175 MW.
- PLTA Lamajan, berada di kecamatan Pangalengan, kabupaten Bandung, Jawa Barat yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 19,2 MW.
- PLTA Parakan Kondang, berada di Jawa Barat yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 9,92 MW.
- PLTA Jelok, berada di kecamatan Tuntang, kabupaten Semarang, Jawa Tengah yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 20,48 MW.
- PLTA Timo, berada di kecamatan Pringapus, kabupaten Semarang, Jawa Tengah yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 12 MW.
- PLTA Ketenger, berada di kecamatan Baturraden, kabupaten Banyumas, Jawa Tengah yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 7 MW.
- PLTA Gajah Mungkur, berada di kecamatan Wonogiri, kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 12,4 MW.

- PLTA Sempor, berada di kecamatan Sempor, kabupaten Kebumen, Jawa Tengah yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 25 MW.
- PLTA Pejengkolan, berada di kecamatan Padureso, kabupaten Kebumen, Jawa Tengah yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 15 MW.
- PLTA Wadaslintang, berada di kecamatan Padureso, kabupaten Kebumen, Jawa Tengah yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 16,4 MW.
- PLTA Garung, berada di kecamatan Garung, kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 26,4 MW.
- PLTA Mrica, berada di kecamatan Bawang, kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 184,5 MW.
- PLTA Kedung Ombo, berada di kecamatan Geyer, kabupaten Grobogan, Jawa Tengah yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 23 MW.
- PLTA Sidorejo, berada di kecamatan Geyer, kabupaten Grobogan, Jawa Tengah yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 1,4 MW.
- PLTA Klambu, berada di kecamatan Klambu, kabupaten Grobogan, Jawa Tengah yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 1,1 MW.
- PLTA Mendalan, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 23 MW.
- PLTA Siman, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 10,8 MW.
- PLTA Giringan, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 3 MW.
- PLTA Selorejo, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 4,48 MW.
- PLTA Karangates, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 105 MW.
- PLTA Wlingi, berada di Jawa Timur yang mempunyai total

2 unit dengan kapasitas 54 MW.

- PLTA Lodoyo, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 4,5 MW.
- PLTA Sengguruh, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 29 MW.
- PLTA Tulung Agung, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 46 MW.
- PLTA Tulis, berada di Jawa Timur yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 14 MW.

- *Pulau Sumatera.*

- PLTA Peusangan, berada di kecamatan Silih Nara, kabupaten Aceh Tengah, Aceh yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 86,6 MW.
- PLTA Sigura-gura, berada di kecamatan Pintu Pohan Meranti, kabupaten Toba Samosir, Sumatera Utara yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 286 MW.
- PLTA Tangga, berada di kecamatan Pintu Pohan Meranti, kabupaten Toba Samosir, Sumatera Utara yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 317 MW.
- PLTA Sipansihaporas, berada di Sumatera Utara yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 50 MW.
- PLTA Asahan 1, berada di Sumatera Utara yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 180 MW.
- PLTA Batang Agam, berada di Sumatera Barat yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 10,5 MW.
- PLTA Maninjau, berada di Sumatera Barat yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 68 MW.
- PLTA Singkarak, berada di kecamatan Lubuk Alung, kabupaten Padang Pariaman, Sumatera Barat yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 175 MW.
- PLTA Tes, berada di Bengkulu yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 16 MW.
- PLTA Musi, berada di Bengkulu yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 210 MW.

- PLTA Koto Panjang, berada di Riau yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 114 MW.
  - PLTA Besai, berada di Lampung yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 90 MW.
  - PLTA Batuteги, berada di Lampung yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 28 MW.
- **Pulau Kalimantan.**
- PLTA Riam Kanan, berada di kecamatan Aranio, kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 30 MW.
- **Pulau Sulawesi.**
- PLTA Tonsea Lama, berada di kecamatan Tondano Utara, kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 14,38 MW.
  - PLTA Tanggari I, berada di kecamatan Tondano Utara, kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 17,2 MW.
  - PLTA Tanggari II, berada di kecamatan Tondano Utara, kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara yang mempunyai total 1 unit dengan kapasitas 19 MW.
  - PLTA Larona, berada di Sulawesi Selatan yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 165 MW.
  - PLTA Balambano, berada di Sulawesi Selatan yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 130 MW.
  - PLTA Karebbe, berada di Sulawesi Selatan yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 140 MW.
  - PLTA Bakaruu, berada di Sulawesi Selatan yang mempunyai total 2 unit dengan kapasitas 126 MW.
  - PLTA Sulewana-Poso I, berada di kecamatan Pamona Utara, kabupaten Poso, Sulawesi Tengah yang mempunyai total 4 unit dengan kapasitas 160 MW.
  - PLTA Sulewana-Poso II, berada di kecamatan Pamona Utara, kabupaten Poso, Sulawesi Tengah yang mempunyai total 3 unit dengan kapasitas 195 MW.

- PLTA Sulewana-Poso III, berada di kecamatan Pamona Utara, kabupaten Poso, Sulawesi Tengah yang mempunyai total 5 unit dengan kapasitas 400 MW.
- Papua.
- PLTA Genyem berkapasitas 20 MW memiliki 2 unit
  - PLTA Baliem di Wamena berkapasitas 50 MW

Selain PLTA diatas, secara tersebar masih banyak lagi pembangkit listrik tenaga air yang di operasikan dalam skala kecil, yang di kategorikan sebagai PLTM (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro).

# 6

## Tenaga Panas Bumi (*Geothermal*)

Pemanfaatan energi panas bumi telah dikenal manusia sejak lama, walaupun pada awalnya hanya dimanfaatkan secara sederhana untuk memenuhi berbagai kebutuhan, seperti pasokan air panas, mencairkan salju dan menghangatkan ruangan terutama pada daerah-daerah yang bermusim dingin. Namun pada perkembangannya, energi panas bumi kemudian lebih banyak dimanfaatkan untuk pembangkitan tenaga listrik, yang disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP).

### 6.1. Sejarah Teknologi Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi



**Gambar 6.1.** Generator listrik tenaga uap panas bumi pertama di Lardelero

Walaupun energi panas bumi telah dikenal lama sejak awal peradaban manusia, pemanfaatan secara intensif baru dilakukan mulai awal abad ke 20, sejalan dengan ditemukannya teknologi tenaga listrik pada abad sebelumnya. Meningkatnya permintaan akan tenaga listrik menjadikan potensi tenaga panas bumi dipertimbangkan sebagai salah satu alternatif penyediaan tenaga listrik.

Penggunaan pertama energi panas bumi untuk pembangkit listrik dimulai pada awal abad ke-20. Dimana pada tahun 1904 dibangun pembangkit listrik tenaga panas bumi pertama di Larderello, Italia. Diawali dengan upaya *Pangeran Piero Ginori Conti*, yang menguji coba pembangkit listrik tenaga panas bumi pertama, pada tanggal 4 Juli 1904 di *Larderello-Italia*, dimana berhasil menyalakan empat buah bola lampu. Berikutnya pada tahun 1911 pembangkit listrik tenaga panas bumi komersial pertama dibangun pada lokasi tersebut, dan mulai beroperasi pada tahun 1913 untuk menghasilkan listrik sebesar 250 kW. Kemudian pada tahun 1915 kapasitas kemampuannya ditingkatkan menjadi 15 MW. Walaupun sempat hancur pada masa perang dunia II, pembangkit *Lardareello* dibangun dan beroperasi kembali untuk dapat menghasilkan tenaga listrik sebesar 545 MW, atau setara dengan 1,6% kebutuhan listrik Italia.

Pembangkit-pembangkit uji coba lainnya, juga dibangun di *Beppu-Jepang* dan *California- Amerika Serikat* pada tahun 1920, namun sampai dengan tahun 1958, Italia adalah satu- satunya negara yang memiliki industri pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Selandia Baru (1958) menjadi penghasil listrik tenaga panas bumi terbesar kedua setelah pembangkit listrik tenaga panas bumi *Wairakei* dioperasikan. *Wairakei* merupakan pembangkit pertama yang menggunakan teknologi *flash steam*.

Pada tahun 1960, *Pacific Gas and Electric* mulai mengoperasikan pembangkit listrik tenaga panas bumi pertama di Amerika Serikat di *The Geysers-California*, dimana turbin aslinya bertahan hingga 30 tahun dan menghasilkan daya bersih 11 MW.

Pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan sistem siklus biner pertama kali diuji coba di Rusia, dan diperkenalkan di Amerika Serikat pada tahun 1981, untuk mengatasi krisis energi yang terjadi pada tahun 1970-an, dimana teknologi ini memungkinkan penggunaan sumber panas yang bersuhu lebih rendah. Pada tahun 2006, pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan sistem siklus biner mata air panas *Chena-Alaska* di Amerika Serikat mulai beroperasi, dan dapat menghasilkan tenaga listrik dari sumber dengan suhu rendah, yaitu 57 °C.

Pengembangan pembangkit dengan sistem siklus biner dan peningkatan dalam teknologi pemboran memungkinkan pengembangan sistem panas bumi yang ditingkatkan (*Enhanced Geothermal Systems*) dalam rentang geografis yang lebih besar. Proyek demonstrasi yang sudah beroperasi telah dapat ditunjukkan di *Landau-Pfalz*-Jerman, dan *Soultz-sous-Forêts*- Perancis.

Di Uni Soviet, *hydraulic fracturing* yang disebut juga sebagai teknologi *fracking*, pertama kali dilakukan pada 1952. Walaupun percobaan awal di Basel-Swiss, terpaksa dibatalkan oleh karena diduga memicu terjadinya gempa bumi, berikutnya proyek-proyek pada tingkat demonstrasi, juga dilakukan di Australia, Inggris, dan Amerika Serikat. Negara-negara lain di Eropa dan Afrika Utara yang kemudian menerapkan teknik ini antara lain Norwegia, Polandia, Republik Ceko, Yugoslavia, Hungaria, Austria, Perancis, Italia, Bulgaria, Rumania, Turki, Tunisia, dan Aljazair. Berikutnya, sejak tahun 2013, *hydraulic fracturing* secara masal diterapkan dalam skala ekonomis di Amerika, Kanada, dan Cina.

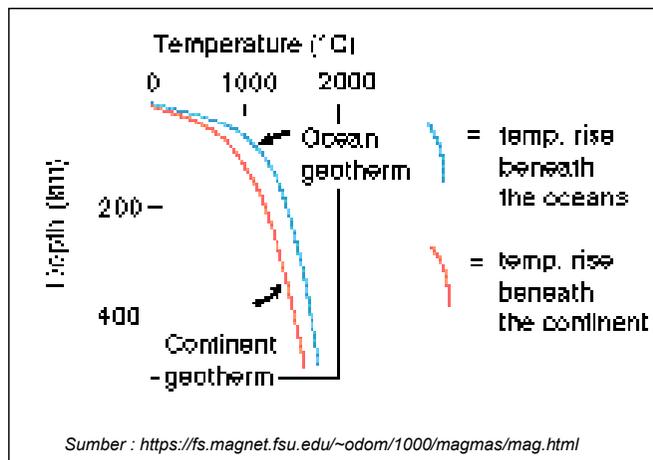
Pemanfaatan energi panas bumi untuk pembangkitan tenaga listrik menjadi semakin menarik, salah satunya oleh karena pasokan energinya yang stabil, tidak berubah ubah seperti halnya energi angin ataupun surya, sehingga faktor kapasitasnya (*capacity factor*) dapat dirancang cukup besar. Rata-rata faktor kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah 74,5% (*IPCC, 2008*), bahkan pernah ditunjukkan dapat mencapai 96%.

## **6.2. Potensi Energi Panas Bumi**

Sumber utama panas bumi berasal dari inti bumi yang diperkirakan masih memiliki suhu mencapai  $6000^{\circ}\text{C}$ , atau setara dengan panas permukaan matahari. Panas tersebut merupakan sisa dari proses awal pembentukan planet bumi, peluruhan berbagai kandungan unsur radioaktif didalamnya, dan gesekan-gesekan pada lapisan kerak bumi.

Permukaan bumipun pada mulanya memiliki panas yang sangat tinggi, namun dengan berjalannya waktu, permukaan bumi mendingin dan mengeras, dan akhirnya tinggal bagian dalam bumi saja, yang diantaranya berupa cairan mantel dan inti bumi, yang masih panas dan menjadi sumber energi panas bumi.

Secara termodinamika, panas inti bumi menyebar keluar dan berpindah (*heat transfer*) dan memanaskan lapisan di atasnya yang lebih dingin, baik secara konveksi maupun konduksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi pada masa padat bebatuan, yang dapat mengakibatkan pelelehan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi pada masa cair, yaitu pada lapisan mantel. Di atas lapisan mantel terdapat lapisan kerak bumi atau lithosfer, yang terdiri dari lempengan-lempengan seperti kulit telur yang saling bertumpuk. Lempengan ini, yang disebut sebagai lempeng tektonik, terus bergerak membentuk permukaan bumi seperti benua, palung dan pegunungan. Panas pada mantel yang terpindahkan secara konveksi inilah yang kemudian memanaskan lapisan kerak bumi.



**Gambar 6.2. : Grafik gradien panas bumi untuk kerak samudera dan kerak benua**

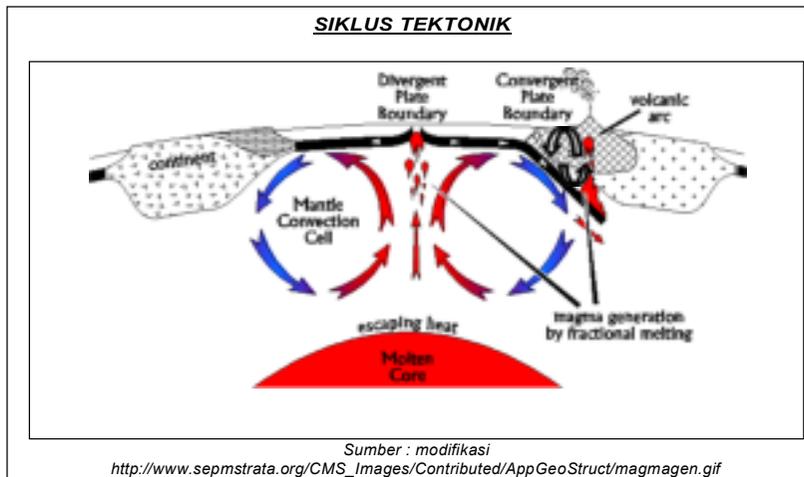
Semakin dalam masuk kedalam bumi, semakin mendekati sumber panas, maka temperatur kerak bumi semakin meningkat pula. Secara umum, setiap penurunan 1 km kedalam perut bumi temperatur akan naik sebesar 25 - 30<sup>o</sup> C, atau sekitar 2,5 sampai 3<sup>o</sup> C untuk setiap peningkatan kedalaman 100 meter, walaupun untuk tempat-tempat tertentu di sekitar daerah vulkanik gradiennya dapat lebih besar, dengan variasi 1 - 25<sup>o</sup>C / 100 m. Sehingga semakin jauh ke dalam perut bumi temperatur batuan akan semakin meningkat. Pertambahan panas tersebut dikenal sebagai gradien panas bumi atau gradien

geothermal, dimana gradien panas bumi pada kerak samudera sedikit lebih tinggi daripada pada kerak benua, disebabkan oleh komposisi kandungan logamnya yang berbeda.

### 6.2.1. Sumber Energi Panas Bumi

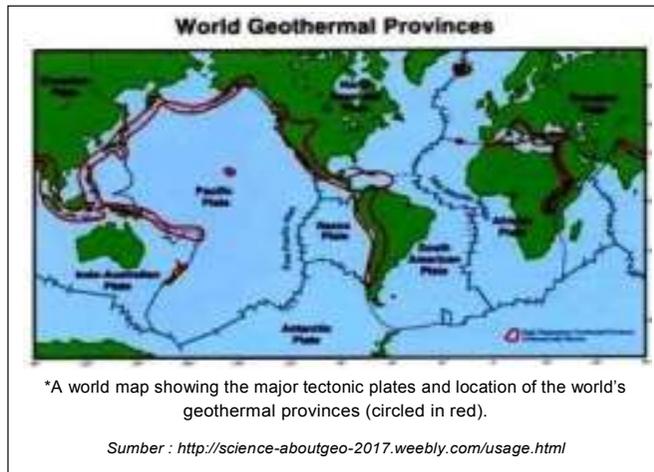
Walaupun inti bumi beserta lapisan mantel yang menyelimutinya merupakan sumber energi panas yang nyaris tak terbatas, lapisan kerak bumi yang tebal telah membatasinya sehingga hanya sebagian kecil saja yang tersalurkan ke permukaan bumi.

Namun demikian, pergerakan kerak bumi menimbulkan rekahan dan bukaan-bukaan lainnya yang memungkinkan magma sebagai cairan mantel dapat menerobos mendekati bahkan keluar ke permukaan bumi keluar. Magma yang menerobos kerak bumi, bertemu dengan fluida atau material lainnya, sehingga terjadi transfer panas, dan sumber panas inilah yang kemudian dapat di-eksploitasi sebagai sumber energi panas bumi.



Gambar 6.3. : Diagram aliran panas, yang mendekati dan menerobos permukaan bumi.

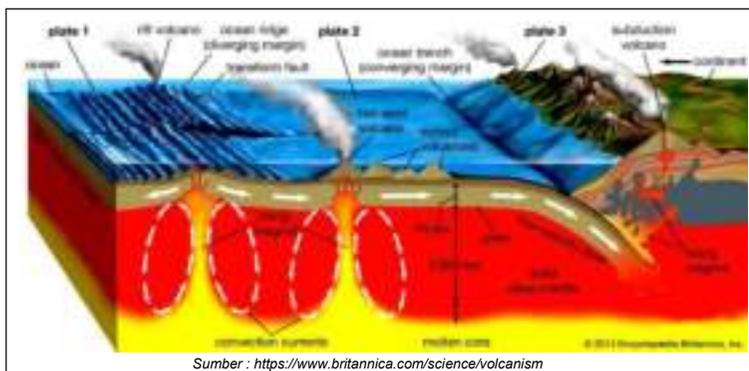
Maka, wilayah-wilyah yang potensial untuk eksploitasi energi panas bumi, hampir selalu berhubungan dengan batas-batas lempeng kerak bumi, dimana terbuka celah-celah yang memungkinkan cairan mantel yang panas bergerak mendekati dan menerobos permukaan bumi.



*Gambar 6.4. : Peta wilayah-wilayah potensial panas bumi dunia*

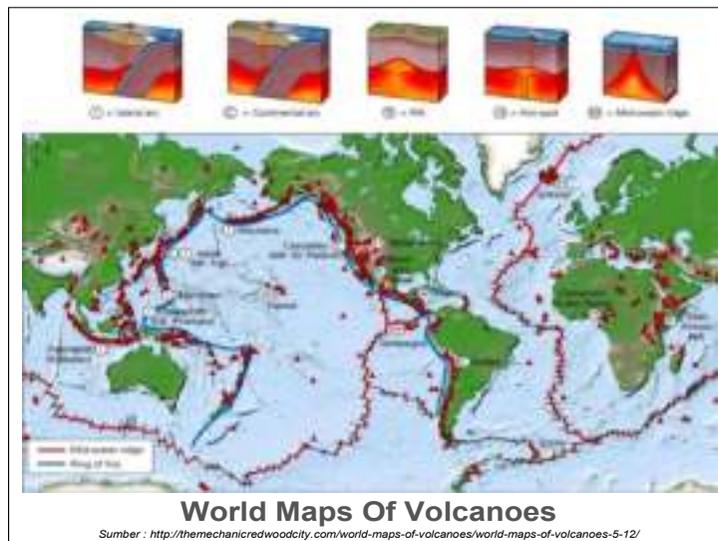
### **6.2.2. Panas Bumi dan Vulkanologi**

Aktivitas gunung api adalah suatu proses dimana cairan magma dari dalam perut bumi naik menerobos kerak bumi hingga keluar ke permukaan bumi, baik secara mengalir atau eksplosif. Peristiwa tersebut dapat terjadi manakala terdapat celah terbuka, atau adanya tekanan yang besar yang mendesaknya keluar. Magma itu sendiri dapat berasal dari cairan panas mantel di bawah kerak bumi, atau dapat juga berasal dari kerak bumi yang meleleh dan mencair oleh sebab temperatur yang sangat tinggi. Maka keberadaan gunung api erat kaitannya dengan sumber panas bumi, oleh karena berhubungan dengan terobosan magma panas yang mendekati atau bahkan keluar dari permukaan bumi.



*Gambar 6.5. : Sketsa proses pembentukan gunung api*

Bagaimanapun, ada saling keterkaitan antara aktivitas gunung api dan fenomena panas bumi, dengan proses interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi, walaupun sumber panas bumi tidak selalu terkait dengan gunung api aktif. Sumber panas bumi yang terdapat jauh didalam perut bumi, dapat terangkat keluar melalui celah-celah bukaan yang terbentuk pada sekitar batas-batas lempeng kerak bumi. Maka pada daerah-daerah ini pulalah potensi energi panas bumi berpeluang untuk didaya gunakan.



**Gambar 6.6. : Peta Gunung Api dunia, menggambarkan hubungan antara batas lempeng kerak bumi dengan sebaran gunung api dan titik-titik panas (hot spot)**

Pada batas atau pergerakan divergen lempeng-lempeng tektonik, dimana kerak bumi mengalami regangan atau *tension* yang membentuk rekahan atau celah-celah terbuka, memungkinkan magma mengalir keluar kepermukaan bumi. Hal ini membentuk fenomena aktivitas gunung api (*rift volcano*), dengan karakter effusif, yaitu dimana magma keluar kepermukaan bumi dalam bentuk aliran lava. Sedangkan pada batas konvergen, lempeng samudera yang teguh menunjam kebawah masuk kedalam mantel yang sangat panas, sehingga meleleh dan mencair menjadi magma. Tekanan yang tinggi dari konvergensi diantara lempeng-lempeng tektonik mendorong magma kepermukaan sehingga menimbulkan aktivitas gunung api (*subduction volcano*), dengan ciri erupsi yang eksplosif.

### 6.2.3. Sistem Panas Bumi

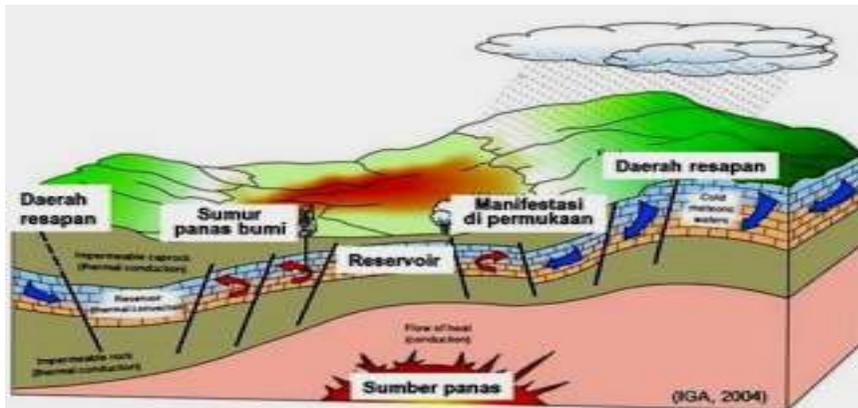
Sistem panas bumi (*geothermal system*) secara umum diartikan sebagai sistem penghantaran panas di dalam mantel dan kerak bumi, dimana panas dihantarkan dari suatu sumber panas menuju suatu tempat penampungan panas. Dalam hal ini, panas merambat dari dalam bumi mendekati permukaan bumi sebagai tempat penampungan panas.

Proses penghantaran panas pada sistem panas bumi melibatkan fluida thermal yang dapat berupa batuan yang meleleh, gas, uap, air panas, dan lain-lain. Dalam perjalanannya, fluida thermal yang berupa uap dan atau air panas dapat terakumulasi dalam suatu formasi batuan penampung yang berada diantara sumber panas dan permukaan bumi. Formasi batuan inilah yang selanjutnya disebut sebagai reservoir panas bumi.

Ada beberapa jenis sistem panas bumi, namun sistem hidrothermal yang paling banyak dimanfaatkan hingga saat ini, yaitu sistem panas bumi yang terpengaruh kuat oleh adanya uap dan atau air panas. Sistem ini biasanya berasosiasi dengan aktivitas vulkanik atau gunung api disekitarnya, sehingga disebut juga sebagai sistem vulkanik hidrotermal (*volcanic hydrothermal system*), dimana fluida magmatik gunung api lebih mendominasinya.

M T Zen (1973) membagi lapangan panas bumi dalam 3 type, didasarkan pada proses genesa pembentukan fluida panas buminya, yaitu :

- *Type Lardellerro*, dimana sumber panas berasal dari badan magma, baik berupa *batholith*, *lacolith* ataupun yang lainnya, yang menerobos kerak bumi sampai dengan kedalaman yang tak terlalu dalam dari permukaan. Namun demikian, terobosan tersebut tidak terkait langsung dengan permukaan.
- *Type Mt Amiata*, dimana sumber panas berasal dari aktivitas gunung api masa lalu (*pliosen-kwarter*), yang saat ini tidak aktif (*dormant*).
- *Type Wairake*, dimana sumber panas berasal dari gunung api yang masih aktif.



Gambar 6.7. : Contoh diagram model panas bumi (Dickson & Fanelli, 2004)

Pemanfaatan energi panas bumi utama pada saat ini, adalah untuk kepentingan pembangkitan tenaga listrik, yang berbasis teknologi mesin uap. Maka, disamping sumber panas, identifikasi keberadaan uap panas bertekanan menjadi fokus dalam eksplorasi panas bumi, juga meliputi batuan reservoir sebagai penampung fluida panas, beserta lapisan penudungnya (*cap rock*).

- Sumber panas dalam sistem vulkanik hidrotermal (*volcanic hydrothermal system*) adalah magma yang menerobos mendekati permukaan bumi, namun panas tersebut dapat ter transfer pada batuan sekitarnya (*thermal conductor*) secara konduktif, yang kemudian memanaskan fluida disekitarnya. Gunung api merupakan contoh dimana sumber panas terakumulasi dalam jumlah besar walaupun bersifat *intermittent*, dimana sewaktu-waktu dapat dilepaskan dalam bentuk erupsi, sedangkan pada sistem panas bumi konsentrasi panas ini bersifat kontinu. Namun demikian dalam banyak kasus, gunung api baik yang aktif maupun *dormant*, adalah sumber panas dari sistem panas bumi, oleh karena magma merupakan pemasok energi panas bagi sistem panas bumi disekitarnya.

Daerah lain yang ber-potensi menjadi sumber panas adalah daerah-daerah dengan tekanan *lithostatic* lebih besar dari normal (*geopressured system*), daerah-daerah dengan kapasitas panas tinggi yang diakibatkan peluruhan unsur radioaktif dalam batuan, dan daerah-daerah yang memiliki magmatisme dangkal

di bawah basement. Namun pada kasus tersebut intensitas panasnya sangat jarang sebesar intensitas panas gunung api.

- **Batuan reservoir** adalah formasi batuan dibawah permukaan yang mampu menyimpan dan mengalirkan fluida thermal (uap dan atau air panas). Reservoir ini biasanya merupakan batuan yang memiliki porositas dan permeabilitas yang baik, dimana porositas berperan dalam menyimpan fluida thermal, sedangkan permeabilitas berperan dalam mengalirkan fluida tersebut.

Reservoir panas bumi dicirikan oleh adanya kandungan Cl (*klorida*) yang tinggi dengan pH mendekati normal, adanya pengayaan isotop oksigen dibandingkan dengan air meteorik (air hujan), namun pada saat yang sama memiliki isotop *deuterium* yang sama atau mendekati air meteorik, dan adanya gradien temperatur yang tinggi yang relatif konstan terhadap kedalaman.

- **Lapisan penudung (cap rock)** merupakan lapisan yang menyelimuti batuan reservoir, adalah lapisan batuan dengan permeabilitas sangat kecil (*impermeable*). Lapisan penudung berperan sebagai penahan fluida thermal, agar terakumulasi tidak mengalir keluar dari batuan reservoir. Umumnya terdiri dari mineral-mineral lempung yang mampu mengikat air namun sulit meloloskannya. Mineral-mineral lempung ini mengandung ikatan-ikatan hidrosil dan ion-ion seperti  $K^+$  dan  $Ca^{2+}$ , sedemikian rupa sehingga menyebabkan lapisan tersebut menjadi sangat konduktif. Sifat konduktifitas dari lapisan ini dapat dideteksi dengan melakukan pengukuran *magneto-tellurik (MT)*, sehingga posisinya dibawah permukaan dapat teridentifikasi. Dengan mengetahui posisi lapisan konduktif ini, maka posisi reservoir dapat diperkirakan, oleh karena reservoir panas bumi biasanya berada dibawah lapisan ini.
- **Daerah resapan (recharge area)** merupakan daerah dimana arah pergerakan aliran air tanah menjauhi permukaan tanah, menuju batuan reservoir mendekati sumber panas di bawah permukaan bumi. Daerah resapan juga ditandai dengan nilai rata-rata resapan air tanah per-tahun yang tinggi, dengan tingkat curah hujan yang cukup sehingga menjamin pasokan air meteorik (air hujan) sebagai bahan baku yang memadai, untuk keberlangsungan produksi uap panas bumi.

Dalam suatu sistem lapangan panas bumi, daerah resapan seyogyanya cukup luas dan berada pada elevasi yang lebih tinggi dari elevasi dimana sumur-sumur produksi berada. Maka, menjaga kelestarian daerah resapan penting artinya dalam pengembangan suatu lapangan panas bumi, yaitu untuk menjaga keberlanjutan hidup dari reservoir panas bumi dalam jangka panjang, oleh karena adanya jaminan pasokan fluida yang mengisi pori-pori batuan reservoir secara berkelanjutan.

Sistem panasbumi sendiri dibedakan menjadi 5 jenis (Lund, 2007), yaitu :

- Sistem hidrothermal konvektif.
- Sistem geopressured.
- Sistem sedimentary.
- Sistem radiogenik.
- Sistem hot dry rock.

Sementara itu, reservoir panas bumi juga dikelompokkan berdasarkan temperaturnya, (Hochstein, 1990), yaitu :

- Reservoir panasbumi bertemperatur rendah, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur  $< 125^{\circ}\text{C}$ .
- Reservoir panasbumi bertemperatur sedang, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur  $125\text{-}225^{\circ}\text{C}$ .
- Reservoir panasbumi bertemperatur tinggi, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur  $>225^{\circ}\text{C}$ .

### **6.3. Lapangan Panas Bumi**

Lapangan panas bumi didefinisikan sebagai daerah yang menunjukkan adanya indikasi aktivitas panas bumi, baik dipermukaan maupun dibawah permukaan. Sedangkan sistem panas bumi sendiri meliputi bagian-bagian yang termasuk dalam sistem hidrologi, seperti zona *recharge* dan bagian-bagian *outflow* serta bagian bawah permukaan. Sementara itu, reservoir panas bumi merupakan bagian dari sistem panas bumi yang mengindikasikan terdapatnya panas dan zona permeabel yang dapat langsung dieksploitasi.

Tanda-tanda keberadaan sumber panas bumi juga dapat dilihat langsung dipermukaan, baik diakibatkan oleh tekanan maupun *ebulisi* (pendidihan), yang disebut sebagai manifestasi.

Manifestasi panas bumi di permukaan adalah tanda-tanda yang tampak di permukaan bumi, yang menunjukkan adanya sistem panas bumi dibawah permukaan di sekitar tempat kemunculannya. Manifestasi panas bumi yang keluar ke permukaan tersebut, yaitu dapat berupa keluarnya fluida-fluida, baik cair ataupun uap (*manifestasi aktif*), atau dapat pula berupa indikasi alterasi pada batuan (*manifestasi fosil*), yang dapat meng-indikasikan kondisi reservoir yang berada di bawah permukaan secara umum.

Manifestasi panas bumi aktif, disamping ditunjukkan dengan keluarnya fluida panas bumi dari batuan reservoir ke permukaan, juga meng-indikasikan adanya rekahan, bukaan-bukaan, atau zona permeabel. Manifestasi ini dapat berupa mata air panas, kolam air panas, atau berupa uap seperti *fumarola*. Juga dapat keluar secara terdiffusi, berupa tanah ber-uap (*steaming ground*) atau tanah hangat (*warm ground*), dan dapat pula keluar secara *intermittent* seperti pada *geyser*, atau tersembunyi dalam bentuk rembesan air panas di sungai. Namun secara umum, manifestasi permukaan yang sering muncul pada sistem panas bumi, terutama di Indonesia, adalah mata air panas, *fumarola*, *steaming ground*, *warm ground*, kolam lumpur panas, *solfatara*, dan batuan ter alterasi. Dimana *solfatara* adalah uap air yang bercampur dengan H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, dan terkadang juga SO<sub>2</sub> dengan endapan sulfur disekitarnya.

Batuan reservoir panas bumi sendiri dapat berisi air, uap air, atau gabungan keduanya. Sistem reservoir yang didominasi oleh uap pada umumnya ditandai dengan komposisi uap dalam batuan reservoir yang melebihi 85%, biasanya menunjukkan adanya aliran panas (*heat flow*) yang tinggi dengan jumlah air tangkapan yang sedikit. Jenis ini merupakan sumber panas bumi yang ideal untuk dikembangkan, namun jumlahnya tidak sebanyak sistem yang didominasi air panas. Contoh beberapa sistem dominasi uap adalah *The Geysers Geothermal - California*, *Larderello - Italia*, dan Kawah Kamojang di Indonesia.



**Gambar 6.8. : Manifestasi semburan uap air panas (Cisolok – Banten)**

Mata air panas adalah manifestasi permukaan dari sistem reservoir panas bumi yang didominasi air. Kelompok mata air panas ini biasanya merupakan keluaran langsung dari batuan reservoir panas bumi, dan dapat digunakan sebagai petunjuk dalam menentukan lokasi pemboran pada tahapan eksplorasi. Namun, dapat pula merupakan keluaran dari batuan reservoir yang telah mengalir jauh dari pusat reservoirnya. Maka, analisis kimia dalam hal ini akan memberikan informasi tentang tingkat pencampuran antara air tanah dan air panas, yang mengindikasikan jaraknya dari sumber reservoir panas bumi.

Mata air panas terbentuk oleh adanya aliran air panas dari bawah permukaan melalui celah rekahan batuan, dan bercampur dengan air permukaan. Maka karakteristiknya dapat menjadi indikator untuk memperkirakan jenis reservoir di bawah permukaan. Mata air panas yang bersifat asam biasanya merupakan manifestasi permukaan dari suatu sistem panas bumi yang didominasi uap (*steam/vapor dominated*). Sedangkan mata air panas yang bersifat netral biasanya merupakan manifestasi permukaan dari suatu sistem panas bumi yang didominasi air (*water dominated*), yang umumnya jenuh dengan silika, sehingga apabila laju alirannya tidak terlalu besar, maka akan

dapat membentuk teras-teras silika (*silica sinter terraces or sinter platforms*). Namun apabila air panas banyak mengandung karbonat, maka akan membentuk teras-teras travertine (*travertine terrace*).

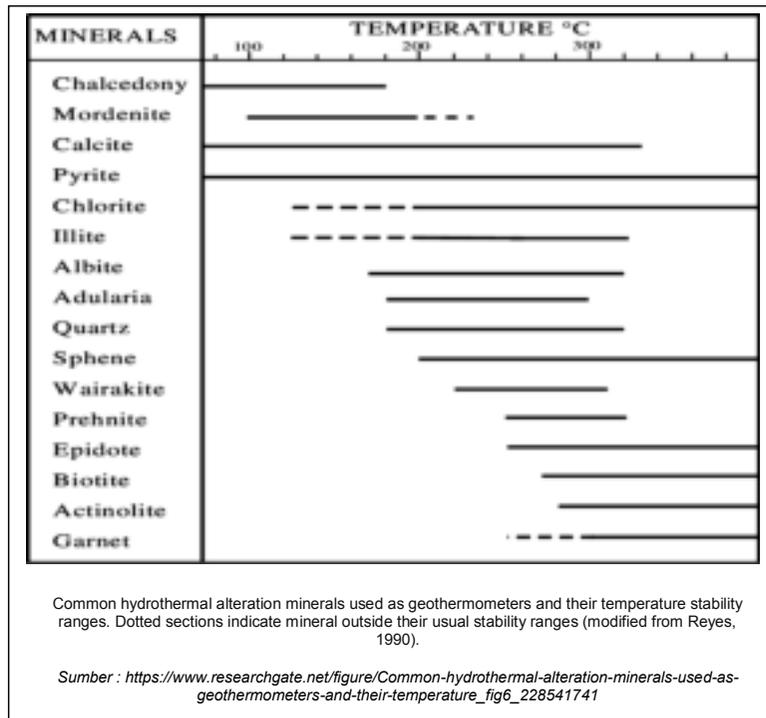


**Gambar 6.9. : Manifestasi endapan travertin (pemandian air panas Tirta Sayaga - Bogor)**

*Alterasi hidrothermal* merupakan proses yang terjadi sebagai akibat reaksi antara batuan asal dengan fluida panas bumi. Yaitu dimana *alterasi hidrothermal* merupakan suatu proses perubahan secara mineralogi, kimia dan tekstur, yang terjadi akibat interaksi antara larutan *hidrothermal* dengan batuan sampling yang dilaluinya pada kondisi kimia-fisika tertentu. Maka keberadaannya dapat menjadi petunjuk temperatur, dimana mineral-mineral tersebut terbentuk. Namun demikian, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi perubahan yang terjadi pada batuan yang diakibatkan larutan *hidrothermal*, antara lain :

- Temperatur dan tekanan pada saat reaksi berlangsung
- Sifat kimia larutan hidrotermal (EH, pH)
- Konsentrasi larutan hidrhotermal
- Komposisi batuan sampling
- Durasi aktivitas hidrothermal
- Permeabilitas

Tabel 6.1. : Mineral-mineral hydrothermal dengan temperatur pembentukannya.



Alterasi hidrothermal yang terjadi akibat reaksi antara batuan dengan air jenis klorida yang berasal dari reservoir panas bumi dalam (*deep chloride water*) dapat menyebabkan terjadinya pengendapan (misalnya kwarsa) dan pertukaran elemen-elemen batuan dengan fluida, sehingga menghasilkan mineral-mineral seperti *Chlorite*, *adularia*, *epidote*. Sedangkan air yang bersifat asam pada kedalaman yang relatif dangkal dan elevasi yang relatif tinggi, akan dapat mengubah batuan asal menjadi mineral lempung dan mineral mineral lainnya yang terlepas. Umumnya berupa mineral-mineral *hidrothermal* pada zona permukaan, seperti *kaolin*, *alunite*, *sulphur*, *residu silika* dan *gypsum*.

Bagaimanapun, informasi permukaan hanya dapat menafsirkan konfigurasi bawah permukaan secara umum. Maka, penyelidikan geologi permukaan masih perlu dilengkapi dengan penyelidikan bawah permukaan, untuk mendapatkan informasi konfigurasi geologi bawah permukaan yang lebih akurat, termasuk informasi tentang komponen-komponen panas bumi yang terkait.

## 6.4. Perhitungan Potensi Energi Panas Bumi

Perhitungan potensi energi panas bumi, umumnya dihitung dengan metode volumetrik, dimana besarnya potensi energi sumberdaya atau cadangan diperkirakan berdasarkan kandungan energi panas dalam reservoir. Kandungan energi panas dalam reservoir sendiri merupakan jumlah keseluruhan panas yang terkandung dalam batuan dan fluida panas bumi. Maka, data-data yang diperlukan untuk perhitungan adalah luas reservoir, ketebalan reservoir, temperatur, entalpi, saturasi, densitas batuan, densitas fluida, panas spesifik batuan, efisiensi konversi, porositas, *recovery factor*, dan *life time*.

Prinsip metode volumetrik dalam perhitungan potensi panas bumi, adalah dengan mengalikan luas area yang diperkirakan mengandung fluida panas bumi dengan ketebalannya. Metode volumetrik digunakan secara umum untuk perhitungan potensi energi panas bumi, pada klasifikasi perkiraan sumberdaya hipotesis sampai dengan cadangan terbukti, dengan rumus umum sebagai berikut :

$$H_e = A.H.[(1 - \theta) \cdot \rho_r \cdot C_r \cdot T + \theta \cdot (S_l \cdot \rho_l \cdot U_i + S_v \cdot \rho_v \cdot U_v)]$$

Dimana :

$H_e$  = Kandungan energi panas (Kj)

$A$  = Luas daerah panas bumi ( $m^2$ )

$H$  = Tebal reservoir (m)

$T$  = Temperatur reservoir ( $^{\circ}C$ )

$C_r$  = Kapasitas panas batuan (Kj/kg $^{\circ}C$ )

$\theta$  = Porositas batuan reservoir (fraksi)

$S_l$  = Saturasi air (fraksi)

$S_v$  = Saturasi uap (fraksi)

$\rho_r$  = Densitas batuan (kg/ $m^3$ )

$\rho_l$  = Densitas air (kg/ $m^3$ )

$\rho_v$  = Densitas uap (kg/ $m^3$ )

$U_i$  = Energi dalam air (kj/kg)

$U_v$  = Energi dalam uap (kj/kg)

Dengan prosedur sebagai berikut :

1. Hitung kandungan energi dalam reservoir pada keadaan awal ( $H_{ei}$ )
2. Hitung kandungan energi dalam reservoir pada keadaan akhir ( $H_{ef}$ )
3. Maka energi maksimum yang didapat adalah :

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef}$$

4. Energi panas yang dapat dimanfaatkan ( $H_{de}$ ), apabila cadangan dihitung dalam satuan KJ, adalah :

$$H_{de} = R_f - H_{th}$$

Dimana :

$$R_f = (T_i - T_f) / (T_i - T_s)$$

Apabila cadangan dinyatakan dalam satuan MW<sub>th</sub>, maka :

$$H_{th} = H_{de} / (t \times 365 \times 24 \times 3600)$$

5. Maka besarnya energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode waktu  $t$  tahun (dalam satuan MWe) adalah :

$$H_{el} = H_{de} \cdot \eta / (t \times 365 \times 24 \times 3600)$$

Dimana :

$T_i$  : temperatur awal (°C)

$T_f$  : temperatur akhir (°C)

$T_s$  : temperatur permukaan (°C)

$H_{ei}$  : kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan/kondisi awal (kJ)

$H_{ef}$  : kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan kondisi akhir (kJ)

$H_{th}$  : energi panas bumi maksimum yang dimanfaatkan (kJ)

$H_{de}$  : energi panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan (kJ)

$H_{re}$  : cadangan panas bumi yaitu energi panas bumi maksimum yang dapat diambil selama periode tertentu (MW<sub>th</sub>)

$H_{el}$  : potensi listrik panas bumi (MWe)

$R_f$  : faktor perolehan (fraksi)

$t$  : lama waktu pembangkitan listrik (th)

$\eta$  : faktor konversi listrik (fraksi)

Metode perkiraan potensi panas bumi yang lebih sederhana, adalah dengan *Metode Perry*, yang pada dasarnya mempergunakan prinsip energi dari panas yang hilang. Yaitu dengan rumus sebagai berikut :

$$E = D \times Dt \times P$$

Dimana :

$E$  = arus energi (Kkal/detik)

$D$  = debit air panas (liter/det)

$Dt$  = perbedaan suhu permukaan air panas dan air dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P$  = panas jenis (Kkal/kg)

Sementara itu, Panitia Standarisasi Panas Bumi (1994) dalam Tim Survei Geologi dan Geokimia - Pusat Sumberdaya Geologi (2009), yang juga menggunakan metoda volumetrik dalam menghitung potensi sumberdaya panas bumi, merumuskannya sebagai berikut (SNI 13-6171-1999 ICS 73.020) :

$$Q = 0,11585 \times h \times A \times (T_{ag} - T_{cut\ off})$$

Dimana :

$Q$  = Potensi Energi (MWe)

$A$  = Luas Persebaran Reservoir ( $\text{km}^2$ )

$h$  = Tebal Reservoir (km)

$T_{ag}$  = Suhu Reservoir ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{cut\ off}$  = Suhu cut off ( $^{\circ}\text{C}$ )

## **6.5. Teknologi Panas Bumi**

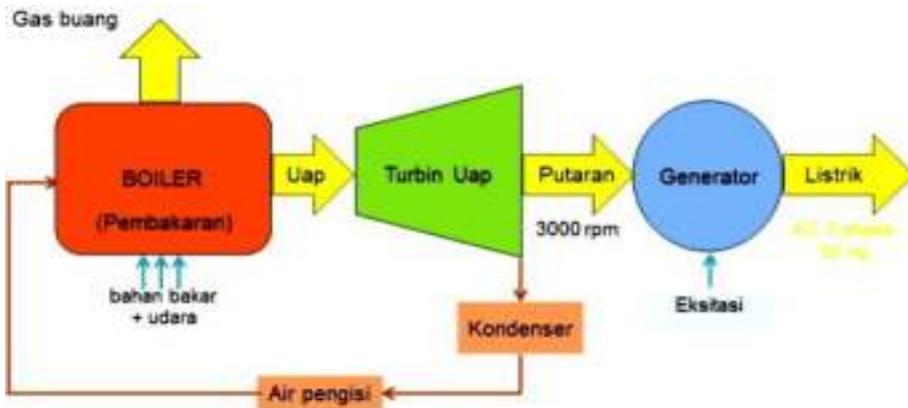
Prinsip kerja PLTP pada dasarnya sama dengan PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Akan tetapi yang digunakan pada PLTP adalah uap panas bumi alamiah yang telah dipisahkan dari fluida cair yang berasal dari sumber panas dalam perut bumi, sehingga biaya operasionalnya menjadi lebih murah oleh karena tidak memerlukan bahan bakar. Namun demikian, pembangunan suatu PLTP membutuhkan biaya investasi yang lebih besar, oleh karena

diperlukannya biaya untuk eksplorasi dan pemboran untuk memperoleh uap panas dari dalam perut bumi. Disamping itu, juga faktor lokasi yang umumnya jauh dari pusat-pusat beban tenaga listrik.

Prinsip kerja PLTU adalah dengan menggunakan fluida kerja berupa air-uap yang bersirkulasi secara tertutup, yaitu dimana fluida yang sama digunakan secara berulang-ulang. Dimulai dengan mengisikan air kedalam boiler, kemudian didalam boiler air dipanaskan dengan pembakaran bahan bakar (Minyak, Batubara, Gas) dengan udara sehingga berubah menjadi uap. Uap hasil produksi boiler dengan tekanan dan temperatur tertentu kemudian diarahkan untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan daya mekanik berupa putaran. Generator listrik yang dihubungkan langsung dengan turbin, berputar menghasilkan energi listrik sebagai hasil dari perputaran medan magnet dalam kumparan, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal output generator. Uap bekas yang keluar dari turbin dimasukkan kedalam kondensor, untuk didinginkan dengan air pendingin, untuk dirubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan kembali sebagai air pengisi boiler. Demikian siklus ini berlangsung terus menerus dan berulang.

Pada PLTP, fluida yang digunakan berasal dari reservoir dalam perut bumi. Air panas dan uap bertekanan dikeluarkan dari reservoir panas bumi melalui sumur produksi, dan dipisahkan melalui separator. Uap kering yang telah terpisah kemudian dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator pembangkit listrik, sementara air yang terpisah (*brine*) dialirkan kedalam sumur injeksi. Bersama uap sisa yang telah di kondensasikan melalui kondensor.

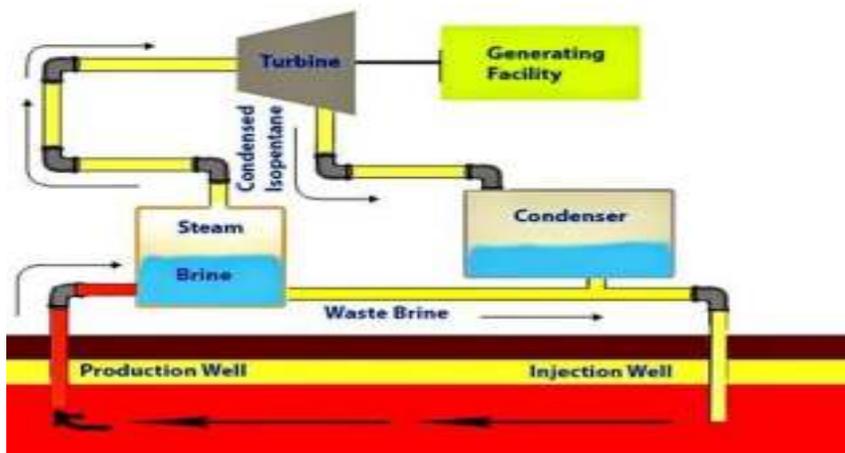
## PRINSIP KERJA PLTU



Sumber : <https://www.slideshare.net/AristiaEndahRenatyas/pembangkit-listrik-tenaga-uap-pltu>

## PRINSIP KERJA PLTP

<http://mechanicalinventions.blogspot.com>



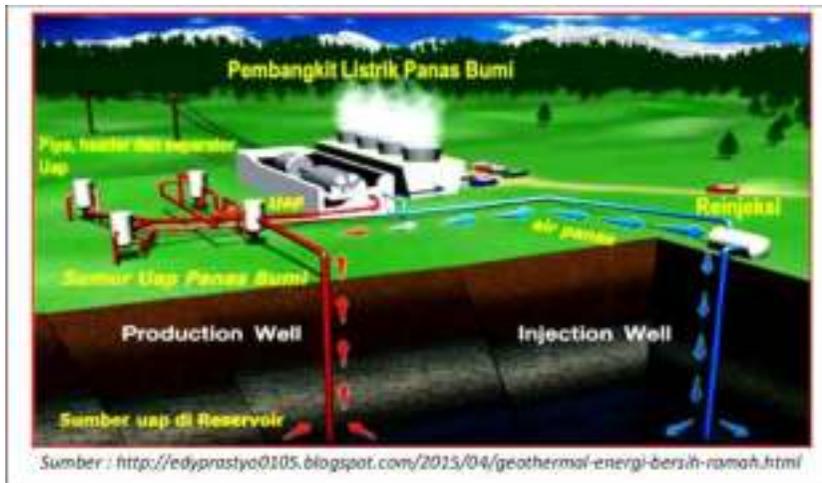
Gambar 6.10. : Diagram perbandingan prinsip kerja PLTU dengan PLTP

Penerapan teknologi pembangkit listrik tenaga panas bumi, pada dasarnya secara konvensional disesuaikan dengan kondisi temperatur dan tekanan reservoir panas bumi. Yaitu meliputi Pembangkit Uap Kering (*dry steam*) dan Pembangkit *Flash Steam*.

- **Pembangkit Uap Kering (*dry steam*)**, adalah pembangkit dengan sistem uap kering (tidak atau sangat sedikit mengandung fluida cair) adalah merupakan rancangan paling tua dan sederhana. Dalam sistem ini fluida uap panas bumi langsung digunakan untuk memutar turbin.
- **Pembangkit *Flash Steam***, adalah pembangkit dimana fluida cair dan panas mendominasi batuan reservoir panas bumi, sehingga perlu dipisahkan atau diubah terlebih dahulu menjadi fluida uap, dan uap yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin. Pembangkit ini adalah jenis yang paling umum dioperasikan saat ini.

Namun pada perkembangan teknologi selanjutnya, telah dikembangkan pula teknologi untuk meningkatkan daya mampu potensi panas bumi. Yaitu dengan teknologi Pembangkit Siklus Biner (*binary cycle*), dan teknologi *Fracking* yang disebut juga sebagai *EGS (Enhanced Geothermal System)*.

- **Pembangkit Siklus Biner (*binary cycle*)**, adalah pengembangan teknologi PLTP baru, yang memungkinkan pemanfaatan fluida reservoir yang ber-temperatur rendah sampai dengan 57 °C. Fluida panas bumi yang tidak terlalu panas tersebut dialirkan melalui fluida sekunder yang memiliki titik didih rendah dibawah titik didih air, sehingga menghasilkan uap yang dapat digunakan untuk menggerakkan turbin.
- **Teknologi *Fracking*** pada dasarnya dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas suatu sistem panas bumi alami (*EGS - Enhanced Geothermal System*). Atau dengan kata lain, meningkatkan suatu sistem panas bumi yang kurang ekonomis menjadi lebih ekonomis, dengan cara *hydraulic fracturing* atau *fracking*, untuk meningkatkan kapasitas komponen reservoir panas bumi.



Gambar 6.11. : Lay out PLTP

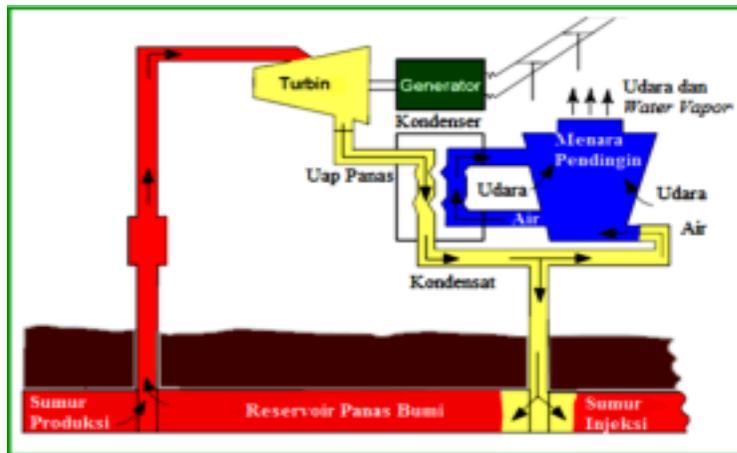
### 6.5.1. Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Konvensional

Teknologi panas bumi secara konvensional merupakan teknologi awal dalam pemanfaatan energi panas bumi, terutama untuk keperluan pembangkitan tenaga listrik. Yaitu dengan cara menyalurkan fluida alamiah dari batuan reservoir panas bumi secara langsung, untuk menggerakkan turbin pembangkit tenaga listrik. Walaupun teknologi ini kemudian disempurnakan dengan penambahan unit separator, untuk memisahkan fraksi cair dari fraksi uap dari fluida panas bumi, oleh karena bagaimanapun dalam teknologi mesin uap, fraksi uap lah yang berperan menggerakkan turbin.

Maka, komposisi fraksi cair dan fraksi uap dari fluida dalam batuan reservoir panas bumi merupakan pertimbangan dalam pemilihan teknologinya, apakah dengan menggunakan sistem *Pembangkit Uap Kering (dry steam)* atau sistem *Pembangkit Flash Steam*.

#### - *Pembangkit Uap Kering (dry steam)*.

Teknologi ini merupakan teknologi konvensional tertua, yang telah digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) *Lardarello - Italia* (1904). Yaitu dimana uap panas bumi dari batuan reservoir, langsung disalurkan melalui sumur produksi untuk menggerakkan turbin.



Sumber : <https://ecanblue.wordpress.com/2014/01/09/pemanfaatan-langsung-panas-bumi/>

**Gambar 6.12. : Diagram Pembangkit Uap Kering (dry steam)**

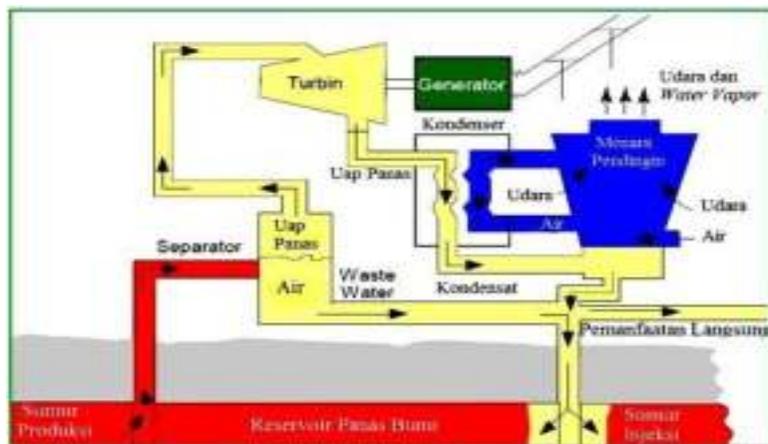
Apabila jumlah uap panas bumi yang tersedia dan digunakan cukup besar, maka teknologi ini dapat dilengkapi dengan unit kondensor dengan kelengkapan menara pendingin dan pompa, untuk memproses uap sisa yang keluar dari turbin. Dimana kondensor berfungsi untuk mengkondensasikannya menjadi air, sedangkan menara pendingin berfungsi untuk pembuangan uap yang tak terkondensasi. Sementara itu uap sisa yang telah terkondensasi menjadi air dipompakan kembali kedalam tanah melalui sumur injeksi.

Jenis teknologi uap kering, sesuai untuk diterapkan pada PLTP berkapasitas kecil, bersuhu tinggi, dengan kandungan fluida uap dalam batuan reservoir yang tinggi pula, seperti pada contoh PLTP Kamojang (1 X 250 KW) dan PLTP Dieng (1 X 200 KW). Sedangkan PLTP jenis uap kering yang berkapasitas lebih besar, dengan kelengkapan kondensor dan menara pendingin serta pompa injeksinya, contohnya adalah PLTP Kamojang (1 X 30 MW dan 2 X 55 MW), dan PLTP Drajat (1 X 55 MW). Namun PLTP jenis ini umumnya sangat jarang ditemui, oleh karena batuan reservoir umumnya selalu mengandung fluida cair yang signifikan didalamnya.

- **Pembangkit Flash Steam (Wet Steam).**

Teknologi *flash steam* digunakan pada lapangan panas bumi

dimana kandungan fluida dalam reservoirnya di-dominasi oleh fluida air panas dengan temperatur tinggi, sehingga sering disebut juga sebagai pembangkit uap basah, yaitu dengan menggunakan unit *flash* (*separator*) untuk membentuk dan memisahkan fluida uap dari fluida cairnya. Pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan teknologi *flash* ini banyak digunakan di berbagai lapangan panas bumi, oleh karena kandungan fluida cair yang umumnya mendominasi reservoir panas bumi di dunia. Misalnya, sekitar 45 persen dari produksi listrik tenaga panas bumi di Amerika Serikat berasal dari pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan teknologi *flash*.



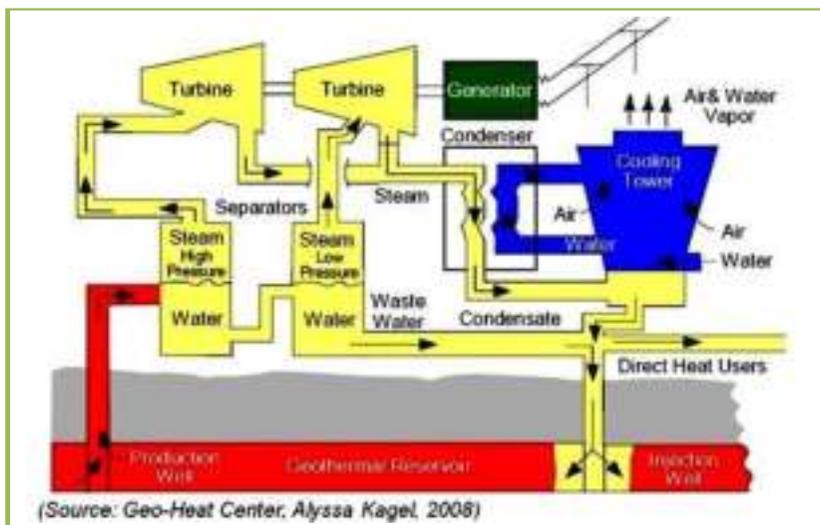
Sumber : <https://ecanblue.wordpress.com/2014/01/09/pemanfaatan-langsung-panas-bumi>

**Gambar 6.13. : Diagram pembangkit single flash steam**

Pembangkit listrik panas bumi dengan teknologi *flash* biasanya membutuhkan temperatur reservoir antara 350° sampai dengan 500°F (177°C s/d 260°C). Fluida cair dalam reservoir yang bertekanan tinggi, dialirkan melalui sumur produksi (*production well*) kedalam tangki *flash* (*separator*) yang bertekanan lebih rendah sehingga terbentuk uap panas, untuk kemudian dipisahkan dari fluida cairnya. Uap panas yang disebut dengan *flash* inilah yang dialirkan untuk menggerakkan turbin, untuk mengaktifkan generator yang kemudian menghasilkan tenaga listrik. Sedangkan sisa fluida cair yang tidak terpakai (*brine*) dimasukkan kembali kedalam reservoir melalui sumur injeksi (*injection well*).

Ada kalanya, fluida cair sisa yang keluar dari *separator* masih cukup banyak dan ber temperatur masih cukup tinggi, sehingga masih memungkinkan untuk memproduksi uap. Maka teknologi *flash steam* yang pada awalnya merupakan *single flash*, kemudian dapat dikembangkan menjadi sistem *double flash* bahkan *multy flash*, dengan modifikasi penambahan *separator (flasher)* yang bertekanan lebih rendah

Pada teknologi *double flasher*, *brine* dari *separator* bertekanan tinggi dilewatkan melalui *flasher / separator* bertekanan lebih rendah, sehingga terbentuk kembali fluida uap yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin bertekanan rendah. Maka dalam hal ini, fluida reservoir bertekanan tinggi akan menghasilkan uap bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin tekanan tinggi. Sedangkan *brine* dari *separator* bertekanan tinggi, akan menghasilkan uap bertekanan rendah setelah melalui *separator* bertekanan rendah, untuk kemudian dialirkan untuk menggerakkan turbin tekanan rendah. Sistem dua turbin ini lazim disebut *bottoming turbine*.



Gambar 6.14. : Diagram pembangkit double flash steam

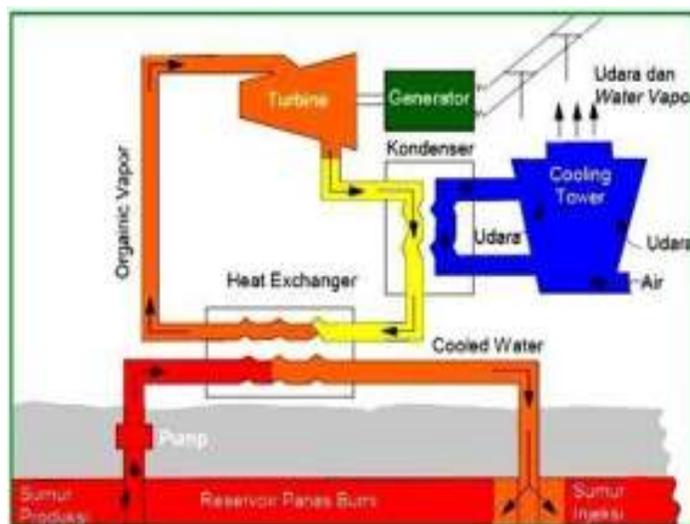
Di kemudian hari, apabila kondisi fluida panas bumi dari batuan reservoir, secara kualitas, kuantitas maupun ekonomis memungkinkan, tidak tertutup kemungkinan untuk pengembangan lebih lanjut menjadi *multy flash steam* sistem.

### 6.5.2. Pengembangan Teknologi Panas Bumi (EGC-Enhanced Geothermal System).

Pemanfaatan teknologi panas bumi untuk pembangkitan tenaga listrik secara konvensional, sejauh ini masih sangat tergantung pada kelengkapan komponen-komponen penunjangnya, seperti sumber panas, batuan reservoir termasuk kandungan fluida didalamnya, dan daerah resapan (*recharge area*), yang tidak selalu tersedia secara alamiah dan memadai. Oleh karena kandungan fluida cair dalam batuan reservoir mungkin tidak cukup panas untuk menghasilkan uap, atau bahkan mungkin tidak tersedia sama sekali oleh karena faktor permeabilitas batuan reservoir yang terlalu rendah. Maka teknologi panas bumi kemudian dikembangkan (*EGC- Enhanced Geothermal System*), sebagai upaya untuk menyasiasi dan melengkapinya. Yaitu, yang saat ini telah mulai dikembangkan, adalah teknologi pembangkit siklus biner (*binary cycle*), dan teknologi *fracking*.

#### - Pembangkit Siklus Biner (*binary cycle*).

Pembangkit Siklus Biner menggunakan teknologi yang berbeda dengan teknologi *dry steam* maupun *flash steam*, dan dapat dioperasikan dengan fluida reservoir panas bumi dengan temperatur rendah, yaitu berkisar antara 107°-182°C, bahkan pada temperatur 57°C.



Sumber : <https://ecanblue.wordpress.com/2014/01/09/pemanfaatan-langsung-panas-bumi/>

Gambar 6.15. : Diagram pembangkit Siklus Biner (*binary cycle*)

Dalam teknologi ini, fluida panas bumi baik berupa air maupun uap panas dari reservoir, yang dikeluarkan melalui sumur produksi (*production well*) tidak dialirkan langsung untuk memutar turbin, namun digunakan untuk memanaskan fluida kerja (*working fluid*) pada unit pemindah panas (*heat exchanger*). Fluida kerja yang terpanaskan dan menghasilkan uap (*flash*) dialirkan untuk memutar turbin dan menggerakkan generator sehingga menghasilkan tenaga listrik. Uap panas yang dihasilkan dalam *heat exchanger*, yang disebut juga sebagai *secondary* atau *binary fluid*, adalah sejenis fluida yang mempunyai titik didih rendah (lebih rendah dari titik didih fluida reservoir), seperti halnya senyawa organik *isobutana*.

**Tabel 6.2. : Berbagai jenis fluida kerja pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner.**

Fluid	Formula	$T_b$ °C	$T_b$ °F	$P_c$ MPa	$P_c$ lb/in <sup>2</sup>	$P_c @$ 100 K MPa	$P_c @$ 400 K MPa
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	96.95	206.5	4.236	614.4	0.9935	n.a.
i-Butane	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	135.92	276.7	3.685	534.4	0.3727	3.204
n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	150.8	303.4	3.718	539.2	0.2559	2.488
i-Pentane	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	187.8	370.1	3.409	494.4	0.09759	1.238
n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	193.9	380.9	3.240	469.9	0.07376	1.036
Ammonia	NH <sub>3</sub>	133.65	272.57	11.627	1686.3	1.061	10.3
Water	H <sub>2</sub> O	374.14	705.45	22.089	3203.6	0.003536	0.24559

Sumber : <https://blogs.itb.ac.id/asepandielektro/2013/10/10/panas-bumi/>

Secara keseluruhan, pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus biner merupakan sistem tertutup, dimana tak ada fluida yang dilepas ke atmosfer, dapat dioperasikan pada temperatur rendah, dengan tingkat efisiensi 10-13%, sehingga cukup menarik untuk dikembangkan dimasa depan. Contoh penerapan teknologi siklus biner ini adalah di *Mammoth Pacific Binary Geothermal Power Plants - Casa Diablo geothermal field*, Amerika Serikat.

- **Teknologi Fracking.**

Secara umum teknologi ini dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas suatu sistem panas bumi alami, sehingga sering disebut sebagai *Enhanced Geothermal System (EGS)*. Yaitu dengan upaya meningkatkan kinerja batuan reservoir panas bumi, atau bahkan menciptakan reservoir itu sendiri.

Produksi energi panas bumi dalam skala komersial, tentu tergantung pada kuantitas fluida dalam batuan reservoirnya. Sedangkan kuantitas fluida panas bumi yang dapat diekstraksi tergantung setidaknya pada jumlah fluida yang cukup dalam siklus injeksi produksi, dan kemampuan batuan reservoir melalukannya, yang dalam hal ini dipengaruhi oleh tingkat permeabilitasnya. Dalam beberapa kasus proyek energi panas bumi, dijumpai kebutuhan untuk meningkatkan kapasitas alami sebuah sistem panas bumi (*Enhanced Geothermal System/EGS*) untuk mencapai tingkat keekonomian yang komersial, sehingga dipandang perlu untuk meningkatkan volume fluida yang berada dalam siklus.

Teknologi *Enhanced Geothermal System (EGS)* pada dasarnya dikembangkan untuk menjawab kekurangan kapasitas sebuah sistem panas bumi alami, dengan meningkatkan kapasitas sistem reservoir panas bumi. Dimana cara peningkatan kapasitas sistem panas bumi tersebut, dilakukan dengan teknologi *fracking*.

Teknologi *fracking*, yang disebut juga sebagai *hydraulic fracturing*, bukanlah merupakan teknik pemboran, namun teknik ini digunakan untuk men stimulasi sumur-sumur yang sudah ada agar mampu meng ekstraksi lebih banyak fluida dari dalam lapisan batuan reservoir. Yaitu dengan meningkatkan permeabilitas batuan dan volume fluida yang berada didalamnya, dengan cara membuat retakan-retakan pada batuan reservoir, dengan memompakan cairan bertekanan tinggi. Proses ini melibatkan injeksi "larutan peretak" bertekanan tinggi yang umumnya berupa air yang mengandung pasir, kedalam sumur untuk menghasilkan retakan pada formasi batuan reservoir, sehingga fluida panas bumi dapat mengalir lebih bebas melalui retakan-retakan yang terbentuk.

Teknik *fracking* atau yang pada awalnya dikenal sebagai *fracturing methods* sudah dikenal sejak tahun 1860-an di Amerika Serikat. Pada awalnya dilakukan untuk stimulasi sumur minyak atau air tanah, dimana awalnya dinamit atau peledakan *nitroglycerin* digunakan untuk meningkatkan produksi minyak dan gas bumi.

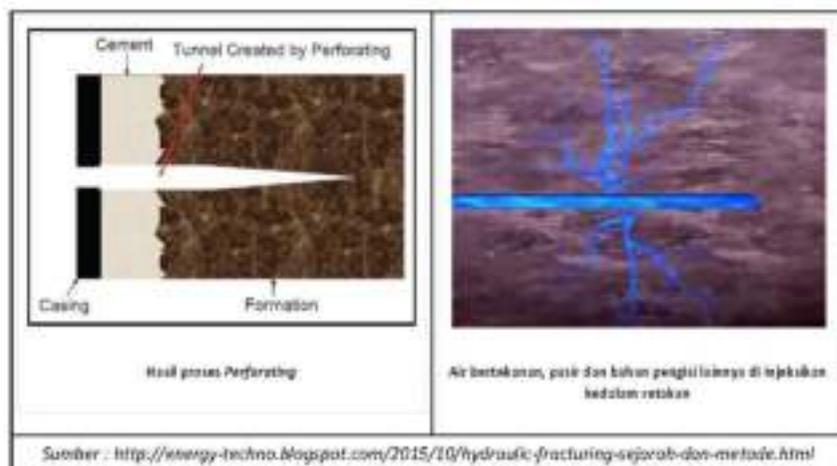
Pada 25 April 1865, *Col. Edward A. L. Roberts* memperoleh hak

paten untuk metode yang dikenal sebagai "*Exploding Torpedo*". Sementara itu, stimulasi sumur dengan larutan asam sebagai pengganti *explosive liquid* diperkenalkan pada tahun 1930-an.

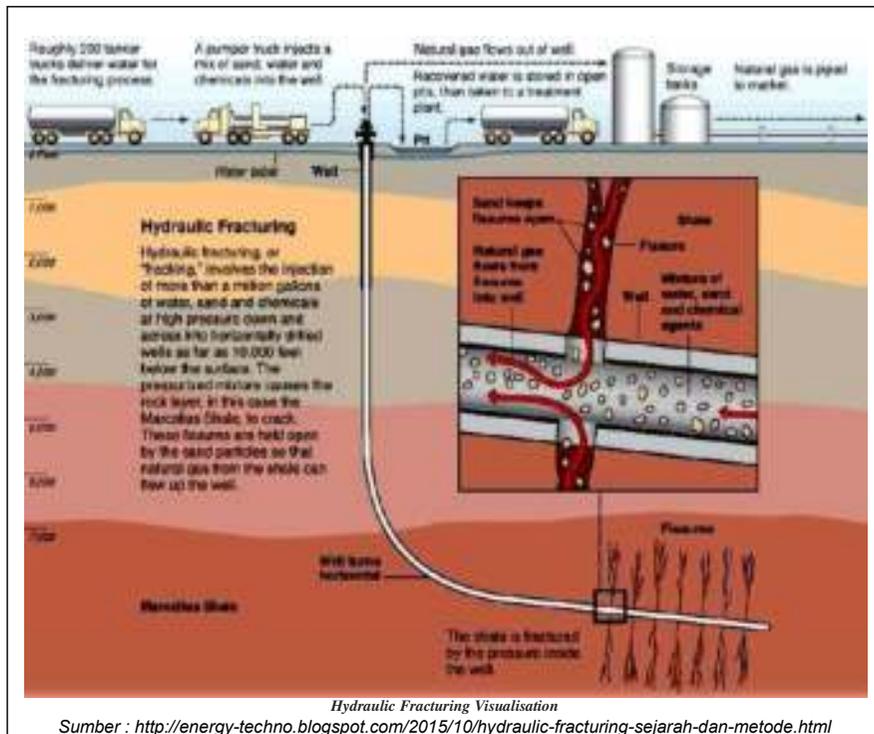
Di Uni Soviet, *hydraulic fracturing* pertama kali dilakukan pada 1952. Negara-negara lain di Eropa dan Afrika Utara yang kemudian menerapkan teknik ini antara lain adalah Norwegia, Polandia, Republik Ceko, Yugoslavia, Hungaria, Austria, Perancis, Italia, Bulgaria, Rumania, Turki, Tunisia, dan Aljazair. Tahun 2013, *hydraulic fracturing* secara masal diterapkan dalam skala yang ekonomis di Amerika, Kanada, dan Cina.

*George P. Mitchell* adalah tokoh yang berperan dalam penerapan *hydraulic fracturing* pada sumur *Barnett*. Sumur ini merupakan sumur horisontal pertama yang di *Barnett - North Texas*, yang telah ada sejak tahun 1991 yang pada awalnya tidak ekonomis, namun menjadi ekonomis setelah penerapan *hydraulic fracturing*. Sehingga *George P. Mitchell* kemudian dikenal sebagai "*father of fracking*".

Secara umum, *fracking* atau *hydraulic fracturing* diterapkan pada sumur-sumur horisontal yang telah ada, sehingga bukan merupakan teknik pemboran akan tetapi lebih merupakan teknik meretakkan dinding-dinding batuan dalam sumur yang sudah ada, dan teknik ekstraksi fluida yang terperangkap dalam lapisan batuan.

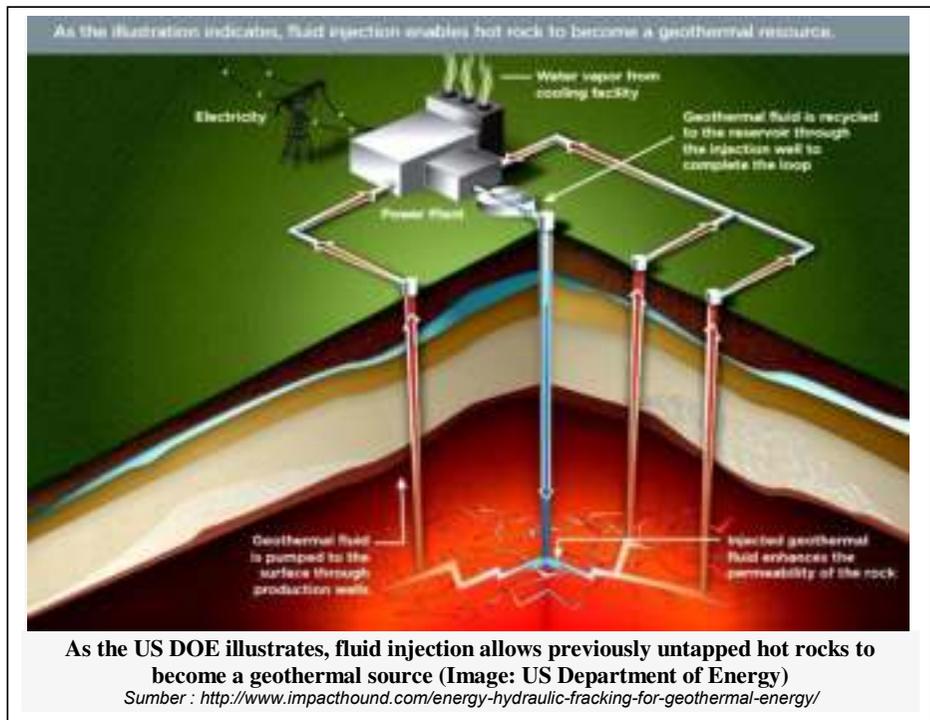


**Gambar 6.16. : Proses hydraulic fracturing**



Gambar 6.16. : Contoh visualisasi proses hydraulic fracturing

Proses *hydraulic fracturing* dilakukan dengan memasukkan *perforating tool* kedalam sumur lubang bor yang ada, dimana *perforating tool* berfungsi untuk melubangi dinding-dinding lubang bor. Selanjutnya air bertekanan bercampur dengan pasir atau bahan kimia lainnya di-injeksikan kedalam lubang bor, untuk membentuk dan memperlebar retakan atau lubang-lubang yang telah dibentuk oleh *perforating tool*. Pasir atau bahan kimia pengisi dalam hal ini berfungsi untuk menjaga celah retakan agar tetap terbuka, sehingga memudahkan fluida untuk bergerak.



**Gambar 6.17. : Diagram pemanfaatan tenaga panas bumi dengan teknologi Fracking**

Maka, fungsi teknologi *fracking* dalam *Enhanced Geothermal System (EGS)*, adalah :

- Meningkatkan kinerja reservoir panas bumi dalam sistem panas bumi konvensional, dengan meningkatkan permeabilitas batuan reservoir, sehingga lebih memudahkan ekstraksi fluida panas bumi.
- Pada panas bumi dengan sistem batuan kering (*hot dry rock*), berfungsi untuk memproduksi fluida panas bumi secara artifisial. Yaitu dengan meng-injeksikan air ke dalam reservoir buatan yang dibentuk melalui proses *fracking* atau *hydraulic fracturing*, untuk diubah menjadi fluida panas bumi berupa uap. Uap ini kemudian dimanfaatkan sebagai penggerak turbin melalui sumur produksi (*production well*), baik secara langsung maupun melalui pemindah panas (*heat exchanger*).

Namun demikian, teknologi *fracking* juga perlu dicermati, oleh karena dapat memicu terjadinya gempa bumi lokal. Injeksi fluida bertekanan bagaimanapun akan dapat menyebabkan peningkatan tekanan dalam batuan reservoir yang berpotensi memicu *pergeseran* (*slip*), oleh karena terlampauinya kuat geser statis (*static friction*). Maka gempa bumi lokal akan dapat terjadi ketika pergeseran (*slip*) itu terjadi. Dimana pada prinsipnya gempa bumi hampir selalu berasosiasi dengan pergerakan patahan (*slip*), dengan melepaskan sejumlah energi dalam bentuk getaran.

## 6.6. Keekonomian Panas Bumi

Panas bumi merupakan energi terbarukan oleh karena tidak pernah habis. Energi panas bumi yang diambil dari fluida panas didalam bumi, yang diangkat kepermukaan untuk diubah menjadi energi listrik, setelah itu dikembalikan lagi kedalam bumi sebagai fluida yang telah mendingin. Walaupun tekanan pada reservoir panas bumi dapat saja berkurang dengan berkurangnya masa fluida, sehingga sumur produksi tidak dapat lagi di eksploitasi, energi panas bumi dapat dimanfaatkan dalam jangka waktu yang lama, oleh karena sumber panas abadi yang tak pernah habis.

Tabel 6.3. : Perbandingan biaya produksi tenaga listrik berbagai jenis pembangkit

Power Plant Type	Cost \$/kW-hr
Coal	\$0.095-0.15
Natural Gas	\$0.07-0.14
Nuclear	\$0.095
Wind	\$0.07-0.20
Solar PV	\$0.125
Solar Thermal	\$0.24
Geothermal	\$0.05
Biomass	\$0.10
Hydro	\$0.08

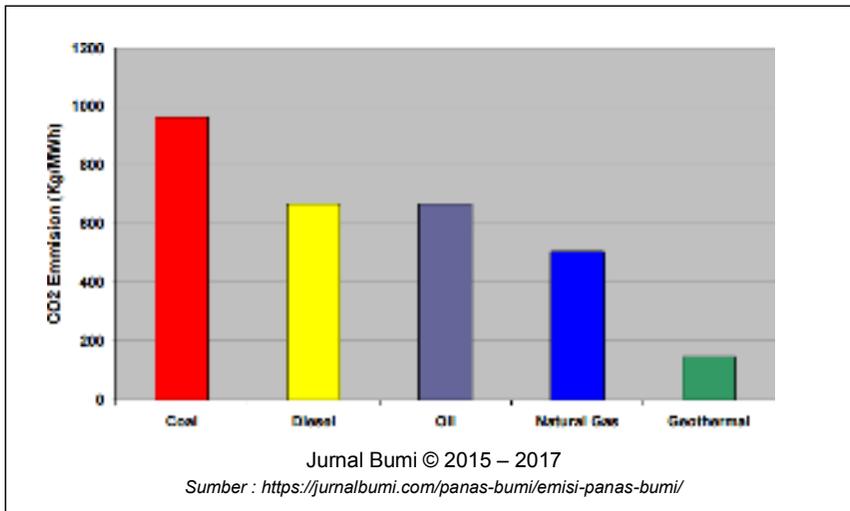
(Source: US Energy Outlook)

Ketersediaan sumber panas abadi merupakan salah satu faktor yang menyebabkan biaya produksi tenaga listrik dari energi panas bumi menjadi relatif lebih rendah. Hal ini disebabkan tidak diperlukannya biaya bahan bakar dalam pengoperasiannya.

Namun demikian, pembangunan suatu pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) memerlukan biaya investasi yang relatif tinggi. Hal tersebut disebabkan oleh biaya eksplorasi yang tinggi, dengan tingkat risiko kegagalan yang tinggi pula. Biaya investasi PLTP dengan kapasitas kecil (< 1 MW), berkisar antara US\$ 3.000-5.000 per kilowatt (kW), sementara untuk kapasitas yang lebih tinggi (>1MW), berkisar antara US\$ 1.500-2.500 per kW. Sebagai perbandingan, biaya investasi rata-rata untuk PLTU adalah US\$ 1.300 per kW, sedangkan PLTA US\$ 2.000 per kW.

Biaya investasi PLTP juga ber-variasi diantara daerah yang berbeda, yang dipengaruhi oleh berbagai karakter dari lapangan panas bumi, seperti kondisi temperatur, tekanan dan jenis fluida yang tersedia dalam batuan reservoir, oleh karena akan mempengaruhi jenis teknologi yang akan digunakan. Seperti penggunaan *separator / flasher* pada reservoir panas bumi yang di dominasi oleh fluida cair, penggunaan pemindah panas (*heat exchanger*) bagi fluida panas bumi yang ber temperatur rendah, atau bahkan dengan diterapkannya teknologi *fracking* pada sistem panas bumi *hot dry rock*. Faktor lainnya adalah kandungan gas korosif dan atau beracun yang memerlukan penanganan khusus.

Namun demikian nilai keekonomian energi panas bumi akan terus berkembang sejalan dengan perkembangan teknologi. Sejauh ini teknologi panas bumi masih bertumpu pada teknologi uap, dimana energi panas yang tersedia secara abadi harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi tenaga uap sebelum kemudian dikonversikan kembali menjadi tenaga listrik. Sehingga ketergantungannya pada keberadaan fluida panas bumi menjadi faktor utama, yang mempengaruhi nilai ke ekonomianya. Hal ini tentunya dapat berubah, misalnya apabila kelak ditemukan teknologi yang lebih ekonomis, yang misalnya mampu untuk mengkonversikan energi panas menjadi energi listrik tanpa melalui media uap.



*Gambar 6.18. : Perbandingan emisi gas CO<sub>2</sub> panas bumi dengan berbagai bahan bakar fosil*

Tidak diperlukannya bahan bakar merupakan nilai tambah keekonomian pembangkit listrik tenaga panas bumi. Tanpa kebutuhan bahan bakar menjadikan kebutuhan lahan yang lebih sedikit, karena tidak diperlukannya ruang penyimpanan bahan bakar dan pembuangan limbahnya. Tidak adanya pembakaran juga menjadikan pembangkit ini tidak menghasilkan emisi oksida karbon yang signifikan dibandingkan dengan pembangkit tenaga listrik berbahan bakar hidrokarbon.

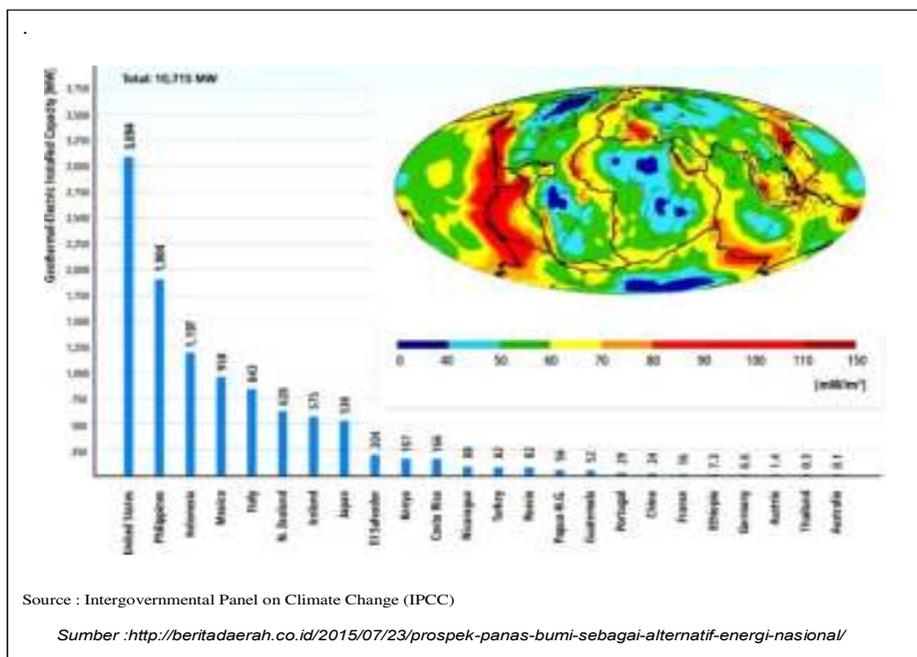
## **6.7. Prospek Pengembangan Energi Panas Bumi**

Magma, yang merupakan bagian dari mantel setebal 2900 km, adalah sumber energi panas bumi dalam jumlah yang nyaris tak terbatas. Namun hanya sebagian yang berpotensi untuk dikembangkan secara efektif oleh karena keterbatasan teknologi, dimana sebagian besar berada jauh dibawah permukaan bumi tertutup oleh kerak bumi yang tebal, sehingga sulit untuk dimanfaatkan.

Potensi panas bumi yang efektif untuk dikembangkan terdapat pada lokasi-lokasi tertentu dipermukaan bumi, dimana kerak bumi yang menutupinya cukup tipis, atau terdapat celah- celah rekahan

yang memungkinkan magma menerobos mendekati atau keluar dari permukaan bumi. Lokasi yang dimaksud sering muncul ke permukaan bumi dalam bentuk aktivitas vulkanik ataupun berbagai fenomena *hot spot*.

Catatan dari Asosiasi Panas Bumi Internasional (IGA - *International Geothermal Association*) menyatakan bahwa pada tahun 2010 telah dioperasikan pembangkit-pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan total kapasitas 10 715 MW daya terpasang, yang tersebar di 24 negara, dan telah menghasilkan 67 246 GWh. Angka ini menunjukkan peningkatan sebesar 20% dibandingkan pada tahun 2005, dan diprediksi akan terus meningkat sejalan dengan perkembangan dalam teknologi eksploitasinya.



**Gambar 6.19. : Produksi tenaga listrik panas bumi tahun 2010, dan zonasi potensi panas bumi dunia.**

Sampai dengan tahun 2010, Amerika Serikat merupakan produsen tenaga listrik panas bumi terbesar dunia, dengan total kapasitas terpasang 3 086 MW dari 77 unit pembangkitnya. Diantaranya berasal dari gugusan pembangkit listrik tenaga panas bumi terbesar dunia *The Geysers* di California.

Filipina merupakan produsen tenaga listrik kedua terbesar dunia, dengan total kapasitas terpasang sebesar 1 904 MW, memasok sekitar 27% tenaga listrik dari seluruh negeri. Sementara itu Indonesia pada posisi ketiga, dengan kapasitas terpasang sebesar 1 197 MW.

**Tabel 6.4. : Kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi dunia**

Negara	Kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi			Persentase(%) Terhadap Produksi Nasional
	Kapasitas (MW) 2007	Kapasitas (MW) 2010	Kapasitas (MW) 2012	
Amerika Serikat	2.687	3.086		0,30
Filipina	1.909,7	1.904		27,00
Indonesia	992	1.197		3,70
Meksiko	953	958		3,00
Italia	810,5	843		1,50
Selandia Baru	471,6	628		10,00
Islandia	421,2	575		30,00
Jepang	535,2	536		0,10
El Salvador	204,4	204		25,00
Kenya	128,8	167		11,20
Costa Rica	162,5	166		14,00
Turki	38	94	162	0,30
Nikaragua	87,4	88		10,00
Rusia	79	82		
Parma Nagini	56	56		
Guatemala	53	52		
Portugal	23	29		
Cina	27,8	24		
Perancis	14,7	16		
Etiopia	7,3	7,3		
Jerman	8,4	6,6		
Austria	1,1	1,4		
Australia	0,2	1,1		
Thailand	0,3	0,3		
<b>TOTAL</b>	<b>9.731,9</b>	<b>10.709,7</b>		

Sumber : [https://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit\\_listrik\\_tenaga\\_panas\\_bumi](https://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit_listrik_tenaga_panas_bumi)

Sementara itu, Kanada yang merupakan salah satu negara besar pada jalur Lingkaran Pasifik, yang disebut juga sebagai *ring of fire*, sejauh ini belum mengembangkan potensi tenaga panas buminya. Dimana wilayah dengan potensi terbesarnya terdapat di *Cordillera-Kanada*, yang membentang dari *British Columbia* sampai ke *Yukon*, diperkirakan memiliki potensi sebesar 1 550 MW – 5 000 MW.

Indonesia dengan jumlah gunung api aktif terbesar di dunia, merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di





# 7

## Tenaga Angin

Pemanfaatan tenaga angin telah dikenal sejak lama, sejak sekitar tahun 5000 S.M, dimana tenaga angin mulanya digunakan untuk membantu pelayaran kapal-kapal di sekitar sungai Nil. Berikutnya pemanfaatan tenaga angin pada negara-negara kepulauan, menjadi sarana dalam transportasi antar pulaunya. Bahkan menjadi andalan transportasi laut utama dunia, terutama pada masa-masa pra *revolusi industri*, sebelum ditemukannya teknologi mesin uap.

Secara tradisional, masyarakat nelayan sudah sejak lama memanfaatkan tenaga angin. Para nelayan pergi melaut pada sore menjelang malam hari dengan memanfaatkan tiupan angin darat. Dan Kembali mendarat pada pagi hari dengan memanfaatkan tiupan angin laut.

Dari bentangan layar yang menampung angin untuk menggerakkan armada kapal tersebut, kemudian pengetahuan berkembang lebih lanjut, sehingga ditemukannya teknologi kincir angin. Namun sampai saat ini belum diketahui secara pasti siapa penemu kincir angin. Informasi tentang penggunaan kincir angin ditemukan pada naskah tua berbahasa Arab dari abad ke-9 Masehi, yang menuliskan bahwa kincir angin yang dioperasikan di perbatasan Iran dan Afganistan sudah ada sejak beberapa abad sebelumnya. Kincir angin tersebut yang dinamakan *Persian windmill*, juga digunakan di Cina untuk menguapkan air laut dalam memproduksi garam, yang terakhir masih digunakan di Crimea, Eropa dan Amerika Serikat. Fungsi pertama kali yang dikenal tentang penggunaan Kincir angin, adalah untuk menumbuk biji-bijian tanaman padi.

Belanda adalah negara yang dikenal memanfaatkan teknologi kincir angin secara meluas. Kincir angin pada awal keberadaannya di

Belanda pada sekitar abad 13 difungsikan untuk mendorong air ke lautan, untuk membentuk daratan baru yang dikenal sebagai *polder*. Hal ini dilakukan oleh karena sebagian besar wilayah daratannya berada pada elevasi di bawah permukaan laut. Namun seiring dengan perkembangan teknologi, pada abad ke-17 kincir angin digunakan juga sebagai sarana pembantu dalam bidang pertanian dan industri lainnya, seperti memproduksi kertas, mengasah kayu, mengeluarkan minyak dari biji, dan menggiling jagung. Seiring berjalannya waktu, kincir angin terus mengalami peningkatan fungsi, dan saat ini kincir angin dimanfaatkan juga untuk menghasilkan tenaga listrik.

Kincir angin pertama yang digunakan untuk membangkitkan listrik dibangun oleh *P. La Cour* dari Denmark pada akhir abad ke-19, disebut kincir angin type *propeler* atau *turbin*. Eksperimen kincir angin sudu kembar dilakukan di Amerika Serikat tahun 1940, dengan ukuran sangat besar, disebut mesin *Smith-Putman* oleh karena dirancang oleh *Palmer Putman*, ber kapasitas 1,25 MW, dibuat oleh *Morgen Smith Company* dari Pennsylvania.

Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan tenaga listrik.

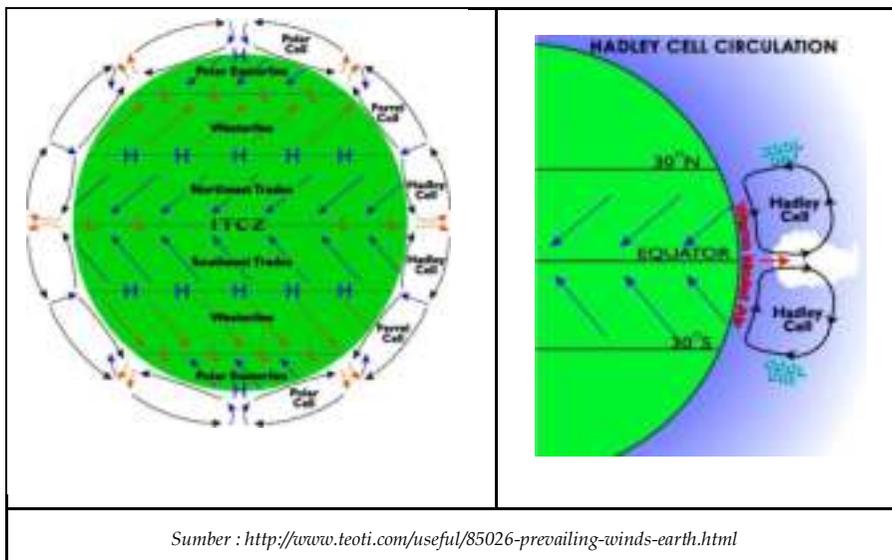
## **7.1. Potensi Tenaga Angin**

Energi angin timbul akibat sirkulasi udara di atmosfer yang dipengaruhi oleh aktivitas matahari dalam menyinari bumi yang berotasi. Sehingga, daerah khatulistiwa (*equator*) akan menerima energi radiasi matahari lebih banyak bila dibandingkan dengan daerah kutub. Perbedaan intensitas penyinaran matahari tersebut menyebabkan terjadinya perbedaan kerapatan masa dan tekanan udara diberbagai tempat yang berbeda. Perbedaan kerapatan dan tekanan udara inilah yang dapat menyebabkan pergerakan udara, dan pergerakan ini juga disebut sebagai angin.

Masa udara yang menjadi ringan oleh karena terpanaskan oleh matahari akan bergerak keatas, dan masa udara dingin akan mengisi ruang kosong yang ditinggalkannya, demikian seterusnya terjadi pergerakan arus konveksi udara dipermukaan bumi dalam bentuk

angin. Maka posisi matahari terhadap permukaan bumi akan selalu mempengaruhi arah pergerakan angin.

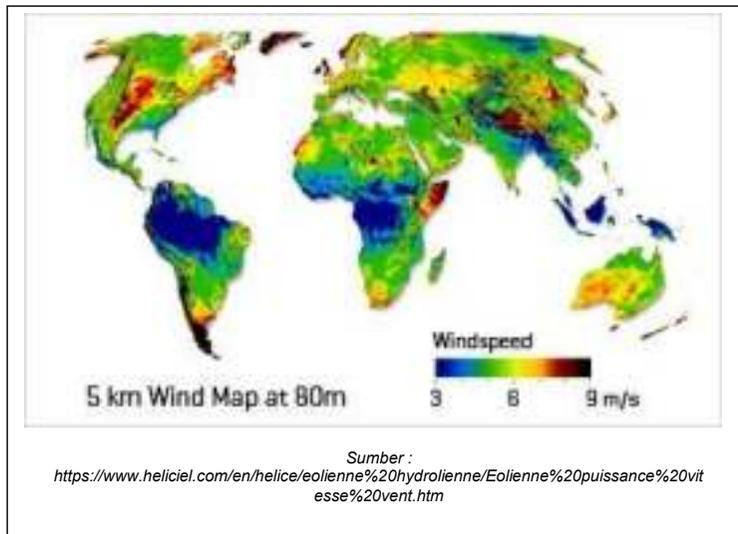
Didaratan pergerakan angin berinteraksi dengan permukaan bumi dengan variasi kekasaran, dan material penutupnya, baik berupa vegetasi maupun bangunan di atasnya, sehingga terjadi pergesekan-pergesekan yang menghambat pergerakannya. Pergerakan angin akan dapat mencapai kecepatan yang optimal pada ketinggian yang tidak terpengaruh oleh kekasaran permukaan bumi tersebut. Untuk alasan inilah, maka banyak PLTB dibangun dengan menggunakan tower yang tinggi atau dipasang diatas bangunan.



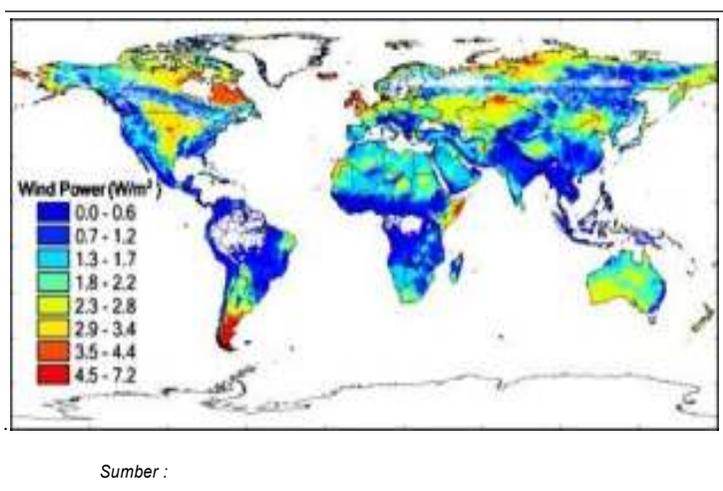
*Gambar 7.1. : Pergerakan angin yang dipengaruhi oleh peredaran matahari*

Potensi tenaga angin bagaimanapun akan merupakan fungsi dari kecepatan angin. Namun besarnya kecepatan angin tidak merata, dalam batasan ruang dan waktu. Dalam batasan ruang, kecepatan angin ber variasi secara vertikal. Sedangkan secara horisontal bervariasi secara geografis dan waktu, sesuai dengan posisi matahari yang bergeser diantara garis balik utara dan garis balik selatan secara periodik. Maka distribusi daerah-daerah potensial untuk pembangkitan listrik tenaga angin pun akan mengikuti pola distribusi kecepatan angin tersebut.

Sejauh ini, listrik tenaga angin belum menjadi pemasok utama kebutuhan tenaga listrik dunia. Dimana Amerika Serikat dan Cina merupakan produsen listrik terbesar dunia. Namun pada masa mendatang, dengan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil dunia, dan semakin merebaknya isu pemanasan global, maka tenaga angin mempunyai prospek untuk berkembang, terutama dengan semakin berkembangnya teknik pembangkitannya.



*Gambar 7.2. : Peta kecepatan angin rata-rata tahunan dunia*



*Gambar 7.3. : Peta potensi tenaga angin dunia*

Tabel 7.1. : Daftar 10 negara produsen terbesar listrik tenaga angin

<u>Top wind-power electric power producing countries in 2012</u>		
Country	Wind-power Production (TWh)	% of World Total
<a href="#">United States</a>	140,9	26,4%
<a href="#">China</a>	118,1	22,1%
<a href="#">Spain</a>	49,1	9,2%
<a href="#">Germany</a>	46,0	8,6%
<a href="#">India</a>	30,0	5,6%
<a href="#">United Kingdom</a>	19,6	3,7%
<a href="#">France</a>	14,9	2,8%
<a href="#">Italy</a>	13,4	2,5%
<a href="#">Canada</a>	11,8	2,2%
<a href="#">Denmark</a>	10,3	1,9%
<a href="#">(rest of world)</a>	80,2	15,0%
<b>World Total</b>	<b>534,3</b>	<b>100,0%</b>

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power)

## 7.2. Perhitungan Potensi Tenaga Angin

Prinsip kerja PLTB adalah dengan memanfaatkan energi kinetik angin yang masuk ke dalam area efektif turbin untuk memutar baling-baling / kincir angin, kemudian energi putaran ini diteruskan ke generator untuk membangkitkan tenaga listrik.

Mengacu kepada teori fisika klasik, dimana suatu masa yang bergerak akan mempunyai energi kinetik, maka energi yang dihasilkan oleh pergerakan masa udara atau angin dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$E_k = 0,5 mv^2$$

Dimana :

$E_k$  = Energi kinetik

$m$  = Masa angin

$v$  = Kecepatan angin

Apabila udara atau angin bergerak melalui lorong dengan permukaan seluas sapuan rotor dari suatu kincir angin ( $A$ ), maka akan menghasilkan energi kinetik sebagai berikut :

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

Dimana :

$$m = A \cdot v \cdot \rho \text{ (kg/det)}$$

$$\rho = \text{Masa jenis udara (= 1,225 kg/m}^3\text{)}$$

A = Luas Sapuan Rotor yang merupakan permukaan area efektif turbin (m<sup>2</sup>) =  $\frac{1}{4} \pi \cdot D^2$

D = Diameter rotasi (m)

Maka :

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \right) v^3$$

Namun demikian, tidak semua energi kinetik dari pergerakan angin terkonversikan menjadi tenaga listrik. Bagaimanapun ada faktor pengurang yang diakibatkan oleh tingkat efisiensi turbin, generator dan peralatan lainnya. Sehingga konversi energi yang dihasilkan dari tenaga angin, masih harus dikalikan dengan faktor koreksi sebagai koefisien daya (Cp). Maka tenaga listrik yang dihasilkan dari sistem pembangkit (P) menjadi :

$$P = C_p \cdot E_k$$

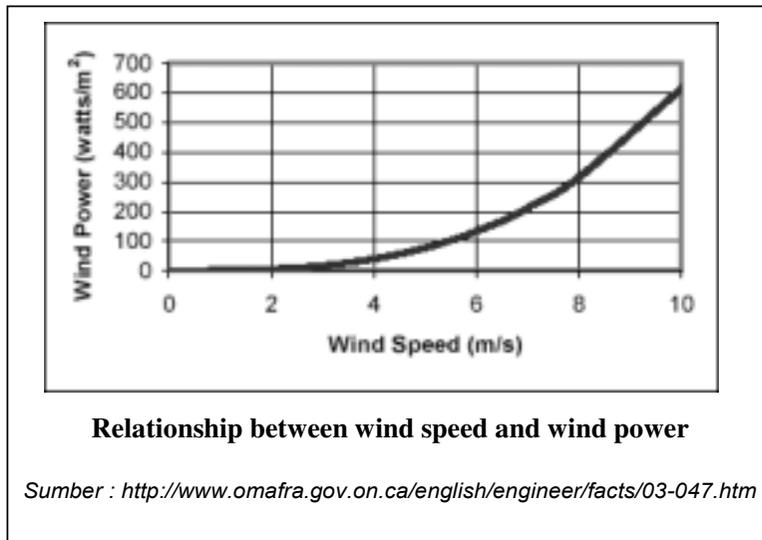
$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho \left( \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \right) v^3$$

Dimana :

P = Daya yang dihasilkan (Watt)

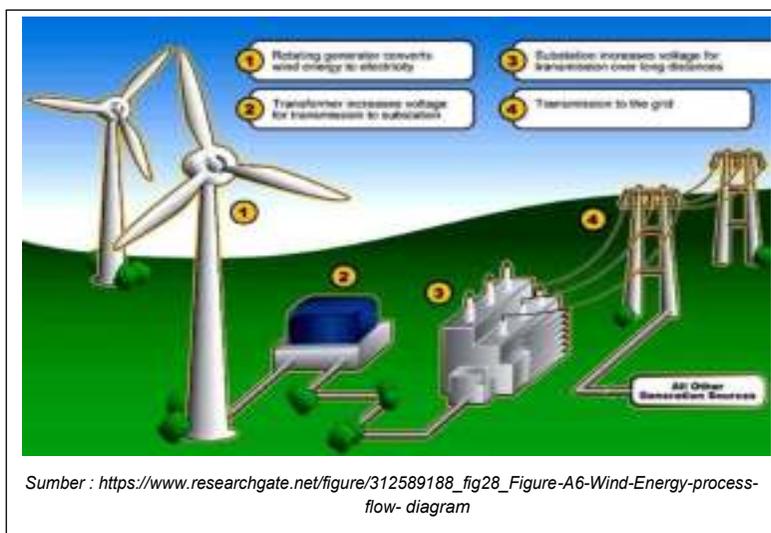
Cp = Koefisien daya



*Gambar 7.4. : Grafik hubungan antara energi dan kecepatan angin*

### 7.3. Teknologi Pembangkitan Listrik Tenaga Angin (PLTB)

Kincir angin adalah alat yang dirancang untuk mengkonversikan energi angin menjadi energi mekanik, yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai aktivitas. Salah satunya adalah untuk membangkitkan tenaga listrik melalui turbin angin.



*Gambar 7.5. : Skema pemangkitan listrik tenaga angin*

Kincir angin yang menghasilkan listrik bekerja berdasarkan adanya *Prime Mover* atau penggerak mula yaitu angin. Angin menjadi penggerak awal yang memutar kincir, putaran kincir kemudian memutar turbin angin. Berikutnya, putaran turbin angin memutar generator listrik untuk menghasilkan tenaga listrik.



**Gambar 7.6. :** Bagan alir proses pembangkitan listrik tenaga angin

Komponen utama pembangkit listrik tenaga angin dalam hal ini adalah turbin angin. Turbin angin berputar oleh energi yang dihasilkan oleh kecepatan angin memutar bilah kipas (*Rotor Blade*). Putaran tersebut dikonversikan menjadi energi mekanik, untuk selanjutnya dikonversikan menjadi menjadi energi listrik oleh perputaran generator listrik.



**Gambar 7.7. :** Diagram Turbin Angin beserta komponen-komponennya

Selain bilah kipas (*rotor blade*) sebagai penangkap energi angin, banyak lagi komponen teknis dari suatu turbin angin. Beberapa komponen penting yang spesifik dalam sistem pembangkitan listrik tenaga angin adanya komponen-komponen dengan fungsi control, diantaranya adalah :

- **Gearbox**, yang berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi, biasanya dengan perbesaran 1 : 60.
- **Brake System**, sebagai komponen pengendali putaran. Komponen ini diperlukan oleh karena fluktuasi kecepatan angin yang selalu berubah ubah. Salah satunya fungsinya adalah untuk menghindari terjadinya putaran turbin yang melampaui batas, yang dapat terjadi oleh angin yang luar biasa kencang. Bagaimanapun generator listrik mempunyai batas putaran kerja, dimana apabila terlampaui akan dapat mengganggu kinerjanya, seperti terjadinya *overheating* yang dapat berakibat pada kerusakan generator.
- **Komponen Penyimpan Energi** diperlukan oleh karena energi angin yang bervariasi dengan fluktuasi yang lebar, sehingga pasokan energinyapun bervariasi pula. Untuk ini diperlukan komponen penyimpanan (*electric power storage*), sehingga tenaga listrik dapat disalurkan kepada pengguna secara stabil.
- **Rectifier-Inverter** adalah komponen pengubah type arus listrik. Putaran turbin dalam hal ini akan menghasilkan arus listrik bolak-balik (*AC*), sehingga perlu dirubah menjadi arus listrik searah (*DC*) dengan komponen *rectifier*, agar dapat disimpan dalam komponen penyimpanan. Sementara itu komponen penyimpanan akan mengeluarkan tenaga listrik dalam bentuk arus listrik searah (*AC*), sehingga diperlukan komponen *inverter* untuk merubahnya kembali menjadi arus listrik bolak-balik (*AC*), sebelum disalurkan kepada pengguna.

## **7.4. Kendala dan Aspek Lingkungan**

Pembangkit Listrik Tenaga Angin, atau sering juga disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), adalah pembangkit listrik energi terbarukan (*renewable*) yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja cukup baik dibandingkan dengan pembangkit

listrik energi terbarukan lainnya. Bagaimanapun, pengoperasian PLTB tidak terkait langsung dengan proses pembakaran, sehingga tidak menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub> dan gas-gas lainnya. Namun demikian, oleh karena potensi tenaga angin merupakan fungsi dari kecepatan angin, maka pemanfaatannya terkendala oleh hal tersebut.

Kecepatan angin yang tidak tetap dan selalu berubah-ubah menyebabkan pasokan tenaga listrik yang dihasilkannya berubah-ubah pula. Sehingga diperlukan media penyimpan tenaga listrik seperti halnya *storage battery*, sebelum tenaga listrik didistribusikan. Kecepatan angin yang rendah menyebabkan produksi tenaga listrik per satuan luas penampang kincir menjadi kecil pula, sehingga sulit untuk memproduksi tenaga listrik berkapasitas besar. Maka untuk mengembangkan proyek listrik tenaga angin berskala besar, diperlukan sejumlah besar unit kincir angin dan mencakup areal lahan yang sangat luas. Sehingga proyek pengembangan listrik tenaga angin dengan skala besar sering dikenal sebagai *ladang angin (wind farm)*.

Sebagai contoh, ladang angin *The San Gorgonio Pass* di Amerika Serikat, memerlukan 3218 unit turbin angin untuk dapat membangkitkan tenaga listrik sebesar 615 MW, sehingga memerlukan areal lahan yang sangat luas.



**Gambar 7.8. : Ladang angin (wind farm) San Gorgonio Pass – Amerika Serikat**

Sejauh ini, biaya investasi untuk pemanfaatan listrik tenaga angin masih tergolong tinggi, dan kurang andal oleh karena rentan terhadap perubahan cuaca, walaupun biaya produksinya setelah beroperasi relatif rendah. Namun demikian prospek pengembangannya kedepan cukup menjanjikan, terutama dengan perkembangan teknologi yang lebih maju, yang dapat mengatasi kendala faktor-faktor teknis tersebut.

## **7.5. Perkembangan PLTB**

Pada saat ini, Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) telah banyak dimanfaatkan di berbagai negara, terutama di negara-negara dengan tiupan anginnya yang cukup kencang, dan teratur dalam jangka waktu yang cukup lama, seperti di Denmark.

Cina saat ini merupakan negara pemilik PLTB dengan kapasitas terbesar di dunia, yaitu dengan kapasitas terpasang sekitar 45 GW, yang dihasilkan dari sekitar 80 ladang kincir angin. Daya listriknya masih terus ditingkatkan dengan memperbanyak ladang kincir angin, mencapai 100 GW. Bahkan secara ambisius, direncanakan seluruh kebutuhan energi listrik mereka akan dipenuhi dengan PLTB pada tahun 2030. Cina juga membangun PLTB dalam skala yang lebih kecil, yang dipasang pada gedung bertingkat.

Amerika Serikat memiliki PLTB dengan kapasitas sekitar 43 GW, yang dihasilkan dari 101 kincir angin. Ladang turbin *Roscoe* merupakan ladang kincir angin terbesar di dunia, dengan kapasitas energi yang dihasilkan mencapai 781 MW, yang dihasilkan dari sekitar 627 buah kincir angin.

Jerman memiliki PLTB dengan kapasitas 28 GW, dari 21.607 kincir angin yang sebagian besar off-shore. Dimana *Enercon-126* merupakan kincir angin terbesar di dunia, dengan diameter rotor 126 meter dan menghasilkan energi sekitar 7 MW.

Spanyol memproduksi listrik tenaga angin sekitar 21 GW, yang merupakan 16% dari seluruh energi listrik yang dihasilkan negara itu. Sebagian besar PLTB-nya berada di dataran perbukitan.

India memproduksi listrik tenaga angin yang menghasilkan tenaga listrik dengan kapasitas sekitar 14 GW, sekitar 1,6% dari total produksi tenaga listriknya. Salah satu ladang kincir anginnya terletak di *Muppadal, Tamil Nadu*.

Negara Denmark menargetkan kontribusi energi angin sekitar 50% pada tahun 2020 dalam bauran energi nasional, bahkan pada untuk tahun 2050 tidak lagi menggunakan energi fosil. Untuk ini pemerintahnya tidak hanya mengembangkan PLTB, namun juga membangun pabrik-pabrik yang memproduksi mesin dan perlengkapan pembangkit listrik tenaga angin.

**Tabel 7.2. : Daftar potensi tenaga angin Indonesia per provinsi**

Satuan: MW			Satuan: MW		
No.	Provinsi	Potensi	No.	Provinsi	Potensi
1	Nusa Tenggara Timur	10.188	18	Kepulauan Riau	822
2	Jawa Timur	7.907	19	Sulawesi Tengah	908
3	Jawa Barat	7.038	20	Aceh	894
4	Jawa Tengah	5.213	21	Kalimantan Tengah	681
5	Sulawesi Selatan	4.193	22	Kalimantan Barat	554
6	Maluku	3.188	23	Sulawesi Barat	514
7	Nusa Tenggara Barat	2.605	24	Maluku Utara	504
8	Bangka Belitung	1.787	25	Papua Barat	437
9	Banten	1.753	26	Sumatera Barat	428
10	Bengkulu	1.513	28	Sumatera Utara	356
11	Sulawesi Tenggara	1.414	29	Sumatera Selatan	301
12	Papua	1.411	30	Kalimantan timur	212
13	Sulawesi Utara	1.214	31	Gorontalo	137
14	Lampung	1.137	27	Kalimantan Utara	73
15	DI. Yogyakarta	1.079	32	Jambi	37
16	Bali	1.019	33	Riau	22
17	Kalimantan Selatan	1.006	34	DI.Jakarta	4
<b>Total</b>					<b>60.647,0</b>

Sumber : Lampiran Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017

Sumber : <https://setkab.go.id/potensi-pengembangan-pltb-di-indonesia/>

Potensi tenaga angin Indonesia teridentifikasi sebesar 60.647,0 MW, pada angin dengan kecepatan lebih dari 4 m/detik (*sumber : Lampiran Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017*).

Indonesia mempunyai sumber energi angin yang cukup besar dan tersebar di berbagai daerah untuk dikembangkan menjadi PLTB. Berdasarkan hasil penelitian Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), dari 166 lokasi yang diteliti terdapat 35 lokasi

yang mempunyai potensi angin yang baik, dengan kecepatan angin lebih dari 5 meter perdetik pada ketinggian 50 meter. Yaitu meliputi daerah-daerah di Nusa Tenggara Barat (NTB), Nusa Tenggara Timur (NTT), pantai selatan Jawa dan pantai selatan Sulawesi. Disamping itu, LAPAN juga menemukan 34 lokasi yang kecepatan anginnya mencukupi dengan kecepatan 4 sampai 5 meter perdetik (*Energinet, DEA, 2016*).



**Gambar 7.9. : PLTB Sidrap di Sulawesi Selatan**

PLTB Sidrap I, yang merupakan pembangkit bertenaga angin skala komersial pertama di Indonesia, terletak di Desa Mattirotasi dan Desai Lainungan, Kec. Watang Pulu, Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, mulai beroperasi secara komersial pada tanggal 5 April 2018. Pembangunan proyek PLTB Sidrap I sendiri berlangsung selama 2,5 tahun, dari bulan Agustus 2015 s.d. Maret 2018.



# 8

## Tenaga Matahari

Surya atau matahari sesungguhnya 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 daripadanya mengarah ke bumi. Maka bumi menerima sebesar 179 Petawatt (PW) radiasi surya (*insolasi*) pada bagian atas dari 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, sedangkan sebagian kecil lainnya berada pada rentang *ultraviolet* dekat.

Penyerapan radiasi matahari oleh permukaan daratan, lautan dan atmosfer mengakibatkan kenaikan temperatur. Pemanasan udara dan perairan laut ini kemudian menggerakkan peredaran air dalam siklus hidrologi, dan juga menyebabkan terjadinya fenomena atmosferik lainnya, seperti angin, siklon dan anti-siklon.

Di daratan, cahaya matahari melalui proses *fotosintesis* pada tanaman ber-klorofil, mengubah energinya menjadi energi kimia, dalam bentuk ikatan kimia senyawa karbohidrat yang merupakan materi kehidupan (*biomasa*), dan merupakan komponen dasar dari sumber energi potensial bahan bakar *fosil*, baik berupa minyak dan gas bumi, ataupun batubara.

## 8.1. Pemanfaatan Tenaga Matahari

Pemanfaatan energi surya umumnya merujuk pada penggunaan radiasi matahari untuk kebutuhan praktis, secara umum dikategorikan menjadi teknologi pasif dan teknologi aktif. Teknologi pasif pada dasarnya adalah upaya adaptatif terhadap fluktuasi *insolasi*, yang diakibatkan oleh pergeseran posisi matahari terhadap permukaan bumi. Hal ini sudah sejak lama diterapkan secara tradisional dalam bidang pertanian, yaitu dalam penetapan masa musim tanam dan musim panen.

Walau energi matahari umumnya dianggap sebagai sumberdaya alam yang berlimpah, namun pentingnya upaya rekayasa dan penyesuaian terhadap musim untuk pertanian diperlukan pada daerah-daerah dengan keterbatasan intensitas sinar matahari. Petani Perancis dan Inggris misalnya, menggunakan dinding buah untuk memaksimalkan penyerapan energi surya selama pendeknya masa tanam pada musim dingin. Dinding ini berfungsi sebagai penahan keluarnya masa *thermal*, dan mempercepat pematangan dengan cara menjaga tanaman agar tetap hangat. Pada tahun 1699, *Nicolas Fatio de Duiller* bahkan menyarankan menggunakan mekanisme lacak yang dapat memutar dinding mengikuti posisi matahari.

Teknik rumah kaca adalah salah satu upaya dalam bidang pertanian, dimana pemanfaatan panas matahari yang lebih dikembangkan, namun masih bersifat pasif dengan menyesuaikan

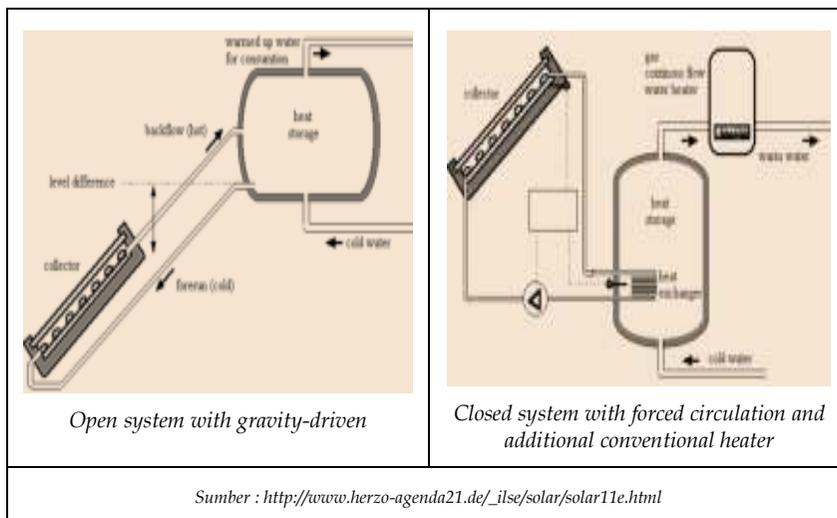
peredaran matahari. Teknik ini mengubah energi cahaya matahari menjadi energi panas, yang memungkinkan produksi dan pertumbuhan tanaman sepanjang tahun. Rumah kaca primitif pertama kali digunakan pada jaman Romawi untuk memproduksi mentimun sepanjang tahun, untuk kaisar Romawi *Tiberius*. Sedangkan rumah kaca modern yang pertama dibangun di Eropa pada abad ke-16, dikhususkan untuk tanaman eksotik yang diperoleh dari wilayah yang dijelajahi. Selanjutnya, teknologi rumah kaca tetap menjadi bagian penting dari perkebunan modern saat ini.

Upaya pemanfaatan energi matahari secara aktif dilakukan terutama terkait dengan pemanasan, yaitu dengan mengarahkan sinar matahari secara terfokus, sehingga diperoleh energi panas secara terakumulasi. Cara ini terutama dilakukan dalam teknik pemanasan

air untuk berbagai kepentingan. Sistem pemanasan air menggunakan sinar matahari dilakukan pada daerah dengan lintang bujur geografis rendah atau daerah subtropis, dimana 60% - 70% air panas untuk keperluan rumah tangga, dimana air panas dengan temperatur sampai dengan 60 °C dapat diperoleh dengan menggunakan cara ini.

Jenis pemanas air matahari yang umum digunakan adalah kolektor buluh (44%) dan plat datar dengan kaca (34%) untuk kebutuhan air panas rumah tangga, kolektor plastik tanpa kaca (21%) digunakan untuk memanaskan kolam renang.

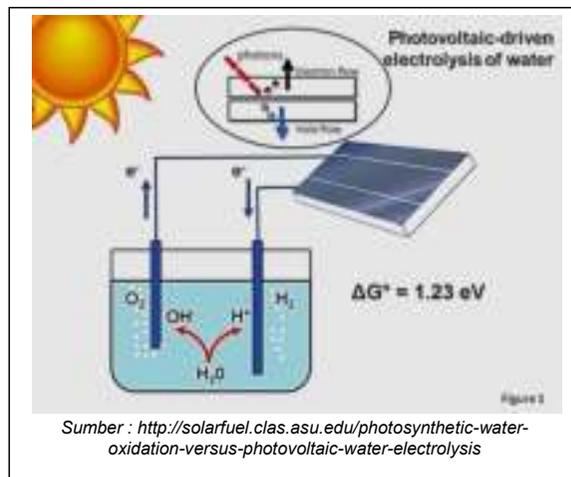
Sampai dengan tahun 2007, kapasitas total terpasang dari sistem air panas matahari adalah sekitar 154 GW, dimana Cina merupakan pengguna dengan kapasitas terbesar, yaitu dengan kapasitas terpasang 70 GW sampai dengan tahun 2006. Sementara itu Amerika Serikat, Kanada, dan Australia, menggunakan pemanasan kolam renang dengan energi matahari, dengan kapasitas terpasang setara dengan 18 GW pada tahun 2005.



**Gambar 8.1. : Diagram pemanasan air dengan tenaga surya**

Konversi tenaga matahari menjadi tenaga listrik mulai dikembangkan dengan ditemukannya teknologi sel surya atau sel *photovoltaic*. Yaitu peralatan yang mampu merubah sinar matahari menjadi arus listrik dengan menggunakan efek *photovoltaic*.

Sel *photovoltaic*, pertama dibuat oleh *Charles Fritts* pada tahun 1880an. Pada tahun 1931 *Dr. Bruno Lange*, membuat sel *photovoltaic*, menggunakan perak selenida sebagai pengganti tembaga oksida. Dengan melanjutkan penelitian *Russel Ohl* pada tahun 1940an, peneliti *Gerald Pearson*, *Calvin Fuller*, dan *Daryl Chapin* membuat sel surya silikon pada tahun 1954.

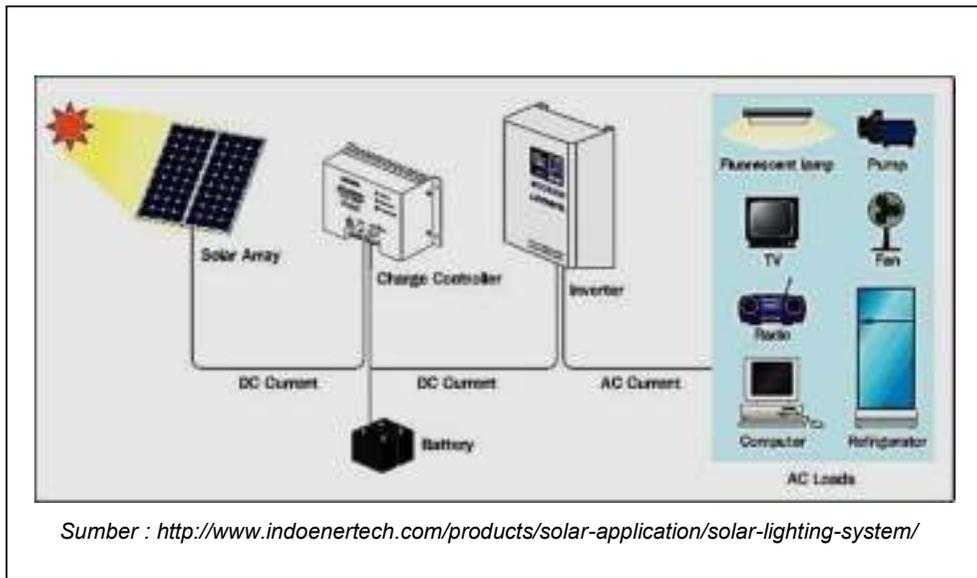


**Gambar 8.2. : Diagram proses konversi tenaga surya menjadi arus listrik**

Proses pengubahan cahaya matahari menjadi listrik, dilakukan baik secara langsung menggunakan *photovoltaic* atau secara tak langsung menggunakan tenaga matahari terpusat (*CSP-concentrated solar power*). Sistem *CSP* menggunakan lensa atau cermin dan sistem lacak untuk memfokuskan paparan cahaya matahari yang luas menjadi seberkas sinar kecil yang terfokus. Sel *photovoltaic* kemudian merubahnya menjadi arus listrik menggunakan efek *fotolistrik*.

Pembangkit *CSP* komersial pertama kali dikembangkan pada tahun 1980an. Yaitu berupa *CSP* berkapasitas 354 MW di gurun Mojave-California. Pembangkit listrik *CSP* lainnya adalah pembangkit listrik tenaga surya Solnova (150 MW) dan pembangkit listrik tenaga surya Andasol (100 MW) di Spanyol. Proyek listrik tenaga surya Agua Caliente (250 MW) di Amerika Serikat dan Lahan Surya Charanka (221) MW di India adalah pembangkit *photovoltaic* berikutnya. Sementara itu sistem *photovoltaic* rumah tangga, yang dipasang di

atap-atap dengan kapasitas kecil kurang dari 5 kW, yang terhubung dengan saluran listrik menggunakan meteran net dan/atau tarif feed-in, juga mulai diminati dan dikembangkan.



Gambar 8.3. : Diagram sistem Photovoltaic rumah tangga

## 8.2. Potensi Tenaga Surya

Energi radiasi sinar matahari pada dasarnya secara kuantitatif berjumlah tak terbatas bagi kehidupan bumi. Maka, daerah tropis disekitar khatulistiwa adalah daerah yang mengalami penyinaran matahari terbanyak sepanjang tahun, dan merupakan habitat mahluk hidup utama dibumi, baik manusia, binatang atau tumbuhan. Namun demikian hanya sebagian kecil radiasi sinar matahari yang mencapai bumi, banyak diantaranya yang terpantulkan kembali ke ruang angkasa oleh selimut atmosfer, ataupun gumpalan awan, uap air diudara, bahkan butiran-butiran debu yang melayang. Sehingga hanya sebagian kecil yang mencapai permukaan bumi, itupun hanya pada bagian permukaan bumi yang menghadap matahari pada siang hari, sehingga diperlukan unit penyimpanan energi seperti halnya *storage battery*.

Kendala yang dihadapi dalam pemanfaatan energi surya adalah, jumlah *insolasi* matahari per satuan luas permukaan yang kecil, sehingga diperlukan permukaan yang sangat luas untuk dapat menghasilkan listrik tenaga surya dalam kapasitas besar. Kendala lainnya adalah, bahwa teknologi konversi sejauh ini baru mampu mengkonversikan energi radiasi surya menjadi listrik arus searah (*DC - direct current*), sehingga masih diperlukan *inverter* untuk merubahnya menjadi listrik arus bolak balik (*AC - alternating current*). Namun bagaimanapun, wilayah tropis merupakan daerah potensial utama bagi pengembangan energi matahari, oleh karena mengalami radiasi sinar matahari secara maksimal sepanjang tahun.



<http://www.alternative-energy-news.info/benefits-solar-power-infographic/>

**Gambar 8.4. : Peta Potensi Tenaga Matahari (Insolasi)**

Sejauh ini, Cina merupakan negara produsen listrik tenaga matahari terbesar, dengan kapasitas terpasang sebesar 78.07 GW pada tahun 2016, dan cenderung meningkat pesat pada tahun-tahun berikutnya.

Tabel 8.1. : Daftar 10 negara utama produsen listrik tenaga surya

<u>Installed PV Solar Power in 2016</u>			
# Nation	<u>Total Capacity</u>	<u>Added Capacity</u>	<u>Of total consumption</u>
	(GW)	(GW)	
1  <a href="#">China</a>	78.07	34.54	1.07%
2  <a href="#">Japan</a>	42.75	8.6	4.9% (2016)
3  <a href="#">Germany</a>	41.22	1.52	6.2%-6.7%
4  <a href="#">United States</a>	40.3	14.73	1.4%
5  <a href="#">Italy</a>	19.28	0.37	7.5% (2014)
6  <a href="#">United Kingdom</a>	11.63	1.97	3.4%
7  <a href="#">India</a>	9.01	3.97	
8  <a href="#">France</a>	7.13	0.56	1.6%
9  <a href="#">Australia</a>	5.9	0.84	2.4% (2015)
10  <a href="#">Spain</a>	5.49	0.06	3.2% (2013)

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_power\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country)

### 8.3. Pengembangan Potensi Tenaga Surya di Indonesia

PLTS adalah pembangkit listrik tenaga surya, sangat potensial untuk dikembangkan di Indonesia, oleh karena posisi geografisnya yang terletak di garis Khatulistiwa, yang mendapatkan energi sinar matahari secara menerus sepanjang tahun. Namun demikian potensi pemanfaatan PLTS sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia belum maksimal, oleh sebab berbagai kendala, seperti biaya investasi dan kebutuhan lahan yang cukup besar.

Data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2016 menunjukkan perkiraan potensi energi surya di Indonesia sebesar 207.898 Megawatt (MW), lebih besar dari potensi sumber energi tebarukan lainnya, seperti tenaga air (75.091 MW), tenaga angin (60.647MW) dan panas bumi (29.544 MW). Namun kapasitas PLTS atau solar panel yang terpasang baru mencapai 78,5 MW, atau sekitar 0,04% dari total potensi yang ada.



***Gambar 8.5. : Ladang PLTS Sikupang, Desa Wineru, Kecamatan Likupang Timur, Kabupaten Minahasa Utara, Provinsi Sulawesi Utara.***

Sejauh ini Ladang PLTS Likupang adalah lapangan PLTS terbesar di Indonesia, beroperasi sejak tanggal 5 September 2019. Dimana sebanyak 64 620 hamparan panel surya tersusun di atas ladang seluas 29 hektar di Desa Wineru, Kecamatan Likupang Timur, Kabupaten Minahasa Utara - Sulawesi Utara. Dengan kapasitas terpasang 21 MWp (Megawatt peak), ladang PLTS Likupang memasok tenaga listrik rata-rata 15 MW per hari.

# 9

## Sumber Energi Biomassa

Biomassa adalah materi yang berasal dari organisme hidup yang meliputi tumbuh-tumbuhan, hewan, beserta produk-produk sampingnya seperti limbah sampah kebun, hasil panen dan berbagai limbah organik lainnya. Biomassa sendiri merupakan materi yang menjadi dasar bagi kehidupan, yang terbentuk dari unsur-unsur utama Karbon (C), Hidrogen (H), dan Oksigen (O), ditambah dengan berbagai unsur anorganik (*unsur Hara*) lainnya dalam jumlah minoritas. Sedangkan energi biomassa adalah energi potensial yang tersimpan dalam bentuk ikatan kimiawi pada materi biomassa, utamanya adalah ikatan kimiawi diantara unsur-unsur Karbon (C) dan Hidrogen (H).

Maka biomassa adalah sumber energi yang dapat dibuat menjadi bahan bakar, yang didapat dari sumber alami yang dapat diperbaharui. Sumber energi biomassa dapat berasal dari kelompok hewan baik berupa mikroorganisme ataupun makroorganisme, dan dapat pula dari tetumbuhan, termasuk sisa-sisa pengolahannya. Energi biomassa terbentuk oleh adanya siklus karbohidrat di bumi dimana semua unsur kehidupan memilikinya, sehingga akan selalu terbarukan (*renewable*) selama siklus tersebut tidak terputus atau terganggu. Namun secara umum, sumber energi biomassa tidak mencakup materi organik yang tertransformasi oleh proses geologis, sehingga menjadi material fosil yang terlepas dari siklus karbohidrat, seperti batubara atau minyak dan gas bumi.

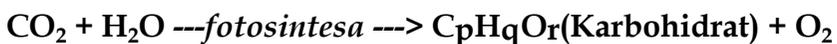
Energi biomassa dapat dimanfaatkan secara langsung maupun tidak langsung sebagai bahan bakar. Briket arang, briket sekam padi, briket ranting dan daun kering adalah contoh bahan bakar biomassa yang dapat digunakan secara langsung sebagai bahan bakar pemanas atau sumber tenaga. Di daerah pedesaan pada negara-negara

berkembang, biomassa dari kayu, daun, sekam padi dan jerami masih merupakan bahan bakar utama untuk pemanasan dan memasak. Catatan dari *International Energy Agency* menunjukkan bahwa energi biomassa masih merupakan 30% pemasok energi utama pada beberapa negara berkembang. Bahkan diperkirakan lebih dari 2 juta penduduk dunia saat ini masih tergantung pada bahan bakar biomassa sebagai sumber energi primer. Namun selain pemanfaatan langsung sebagai bahan bakar padat, biomassa dapat pula diolah menjadi berbagai jenis bahan bakar cair dan gas.

Eksplorasi sumber energi biomassa, pada dasarnya adalah upaya pemanfaatan energi potensial yang tersimpan dalam ikatan kimiawi antara unsur-unsur Karbon (C) dan/atau Hidrogen (H) dalam materi biomassa dengan bantuan Oksigen (O<sub>2</sub>). Dimana ketika ikatan kimiawi antara unsur-unsur tersebut terputus, maka terbebaskan pula kandungan energi potensial di dalamnya.

## 9.1. Siklus Energi Biomassa

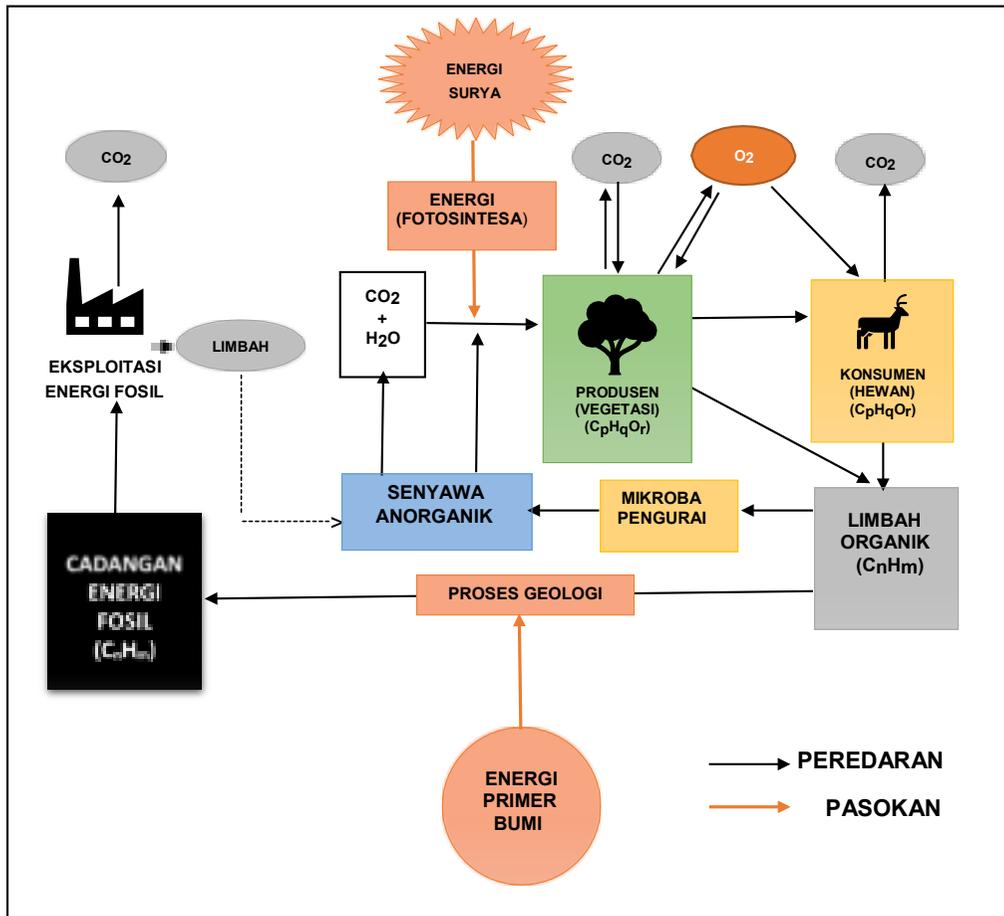
Energi radiasi sinar matahari yang memancar ke permukaan bumi, terurai salah satunya menjadi energi fotosintesa. Energi ini memicu reaksi kimia yang menghasilkan senyawa Karbohidrat (C<sub>p</sub>H<sub>q</sub>O<sub>r</sub>) yang merupakan materi dasar organisme kehidupan. Yaitu dari reaksi kimia antara oksida karbon (CO<sub>2</sub>) di atmosfer dengan air (H<sub>2</sub>O) yang terbentuk di permukaan bumi, dengan melepaskan sejumlah oksigen (O<sub>2</sub>) ke atmosfer.



Energi fotosintesa dalam hal ini terkonversi menjadi energi potensial yang tersimpan dalam ikatan kimia senyawa Karbohidrat vegetasi sebagai organisme produsen, yang digunakannya untuk proses metabolisme dan berkembang biak.

Semakin meningkatnya kandungan O<sub>2</sub> di atmosfer memungkinkan bertumbuh kembangnya organisme konsumen, yaitu golongan hewan. Organisme konsumen ini bertumbuh kembang dengan mengkonsumsi sumber energi potensial yang terkandung dalam organisme produsen, dan juga organisme konsumen lainnya,

melalui proses metabolisme yang ditunjang oleh  $O_2$  di atmosfer, dan memperoleh energi yang digunakan untuk melakukan berbagai aktivitas lainnya.



Gambar 9.1. : Diagram Siklus Materi Karbohidrat

Demikian seterusnya, siklus energi biomassa beredar mengikuti siklus materi kehidupan dalam sistem tertutup biosfer yang terus berjalan dan berkembang, oleh karena adanya pasokan energi primer terus menerus berupa energi fotosintesa dari radiasi sinar matahari, dan pasokan materi dari bumi. Sementara itu limbah organik yang tak terpakai berupa senyawa Hidrokarbon ( $C_mH_n$ ) ataupun sisa-sisa

Karbohidrat ( $C_pH_qO_r$ ), akan diolah oleh organisme pengurai dan dikembalikan kedalam siklus. Sedangkan limbah yang tak terolah, akan terawetkan oleh proses geologi menjadi material cadangan energi fosil, yang pada saatnya akan kembali memasuki siklus biosfer setelah melalui siklus geologi yang panjang.

Maka sumber energi biomassa akan selalu terbarukan (*renewable*) selama siklus materi kehidupan atau Karbohidrat masih beredar dalam keseimbangannya. Yaitu terdiri dari siklus dengan periode ulang pendek dengan durasi tahunan, puluhan tahun atau lebih, dan siklus dengan periode ulang panjang dalam skala waktu geologi jutaan tahun yang menghasilkan cadangan energi fosil.

Namun demikian intervensi manusia dalam mengeksploitasi sumber energi biomassa secara berlebihan akan dapat mengganggu keseimbangan siklus, sehingga sumber energi biomassa tersebut menjadi tidak lagi terbarukan.

## 9.2. Biofuel

Secara umum, biofuel didefinisikan sebagai bahan bakar organik yang dihasilkan atau diturunkan dari materi biomassa. Sedangkan pada definisi yang lebih spesifik biofuel adalah cairan atau gas yang berfungsi sebagai bahan bakar transportasi yang berasal dari biomassa. Pengertian lain menyebutkan biofuel sebagai bahan bakar hayati, yaitu merupakan bahan bakar padat, cair ataupun gas, yang dihasilkan dari bahan-bahan organik, yang dapat dihasilkan secara langsung dari tanaman, atau secara tidak langsung dari berbagai limbah organik. Biofuel sendiri secara fisik dapat berbentuk bahan bakar padat, cair ataupun gas.

### - Bahan bakar padat

- **Kayu bakar** adalah bahan bakar yang merupakan sumber energi *konvensional* paling tua yang dikenal manusia, bahkan masih digunakan sampai saat ini di lingkungan pedesaan.
- **Arang** adalah adalah bahan bakar *konvensional* tua lainnya, yang dikembangkan dari kayu bakar melalui konversi *Thermokimia*, yaitu melalui proses pemanasan,

menghilangkan kandungan air dan berbagai komponen volatile lainnya. Arang sendiri merupakan suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon dengan pemanasan pada suhu tinggi.

- **Biobriket** atau **pellet** adalah pengembangan bahan bakar arang melalui proses pemadatan untuk meningkatkan densitas sehingga meningkatkan nilai kalornya per unit volume. Secara umum densifikasi (pembentukan briket atau pellet) bertujuan untuk menaikkan nilai kalor per unit volume, memudahkan penyimpanan dan transportasi, serta standarisasi ukuran dan kualitas. Biobriket dapat dibuat dari berbagai materi biomassa, seperti sekam, arang sekam, serbuk gergaji, serbuk kayu, dan limbah-limbah biomassa lainnya.

- **Bahan bakar cair**

- **Bioetanol** merupakan senyawa Hidrokarbon dengan gugus Hydroxyl (OH) dengan 2 atom karbon (C) dengan rumus kimia  $C_2H_5OH$ , merupakan cairan yang tidak berwarna, dengan titik didih  $78,4^{\circ}C$ , yang tidak mudah menguap walaupun dapat terurai di alam (*biodegradable*). Secara kimiawi disebut *Etanol* atau lebih dikenal sebagai *Etil Alkohol* yang kemudian lebih populer dengan nama Bioetanol oleh karena diperoleh melalui proses *fermentasi* biomassa. Bioetanol dibuat dari biomassa yang mengandung komponen gula, pati, maupun selulosa, seperti umbi-umbian, jagung atau tebu. Bioetanol saat ini merupakan jenis biofuel yang paling banyak digunakan. Di Amerika Serikat misalnya, pada tahun 2004 produksi *etanol* mencapai 3 - 4 billion gallons, dan cenderung akan terus meningkat.

Bioetanol adalah bahan bakar alternatif yang prospektif, oleh karena tidak memberi kontribusi signifikan terhadap pemanasan global, dapat dicampur dengan gasoline sampai dengan 10% (E10), dan dapat dihasilkan dari bahan-bahan alami (biomassa) yang dapat diperbaharui (*renewable*).

- **Biodiesel** adalah bahan bakar dari minyak tumbuh-tumbuhan atau lemak hewan, dengan komposisi *mono-alkyl ester* yang berasal dari asam lemak.

Biodiesel bersifat ramah lingkungan oleh karena tidak memberi kontribusi signifikan terhadap pemanasan global, mudah didegradasi, mengandung sekitar 10% oksigen alamiah yang bermanfaat dalam pembakaran dan pelumasan mesin. Biodiesel atau *mono-alkyl ester* juga bersifat menyerupai minyak solar, bahkan lebih baik nilai *cetane* nya.

Riset tentang biodiesel telah dilakukan di berbagai tempat di dunia, dengan bahan baku utaman minyak kedelai, minyak *rapeseed*, dan minyak bunga matahari. Di Hawaii misalnya, biodiesel bahkan diproduksi dari minyak goreng bekas, sedangkan di Nagano - Jepang berbahan baku limbah restoran-restoran cepat saji. Saat ini di seluruh dunia terdapat lebih dari 85 pabrik biodiesel dengan kapasitas 500 - 120.000 ton per tahun. Sementara itu, di Indonesia biodiesel diproduksi dengan menggunakan bahan baku minyak sawit mentah (*Crude Palm Oil*), minyak nyamplung, minyak jarak, minyak kelapa, *palm fatty acid distillate* (PFAD) dan minyak ikan.

#### - **Bahan bakar gas (Biogas)**

Biogas adalah gas yang dihasilkan oleh aktivitas *anaerobik* atau *fermentasi* dari bahan-bahan organik, termasuk diantaranya kotoran manusia dan hewan, limbah domestik, sampah atau limbah-limbah *biodegradable* lainnya dalam kondisi *anaerobik*. Kandungan utama biogas adalah Metan ( $\text{CH}_4$ ) dan Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan maupun untuk menghasilkan listrik. Gas Metan dalam biogas, apabila terbakar relatif lebih bersih daripada batubara, dan menghasilkan energi yang lebih besar dengan kadar emisi karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang lebih rendah. Pemanfaatan biogas memegang peranan penting dalam manajemen limbah karena Metan ( $\text{CH}_4$ ) merupakan gas rumah kaca yang berbahaya dalam pemanasan global, bahkan lebih

berbahaya dari Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Komposisi gas dalam biogas yang dihasilkan bervariasi tergantung pada proses *anaerobik* yang dilakukan. Rata-rata biogas memiliki konsentrasi Gas Metan (CH<sub>4</sub>) sekitar 50%. Namun sistem pengolahan limbah modern telah dapat meningkatkan kadar Gas Metan (CH<sub>4</sub>) nya sampai mencapai 55-75%.

### 9.3. Teknologi Pemanfaatan Energi Biomassa

Sumber energi biomassa, diluar pemanfaatannya untuk metabolisme dan berkembang biak makhluk hidup, biasa digunakan sebagai bahan bakar, baik yang dibakar secara langsung ataupun setelah diolah menjadi berbagai bentuk bahan bakar lainnya.

Komposisi kimia utama bahan bakar biomassa adalah unsur-unsur Karbon (C), Hidrogen (H), Oksigen (O), dan Belerang (S). Akan tetapi yang memiliki kontribusi penting terhadap pelepasan kandungan energi kimia adalah ikatan diantara unsur-unsur Karbon (C) atau/dan Hidrogen (H), dimana setiap bahan bakar mempunyai kandungan yang berbeda-beda.

*Tabel 9.1. : Komposisi dan kandungan energi material Biomassa*

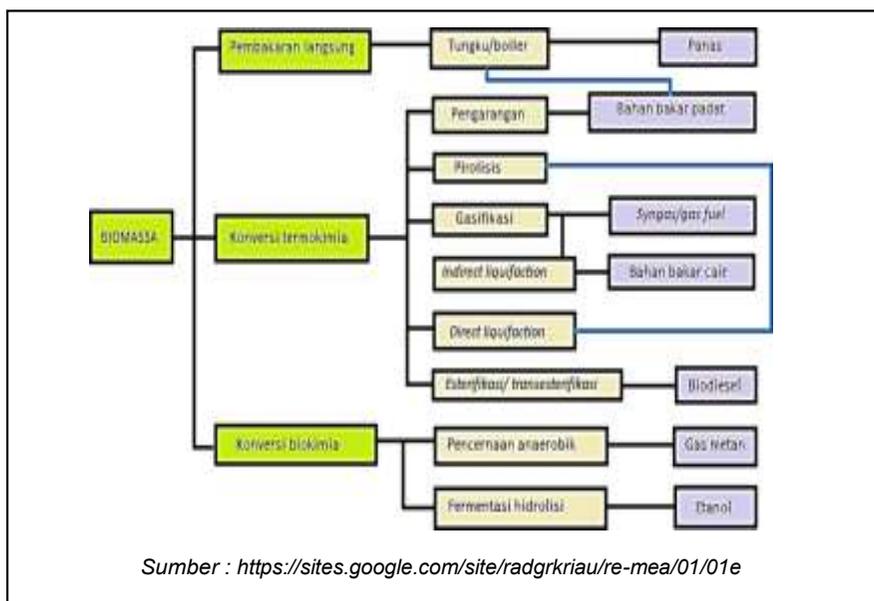
Jenis bahan bakar	Komposisi (%)			Nilai kalor (kJ/g)
	C	H	O	
Gas Alam (LNG)	70	23	0	49
Batu bara (Antrasit)	82	1	2	31
BatuBara (Bituminos)	77	5	7	32
Minyak Mentah	85	12	0	45
Bensin	85	15	0	48
Arang	100	0	0	34
Kayu	50	6	44	18
Hidrogen	0	100	0	142

Sumber : <http://www.kimiaputri.com/2016/10/bahan-bakar-dan-perubahan-entalpi.html>

Prinsip pembakaran bahan bakar biomassa pada dasarnya adalah reaksi kimia antara bahan bakar dengan oksigen (O<sub>2</sub>), yang mengakibatkan terputusnya ikatan kimia diantara unsur-unsur Karbon (C) dan/atau Hidrogen (H), dengan disertai terbebaskannya energi ikatan kimianya.

Proses pemanfaatan energi biomassa sendiri, dapat dilakukan dengan cara pembakaran langsung (*direct combustion*), atau dapat pula melalui proses konversi terlebih dahulu, yaitu konversi *Thermokimia* atau konversi *Biokimia*.

Pada prinsipnya, konversi *Thermokimia* maupun *Biokimia* secara artifisial adalah upaya meningkatkan nilai kalori dari materi biomassa. Yaitu dengan meningkatkan kadar Karbon (C), dengan memisahkan kandungan materi-materi non bahan bakarnya, seperti CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan tar cair, melalui proses pemanasan ataupun reaksi biokimia.



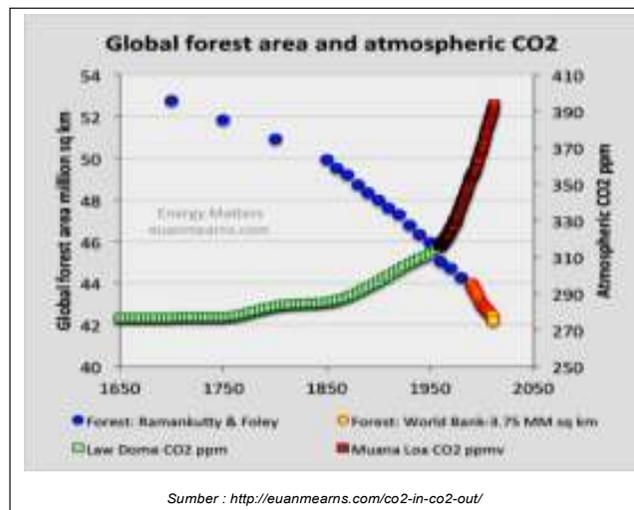
Gambar 9.2. : Metoda-metoda pemanfaatan energi Biomassa

### 9.4. Pembakaran Langsung (Direct Combustion)

Sumber energi biomassa dengan cara pembakarannya secara langsung, adalah sumber energi *konvensional* yang tertua yang dikenal manusia, yaitu dengan membakar berbagai jenis kayu yang ada di hutan. Cara ini telah dikenal sejak lama, hampir bersamaan dengan dikenalnya api dalam budaya sosial manusia, jauh sebelum dikenalnya sumber energi *konvensional* yang lebih *transportable* seperti minyak dan gas bumi. Bahkan sampai saat inipun kayu bakar masih menjadi andalan sebagai bahan bakar *konvensional*, terutama pada masyarakat

pedesaan di berbagai belahan dunia termasuk di negara-negara maju. Bahkan, di Indonesia sendiri diperkirakan 50% penduduknya masih menggunakan kayu bakar sebagai sumber energi dengan tingkat konsumsi sekitar 1,2 m<sup>3</sup> /orang/tahun (Sumber : Departemen ESDM, 2005).

Hutan adalah sumber energi bahan bakar biomassa kayu bakar, sehingga semakin berkurangnya luas areal hutan, berarti semakin berkurang pula potensi sumberdaya energinya, walaupun berkurangnya areal hutan tidak harus berhubungan langsung dengan pemanfaatan sumber energi kayu bakar secara berlebihan. Berkurangnya luas areal hutan juga berkaitan dengan perubahan tataguna lahan, pembalakkan industri, bahkan juga penggurunan (*desertification*). Bagaimanapun, melonjaknya populasi manusia pasca Revolusi Industri, memerlukan ketersediaan lahan yang lebih besar, sehingga merambah mengurangi luas hutan yang ada.



**Gambar 9.3. : Grafik peningkatan kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer & pengurangan luas hutan**

Bagaimanapun kayu hutan masih merupakan sumber biomassa utama di dunia, akan tetapi terlalu banyak menggunakan kayu hutan sebagai bahan bakar dapat berakibat buruk pula bagi iklim global, sebagai dampak semakin berkurangnya areal hutan sebagai komponen

penyerap CO<sub>2</sub> dari atmosfer. Catatan dari berbagai Lembaga dunia menunjukkan bahwa semakin menyusutnya luas areal hutan di dunia, dibarengi dengan semakin meningkatnya kadar CO<sub>2</sub> dari atmosfer.

Namun demikian dengan semakin berkembangnya sistem sosial kemasyarakatan, bahan bakar untuk pembakaran langsung tidak lagi hanya diambil dari kayu-kayu hutan, namun juga diambil dari bahan tanaman berupa limbah pertanian, limbah industri pengolahan kayu, atau bahkan tanaman yang memang ditanam secara khusus untuk menghasilkan energi bagi mesin bakar. Teknologi energipun berkembang pula, dimana sumber energi biomassapun dapat di konversikan menjadi bahan bakar yang lebih ramah lingkungan, dengan tingkat emisi CO<sub>2</sub> yang lebih rendah.

## **9.5. Konversi Thermokimia**

Konversi Thermokimia (*TCC-Thermochemical conversion*) adalah suatu proses dekomposisi material organik pada temperatur dan tekanan tinggi, yang mengubahnya menjadi bentuk lain, seperti arang, biofuel dan gas sintetis (*Singh and Agarwal 2018*).

Pada prinsipnya, konversi thermokimia artifisial adalah upaya meningkatkan kadar Karbon (C), dari material biomassa mentah seperti kayu, sekam, sabut serta tempurung kelapa, dan sebagainya, melalui rekayasa pemanasan sedemikian rupa, dimana terjadi reaksi kimia sedemikian rupa, sehingga berbagai ikatan kimia yang tak menghasilkan kalori signifikan, dapat terlepas. Hal ini dilakukan melalui proses *pengarangan (karbonisasi)*, *pirolisis*, *gasifikasi*, *likuifaksi*, dan *estensifikasi/trasnestensifikasi*.

### **9.5.1. Pengarangan (Karbonisasi)**

Pengarangan atau proses menjadikan arang, adalah metoda konservasi thermokimia tradisional yang sudah dikenal manusia sejak lama. Keberadaan arang sebagai bahan bakar, sampai saat ini masih merupakan sumber energi konvensional, yang masih banyak digunakan untuk berbagai aktivitas khusus seperti kegiatan kuliner, yang bahkan masih digunakan di wilayah perkotaan.

Pada awalnya, arang dibuat dari bahan mentah biomassa berupa kayu-kayu hutan. Namun dengan berkembangnya wilayah pertanian dan semakin menyempitnya luas areal hutan, arang juga dibuat dari bahan mentah berupa berbagai bentuk limbah pertanian, seperti sekam padi, sabut dan tempurung kelapa, kulit kacang dan sebagainya.



**Gambar 9.4. : Contoh sederhana proses pembuatan arang kayu**

Prinsip proses pengarangan (*karbonisasi*), adalah proses mengubah bahan baku biomassa mentah menjadi karbon, melalui pembakaran dalam ruang tertutup dengan udara terbatas atau minimal. Proses karbonisasi atau pengarangan dilakukan dengan memasukkan bahan baku berupa material biomassa mentah ke dalam ruangan tertutup, seperti dalam tanah atau tangki baja, kemudian dipanaskan dengan nyala api yang dikendalikan. Yaitu untuk mengedalikan agar kandungan unsur Karbon (C) tidak terlepas akibat terbakar menjadi oksida-oksida Karbon ( $\text{CO}_2$  &  $\text{CO}$ ), dengan menyisakan abu.

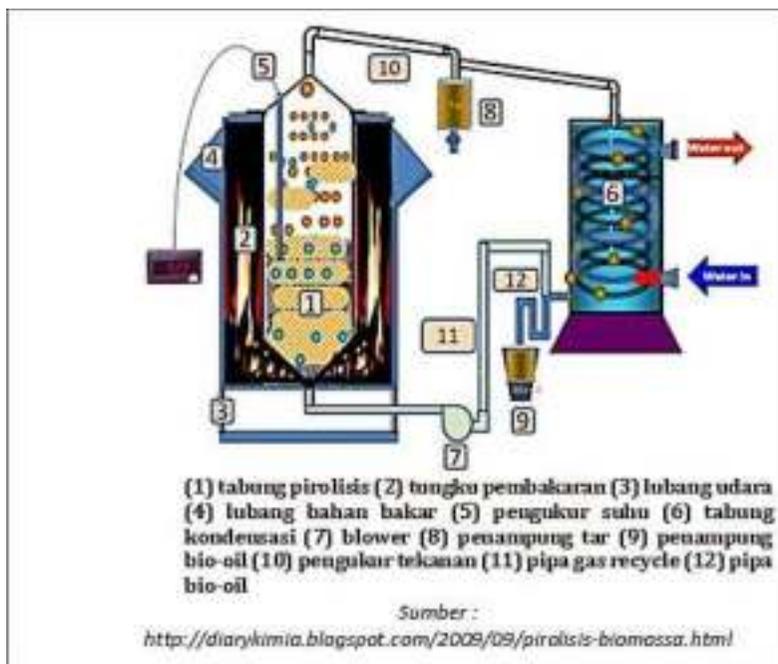
Dalam perkembangannya, pengarangan atau *karbonisasi* dapat dilanjutkan dengan proses *densifikasi*, yaitu untuk lebih meningkatkan densitas, dengan membentuknya sebagai *briket* atau pellet. Sehingga

lebih memudahkan dalam penyimpanan dan pengangkutannya, sekaligus juga meningkatkan nilai kalor per unit volumenya.

Walaupun *briket* yang dikenal pada umumnya adalah *briket batubara*, namun juga dapat dibuat dan diproduksi *briket-briket* dari material biomassa lainnya, seperti sekam padi, serbuk gergaji, serbuk kayu, dan limbah-limbah biomassa lainnya.

### 9.5.2. Pirolisis

Pirolisis adalah suatu proses penguraian (*lysis*) dengan cara pemanasan (*pyro*), yang dalam hal ini dilakukan pada temperatur tinggi. Maka proses ini sesungguhnya merupakan kelanjutan dari proses *karbonisasi* untuk memperoleh Karbon atau arang.



Gambar 9.5. : Diagram proses pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi kimia dengan pemanasan tanpa oksigen pada temperatur tinggi, sehingga disebut juga sebagai *High Temperature Carbonization (HTC)*. Dimana dalam proses ini dihasilkan produk-produk berupa bahan bakar padat (arang) cairan minyak (*tar & bio-oil*) dan berbagai gas seperti  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , serta

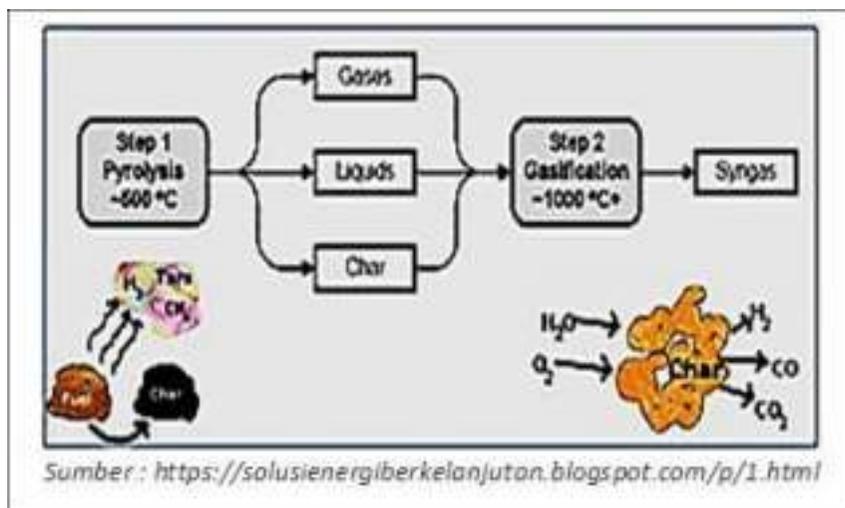
hidrokarbon ringan, yang jenisnya bermacam-macam tergantung pada bahan bakunya.

Umumnya proses pirolisis berlangsung pada suhu di atas 300°C dalam waktu 4-7 jam. Namun keadaan ini sangat bergantung pada bahan baku dan cara pembuatannya (Oemirbas, 2005).

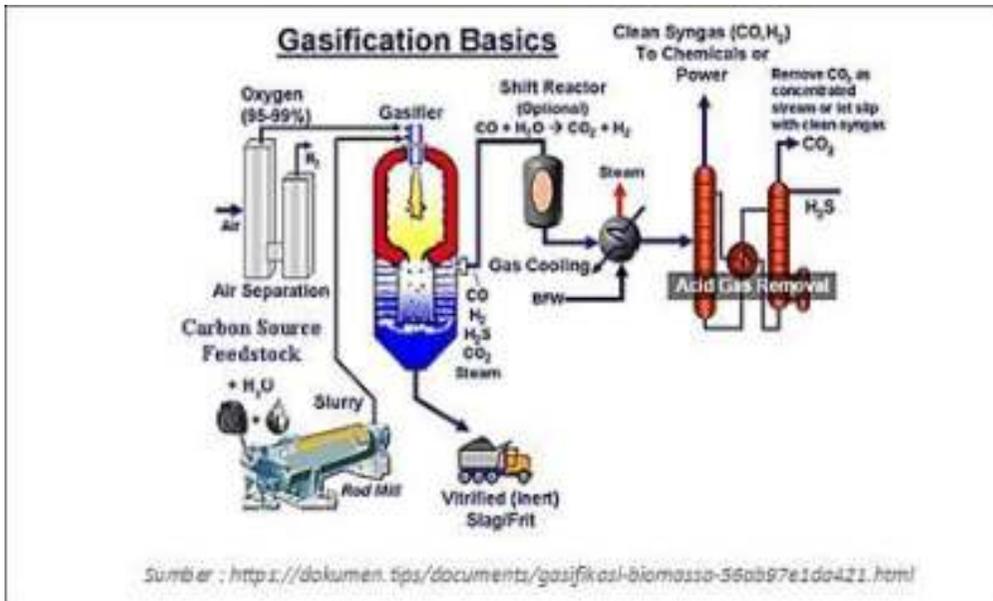
Saat ini pirolisis lebih banyak di aplikasikan untuk memproduksi *bio-oil* (Asap Cair) dari bahan baku biomassa, dengan metode *flash pyrolysis*. Yaitu dimana material biomassa dipanaskan secara cepat tanpa oksigen pada suhu tinggi (450-600 °C), dengan waktu tinggal gas (*residence time*) yang pendek kurang dari 1 detik (Bramer, Brem, 2006).

### 9.53. Gasifikasi

Gasifikasi biomassa di definisikan sebagai proses konversi biomassa (*selulosa*) dalam reaktor gasifikasi (*gasifier*), menjadi bahan bakar gas. Kemudian gas tersebut digunakan sebagai bahan bakar berbagai motor, termasuk diantaranya menggerakkan generator pembangkit tenaga listrik.



Gambar 9.6. : Prinsip Proses Gasifikasi



Gambar 9.7. : Lay Out Teknologi Konversi Thermokimia Gasifikasi

Gasifikasi merupakan pengembangan dari proses Pirolisis, dengan produk akhir berupa gas sintetis ( $CO$ ,  $H_2$ ). Yaitu dengan menggunakan panas yang lebih tinggi meskipun masih tetap dalam kondisi minim oksigen, untuk merubah biomassa padat atau padatan berkarbon lainnya, menjadi gas sintetis yang mudah terbakar. Sedemikian rupa sehingga lebih mudah dalam penyimpanan, dan pemindahannya manakala diperlukan.

Produk gasifikasi terdiri dari tiga bagian, yaitu padatan yang biasanya berupa abu yang tak terpakai, cairan (termasuk dari gas yang dapat dikondensasikan), dan gas sintetis ( $CO$ ,  $H_2$ ) yang merupakan bahan bakar gas.

Proses gasifikasi dapat merubah hampir semua bahan organik padat menjadi gas bakar yang lebih bersih, sehingga dapat diterapkan pada berbagai bentuk limbah biomassa. Maka gasifikasi biomassa mempunyai prospek yang menarik, sebagai alternatif sumber energi yang terbarukan.

Tabel 9.2. : Limbah biomassa yang dapat diolah menjadi gas sintetik

JENIS BIOMASSA	PRODUKSI SPESIFIK (ton/ha/tahun)	NILAI KALOR (MJ/kg)	POTENSI ENERGI (MJ/ha/tahun)
Sekam padi	1,0	1.195	11.800
Tongkol jagung	1,2	15,1	17.300
Kulit kacang tanah	0,6	15,8	9.300
Limbah kedelai	1,8	13,4	24.200
Batang dan sisa akar ubi kayu	5,4	8,0	43.200
Bagas tebu	24,1	12,0	288.800
Tempurung kelapa	0,6	170	9.600
Sabut kelapa	1,1	12,0	12.700
Tandan kosong sawit	4,0	8,3	32.800
Serat buah sawit	2,0	9,7	19.200
Cangkang buah sawit	0,4	16,3	6.500
Cabang dan ranting pohon karet	14,5	13,8	200.000
Batang atas pohon karet	1,4	13,8	19.300
Batang bawah pohon karet	3,1	13,8	42.800
Kulit buah kopi	0,6	8,6	5.600
Kayu pohon kopi	2,8	11,3	31.500
Kayu pohon coklat	1,3	11,3	14.900

Sumber : <https://solusienergiberkelanjutan.blogspot.com/p/1.html>

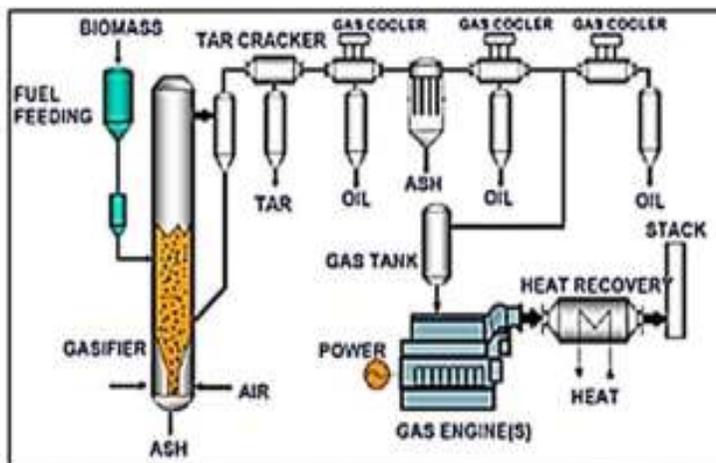
#### 9.5.4. Likuifaksi

Likuifaksi (*liquification*) merupakan proses perubahan wujud dari gas menjadi cair melalui proses kondensasi dengan pendinginan, atau perubahan dari wujud padat menjadi cair melalui proses peleburan, atau dapat juga dengan pemanasan atau penghalusan dan pencampuran dengan cairan lain untuk memutuskan ikatan-ikatan kimianya. Hal ini dilakukan agar material biomassa dari berbagai sumber, dapat di ekstrak menjadi *biofuel cair* yang berbasis senyawa Hidrokarbon ( $C_mH_n$ ). Contohnya adalah pada batubara dan gas alam, yang dirubah menjadi wujud cair, agar lebih mudah dalam transportasi dan pemanfaatannya. Maka proses inipun dapat pula dilakukan pada material biomassa.

Penggunaan minyak nabati (BBN) yang berasal dari material biomassa sebagai bahan *biofuel cair (bio-oil)*, sudah dimulai sejak lama, ketika *Dr. Rudolf Christian Karl Diesel (1895)* mengembangkan mesin motor yang dijalankan dengan BBN. Dimana pada saat itu minyak BBN diperoleh dari pemerasan biji-bijian sumber minyak, yang kemudian disaring dan dikeringkan. Konversi Thermokimia Likuifaksi, dalam hal ini dilakukan dengan cara ekstraksi langsung dari sumber biomasanya (*Direct Liquifaction*).

Namun pemanfaatan BBN mesin diesel tersebut berangsur-angsur tergantikan oleh minyak solar dan minyak bumi, yang lebih murah dan melimpah produksinya. Disamping itu, minyak BBN yang didominasi oleh senyawa *trigliserida* memiliki viskositas dinamik yang lebih tinggi dari minyak solar, yang menyulitkan pengalirannya ke dalam ruang bakar. Sehingga diperlukan proses pemanasan terlebih dahulu untuk menurunkan viskositasnya.

Dari proses pirolisis yang disamping menghasilkan produk berupa residu padat, didapat pula cairan berupa *tar* yang berkadar karbon tinggi, serta minyak dan gas yang berkadar hidrogen tinggi, yang kemudian dapat dikonversikan menjadi bahan bakar cair (Hidayat, 1995).



Sumber : <https://solusienergiBERkelanjutan.blogspot.com/p/1.html>

**Gambar 9.8. : Proses Indirect Liquefaction dalam Konversi Thermokimia Gasifikasi**

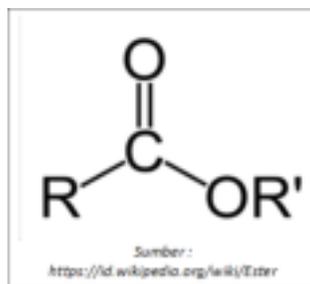
Likuifaksi biomassa juga dapat dilakukan melalui proses konversi secara tidak langsung (*Indirect Liquefaction*). Yaitu melalui proses Konversi Thermokimia Gasifikasi, yang melalui tahapan Pirolisa - Reduksi - Oksidasi. Proses konversi ini, disamping menghasilkan gas sintetik dan energi panas, juga dapat menghasilkan produk sampingan berupa Briket Arang (Kokas) dan *Bio-oil*.

Secara umum, proses pemanasan gasifikasi bukan hanya akan menghasilkan gas sintetik, namun juga gas-gas Hidrokarbon yang turut menguap. Gas-gas tersebut dapat dikondensasikan melalui

pendinginan *Gas Cooler*, sehingga ter ekstrak sebagai cairan minyak yang secara umum disebut *Bio Oil*.

### 9.5.5. Esterifikasi / Transesterifikasi

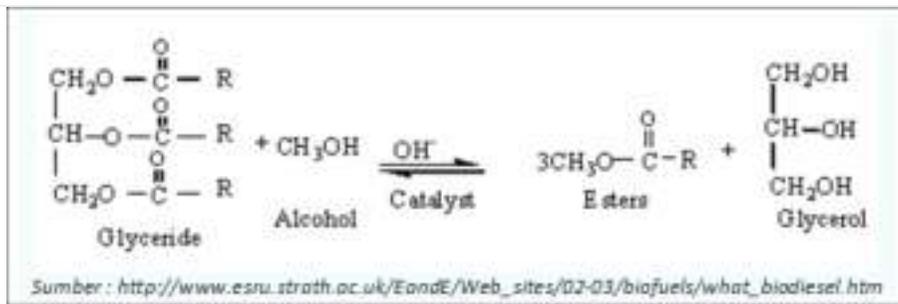
*Ester* adalah senyawa organik yang terbentuk melalui penggantian satu atau lebih atom Hidrogen pada gugus Karboksil, dengan suatu gugus organik (dilambangkan dengan R'). *Ester*, yang kemudian dikenal sebagai *Biodiesel*, adalah suatu senyawa yang menyerupai minyak diesel (solar), sehingga dapat dicampurkan atau bahkan menggantikannya sebagai bahan bakar.



Gambar 9.9. : Struktur kimia umum Ester Karboksilat

*Esterifikasi* pada dasarnya adalah proses untuk mengubah *Gliserida* yang merupakan biomassa cair (*Bio-oil*) menjadi *Ester* atau *Biodiesel*, baik sebagai bahan bakar cair ataupun pencampur bahan bakar diesel (solar). Yaitu dengan cara mengubah asam organik reaktif dalam *Bio-oil* menjadi senyawa *Ester* yang lebih stabil, dengan menggunakan katalis asam dalam campuran kompleks *Bio-oil* dan Alkohol, sehingga secara keseluruhan, proses ini disebut juga proses *Estersifikasi-Transesterifikasi*.

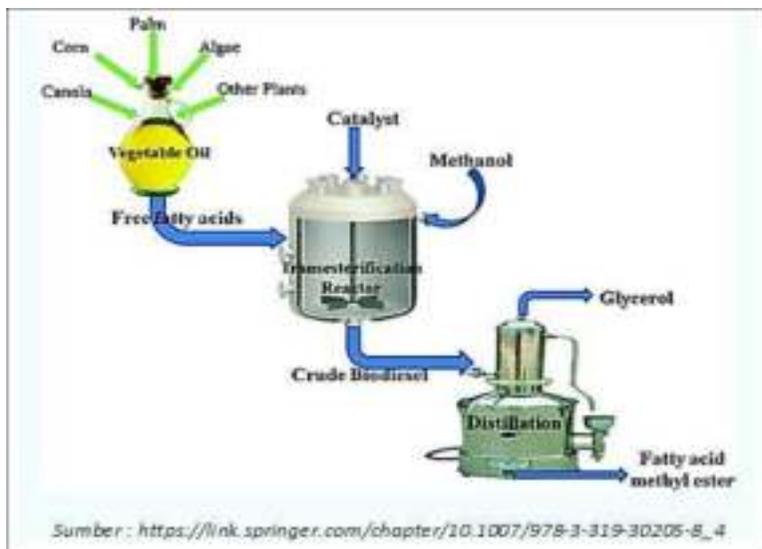
Dalam proses *Transesterifikasi* dilakukan pemanasan dengan melibatkan katalis (*catalyst*) yang dicampurkan dalam pelarut polar (*polar solvent*), berupa Alkohol (*metanol, etanol*), dan *fulfural* untuk menghomogenkan dan menurunkan viskositas *Bio-oil*, yang berlangsung pada temperatur 55°C - 60°C. Reaksi kimia antara *Bio-oil* dan pelarut polar (*metanol/etanol*) juga akan mengurangi tingkat keasaman, meningkatkan volatilitas dan *heating value*, sehingga akan lebih baik dalam pencampurannya dengan bahan bakar diesel.



**Gambar 9.10. : Reaksi kimia pembentukan Ester (Biodiesel).**

Katalis yang sering digunakan untuk reaksi *transesterifikasi* adalah alkali, atau enzim. Namun penggunaan enzim lebih jarang digunakan daripada alkali oleh karena berbagai kendala.

Alkali yang sering digunakan adalah Natrium metoksida ( $\text{NaOCH}_3$ ), Natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ), Kalium hidroksida ( $\text{KOH}$ ), Kalium metoksida, Natrium amida, Natrium hidrida. Kalium amida, dan Kalium hidrida (*Sprules and Price, 1950*). Natrium hidroksida dan Natrium metoksida merupakan katalis yang paling banyak digunakan, dimana Natrium metoksida dinilai lebih efektif daripada Natrium hidroksida (*Fredman et. al., 1984; Hartman, 1956*).



**Gambar 9.11. : Diagram proses Transesterifikasi pembuatan senyawa Ester (Biodiesel)**

Reaksi *Esterifikasi* biasa dilakukan sebelum reaksi *Transesterifikasi*, untuk menghilangkan asam lemak bebas dalam *Bio-oil*, sekaligus menambah perolehan *Ester (Biodiesel)*, melalui penetralan menggunakan katalis. Penetralan dapat dilakukan dengan penambahan basa atau menggunakan mesin penukar anion. Berikutnya, produk *Esterifikasi* berupa *Gliserida*, *Ester*, dan berbagai komponen pengotor dimasukkan ke dalam reaktor *Transesterifikasi*, dimana *Gliserida* direaksikan dengan *Alkohol (Metanol/Etanol)* sehingga menghasilkan *Ester (Biodiesel)* dan *Gliserol*. Selanjutnya, hasil berupa minyak *Biodiesel* kotor (*crude Biodiesel*) dimurnikan dalam mesin *Distilasi* untuk menghasilkan *Biodiesel* murni, yang telah terpisah dari *Gliserol*.

## 9.6. Konversi Biokimia

Konversi Biokimia, merupakan teknologi konversi dengan menggunakan bantuan mikroba untuk menguraikan berbagai materi biomassa, sehingga menghasilkan bahan bakar gas seperti gas *Metan (CH<sub>4</sub>)* dan gas-gas lainnya, dan juga bahan bakar cair seperti *Etanol*. Proses- proses konversi biokimia diantaranya adalah proses *Anaerobic Digestion*, dan proses *Fermentasi Hidrolisis*.

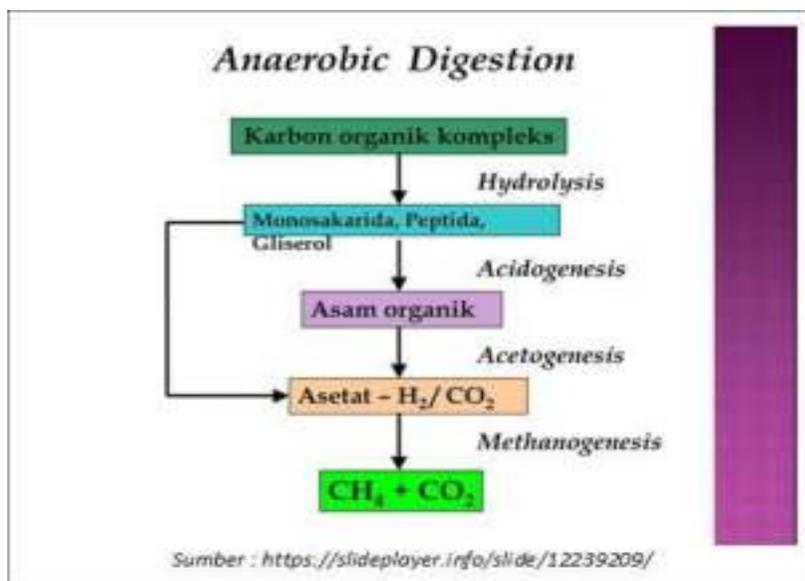
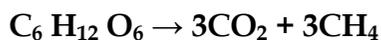
### 9.6.1. Anaerobic Digestion

*Anaerobic digestion* adalah proses biologis, dimana mikro organisme bakteri menguraikan suatu senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dalam bentuk biogas (*gas Metan - CH<sub>4</sub>*), tanpa memerlukan oksigen sebagai komponen dari proses. Mikro organisme ini diyakini telah ada di bumi sejak awal sejarah kehidupan, bahkan sebelum munculnya jenis organisme vegetasi. Maka, *Anaerobic digestion* juga berlangsung secara alamiah pada lingkungan alam dimana tidak terdapat oksigen, seperti pada lingkungan rawa, tanah berair, dan dalam tanah yang terus-menerus tertutup air.

Metoda *Anaerobic digestion* telah dikenal lama, sejak sekitar abad 10 SM di *Asyur*, yang menghasilkan biogas untuk memanaskan air mandi. Pada tahun 1778, fisikawan *Alessandro Volta (1745-1827)*, secara ilmiah mengidentifikasi gas tersebut sebagai gas *Metan*. Selanjutnya, *Sir Humphry Davy (1808)* membuktikan adanya senyawa *Metan* dalam gas yang dihasilkan oleh kotoran ternak.

Digester anaerobik pertama diketahui dibangun pada tahun 1859 pada koloni penderita kusta di Bombay - India. Kemudian teknologi ini dikembangkan di Exeter - Inggris pada tahun 1895, dimana septic tank digunakan untuk menghasilkan gas untuk lampu penerangan.

Secara lebih spesifik, *Anaerobic digestion* adalah proses Konversi Biokimia yang menguraikan bahan organik atau *selulosa* menjadi gas *Metan* ( $CH_4$ ) dan gas-gas lainnya. Keseluruhan proses terjadi melalui reaksi kimia, dimana bahan organik seperti glukosa dicerna secara biokimia menjadi *Karbon dioksida* ( $CO_2$ ) dan *Metan* ( $CH_4$ ) oleh mikroorganisme anaerobik.



**Gambar 9.12. : Diagram proses pembuatan Biogas ( $CH_4$ ) dengan cara Anaerobic digestion**

Yaitu dengan peran serta mikro organisme bakteri-bakteri *Acetogenic* dan *Metanogen*. Dimana bakteri *Acetogenic* menghasilkan asetat kimia, sedangkan bakteri *Metanogen* menghasilkan gas *Metan* ( $CH_4$ ).

Keseluruhan proses *Anaerobic digestion* meliputi tahap-tahap *Hidrolisis*, *Asidogenesis*, *Asetogenesis*, dan *Metanogenesis*.

- **Hidrolisis**

Materi biomassa umumnya terdiri dari polimer-polimer Karbon organik kompleks. Maka rantai inilah yang pertama-tama harus dipecah menjadi bagian-bagian penyusun yang lebih kecil, berupa monomer-monomer seperti *Gloserol (Monosakarida, Peptida)*. Proses memutus rantai dan melarutkan molekul-molekul yang lebih kecil menjadi larutan ini disebut *hidrolisis*. Oleh karena itu, *hidrolisis* komponen polimer dengan berat molekul tinggi ini adalah tahap pertama yang diperlukan dalam proses destruksi anaerobik. Dimana melalui *hidrolisis*, molekul-molekul organik kompleks dipecah menjadi gula sederhana, asam amino, dan asam lemak.

Asetat dan hidrogen yang dihasilkan pada tahap ini dapat digunakan secara langsung dalam proses *metanogenesis*. Sedangkan molekul-molekul lain yang lebih besar, seperti *asam lemak volatil (VFA)*, harus terlebih dahulu dikatabolisasikan menjadi senyawa yang lebih ringkas, untuk dapat langsung digunakan dalam proses *metanogenesis*.

- **Asidogenesis**

Proses biologis *asidogenesis* proses pemecahan lebih lanjut komponen-komponen yang tersisa, oleh bakteri *asidogenik (fermentatif)*. Dimana asam organik berupa *asam lemak volatil (VFA)*, dihasilkan bersama dengan *amonia, Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)*, dan *Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S)*, serta berbagai produk sampingan lainnya. Proses *asidogenesis* ini menyerupai proses pembentukan asam susu.

- **Asetogenesis**

Tahap ini merupakan tahap berikutnya, dimana molekul sederhana yang terbentuk dalam fase *asidogenesis* dicerna oleh bakteri *asetogen*, untuk menghasilkan sebagian besar *Asam asetat*, serta *Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)* dan *Hidrogen (H<sub>2</sub>)*.

- **Metanogenesis**

Tahap ini merupakan tahap akhir dari proses *Anaerobic digestion*, sehingga disebut juga sebagai *metanogenesis* yang berarti pembentukan *Metan (CH<sub>4</sub>)*. Yaitu dimana bakteri *metanogen*

merubah produk-produk tahap sebelumnya menjadi gas *Metan* ( $CH_4$ ), dan *Karbon dioksida* ( $CO_2$ ) sebagai komponen utama dari *biogas*, dan air serta berbagai sisa tak terpakai (*sludge*), yang merupakan hasil dari keseluruhan proses *Anaerobic digestion*. Proses *metanogenesis* ini terjadi pada pH 6,5 - 8, dan sensitif terhadap pH yang terlalu tinggi ataupun rendah.

Pada tahun 1906, *Karl Imhoff* menciptakan *tank Imhoff*, suatu bentuk awal dari instalasi *anaerobic digester*, yang juga menjadi model dari sistem pengolahan air limbah. Berikutnya, setelah tahun 1920 sistem tangki tertutup mulai menggantikan sistem yang terbuka.



**Gambar 9.13. : Contoh instalasi Anaerobic Digester berskala besar**

### **9.6.2. Hidrolisis - Fermentasi**

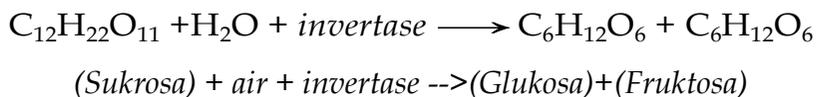
Suatu upaya Konversi Biokimia untuk merubah materi biomassa menjadi bahan bakar cair *Etanol*, atau dikenal juga sebagai *Bioetanol*, dilakukan dengan melibatkan mikroba pengurai. Yaitu dengan melalui tahapan *Hidrolisis*, dan dilanjutkan dengan proses *Fermentasi*.

*Etanol*, atau yang lebih dikenal sebagai *alkohol*, adalah senyawa *Hidrokarbon* berupa gugus *hydroxyl* ( $\text{OH}^-$ ) dengan atom karbon (C). Sedangkan pembuatannya merupakan hasil rekayasa tanaman melalui proses *Enzimatik* dan *Fermentasi*. Jenis tanaman yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan *bioetanol* adalah tanaman dengan bahan-bahan berpati (ubi kayu, ubi jalar, jagung, dll.), bahan-bahan bergula seperti *molases* (tetes tebu, nira tebu, nira kelapa, dll.), dan bahan-bahan ber *selulosa* (limbah kayu, jerami padi, batang pisang, dll).

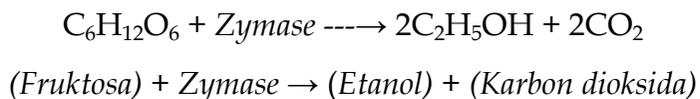
*Bioetanol* yang dihasilkan dari berbagai jenis materi karbohidrat, seperti gula, pati, atau *lignoselulosa*, secara umum pembuatannya meliputi proses-proses *sakarifikasi / hidrolisis, fermentasi, dan distilasi*. Proses *Hidrolisis* akan memecah *Selulosa* dan *Hemiselulosa* menjadi monosakarida (*glukosa & xylosa*) yang selanjutnya proses *Fermentasi* akan merubahnya menjadi menjadi *Etanol*.

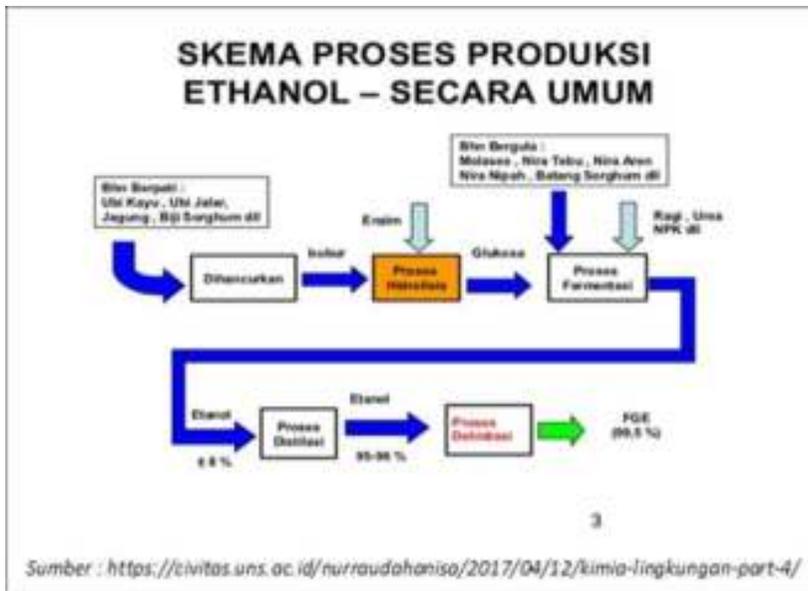
*Hidrolisis* dilakukan secara *enzimatis*, bertujuan untuk memecah polimer-polimer karbohidrat menjadi *Sukrosa*, kemudian di *Fermentasi* dengan bantuan *Saccharomyces Ceveresiae*, atau *Filamenteus* fungi yang merupakan sejenis mikro organisme bakteri. Berikutnya, *Sukrosa* yang dihasilkan dipecahkan melalui dua tahapan proses. *Sukrosa* sendiri merupakan molekul disakarida yang merupakan gabungan dari satu molekul *Glukosa* dan satu molekul *Fruktosa*, masing-masing merupakan molekul monosakarida dengan rumus kimia sama ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) namun dengan struktur yang berbeda.

Pada tahap pertama *Sukrosa* dipecah menjadi *glukosa* dan *fruktosa*, melalui reaksi :



Berikutnya pada tahap kedua, gula sederhana yang diperoleh, dipecah kembali sehingga terbentuk *Etanol*, melalui reaksi :





Gambar 9.14. : Diagram pembentukan Etanol melalui proses Hidrolisis dan Fermentasi

Semua senyawa karbohidrat yang berasal dari biomassa, pada dasarnya dapat dikonversikan menjadi *Etanol* melalui proses konversi Biokimia *Hidolisis-Fermentasi*. Termasuk material *lignoselulosa*, yaitu material yang mengandung bagian keras seperti pada kayu (*lignin*) yang tak dapat dikonversikan menjadi *Etanol*.

Maka secara umum, proses konversi biokimia *Hidolosis-Fermentasi* dilakukan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut :

- **Penghancuran (Delignifikasi)**

Tahapan penghancuran biasa juga disebut *delignifikasi*, oleh karena merupakan tahapan untuk menghilangkan *lignin*, yang merupakan bagian keras pada kayu yang tak dapat dikonversikan menjadi *Etanol*. Untuk memisahkan *lignin* dari *selulosa* dan *hemiselulosa* antara lain dapat dilakukan dengan *steam exploitation*.

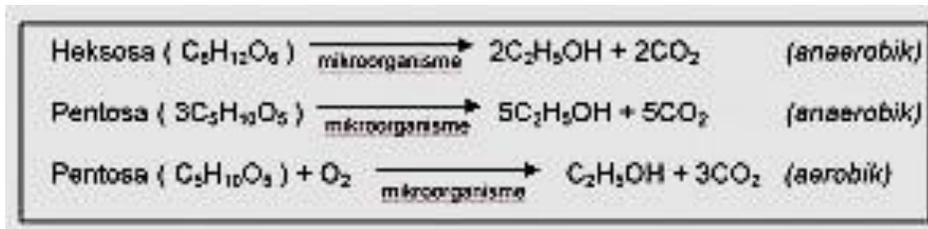
- **Hidrolisis**

*Hidrolisis* dilakukan untuk memutus ikatan Hidrogen (H) dalam fraksi *selulosa* dan *hemiselulosa* menjadi gula sederhana, seperti *heksosa* dan *pentosa*.

*Hidrolisis* dapat dilakukan secara kimiawi ( dengan asam encer atau asam pekat) atau secara *enzimatis*. Namun secara *enzimatis* secara umum lebih baik walaupun lebih lama dan lebih mahal.

- **Fermentasi**

Gula sederhana hasil *hidrolisis* kemudian diurai menjadi *Etanol* secara aerobik maupun anaerobik dengan bantuan mikroorganisme pengurai.



Sumber : <https://rahadiandimas.staff.uns.ac.id/?p=763>

**Gambar 9.15. : Reaksi kimia proses-proses Fermentasi Etanol**

Mikroba yang digunakan dalam proses tersebut harus memenuhi syarat antara lain dapat melakukan pertumbuhan dan *Fermentasi* secara cepat sehingga menghasilkan *Etanol* yang tinggi, mampu bertahan dalam kadar *glukosa* dan *alkohol* yang tinggi, serta mampu bertahan terhadap *inhibitor* yang terdapat pada *substrat* yang akan di *Fermentasi*. Beberapa jenis mikroba yang dapat digunakan untuk *Fermentasi Etanol* diantaranya adalah, *Eschericia Coli* KO11, *Eschericia Coli* FBR5, *Zymomonas Mobilis* 8b, *Pichia Stipitis* CBS 5773, *Saccharomyces Ceveresiae* 424A (LNF-ST), *Saccharomyces Ceveresiae* TMB 3006, dan *Saccharomyces Ceveresiae* TMB 3400.

- **Destilasi & Dehidrasi**

*Destilasi* dan *Dehidrasi* merupakan tahapan akhir dari proses pembentukan *Etanol* dari proses Konversi Biokimia *Hidrolisis-Fermentasi*. Yaitu dimana *Etanol* yang telah terbentuk dari proses *Fermentasi* dimurnikan, dipisahkan dari kandungan air dan berbagai unsur pengotor lainnya. *Etanol* yang dihasilkan dari proses *Fermentasi* umumnya masih tercampur dengan air, dimana kandungan *Etanol* nya hanya berkisar 8 – 9%.

*Destilasi* dalam hal ini merupakan metoda fisik untuk memisahkan *Etanol* dari air. Yaitu dengan memanaskannya sampai dengan titik didih *Etanol* (sekitar 80°C), namun masih lebih rendah dari titik didih air (100°C). Uap *Etanol* yang terbentuk kemudian dipisahkan, dan di kondensasikan kembali menjadi cairan. Proses ini dapat meningkatkan kadar *Etanol* menjadi sekitar 30%.

Berikutnya proses *Dehidrasi* dilakukan untuk lebih meningkatkan kadar *Etanol*, dengan membersihkannya dari sisa kandungan air beserta senyawa-senyawa lainnya yang masih tersisa, seperti *ester*, *aldehyde* dan lain lain. Hal ini dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu melalui proses *azeotropic distillation*, *molecular sieve* atau *membran perforation*. Sehingga dengan cara ini kadar *Etanol*nya dapat ditingkatkan mencapai 94% lebih.



Adkins Energy LLC will break ground on a co-located 2 MMgy biodiesel plant, which will utilize the corn oil produced on site at the ethanol plant as a feedstock. Hillside Studios.

Sumber : <http://ethanolproducer.com/articles/10439/illinois-ethanol-plant-to-build-co-located-biodiesel-plant>

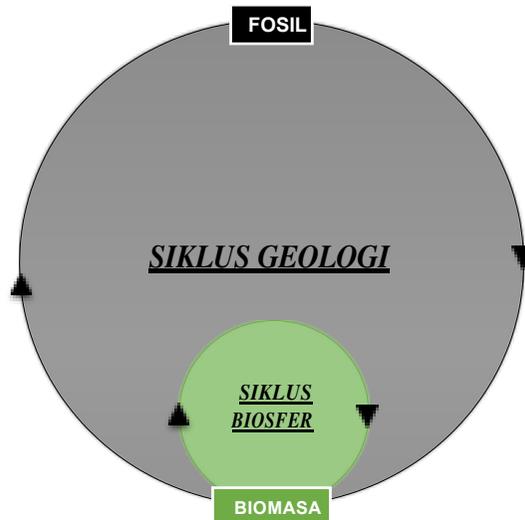
**Gambar 9.16. : Pabrik Biodiesel (Etanol) di Illinois, Amerika Serikat**

# 10

## **Sumber Energi Biomassa Fosil (*Non-Renewable*)**

Energi biomassa merupakan potensi energi yang berasal dari berbagai material organik yang berada dalam lingkup biosfer. Energi tersebut beredar dalam suatu siklus, yang mengikuti siklus biosfer, dan akan selalu terbarukan oleh karena adanya pasokan energi eksternal secara terus menerus, baik dari dalam bumi maupun dari luar bumi berupa radiasi sinar matahari. Sementara itu bumi pun terus berkembang mengikuti siklus geologi dengan periode ulang dalam kurun waktu jutaan tahun, dengan berbagai sub-siklus yang berperiode ulang lebih pendek. Siklus biosfer dalam hal ini adalah salah satu diantara sub-siklus, dengan periode ulang puluhan sampai ratusan tahun saja.

Energi biomassa akan terus beredar mengikuti siklus biosfer, sejauh tidak ada intervensi yang memutus siklus tersebut. Yaitu dimulai dari pembentukan materi kehidupan (Karbohidrat), bertumbuh kembangnya kehidupan, kematian menjadi limbah, penguraian limbah menjadi material anorganik, yang kemudian kembali membentuk materi kehidupan. Namun demikian, tidak semua material limbah dapat terurai menjadi material anorganik. Maka kelebihan material limbah yang tak sempat terurai tersebut, akan memasuki siklus yang lebih besar, yaitu siklus geologi. Proses geologi akan merubahnya menjadi fosil, yang pada saatnya akan terangkat dan tererosi, mengalami desintegrasi - dekomposisi untuk kemudian Kembali memasuki siklus biosfer.



Gambar 10.1. : Peredaran Biomassa dalam Siklus Biosfer & Siklus Geologi

Sumber energi biomassa fosil, dalam hal ini adalah sumber energi yang berasal dari limbah biomassa yang belum sempat terurai, dan terawetkan menjadi fosil oleh proses geologi. Sumber – sumber energi biomassa fosil ini terdiri dari Batubara serta Minyak & Gas Bumi, yang terbentuk oleh proses geologi dengan periode ulang sangat panjang dalam kurun jutaan tahun, sehingga tak akan terbarukan (*non-renewable*) dalam kurun masa kehidupan manusia.

## 10.1. Batubara

Batubara adalah batuan organik yang dapat terbakar, yang terbentuk dari endapan sisa tumbuhan purba, yang berubah bentuk akibat proses fisika dan kimia dalam waktu jutaan tahun, dengan unsur utama pembentuknya terdiri dari karbon (C), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan oksigen (O<sub>2</sub>). Batu bara memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk. Analisis unsur kimia, secara empiris menghasilkan berbagai jenis batubara, diantaranya *Anthracite* (C<sub>240</sub>H<sub>90</sub>O<sub>4</sub>NS) dan *Bituminous* (C<sub>137</sub>H<sub>97</sub>O<sub>9</sub>NS).

Secara umum batubara adalah salah satu bahan bakar padat, yaitu berupa batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik terutama sisa2 tumbuhan, melalui proses

pembatubaraan dalam jangka waktu yang panjang, bahkan dalam skala waktu geologi, sehingga dikategorikan sebagai bahan bakar fosil.

### **10.1.1. Sejarah Pemanfaatan Batubara**

Pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar memiliki sejarah perjalanan yang panjang. Seperti yang dikemukakan oleh beberapa ahli sejarah, diyakini bahwa batubara telah digunakan secara komersial di Cina, seperti laporan yang menyatakan adanya suatu tambang di Cina, yang menyediakan batubara untuk mencairkan tembaga dan untuk mencetak uang logam pada sekitar tahun 1000 SM.

Salah satu dari rujukan batubara yang pertama kali diketahui, dibuat oleh Aristoteles seorang filsuf dan ilmuwan Yunani, yang menyebutnya sebagai arang seperti batu. Penemuan abu batubara pada reruntuhan bangsa Romawi di Inggris menunjukkan bahwa batubara sebagai sumber energi telah digunakan sejak tahun 400 SM. Catatan-catatan sejarah dari abad pertengahan tersebut memberikan bukti adanya upaya penambangan batubara di Eropa. Bahkan suatu perdagangan internasional batubara telah dilakukan, dengan mengumpulkan batubara yang terpapar di pantai Inggris, untuk kemudian diekspor ke Belgia.

Riwayat penambangan dan penggunaan batubara tidak dapat dipungkiri berkaitan dengan Revolusi Industri, dimana penemuan besar mesin uap oleh *James Watt*, yang dipatenkan pada tahun 1769, yang kemudian berlanjut dengan produksi besi dan baja, transportasi kereta api dan kapal uap, sangat berperan dalam pertumbuhan penggunaan batubara.

Batubara juga digunakan untuk menghasilkan gas untuk lampu gas di banyak kota. Proses pembentukan gas dengan menggunakan batubara ini menunjukkan pertumbuhan lampu gas disepanjang daerah metropolitan pada awal abad ke-19, terutama di London.

Dengan berkembangnya teknologi tenaga listrik pada abad ke-19, kemudian batubara dikaitkan dengan pembangkit listrik tenaga uap. Pusat pembangkit listrik tenaga uap yang pertama dikembangkan oleh *Thomas Edison*, mulai dioperasikan di New York pada tahun 1882, yang mencatu daya untuk lampu-lampu rumah.

Walaupun pada tahun 1960-an, minyak bumi kemudian mengambil alih posisi batubara sebagai sumber energi utama, terutama disektor transportasi, batubara masih berperan penting dalam penyediaan energi utama. Yaitu, dimana batubara masih memberikan kontribusi sebesar 23.5% dari kebutuhan energi utama dunia pada tahun 2002, 39% dari kebutuhan listrik dunia, dan memberikan kontribusi penting sebesar 64% dari produksi baja dunia.

Badan Geologi Nasional memperkirakan Indonesia masih memiliki 160 miliar ton cadangan batubara yang belum dieksplorasi. Cadangan tersebut sebagian besar berada di Kalimantan Timur dan Sumatera Selatan, namun demikian banyak daerah-daerah cadangan batubara tersebut berada di kawasan hutan konservasi.

Rata-rata produksi pertambangan batubara di Indonesia mencapai 300 juta ton per tahun, dimana sekitar 10 % digunakan untuk kebutuhan energi dalam negeri, dan sisanya sebesar 90 % merupakan komoditi ekspor.

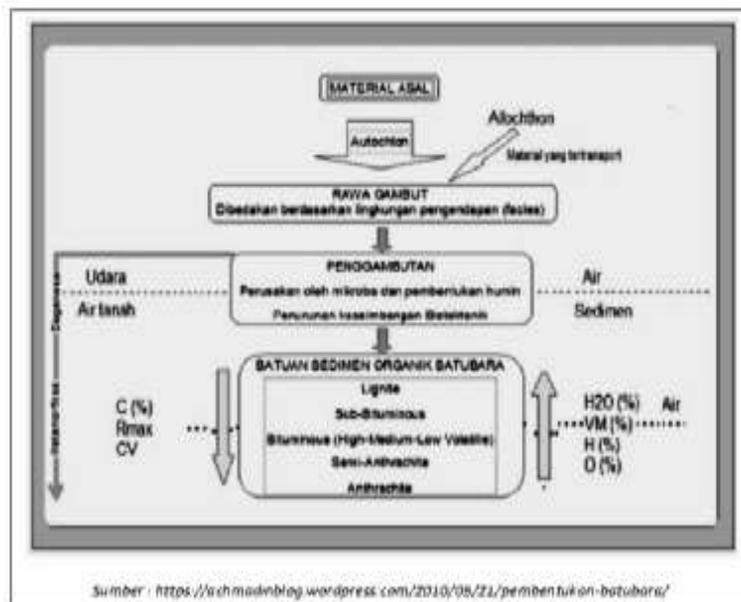
### **10.1.2. Genesa Batubara**

Batubara terbentuk dari sisa-sisa tumbuhan yang telah mati, mengalami pembusukan, tertimbun sehingga mengalami tekanan beban dari endapan di atasnya yang semakin besar. Oleh karena berasal dari senyawa hidrokarbon dari tumbuh-tumbuhan, maka komposisi kimia utamanya adalah Karbon (C), Hidrogen (H) dan Oksigen (O), disamping itu ada juga sisipan dalam jumlah sedikit unsur-unsur Nitrogen (N) dan Sulfur (S). Kandungan air pada awalnya sangat tinggi, namun proses tekanan pembebanan yang semakin meningkat, dan juga temperatur dengan berjalannya waktu, maka endapan ini menjadi semakin memadat, dengan kadar Karbon (C) semakin meningkat, sementara kandungan airnya semakin berkurang.

Hampir seluruh pembentuk batubara berasal dari tumbuhan. Jenis-jenis tumbuhan pembentuk batubara dan umurnya, menurut *Diessel (1981)* adalah sebagai berikut :

- *Algae*, dari jaman Pre-kambrium hingga Ordovisium dan ber sel tunggal. Namun sangat sedikit endapan batubara dari periode ini.

- *Cylophyta*, dari jaman Silur hingga Devon Tengah, merupakan turunan dari *algae*. Juga hanya sedikit endapan batubara yang ditemukan pada periode ini.
- *Pteridophyta*, berumur Devon Atas hingga Karbon Atas. Merupakan materi utama pembentuk batubara berumur Karbon di Eropa dan Amerika Utara. Tetumbuhan ini tanpa bunga dan biji, berkembang biak dengan spora dan tumbuh pada daerah beriklim hangat.
- *Gimnospermeae*, dijumpai pada kurun waktu mulai dari jaman Perm hingga Kapur Tengah. Tumbuhan ini bersifat heteroseksual dengan biji terbungkus dalam buah, merupakan tumbuhan sejenis pinus, mengandung getah (*resin*) yang tinggi. Jenis *Pteridospermeae* seperti *gangamopteris* dan *glossopteris* adalah penyusun utama batubara jaman Perm di Australia, India dan Afrika.
- *Angiospermeae*, dari jaman Kapur Atas hingga kini. Merupakan jenis tumbuhan modern dengan buah yang menutupi biji, berkelamin jantan dan betina dalam satu bunga, kurang bergetah bila dibandingkan dengan *gimnospermeae*, sehingga secara umum kurang dapat terawetkan.



Gambar 10.2. : Diagram proses pembentukan batubara

Batubara terbentuk secara bertahap melalui proses perubahan, mulai dari *gambut* menjadi *lignite*, kemudian menjadi *bituminous* dan akhirnya *anthracite*. Proses perubahan sisa-sisa tanaman menjadi gambut sampai kemudian pada akhirnya menjadi batubara disebut sebagai proses pembatubaraan (*coalification*), yang secara umum meliputi 2 tahapan proses, yaitu :

- **Tahap Diagenetik atau Biokimia** adalah tahapan yang dimulai dari saat material tanaman ter deposisi hingga terbentuk *lignite*. Disebut juga sebagai tahap penggambutan, dimana sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi tersimpan dalam kondisi reduksi didaerah rawa dengan sistem drainase yang buruk dan selalu tergenang air pada kedalaman 0,5 - 10 m. Material tumbuhan ini kemudian membusuk dan melepaskan unsur-unsur H, N, O, dan C dalam bentuk senyawa CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan NH<sub>3</sub> untuk menjadi humus, yang selanjutnya oleh bakteri *anaerobic* dan *fungi* diubah menjadi gambut. Proses utama yang berperan dalam perubahan ini adalah kadar air, tingkat oksidasi dan gangguan biologis yang dapat menyebabkan proses pembusukan (*decomposition*), dan pemadatan (*compaction*) material organik, sehingga terbentuk gambut dan kemudian *lignite*.
- **Tahap Malihan atau Geokimia**, meliputi proses perubahan dari *lignite* menjadi *bituminous* dan akhirnya *anthracite*. Pada tahap ini proses yang berperan adalah pemadatan (*compaction*) sebagai akibat tekanan yang semakin tinggi oleh karena pembebanan timbunan sedimen di atasnya, dan juga faktor temperatur yang tinggi.



**Gambar 10.3. : Jenis-jenis batubara**

Pengendapan material bahan pembentuk batubara, umumnya secara *autochtone*, tertimbun pada lokasi tumbuhan asalnya. Namun dapat pula secara *allochtone*, ter transport oleh air dan diendapkan ditempat lain. Ber turut-turut jenis batubara yang terbentuk adalah sebagai berikut :

- *Peat atau Gambut*, merupakan sisa-sisa tumbuhan yang membusuk, berupa humus dengan kadar air yang tinggi, > 75%.
- *Lignite*, disebut juga sebagai batubara muda atau brown coal oleh karena warnanya yang coklat tua, dengan kadar air yang masih tinggi, antara 35 -75 %.
- *Bituminous*, dengan kandungan Carbon (C) 68 – 86 %, sementara kandungan airnya rendah sekitar 8 – 10%.
- *Anthracite*, yang merupakan batubara yang sesungguhnya atau batubara tua, dengan warna hitam mengkilap oleh karena kandungan Carbon (C) yang sangat tinggi sekitar 86 – 98 %, dan kadar airnya yang sangat rendah < 8 %.

Pembentukan batubara diawali pada lingkungan daratan, yaitu pada kondisi reduksi pada lingkungan rawa, atau daratan yang tergenang air secara terus menerus. Maka, endapan batubara pun banyak dijumpai pada daratan-daratan kuno pada kurun waktu geologi, seperti pada lingkungan tengah benua atau *continental craton*.

### **10.1.3. Klasifikasi Batubara**

Ada berbagai klasifikasi yang sering digunakan untuk penggolongan batubara, seperti berdasarkan atas derajat pembatubaraan atau metamorfismenya, yang sering juga disebut berdasarkan tingkat kedewasaannya, yaitu berturut-turut dari *lignit*, *sub-bituminous*, *bituminous*, sampai ke *anthrasit*.

Klasifikasi teknis yang umum digunakan adalah klasifikasi yang disusun oleh *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, yaitu *ASTM D-388*. Yaitu yang disusun berdasarkan pada peringkat atau *rank* (*Speight, 2013*). Pada klasifikasi tersebut digunakan parameter (1) *heating value*, (2) *volatile matter*, (3) *moisture*, (4) *ash*, dan (5) *fixed carbon*.

Tabel 10.1. : Klasifikasi (rank) batubara, ASTM D-388.

Class/group	Fixed Carbon Limits (dry mineral-matter-free basis) %		Volatile Matter Limits (Dry, Mineral-matter-free Basis) %		Gross Calorific Value Limits (Moist, mineral-matter-free Basis)			
	Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	Btu/lb		MJ/kg	
					Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than
<b>Anthracite</b>								
Meta-anthracite	95	---	---	2				
Anthracite	92	92	2	8				
Semianthracite	86	92	8	14				
<b>Bituminous</b>								
Low Volatile	78	86	14	22				
Medium Volatile	69	78	22	31				
High Volatile A	---	69	31	---	14,000	---	32.6	---
High Volatile B					13,000	14,000	30.2	32.6
High Volatile C					11,500	13,000	26.7	30.2
<b>Subbituminous</b>								
Subbituminous A					10,500	11,500	24.4	26.7
Subbituminous B					9,500	10,500	22.1	24.4
Subbituminous C					8,300	9,500	19.3	22.1
<b>Lignite</b>								
Lignite A					6,300	8,300	14.7	19.3
Lignite B					---	6,300	---	14.7

Sumber : ASTM D-388

Batubara tersusun dari akumulasi material organik tumbuhan yang ter-preservasi dan ter-endapkan sebagai gambut. Perubahan karakteristik fisika dan kimiawi batubara meliputi perubahan atas penyusun batubara secara keseluruhan. Dalam hal ini, dikenal ada 3 kelompok material penyusun batubara, yang menentukan type batubaranya, yang di-identifikasi dengan menggunakan mikroskop optikal, yaitu dengan menggunakan pantulan cahaya putih dan dikenal sebagai *vitrit*, *liptinit*, dan *inertinit*, yang ketiganya disusun oleh konstituen individual yang disebut *makeral*. Dasar pembagian ketiga kelompok *makeral* ini adalah kesamaan proses pembentukan atau mode preservasi dan juga komposisi kimia dasarnya.

- **Kelompok makeral vitrit** berasal dari proses humifikasi sisa bagian kayu tumbuhan dan dapat memiliki struktur sel sisa atau bisa juga ditemui tanpa struktur. Secara tipikal, material ini mengandung lebih banyak oksigen dibandingkan *makeral* lainnya pada tiap tingkatan *rank*. Kelompok *makeral vitrit* umumnya melimpah pada batubara dengan *rank* tinggi.

- **Kelompok makeral liptinit** berasal dari bagian tumbuhan seperti getah, spora, kutikula dan sisa alga yang mempunyai sifat lebih resistan terhadap pembusukan bakterial dan jamur. Kelompok *makeral* ini memiliki ciri mengandung unsur hidrogen lebih tinggi, terutama pada batubara dengan *rank* rendah. Kendati demikian, pada batas antara sub-bituminus dan bituminus terdapat penurunan yang cukup mencolok pada kandungan *volatile matter* dan ada penambahan kandungan karbon. Pada *rank* medium *volatile* menurun lebih jauh, demikian pula dengan kandungan hidrogen, sehingga sulit dibedakan dengan *vitritinit*.
- **Kelompok makeral inertinit** berasal dari sisi bagian kayu tumbuhan, degradasi tanaman atau sisa jamur, dan memiliki ciri memiliki kandungan karbon tinggi yang dihasilkan dari oksidasi termal atau biologi. Kelompok *makeral inertinit* ditemukan dengan kuantitas tinggi, terutama pada batubara yang berasal dari belahan bumi selatan.

Klasifikasian informal juga sering digunakan pada batubara. Seperti pada kalangan industri, dikenal *high grade coal* dan *low grade coal* yang mengacu pada kandungan energi batubara. *High grade coal* adalah sebutan untuk batubara *anthrasit* dan *bituminous*, sedangkan *low grade coal* adalah sebutan untuk untuk batubara *sub-bituminous* dan *lignit*.

Klasifikasi informal yang juga umum digunakan adalah berdasarkan pada penggunaan atau propertiesnya, yaitu *thermal coal*, *coking coal*, serta *anthrasit*.

- **Thermal coal** atau yang dikenal juga sebagai *steaming coal* adalah batubara yang biasa dibakar untuk menggerakkan turbin penghasil tenaga listrik baik itu untuk pemenuhan kebutuhan energi publik maupun industri (seperti industri keramik, manufaktur kertas, industri semen, dll). Selama proses produksi energi, batubara dihancurkan hingga berukuran halus kemudian dibakar di dalam *boiler* untuk menghasilkan uap (*steam*) yang akan menjadi penggerak turbin. Indonesia adalah negara yang dikenal sebagai ekportir utama *thermal coal* disamping juga Australia, Afrika Selatan, Kolombia, Russia, dan Amerika Serikat. Batubara yang dapat dimanfaatkan sebagai *steaming coal* adalah

batubara *rank sub-bituminous* dan *bituminous*. Batubara *thermal coal* umumnya mempunyai karakteristik kandungan *fixed carbon* antara 35% hingga 85%, *ash content* berkisar dari 5% hingga 12%, *moisture* hingga 17%, dan kisaran *volatile matter* yang bervariasi. Baik *subbituminous* maupun *bituminous*, saat dibakar akan menghasilkan emisi gas yang berbahaya (*particulated material*, oksida sulfur, oksida nitrogen, dan merkuri). Emisi gas-gas tersebut dapat memicu hujan asam, yang perlu mendapat perhatian khusus bagi negara yang memanfaatkannya. Untuk mengurangi dampak hujan asam, dapat dilakukan diantaranya dengan pencampuran batubara *sub-bituminous* dengan *bituminous*. Sifat alkali sebagai hasil *by product* pembakaran *sub-bituminous* dapat mengikat senyawa sulfur yang dilepaskan pada pembakaran batubara *bituminous*, sehingga diharapkan akan dapat mengurangi pembentukan kabut asam.

- **Coking coal** adalah batubara yang digunakan dalam proses pembuatan *coke* atau kokas, yang digunakan dalam industri baja dan besi. Istilah lain dari *coking coal* adalah *metallurgical coal*. *Coke* atau kokas adalah bahan keras berpori dengan kadar karbon tinggi, yang dihasilkan dari proses pemanasan batubara *bituminous* tanpa udara, pada temperatur yang sangat tinggi (*pirolisis*). *Coke* dihasilkan dengan memanaskan batubara dalam *coke-oven* dalam kondisi reduksi. Dengan meningkatnya temperatur, batubara akan berubah sifat menjadi plastis, dan mengalami fusi secara bersamaan sebelum mengalami resolidifikasi menjadi partikel *coke*. *Coking coal* digunakan pada industri baja atau besi yang ter-integrasi, dimana pada proses pembuatan baja dibutuhkan biji besi dan kokas. Kokas dari *coking coal* digunakan untuk meng-konversikan biji besi menjadi besi cair, dimana dalam penggunaannya dikenal tiga kategori *coking coal* yaitu : (1) *hard coking coal* yang menghasilkan kokas dengan kualitas tinggi; (2) *semi-soft coking coal* yang menghasilkan kokas dengan kualitas lebih rendah; dan (3) *PCI coal*, yang secara umum tidak diklasifikasikan sebagai *metallurgical coal*, namun lebih digunakan sebagai pengganti kokas yang mahal pada proses injeksi tanur.
- **Anthrasit** umumnya ditambang dari formasi batuan yang berumur sangat tua secara geologis, sehingga telah mengalami

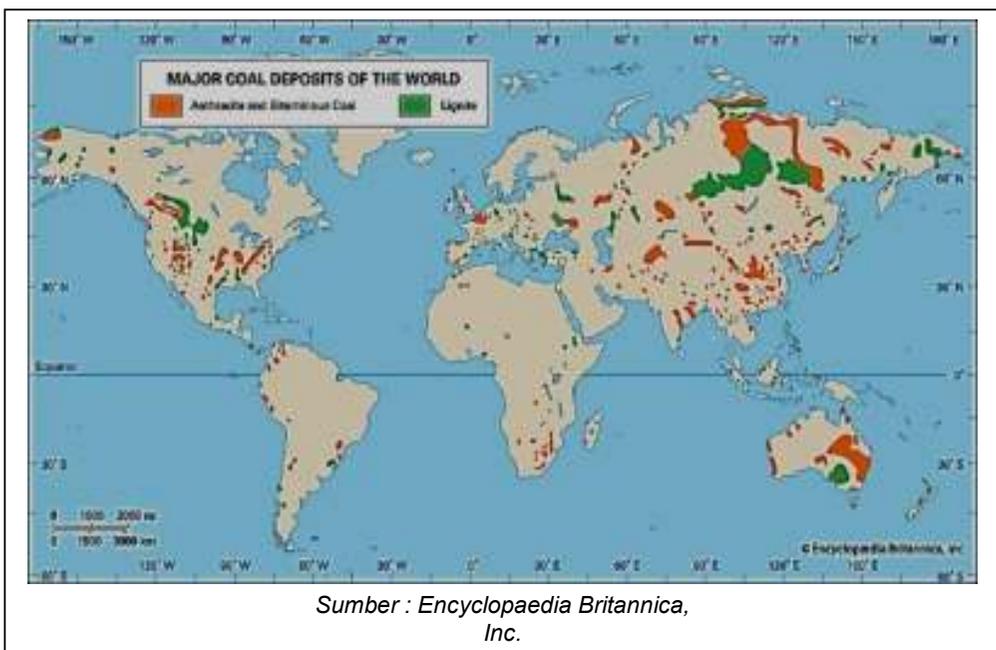
tekanan dan panas yang tinggi dalam waktu lama, sehingga menjadikannya sangat keras. *Anthrasit* memiliki potensi untuk menghasilkan energi panas lebih tinggi daripada batubara *bituminous* atau *sub-bituminus* yang secara geologi umumnya berumur lebih muda. *Anthrasit* memerlukan waktu yang lebih lama dalam proses pembakarannya, namun akan menghasilkan panas yang sangat tinggi. *Anthrasit* mempunyai karakteristik kandungan *fixed carbon* yang tinggi (80 sd 95 %), kadar sulfur serta nitrogen yang rendah (< 1%), kandungan *volatile matters* yang rendah pada kisaran 5%, dan kandungan *ash* pada kisaran 10 – 20%. Kegunaan *antrasit* dalam industri adalah dalam bidang metalurgi, thermal, pemurnian air, dan produksi material komposit. Pada masa-masa awal pemanfaatannya, *anthrasit* banyak digunakan sebagai bahan bakar domestik, dimana pada akhir abad ke 19 hingga tahun 1950 *anthrasit* banyak digunakan sebagai bahan bakar pemanas ruangan di Amerika Utara, sebelum kemudian digantikan dengan minyak dan gas alam. Pada masa kini, dengan kandungan karbon yang tinggi dan *volatile matters* yang rendah, *anthrasit* lebih banyak dimanfaatkan sebagai produk *premium ultra-low volatile pulverized coal injection* (PCI), yang di-injeksikan kedalam tanur pada industri baja. Penggunaan *anthrasit* dimaksudkan untuk mengurangi konsumsi kokas metalurgi yang mahal, sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses pembuatan baja. *Anthrasit* juga memiliki sifat “*non-clinkering*”, sehingga tidak dapat dimanfaatkan untuk pembuatan kokas, oleh karena tidak mengembang dan tidak mengalami resolidifikasi kembali saat dibakar. Tingkat kekerasan *anthrasit* yang tinggi membuatnya tak memiliki plastisitas, yang dibutuhkan untuk pembuatan kokas.

#### **10.1.4. Sebaran Endapan Batubara**

Pembentukan batubara memerlukan kondisi tertentu dan hanya terjadi pada era tertentu sepanjang sejarah geologi. Jaman Karbon, sekitar 300 juta tahun yang lalu (*jtl*), adalah masa pembentukan batubara yang produktif, dimana hampir seluruh endapan batubara berkualitas tinggi berupa *anthracite* yang disebut sebagai *black coal* yang mempunyai nilai ekonomis tinggi, terbentuk dibelahan bumi

utara, baik di Amerika Utara maupun Rusia. Batubara *anthracite* dijumpai dalam jumlah yang sangat besar dan masih menunjukkan jejak sisa-sisa tumbuhan asalnya di Amerika, yaitu pada formasi batuan yang berumur sekitar 300 juta tahun. Maka masa itu, dalam skala waktu geologi, dinamakan sebagai jaman *Karbon*.

Pada jaman *Perm*, sekitar 270 *jtl*, juga terbentuk endapan-endapan batubara yang ekonomis di belahan bumi selatan, khususnya Australia. Dan proses ini berlangsung terus hingga ke jaman Tersier (70 - 13 *jtl*) diberbagai bagian bumi lainnya.



**Gambar 10.4. : Sebaran endapan batubara di dunia**

**Tabel 10.2. : Cadangan batubara di berbagai negara, status pada akhir tahun 2006**

**Proved recoverable coal reserves at end-2006  
(million tonnes)**

Rank	Country	Anthracite & bituminous	Subbituminous & lignite	Total	Share
1	 USA	111,338	135,305	246,643	27.1
2	 Russia	49,088	107,922	157,010	17.3
3	 China	62,200	52,300	114,500	12.6
4	 India	90,085	2,360	92,445	10.2
5	 Australia	38,600	39,900	78,500	8.6
6	 South Africa	48,750	0	48,750	5.4
7	 Ukraine	16,274	17,879	34,153	3.8
8	 Kazakhstan	28,151	3,128	31,279	3.4
9	 Poland	14,000	0	14,000	1.5
10	 Brazil	0	10,113	10,113	1.1
12	 Germany	183	6,556	6,739	0.7
13	 Colombia	6,230	381	6,611	0.7
14	 Canada	3,471	3,107	6,578	0.7
15	 Czech Republic	2,094	3,458	5,552	0.6
16	 Indonesia	740	4,228	4,968	0.5
17	 Turkey	278	3,908	4,186	0.5
18	 Greece	0	3,900	3,900	0.4
19	 Hungary	198	3,159	3,357	0.4
20	 United Kingdom	0	3,196	3,196	0.3
21	 Bulgaria	4	2,183	2,187	0.2
22	 Thailand	0	1,354	1,354	0.1
23	 North Korea	300	300	600	0.1
24	 New Zealand	33	538	571	0.1
25	 Spain	200	330	530	0.1
26	 Zimbabwe	502	0	502	0.1
27	 Romania	22	472	494	0.1
28	 Venezuela	479	0	479	0.1
<b>Total</b>	<b>World</b>	<b>478,771</b>	<b>430,293</b>	<b>909,064</b>	<b>100.0</b>

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Coal\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Coal_by_country)

### 10.1.5. Potensi Sumberdaya Batubara Indonesia

Potensi sumberdaya batubara di Indonesia cukup melimpah, terutama di Pulau Kalimantan dan Pulau Sumatera, sedangkan didaerah lainnya juga dapat dijumpai endapan batubara, walaupun dalam jumlah terbatas dan belum diketahui nilai keekonomisannya, seperti yang ditemukan di Jawa Barat, Jawa Tengah, Papua, dan Sulawesi.

Di Indonesia, endapan batubara yang bernilai ekonomis terdapat pada cekungan *Tersier*, yang terletak di bagian barat Paparan Sunda (termasuk Pulau Sumatera dan Kalimantan). Pada umumnya endapan batubara tersebut merupakan endapan batubara berumur *Eosen* (sekitar 45 juta tahun), dan *Miosen* (sekitar 20 juta tahun) dalam skala waktu geologi.

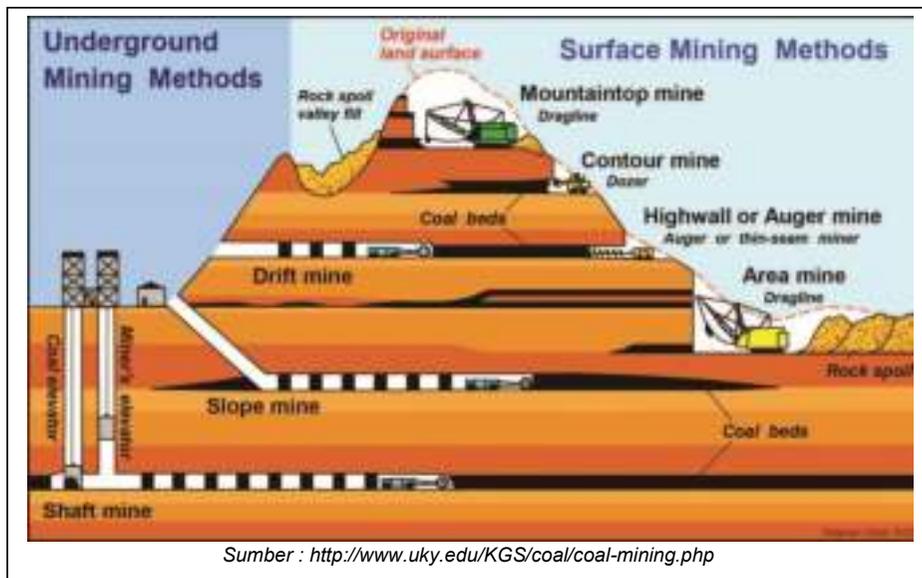
- **Endapan batu bara Eosen** umumnya lebih tipis, berkadar abu dan sulfur tinggi. Endapan batu bara ini terbentuk pada lingkungan lakustrin, dataran pantai atau delta, mirip dengan daerah pembentukan gambut yang terjadi saat ini didaerah timur Sumatera dan sebagian besar Kalimantan. Endapan *batubara Eosen* terbentuk pada tatanan tektonik ekstensional yang dimulai pada Tersier Bawah atau *Paleogen*, pada cekungan-cekungan sedimen di Sumatera dan Kalimantan. Keberadaan endapan batubara *Eosen* ini dijumpai disepanjang tepian Paparan Sunda, dari sebelah barat Sulawesi, Kalimantan bagian timur, Laut Jawa hingga Sumatera. Dari batuan sedimen yang ditemukan diketahui bahwa pengendapan berlangsung mulai pada jaman *Eosen* Tengah. Pemekaran Tersier Bawah yang terjadi pada Paparan Sunda ini ditafsirkan terjadi pada tatanan busur dalam, yang disebabkan oleh gerak penunjaman (*subduction*) Lempeng Indo-Australia. Di Kalimantan bagian tenggara, pengendapan batu bara terjadi sekitar *Eosen* Tengah - Atas namun di Sumatera berumur lebih muda, yaitu *Eosen* Atas hingga *Oligosen* Bawah. Di Sumatera bagian tengah, endapan fluvial yang terjadi pada fase awal kemudian ditutupi oleh endapan danau (non- marin). Berbeda dengan yang terjadi di Kalimantan bagian tenggara dimana endapan fluvial kemudian ditutupi oleh lapisan batubara yang terjadi pada dataran pantai, yang kemudian ditutupi di atasnya secara transgresif oleh sedimen marin berumur *Eosen* Atas. Endapan batu bara *Eosen* yang telah dikenali, dijumpai pada cekungan Pasir dan Asam- asam (Kalimantan Selatan dan Timur), Barito (Kalimantan Selatan), Kutai Atas (Kalimantan Tengah dan Timur), Melawi dan Ketungau (Kalimantan Barat), Tarakan (Kalimantan Timur), Ombilin (Sumatera Barat) dan Sumatera Tengah (Riau).
- **Endapan batu bara Miosen** terutama terdapat di Cekungan Kutai bagian bawah (Kalimantan Timur), Cekungan Barito

(Kalimantan Selatan) dan Cekungan Sumatera bagian selatan. Batu bara *Miosen* juga secara ekonomis ditambang di Cekungan Bengkulu. Batubara ini umumnya ter deposisi pada lingkungan fluvial, delta dan dataran pantai yang mirip dengan daerah pembentukan gambut saat ini di Sumatera bagian timur. Ciri utama lainnya adalah kadar abu dan belerang yang rendah. Kebanyakan endapan batubara *Miosen* ini tergolong *sub-bituminous* atau *lignit* sehingga kurang ekonomis, kecuali jika sangat tebal atau lokasi geografisnya menguntungkan. Namun batubara *Miosen* di beberapa lokasi juga tergolong berkualitas tinggi, seperti pada cekakan Pinang dan Prima, endapan batubara di sekitar hilir sungai Mahakam-Kalimantan Timur dan beberapa lokasi didekat Tanjungenim, serta Cekungan Sumatera bagian selatan. Batubara *Miosen* ini terbentuk dari endapan gambut pada iklim purba disekitar khatulistiwa, yang mirip dengan kondisi saat sekarang ini. Beberapa diantaranya tergolong kubah gambut yang terbentuk diatas muka air tanah rata-rata, pada iklim basah sepanjang tahun. Dengan kata lain, kubah gambut ini terbentuk pada kondisi dimana mineral-mineral anorganik yang terbawa air dapat masuk kedalam sistem dan membentuk lapisan batubara yang berkadar abu dan sulfur rendah, dan menebal secara lokal. Hal ini sangat umum dijumpai pada batubara *Miosen*.

#### **10.1.6. Kendala dan Aspek Lingkungan Penambangan Batubara**

Endapan batubara adalah merupakan batuan sedimen, yang pada awalnya diendapkan secara horisontal pada suatu cekungan sedimen. Maka lapisan batubara akan tersebar meluas baik secara lateral maupun terlipat. Sehingga, penambangan batubara akan merupakan penggalian sejumlah besar volume material padat pembentuk kerak bumi, yang dapat mencakup areal yang sangat luas.

Penambangan batubara dapat dilakukan dengan cara penambangan permukaan (*surface mining*) atau dengan cara penambangan bawah tanah (*underground mining*).



*Gambar 10.5 : Diagram penambangan permukaan (surface mining) dan bawah tanah (underground mining)*

- Penambangan permukaan (surface mining), disebut juga sebagai open pit mining, adalah metoda penambangan yang dilakukan dengan pengupasan lapisan penutup yang berada diatas lapisan batubara, sehingga lapisan batubara tersebut tersingkap kepermukaan untuk kemudian digali atau ditambang. Hal ini akan efektif apabila lapisan penutup yang menutupi lapisan batubara tersebut tidak terlalu tebal, dan lapisan batubara yang ditambang menyebar secara horisontal. Namun demikian, hal tersebut berarti pengupasan lapisan permukaan, sehingga dapat berarti menghilangkan lapisan tanah subur produktif dalam skala yang luas. Di Indonesia sendiri, sebagian besar endapan batubara yang mempunyai nilai ekonomis berada dikawasan hutan, bahkan hutan lindung, sehingga diperlukan regulasi khusus untuk pemanfaatannya secara optimal.



The Welzow-Sued open-pit coal mine, 70 miles south of Berlin, is one of several in eastern Germany's Lusatia region. It is expected to expand in the coming years and consume the village of Proschim, just over a mile away.

Sumber : <https://www.voanews.com/a/coal-renewables-battle-power-germany/3057030.html>

**Gambar 10.6. : Tambang batubara terbuka The Welzow-Sued open-pit coal mining – Germany**

- **Penambangan bawah tanah (*underground mining*)** dilakukan apabila lapisan penutup diatas lapisan batubara cukup tebal, sehingga kurang efektif apabila dikupas. Maka penambangan dilakukan dengan cara menggali terowongan bawah tanah, kemudian menggali lapisan batubaranya untuk diangkut kepermukaan. Cara ini setidaknya dapat meminimalkan dampak lingkungan seperti yang diakibatkan oleh pengupasan pada metoda penambangan terbuka. Namun demikian, penambangan bawah tanah mempunyai risiko yang lebih tinggi dalam hal

keselamatan kerja bagi para pekerjanya. Berbagai peristiwa kecelakaan pada tambang batubara bawah tanah, telah pernah terjadi dengan menimbulkan jumlah korban jiwa yang signifikan. Kecelakaan terutama disebabkan oleh ledakan gas yang dapat diikuti dengan kebakaran. Disamping itu ada juga beberapa kasus kecelakaan yang disebabkan oleh runtuhnya terowongan tambang.



**Gambar 10.7. : Tambang batubara bawah tanah (*underground coal mine*) – West Virginia, USA**

**Tabel 10.3. : Daftar peristiwa kecelakaan terburuk pada tambang batubara bawah tanah**

### **The world's worst coal mining disasters**

#### **Benxihu Colliery Disaster (1942) - China**

The Benxihu colliery disaster in China *cost 1,549 lives* and is believed to be the worst coal mining disaster ever. The tragedy occurred on 26 April 1942 in the Honkeiko coal mine, The fatal *explosion* of the underground coal mine was *caused by a mixture of gas and coal dust*.

#### **Courrieres Coal Mine Disaster (1906) - France**

The Courrieres mine disaster in France, with *a total death toll of 1,099*, is the second deadliest coal mining disaster in history. The coal mining catastrophe occurred on 10 March 1906 due to a *massive explosion sparked by an underground fire* in one of the pits of the Courrieres Colliery.

#### **Mitsubishi Hojyo Coal Mine Disaster (1914) - Japan**

Mitsubishi Hojyo coal mine disaster, the deadliest mining accident in Japan, *caused 687 deaths*. It was caused by a *gas explosion* at the Mitsubishi Hojyo coal mine located in the Kyushu Island of Japan. The disaster took place on 15 December 1914.

#### **Laobaidong Colliery Disaster (1960) - China**

Laobaidong coal mine disaster, the second deadliest in China after the Benxihu colliery disaster, *killed 684 people*. The disaster occurred on 9 May 1960 in the Laobaidong coal mine, located near Datong in the Shanxi province of China. The accident was *caused by methane explosion*.

#### **Mitsui Miike Coal Mine Disaster (1963) - Japan**

The Mitsui Miike coal mine explosion on 9 November 1963, was the second deadliest coal mining disaster in Japan after the Mitsubishi Hojyo Coal Mine Disaster in 1914. *458 miners were killed* in the accident and *833 were injured*. It was a *coal dust explosion* around 500m below the mine's ground level entrance.

#### **Senghenydd Colliery Disaster (1913) - United Kingdom**

The Senghenydd Colliery disaster is the worst ever mining tragedy in the United Kingdom. The disaster, also known as the Senghenydd Explosion, occurred at the Universal Colliery in Senghenydd near Caerphilly, Glamorgan, Wales, on 14 October 1913. The fatal disaster was a result of a *coal dust explosion* in the underground mine. *439 miners were killed* in the accident. Most of the miners who survived the fire and explosion were killed due to carbon monoxide poisoning.

#### **Coalbrook mine disaster (1960) - South Africa**

Coalbrook mine disaster with *435 deaths* is the worst ever disaster in South Africa's mining history. The disaster took place on 21 January 1960 at the Coalbrook North Mine of the Clydesdale Colliery near Sasolburg, Orange Free State, South Africa. *The collapse of around 3km<sup>2</sup> of underground mine area* caused the disaster.

#### **Wankie Colliery Disaster (1972) - Rhodesia (Zimbabwe)**

Wankie Colliery Disaster in Rhodesia (now Zimbabwe) *killed 426 people*. The disaster occurred on 6 June 1972 at the No. 2 mine shaft of the Wankie Colliery, in north-western Rhodesia. The disaster was *caused by multiple explosions* in the underground coal mine.

#### **Oaks Colliery Explosion (1866) - United Kingdom**

Oaks Colliery explosion is the second deadliest coal mine disaster in the United Kingdom after the disaster at Senghenydd Colliery. The disaster took place on 12 December 1866 at the Oaks Colliery, near Stairfoot, Barnsley, in South Yorkshire. *The death toll* of this major nineteenth century coal mine disaster is reported to be *388*. It was a *iredamp and coal dust explosion* suspected to have been ignited by the digging of new workings at the underground mine.

#### **Dhanbad Coal Mine Disasters (1965 and 1975) - India**

The Dhanbad coal mine disaster occurred on the night between 27th and 28th May. The disaster was caused by an explosion in Dhori colliery near Dhanbad, the major coal mining town in India. *375 miners were killed* in the disaster. It was a *iredamp and coal dust explosion*.

#### **Monongah Coal Mine Disaster (1907) - United States of America**

Monongah Coal Mine Disaster is the largest mining catastrophe in the US. The disaster occurred on 6 December 1907 at two mines of the Monogah mine facility in West Virginia. The number of *fatalities in the disaster is recorded as 362*. The disaster was caused by *iredamp and coal dust explosion* in mines six and seven of the Monogah mine facility operated by Fairmont Coal Company.

*Source : modified from <http://www.mining-technology.com/>*

Batubara terbentuk dari tumbuhan purba yang berubah bentuk akibat proses fisika dan kimia yang berlangsung selama jutaan tahun. Konsentrasi unsur karbon yang semakin tinggi sejalan dengan berlanjutnya proses pembatubaraan, memungkinkan terbentuknya gas-gas yang terperangkap didalam rongga dan celah-celah dalam batuan. Gas-gas tersebut diantaranya adalah gas metan (CH<sub>4</sub>), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) karbon monoksida (CO), dan gas-gas lain yang menyertainya. Secara teoritis, volume gas metan (CH<sub>4</sub>) yang terbentuk pada proses pembentukan 1 ton batubara adalah 300 m<sup>3</sup>. Kondisi terperangkapnya gas-gas tersebut terus berlangsung sampai terjadi bukaan lapisan batubara atau batuan disekitarnya, baik oleh proses alam atau artifisial seperti penambangan. Gas metan (CH<sub>4</sub>) adalah gas ringan dengan berat jenis 0.558, tidak berwarna, tidak berbau dan

mudah terbakar. Maka ledakan dalam tambang bawah tanah, sering diawali dengan terbakarnya gas tersebut, diikuti dengan terbentuknya gas-gas yang mematikan seperti halnya karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan karbon monoksida (CO). Peristiwa ini pernah terjadi di tambang batubara Mitsui Miike di Jepang pada awal November 1963, dengan korban tewas mencapai 458 orang, dimana sebagian besar adalah akibat keracunan gas karbon monoksida (CO).

## 10.2. Minyak dan Gas Bumi

Minyak bumi merupakan sumber bahan bakar yang saat ini dibutuhkan oleh seluruh negara, sehingga oleh karena banyaknya yang menggunakan minyak bumi sebagai bahan bakar utama, maka minyak bumi ini sering disebut juga sebagai *emas hitam*. Minyak bumi (dalam bahasa Inggris *petroleum*, berasal dari bahasa Latin *petros*), adalah merupakan cairan kental berwarna coklat gelap atau kehijauan yang mudah terbakar, yang berada pada lapisan atas dari beberapa tempat di kerak bumi.

Minyak bumi dan gas alam berasal dari jasad renik lautan, tumbuhan dan hewan yang mati pada periode jutaan tahun yang lalu. Sisa-sisa organisme tersebut mengendap di dasar lautan, kemudian tertutup oleh lapisan lumpur di atasnya, yang lambat laun berubah menjadi batuan oleh karena pengaruh beban dari lapisan di atasnya. Sementara itu, peningkatan tekanan dan suhu, serta aktivitas bakteri *anaerob* menguraikan sisa-sisa jasad renik tersebut dan mengubahnya menjadi minyak dan gas. Minyak dan gas yang terbentuk kemudian meresap kedalam pori-pori dan celah-celah batuan, dan bermigrasi dari suatu tempat ke tempat yang lain, untuk kemudian terakumulasi apabila terhalang oleh lapisan *impermeable*. Proses pembentukan minyak bumi dan gas hingga terkumpul dalam suatu batuan reservoir ini terjadi dalam jangka waktu puluhan hingga ratusan juta tahun.

### 10.2.1. Sejarah Pemanfaatan Minyak Bumi

Bersumber dari *Ensiklopedia Britannica*, minyak bumi diperkirakan pertama kali ditemukan pada 5000 tahun SM oleh bangsa *Asyiria*, *Sumeria*, dan *Babilonia* kuno. Yaitu dengan cara

mengambilnya langsung dari minyak bumi yang merembes kepermukaan, tanpa perlu melakukan pemboran. Sumber lain menyatakan bahwa minyak bumi pertama kali ditemukan di Timur Tengah oleh bangsa *Persia* kuno, sebagai rembesan yang muncul kepermukaan.

Bangsa-bangsa tersebut memanfaatkan minyak bumi sebagai obat luka, pencahar, atau pembasmi kutu.

Pada abad pertama, bangsa Arab dan Persia berhasil menemukan teknologi destilasi minyak bumi. Destilasi ini menghasilkan minyak yang mudah terbakar, sehingga semenjak itulah minyak bumi digunakan sebagai bahan bakar. Minyak bumi sebagai bahan bakar juga digunakan pada jaman Kekhalifahan *Harun Al Rasyid* dengan nama *Naphta*. Pada jaman berikutnya ditemukan gas bumi yang muncul ke permukaan dan dapat mudah terbakar, sehingga pada waktu itulah berkembang agama penyembah api, yaitu agama *Majusi*, yang beranggapan api dari gas yang terbakar tersebut sebagai api abadi.

Beberapa abad kemudian bangsa Spanyol mulai melakukan eksplorasi minyak bumi di wilayah Kuba, Meksiko, Bolivia, dan Peru. Sementara itu, pada tahun 1847 di Glasgow-Inggris, ditemukan suatu cara mengolah minyak bumi menjadi minyak lampu, sehingga dapat digunakan sebagai pengganti lilin yang merupakan sumber penerangan utama pada saat itu. Dan pada pertengahan abad ke-19, masyarakat Amerika Utara dan Eropa mulai menggunakan minyak tanah atau minyak batubara sebagai bahan bakar untuk penerangan.

Seiring perkembangan jaman, mesin-mesin mulai menggantikan tenaga manusia dan hewan, dan minyak bumi mulai digunakan sebagai bahan bakar penggerakannya. Sehingga masyarakat luas mulai memburu minyak bumi sebagai sumber energi, oleh karena dianggap lebih praktis. Pemboran minyak bumi pertama kali tercatat dilakukan di Pennsylvania-Amerika, pada tahun 1859, di tambang milik *Edwin L. Drake*, yang merupakan pelopor industri minyak bumi modern didunia. Maka, sejak abad ke-19 itulah industri minyak modern mulai berkembang di Amerika Serikat, dan diikuti oleh negara-negara Eropa, sehingga kemudian menjadi industri komersial.

Eksplorasi minyak bumi di Timur Tengah mulai dilakukan pada tahun 1919, dimana pada tahun 1927 dilakukan pemboran minyak bumi untuk yang pertama kali, dan ditemukan lapangan *minyak Kirkuk* dengan produksi mencapai 100.000 bpd (barrel per day). Berikutnya pada tahun 1939 ditemukan beberapa lapangan minyak bumi raksasa di Saudi Arabia, dan pada tahun 1960 mulai dilakukan pencarian minyak bumi lepas pantai di Kuwait.

Perkembangan teknologi yang menyertai perkembangan industri minyak bumi, memicu perkembangan industri sarana yang menggunakan bahan bakar minyak bumi, seperti halnya industri kendaraan bermotor. Maka industri minyak bumi pun semakin berkembang dengan teknologi fraksinasi bahan bakar minyak. *Crude oil* atau minyak mentah didestilasi menjadi berbagai fraksi bahan bakar, seperti bensin, solar, minyak tanah, hingga aspal.

### **10.2.2. Genesa Minyak dan Gas Bumi**

Minyak bumi pada dasarnya adalah senyawa hidrokarbon di alam dalam bentuk cair, sedangkan gas bumi dalam bentuk gas, yang keduanya terbentuk oleh proses alam. Dalam hal ini dikenal beberapa teori tentang proses terbentuknya minyak dan gas bumi, yaitu proses anorganik, proses organik dan proses duplex.

#### **- Teori anorganik (*abiogenesis*)**

Salah Satu teori yang berkembang mengenai asal usul terjadinya minyak bumi adalah teori *anorganik (abiogenesis)*, yang dikemukakan oleh *Barthelot (1866)*, yang berpendapat bahwa didalam minyak bumi terdapat logam alkali, yang dalam keadaan bebas dengan temperatur tinggi apabila bersentuhan dengan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  akan membentuk *acetylena*. Dengan kata lain, logam alkali dalam keadaan bebas dan temperatur tinggi, apabila bersentuhan dengan  $\text{CO}_2$  diudara dan  $\text{H}_2\text{O}$  akan membentuk *acetylena*, kemudian *acetylena* akan berubah menjadi *benzena*. Namun kelemahan dari teori ini adalah, ketiadaan logam alkali bebas dalam kerak bumi.

Berikutnya *Mendelejev (1877)* mengemukakan bahwa minyak bumi terbentuk akibat adanya pengaruh kerja uap pada karbida-

karbida logam dalam bumi. Asumsi ini didasarkan pada adanya karbida besi didalam kerak bumi yang kemudian bersentuhan dengan air membentuk hidrokarbon, namun kelemahannya adalah tidak cukup banyaknya karbida di alam. Dan yang lebih ekstrim adalah, pernyataan beberapa ahli yang mengemukakan bahwa minyak bumi telah mulai ada jauh sebelum bumi terbentuk dan bersamaan dengan proses terbentuknya bumi. Hal tersebut didasarkan fakta penemuan material hidrokarbon dalam beberapa batuan meteorit.

*Von Humbold* dan *Gay Lussac (1805)*, memperkirakan bahwa minyak bumi berhubungan dengan aktivitas gunung api. Pendapat tersebut juga dikemukakan oleh ahli geologi Perancis *Virlet d' Aoust (1834)*, dimana teori ini didasarkan pada ditemukannya minyak bumi bersama dengan lumpur gunung api.

- ***Teori organik (biogenesis)***

*Macqiur (Perancis, 1758)* merupakan orang pertama yang mengemukakan pendapat bahwa minyak bumi berasal dari tumbuh-tumbuhan. Kemudian *M.W. Lamanosow (Rusia, 1763)* mengemukakan hal yang sama, dan pendapat tersebut juga didukung oleh para ahli lainnya, seperti *New Beery (1859)*, *Engler (1909)*, *Bruck (1936)*, *Bearl (1938)* dan *Hofer*. Dimana mereka berpendapat bahwa minyak dan gas bumi berasal dari sisa-sisa organisme laut yang mati jutaan tahun yang lalu, dan membentuk lapisan dibawah permukaan bumi. Berdasarkan teori organik ini, minyak bumi terbentuk oleh karena kebocoran kecil yang permanen dalam siklus karbon. Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) di atmosfer berasimilasi, diekstrak dari atmosfer oleh organisme fotosintetik darat dan laut. Kemudian  $\text{CO}_2$  dibebaskan kembali ke atmosfer melalui respirasi organisme, baik berupa tumbuhan, hewan ataupun mikroorganisme. Dalam proses inilah terjadi kebocoran kecil yang memungkinkan sebagian kecil karbon yang tidak terbebaskan kembali ke atmosfer dalam bentuk  $\text{CO}_2$ , namun mengalami transformasi yang pada akhirnya menjadi fosil yang dapat terbakar.

Bahan bakar fosil pada awalnya jumlahnya sangat kecil, namun hal itulah yang merupakan cikal bakal senyawa-senyawa fosil atau dikenal juga sebagai *embrio minyak bumi*.

Berikutnya embrio tersebut mengalami perpindahan ketempat yang memungkinkannya untuk terakumulasi. Embrio kecil ini terakumulasi diantara mineral-mineral dan material sedimen lainnya, untuk kemudian membentuk molekul yang lebih besar yang dikenal dengan *geopolimer*.

Selanjutnya senyawa organik ini akan mengalami proses geologi dibawah permukaan bumi. Pertama yang terjadi adalah proses *diagenesa*, yaitu dimana senyawa organik dan organisme yang sudah mati, dan terkubur sampai dengan kedalaman 300 meter dibawah permukaan dengan temperatur kurang dari 50°C, mulai kehilangan oksigen sebagai akibat reaksi *dekarboksilasi* dan *dehidratasi*.

Berikutnya, pada kedalaman 300 sampai 600 meter, dengan temperatur meningkat sampai dengan 50 - 150°C proses *katagenesa* mulai berlangsung, maka *geopolimer* yang terpendam mulai terurai, sehingga komponen-komponen minyak bumi mulai terbentuk. Semakin dalam melebihi 3000 meter dengan temperatur lebih dari 150°C, terjadi proses *metagenesa* dimana bahan-bahan organik terurai menjadi molekul-molekul yang lebih kecil, maka terbentuklah gas bumi.

#### - *Teori duplex*

Teori *duplex* yang diakui dan lebih dapat diterima oleh banyak kalangan ahli ini, merupakan kombinasi antara teori *anorganik* dengan teori *organik (biogenesis)*. Berdasarkan teori ini, minyak bumi terbentuk dari berbagai macam jasad organisme laut baik itu hewan ataupun tumbuhan yang merupakan jasad renik. Organisme-organisme tersebut tertimbun oleh lumpur dalam waktu yang lama, sehingga lumpur tersebut perlahan berubah menjadi batuan sedimen. Batuan sedimen ini kemudian akan memiliki bintik-bintik minyak atau gas yang berasal dari sisa-sisa organisme didalamnya, yang kemudian disebut sebagai batuan induk (*source rock*) minyak bumi. Yaitu batuan yang mempunyai banyak kandungan material organik, yang mempunyai sifat

mampu mengawetkan kandungan material organik tersebut didalamnya, seperti batulempung, serpih (*shale*) atau batuan yang mempunyai banyak kandungan material organik lainnya seperti batugamping. Selanjutnya bintik-bintik minyak dan gas tersebut akan ber migrasi menuju tempat yang bertekanan lebih rendah, dan akhirnya terakumulasi pada tempat tertentu dalam batuan, yang disebut sebagai perangkap (*trap*).

### **10.2.3. Perangkap Minyak dan Gas Bumi (*Oil & Gas Trap*)**

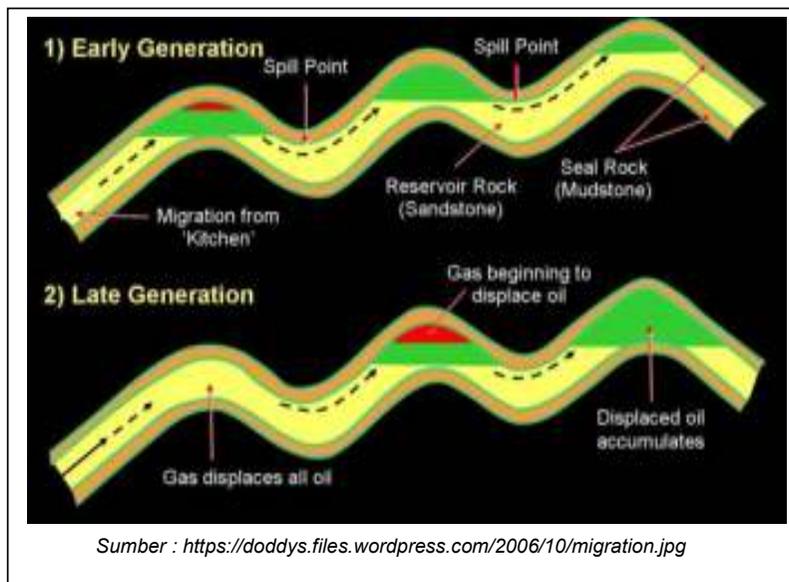
Walaupun minyak dan gas bumi terbentuk pada batuan induk (*source rock*) sebagai bintik- bintik minyak dan gas, namun belum mempunyai nilai ekonomis untuk di-eksploitasi. Bintik- bintik minyak dan gas ini akan bermigrasi menuju tempat yang bertekanan lebih rendah untuk kemudian terakumulasi dan terperangkap. Minyak dan gas bumi baru akan mempunyai nilai ekonomis, setelah terperangkap dan ter akumulasi dalam batuan penyimpan (*reservoir rock*) bersama dengan air tanah. Namun oleh karena perbedaan berat jenis, maka gas selalu berada dibagian teratas, minyak ditengah, dan air dibagian bawah. Suatu perangkap dalam hal ini dapat mengandung (1) minyak, gas, dan air, (2) minyak dan air, (3) gas dan air. Jika gas terdapat bersama-sama dengan minyak bumi maka disebut dengan *associated gas*, sedangkan jika gas terdapat sendiri dalam suatu perangkap tanpa disertai minyak bumi disebut sebagai *non-associated gas*. Perangkap atau cebakan minyak dan gas bumi akan terbentuk manakala adanya komponen-komponen sebagai berikut :

- ***Batuan induk (source rock)*** : Yaitu batuan yang banyak mengandung material organik. Batuan ini merupakan batuan yang mampu mengawetkan kandungan material organik didalamnya, seperti batulempung atau batuan lainnya yang banyak mengandung material organik seperti batugamping.
- ***Batuan penyimpan (reservoir rock)*** : Yaitu batuan yang mempunyai kemampuan menyimpan *fluida*, seperti batupasir atau batuan lainnya, dimana minyak atau gas dapat tersimpan pada pori-pori antar butirannya. Atau dapat juga pada batugamping yang banyak mempunyai celah dan rongga yang saling terhubung satu dengan lainnya.

- **Batuan penutup (seal rock)** : Yaitu lapisan batuan *impermeable* atau batuan yang tidak lolos *fluida* atau gas.

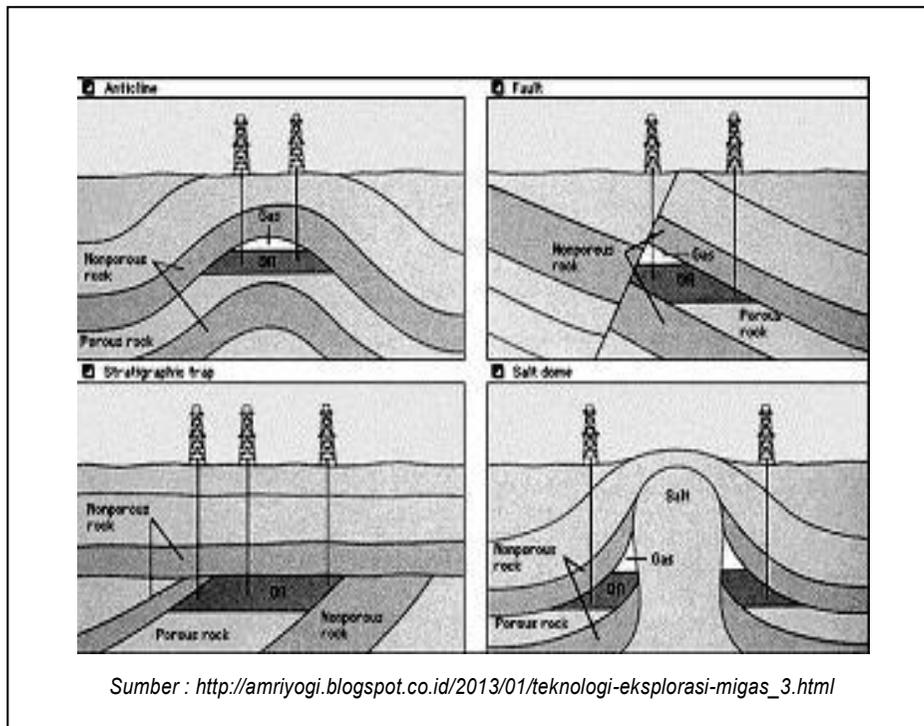
**Migrasi** : Yaitu proses berpindahnya minyak atau gas bumi dari *batuan induk* ke *batuan penyimpan* sampai tertahan oleh *batuan penutup*, sehingga terhenti dan ter-akumulasi.

**Perangkap (trap)** : Yaitu bentuk geometri yang mampu menahan minyak dan gas bumi untuk dapat ter akumulasi.



**Gambar 10.8. : Diagram proses migrasi minyak dan gas bumi menuju perangkap pada batuan penyimpan (reservoir rock)**

Perangkap reservoir merupakan faktor menentukan terbentuknya cekungan minyak dan gas bumi. Didalam zona perangkap, air yang menyertai hidrokarbon cair maupun gas, berada pada bagian bawah dan mendesaknya keatas oleh karena berat jenisnya yang lebih tinggi. Dalam batasan geologis, perangkap minyak dan gas bumi dikelompokkan dalam 3 jenis perangkap, yaitu : perangkap struktur, perangkap stratigrafi dan perangkap kombinasi.



**Gambar 10.9. : Diagram jenis-jenis perangkap (trap) minyak dan gas bumi**

- **Perangkap struktur** adalah bentuk geometri batuan reservoir yang dibentuk pergerakan tektonik, sehingga batuan reservoir terdeformasi sedemikian rupa, sehingga kandungan minyak dan gas bumi didalamnya terperangkap tak dapat bermigrasi. Perangkap struktur ini terdiri dari *perangkap lipatan* dan *perangkap sesar*.

*Perangkap lipatan* terbentuk ketika batuan reservoir (*reservoir rock*) beserta dengan batuan penutupnya (*seal rock*) terlipat, membentuk geometri cembung keatas atau struktur antiklin. Sehingga minyak dan gas bumi yang ada dalam batuan reservoir yang terdesak oleh air, dan terperangkap dalam kubah antiklin tersebut. Perangkap tersebut dapat juga terbentuk sebagai akibat perlipatan semu, seperti halnya perlipatan yang diakibatkan oleh intrusi kubah garam (*salt dome*).

*Perangkap patahan* terbentuk ketika terjadi pergeseran pada batuan, sedemikian rupa sehingga batuan reservoir tertutup oleh

batuan penutup (*seal rock*), sehingga kandungan minyak dan gas bumi didalamnya terperangkap.

- **Perangkap stratigrafi** merupakan perangkap yang terbentuk oleh adanya variasi lateral dalam lapisan batuan reservoir oleh batuan-batuan kedap air yang dapat berfungsi sebagai *seal rock*, sehingga menghentikan proses migrasi kandungan minyak dan gas bumi didalamnya, sekaligus memerangkapnya.

Perangkap stratigrafi (*stratigraphic trap*) ini antara lain terdiri dari 3 jenis, yaitu Perangkap ketidakselarasan (*unconformity traps*), Perangkap diagenesis (*diagenetic trap*), dan Perangkap sedimentologis (*sedimentological traps*)

- **Perangkap ketidak selarasan (*unconformity traps*)**

Kandungan minyak dan gas bumi dalam lapisan batuan reservoir yang miring, terperangkap oleh lapisan batuan penutup yang impermeabel yang diendapkan diatas bidang ketidakselarasan, sehingga terperangkap.

- **Perangkap diagenesis (*diagenetic traps*)**

Perangkap ini biasanya terjadi pada reservoir dari batuan karbonat, yang disebabkan oleh sementasi atau dan pelarutan dan *cementation*, yang berkembang kearah lateral.

- **Perangkap sedimentologis (*sedimentological traps*)**

*Perangkap jenis ini* terbentuk sejak awal proses sedimentasi, yang menghasilkan lapisan batuan *permeabel* yang terisolasi oleh lapisan batuan yang impermeabel. Misalnya endapan pasir point bar yang dikelilingi oleh floodplain clays dalam sistem sedimentasi sungai (fluvial). Atau batugamping (limestone) yang terisolasi oleh marine shales dalam sistem sedimentasi laguna (lagoon).

- **Perangkap campuran** adalah sistem perangkap yang dibentuk oleh gabungan antara sistem perangkap struktur dan sistem perangkap stratigrafi.

#### **10.2.4. Cadangan Minyak dan Gas Bumi Dunia**

Sifat fisik minyak dan gas bumi yang merupakan fluida cair dan gas, menjadikan bahan bakar ini lebih menarik, oleh karena lebih mudah dalam pemanfaatannya, baik dari ekstraksinya dari dalam perut bumi, pemindahan, penyimpanan maupun dalam penggunaannya. Maka teknologipun berkembang menyesuaikan diri, seperti halnya teknologi pembangkit tenaga listrik, otomotif dan berbagai teknologi industri lainnya, sehingga semakin tergantung kepada minyak bumi. Sebagai akibatnya, konsumsi minyak bumi duniapun meningkat dengan pesat, dan upaya ekstraksi minyak dan gas bumi dari dalam perut bumipun meningkat dengan cepat pula. Namun proses pembentukan minyak dan gas bumi secara alamiah berjalan sangat lambat, meliputi kurun waktu jutaan tahun. Secara geologis, sebagian besar, sekitar 70% dari cadangan minyak bumi dunia ditemukan pada lapisan batuan yang berumur *Mesozoicum*, 20% pada batuan-batuan *Kenozoicum* terutama *Tersier*, dan sekitar 10% sisanya pada batuan-batuan *Paleozoicum*. Itupun hanya sebagian yang kemudian terperangkap kedalam batuan reservoir untuk dapat di ekstrak.

Ketimpangan yang menyolok dalam kurun waktu pembentukan alamiahnya yang lama, dengan proses ekstraksinya yang sangat cepat ini, pada akhirnya berujung pada semakin menipisnya cadangan minyak dan gas bumi dunia, sementara lapangan-lapangan minyak bumi baru sudah sangat sulit ditemukan. Sehingga, tanpa adanya penemuan lapangan baru, cadangan minyak dan gas bumi dunia diperkirakan akan habis dalam waktu kurang dari 100 tahun kedepan. Sementara itu pada sisi lain, teknologi dan industri belum cukup siap untuk mengalihkan ketergantungannya dari bahan bakar minyak.

**Tabel 10.4. : Cadangan dan produksi minyak bumi dunia, dari 17 negara produsen utama minyak bumi (status tahun 2012)**

Summary of Proven Reserve Data as of 2012 <sup>(1)</sup>					
Country	Reserves <sup>(2)</sup> 10 <sup>9</sup> bbl	Reserves <sup>(2)</sup> 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	Production <sup>(2)</sup> 10 <sup>6</sup> bbl/d	Production <sup>(2)</sup> 10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> /d	Reserve/ Production Ratio <sup>1</sup> years
1  Venezuela	296.50	47.140	2.1	330	387
2  Saudi Arabia	265.40	42.195	8.9	1,410	81
3  Canada	175.00	27.823	2.7	430	178
4  Iran	151.20	24.039	4.1	650	101
5  Iraq	143.10	22.751	3.4	540	165
6  Kuwait	101.50	16.137	2.3	370	121
7  United Arab Emirates	97.80	15.549	2.4	380	156
8  Russia	80.00	12.719	10.0	1,590	22
9  Libya	47.00	7.472	1.7	270	76
10  Nigeria	37.00	5.883	2.5	400	41
11  Kazakhstan	30.00	4.770	1.5	240	55
12  Qatar	25.41	4.040	1.1	170	63
13  China	25.40	4.038	4.1	650	15
14  United States	25.00	3.975	7.0	1,110	10
15  Angola	13.50	2.146	1.9	300	19
16  Algeria	13.42	2.134	1.7	270	22
17  Brazil	13.20	2.099	2.1	330	17
<b>Total of top seventeen reserves</b>	<b>1,540.43</b>	<b>244.909</b>	<b>59.5</b>	<b>9,460</b>	<b>64</b>

**Note:**  
<sup>1</sup> Reserve to Production ratio (in years), calculated as reserves / annual production.  
 (From above)

It is estimated that between 100 and 135 billion tonnes (which equals between 133 and 180 billions m<sup>3</sup> of oil) of the world's oil reserves have been used between 1850 and the present.

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Oil\\_reserve](https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_reserve)

### 10.2.5. Serpih Minyak (Oil Shale)

Minyak bumi sebagai sumberdaya energi yang tak terbarukan (*non-renewable*) merupakan sumberdaya alam yang strategis, dimana tidak semua negara memilikinya, sehingga menjadi sumber energi andalan dunia saat ini. Konsumsi dunia dalam pemanfaatan minyak bumi ini semakin meningkat dari tahun ketahun. Sehingga terjadi ketidak seimbangan yang begitu besar, antara kurun waktu yang diperlukan untuk pembentukannya dengan waktu untuk menghabiskannya. Diperkirakan bahwa energi fosil tersebut akan habis dalam hitungan puluhan tahun sampai seratus tahun kedepan apabila konsumsinya terus menerus meningkat tanpa adanya penemuan lapangan minyak bumi baru yang cukup signifikan.

Kekhawatiran akan krisis minyak bumi kedepan, kemudian memunculkan ide untuk meng-ekstrak minyak bumi langsung dari batuan induknya (*source rock*), tanpa harus menunggu bintik-bintik minyak bumi didalamnya bermigrasi sampai terperangkap dan terakumulasi dalam batuan penyimpanan (*reservoir rock*), yang memerlukan waktu jutaan tahun. Maka kemudian berkembang suatu inovasi teknologi untuk meng-ekstrak minyak bumi, dan juga gas bumi, langsung dari batuan serpih yang merupakan batuan induknya, yang kemudian dikenal sebagai serpih minyak (*oil shale*).

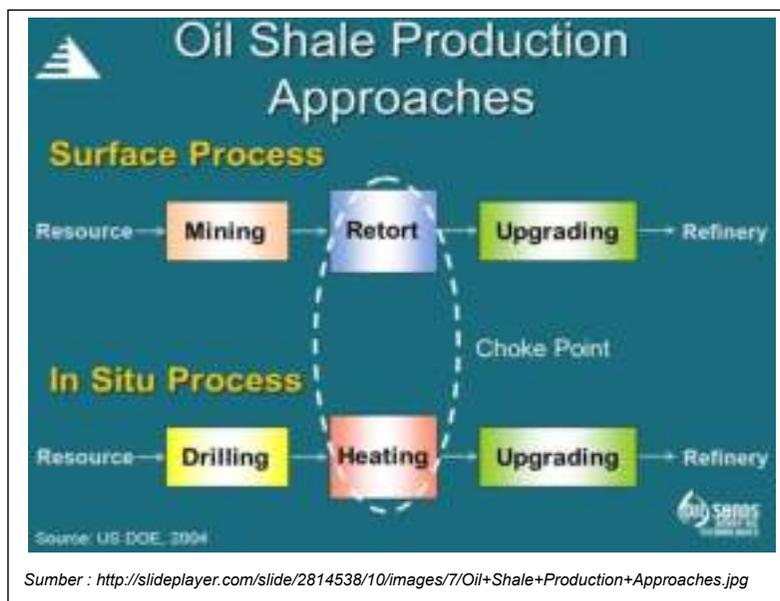
Serpih minyak (*oil shale*) pada dasarnya adalah kelompok batuan sedimen klastik halus yang mengandung material organik (*kerogen*) yang dapat menghasilkan sejumlah cairan serupa minyak ketika diekstraksi. Secara lithologi maupun kimia, sebenarnya tidak ada definisi yang jelas tentang serpih minyak. Serpih minyak dapat terdiri dari beragam kelompok batuan, seperti serpih yang kaya akan kandungan material organik, napal, dolomit, batulempung karbonan, ataupun batubara. Setiap batuan yang dapat menghasilkan minyak dalam jumlah komersial melalui *pirolisis* dapat dianggap sebagai serpih minyak (*shale oil*).

Produksi serpih minyak dalam skala industri pertama kali didirikan di Perancis pada tahun 1837. Berikutnya, pada tahun 1850, Skotlandia mengembangkannya dalam skala lebih besar. Namun *oil shale* yang dikenal oleh masyarakat modern, dikembangkan setidaknya sejak tahun 1930an di Amerika.

*Oil shale* pada dasarnya merupakan bahan bakar minyak yang bersifat *non-konvensional*, diproduksi dari fragmen batuan serpih (*shale*) melalui proses *pirolisis*, *hidrogenasi*, dan *disolusi thermal*, yang disebut sebagai proses *retorting*. Proses ini mengkonversikan material organik dalam batuan yang disebut sebagai *kerogen*, sehingga menjadi minyak dan gas sintetik. Minyak yang dihasilkan dari proses ini dapat secara langsung digunakan sebagai bahan bakar atau dapat di *upgrade* untuk memenuhi spesifikasi *refinery* dengan cara menambahkan *hydrogen* dan menghilangkan material-material pengotor (*impurities*) seperti *sulfur* dan *nitrogen*. Produk *refinery* ini kemudian diproses lebih lanjut seperti halnya minyak mentah konvensional. Namun proses ekstraksi *oil shale* ini lebih rumit dibandingkan dengan minyak bumi konvensional. Minyak yang terkandung dalam *oil shale* tidak dapat

dipompa secara langsung ke permukaan. Sehingga pada awalnya *oil shale* harus ditambang terlebih dahulu, untuk kemudian diolah melalui proses yang disebut *retorting*.

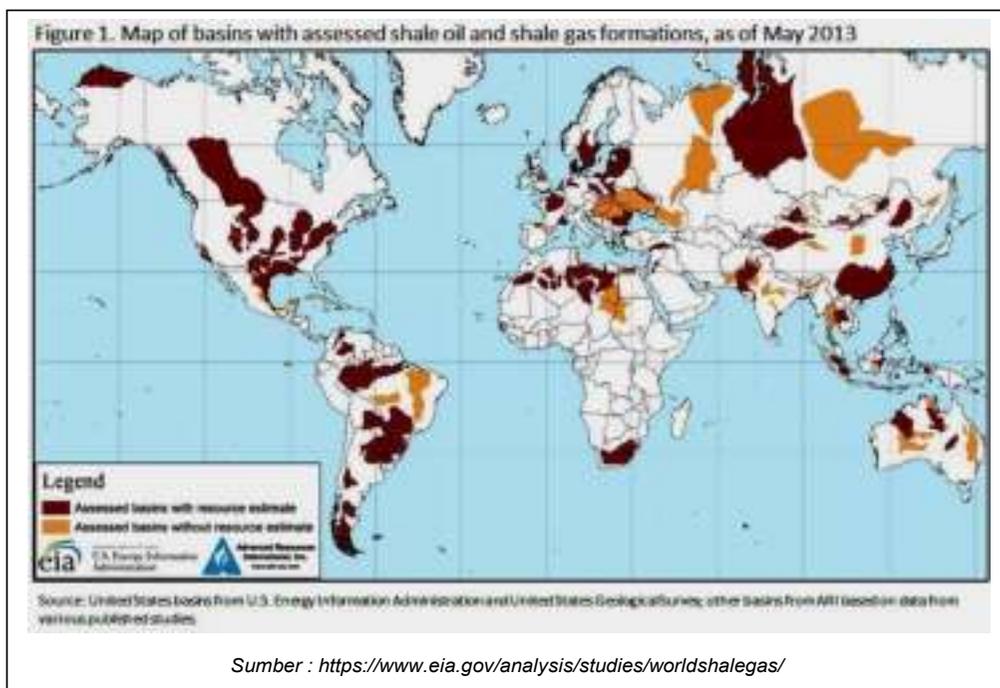
Metode lain yang kemudian dikembangkan untuk mengolah *oil shale* adalah metode yang disebut sebagai *in situ retorting*. Proses ini dilakukan dengan cara pemanasan *oil shale* ketika masih berada dibawah permukaan secara *in situ*. Kemudian, cairan minyak yang dihasilkan dipompa kepermukaan untuk diproses lebih lanjut.



**Gambar 10.10. : Diagram proses ekstraksi serpih minyak (*oil shale*) secara pemrosesan dipermukaan dan *in situ retorting***

Keberadaan *oil shale* secara geologis, terdapat umumnya pada cekungan yang sama dengan cekungan minyak bumi konvensional, walaupun tidak menutup kemungkinan dijumpai pada cekungan yang berbeda. Bagaimanapun, *oil shale* pada dasarnya adalah merupakan batuan induk (*source rock*) dari reservoir minyak dan gas bumi konvensional. Namun demikian, pada dasarnya *oil shale* juga merupakan sumber energi fosil yang bersifat tidak terbarukan (*non renewable*), sehingga pada akhirnya akan habis juga apabila terus menerus diekstraksi dan dikonsumsi.

Cebakan *oil shale* besar dan yang dikenal saat ini dijumpai pada *Formasi Green River* di Amerika Serikat. *Formasi Green River*, adalah suatu formasi batuan berumur *Eosen* yang membentang luas, meliputi wilayah dari Colorado hingga Utah. Formasi batuan ini ditengarai mempunyai cadangan *oil shale* hingga 3 triliun barrel, dimana separuh daripadanya diperkirakan akan dapat diekstraksikan melalui teknologi *retorting* ataupun metode lainnya.



Gambar 10.11. : Peta penyebaran cekungan *oil shale*, status assessment tahun 2013

# 11

## Energi Nuklir

Secara definisi, energi terbarukan (*renewable energi*) juga merupakan energi berkelanjutan, karena senantiasa tersedia di alam dalam waktu yang relatif sangat panjang, sehingga tidak dikhawatirkan akan kehabisan sumbernya.

Berdasarkan hal tersebut, keterbatasan cadangan Uranium-235 (U-235) di alam, sebagai sumber utama tenaga nuklir, menyebabkan secara konservatif tenaga nuklir bukanlah merupakan sumber energi yang terbarukan dan berkelanjutan. Namun demikian, perkembangan teknologi dengan ditemukannya teknologi Reaktor Pembiak Cepat (*FBR: Fast Breeder Reactor*), menjadikan tenaga nuklir dipertimbangkan sebagai sumber energi terbarukan, meskipun masih diperdebatkan. Oleh karena dengan teknologi ini bahan bakar nuklir dapat dikembangkan sehingga beranak pinak ratusan hingga ribuan kali lipat.

Kandungan U-235 di alam tak lebih dari 0,72%, selebihnya merupakan U-238 yang tidak menghasilkan energi nuklir. Akan tetapi pencampurannya dengan U-235 dalam reaktor pembiak, akan mengalami reaksi penangkapan 1 neutron dan berubah wujud menjadi U-239. Dalam waktu singkat U-239 meluruh sambil mengeluarkan partikel beta, dan kembali berubah wujud menjadi Np-239, yang juga kembali meluruh sambil memancarkan partikel beta menjadi Pu-239, yang meskipun tak tersedia di alam namun terbentuk sebagai hasil sampingan pembakaran U-235. Pu-239 ini memiliki kemampuan membelah diri dan melepaskan energi sebagaimana halnya U-235. Hal serupa juga dapat terjadi pada atom Thorium-233 (Th-233), yang dengan reaksi penangkapan 1 neutron berubah wujud menjadi U-233 yang memiliki kemampuan reaksi nuklir secara berantai. Energi nuklir sendiri merupakan energi yang dihasilkan oleh reaksi nuklir

dari unsur-unsur kimia radioaktif, baik melalui proses pembelahan inti atom (*fisi*) maupun penggabungan inti atom (*fusi*).

Unsur kimia radioaktif sendiri merupakan unsur kimia yang mempunyai inti atom tidak stabil dan mudah mengalami perubahan, bahkan dapat berubah menjadi unsur kimia lainnya. Yaitu dengan ciri-ciri antara lain, bernomor atom di atas 83 kecuali unsur *teknesium* dan *promesium*, mempunyai perbandingan *proton* dan *neutron* tidak sama dengan 1 atau 1,5. Sehingga unsur-unsur kimia tersebut akan cenderung berubah menjadi unsur-unsur kimia lain dengan inti yang lebih stabil, dengan cara membelah (*fisi*) atau menggabung (*fusi*), sambil memancarkan energi atau yang disebut sebagai radiasi.

Maka pemanfaatan energi nuklir, dalam hal ini adalah suatu upaya rekayasa reaksi nuklir baik *fisi* maupun *fusi*, sehingga menghasilkan energi dalam bentuk panas atau radiasi, yang dapat digunakan untuk berbagai kepentingan. Walaupun sejauh ini penggunaan energi nuklir untuk kepentingan manusia masih terbatas pada reaksi *fisi* nuklir dan peluruhan radioaktif, namun tidak menutup kemungkinan dikemudian hari reaksi *fusi* nuklir juga akan dapat dimanfaatkan.

Ada banyak unsur kimia radioaktif yang terdapat dikerak bumi, namun *Uranium* dan juga *Thorium* adalah unsur-unsur kimia radioaktif dengan jumlah yang signifikan, walaupun keberadaannya tersebar, dan jarang terkonsentrasi pada suatu cebakan.

*Uranium* adalah unsur kimia radioaktif paling berat yang ditemukan secara alami pada kerak bumi. Salah satu mineral pembawa *Uranium* adalah *Uraninit* ( $UO_2$ ), namun *Uraninit* bukan satu-satunya mineral yang mengandung unsur kimia radioaktif. Beberapa mineral lain seperti *monazit*, *zirkon*, *apatit* dan *xenotim* juga menunjukkan tingkat radiasi tertentu, yang mengindikasikan kandungan unsur kimia radioaktif didalamnya.

## 11.1. Sejarah Pemanfaatan Energi 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, dengan mengacu kepada rumus energi  $E = mc^2$ .

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*.

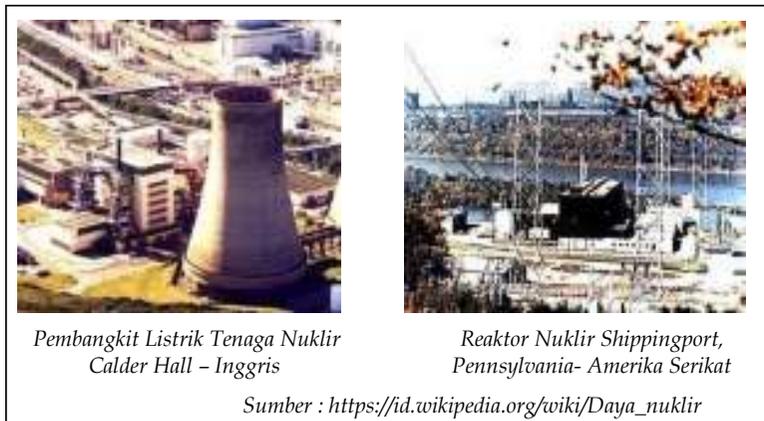
Pada tahun 1938, ahli kimia Jerman *Otto Hahn* dan *Fritz Strassmann*, bersama dengan fisikawan Austria *Lise Meitner* dan *Otto Robert Frisch*, melakukan eksperimen lebih lanjut, yang menghasilkan temuan bahwa *neutron* dapat membelah inti atom uranium menjadi 2 bagian, dimana proses ini kemudian dinamakan 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 Hiroshima dan Nagasaki pada akhir Perang Dunia II.

Pasca Perang Dunia II, energi nuklir untuk penggunaan diluar perang diusahakan secara meluas. Pengembangan energi nuklir terus berlanjut di Amerika Serikat, Kanada, Inggris, dan Uni Soviet pada akhir 1940-an dan awal 1950-an. Tenaga listrik pertama produksi reaktor nuklir dihasilkan pada bulan Desember 1950 distasiun percobaan *EBR-I* dekat *Arco- Idaho*. Organisasi pertama didunia yang mengembangkan pemanfaatan energi nuklir adalah Angkatan Laut Amerika Serikat, dimana energi nuklir dimanfaatkan untuk menggerakkan kapal selam dan kapal induk. Kapal selam pertama bertenaga nuklir, *USS Nautilus (SSN-571)*, diluncurkan pertama kali pada bulan Desember 1954.

Namun kenyataan bahwa reaktor nuklir dapat digunakan untuk memproduksi senjata nuklir (*plutonium*) memaksa berbagai negara

menerapkan aturan kontrol yang ketat. Seperti contoh di Amerika Serikat, penelitian nuklir berada dibawah pengawasan Komisi Energi Atom Amerika Serikat dan Laboratorium Nasional Argonne.



**Gambar 11.1. : Pembangkit Tenaga Listrik dan generator Nuklir pertama dunia Calder Hall - Inggris**

Pembangkit listrik tenaga nuklir komersial pertama didunia, *Calder Hall* di Inggris, mulai dioperasikan pada tahun 1956 dan menghasilkan tenaga listrik sebesar 50 MW, yang kemudian ditingkatkan menjadi 200 MW. Sedangkan generator nuklir komersial pertama yang dioperasikan adalah Reaktor *Shippingport*, Pennsylvania-Amerika Serikat, dibuka pada bulan Desember 1957.

Berikutnya, pemanfaatan energi nuklir untuk pembangkitan tenaga listrik tumbuh dengan sangat pesat, dari sebelumnya kurang dari 1 GW pada tahun 1960, meningkat menjadi 100 GW pada akhir 1970-an, dan 300 GW pada akhir 1980-an. Walaupun kemudian mengalami perlambatan pertumbuhan oleh berbagai sebab, sampai akhirnya hanya mencapai 366 GW pada tahun 2005.

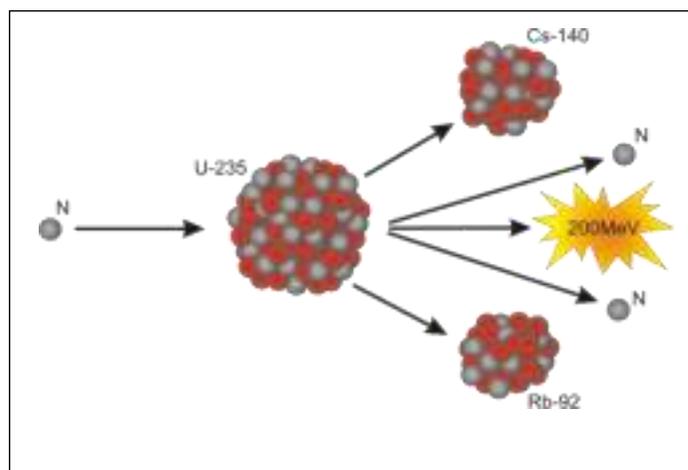
## **11.2. Reaksi Nuklir**

Berawal dari teori relativitas khusus yang diperkenalkan oleh *Albert Einstein (1905)*, yang kemudian berkembang menjadi teori ekuivalensi massa-energi. Yaitu ketika suatu materi bergerak dalam

kecepatan mendekati kecepatan cahaya, maka materi tersebut akan kehilangan massanya, berubah menjadi energi sebesar  $E = mc^2$ .

Di dalam 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 ekuivalensi massa-energi ( $E=mc^2$ , dimana  $m$ =massa bahan dalam kg,  $c$ = kecepatan cahaya sebesar  $3 \times 10^8$  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*).

- **Reaksi fisi nuklir** adalah suatu proses pembelahan inti atom, yang dilakukan dengan cara menembakkan *neutron* kedalam inti atom, sebagai inti atom tersebut terbelah menjadi inti-inti atom lain. Contohnya, inti atom *Uranium (U-235)* yang ditembak dengan 1 unit *neutron*, terbelah menjadi inti atom *Cesium (Cs-140)* dan *Rubidium (Rb-92)*, dan melepaskan energi sebesar 200 MeV yang dihasilkan dari berkurangnya total massa yang diakibatkan.



**Gambar 11.2. : Contoh reaksi nuklir berupa fisi atom Uranium, menghasilkan pelepasan energi sebesar 200 MeV**

Namun disamping menghasilkan energi, reaksi *fisi* tersebut juga melepaskan 2 unit *neutron* yang dapat memicu reaksi *fisi* berikutnya secara berantai. Apabila tidak dikendalikan, reaksi berantai tersebut akan menghasilkan akumulasi energi yang sangat besar, seperti yang terjadi pada ledakan bom nuklir.

- **Reaksi fusi nuklir** adalah proses penggabungan inti-inti atom, sehingga menghasilkan satu inti atom yang baru. Contohnya adalah penggabungan antara inti atom *Deuterium* (*D-2*) dengan *Tritium* (*T-3*), yang menghasilkan inti atom *Helium* (*He-4*), menghasilkan energy 3.2 MeV, dan melepaskan 1 unit *neutron*. Reaksi *fusi* nuklir secara alamiah ini terjadi pada matahari, terjadi secara berantai terus menerus, sehingga menjadikan matahari sebagai sumber energi bagi bumi yang selalu terbarukan (*renewable*).

Reaksi *fusi* nuklir berpotensi untuk dikembangkan dimasa depan, oleh karena diyakini lebih aman dan mempunyai sifat radioaktifitas lebih kecil daripada *fisi* nuklir. Namun demikian, secara teknis masih sulit untuk direalisasikan, walaupun sudah lama dilakukan percobaannya, yaitu sejak tahun 1950-an.

### 11.3. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

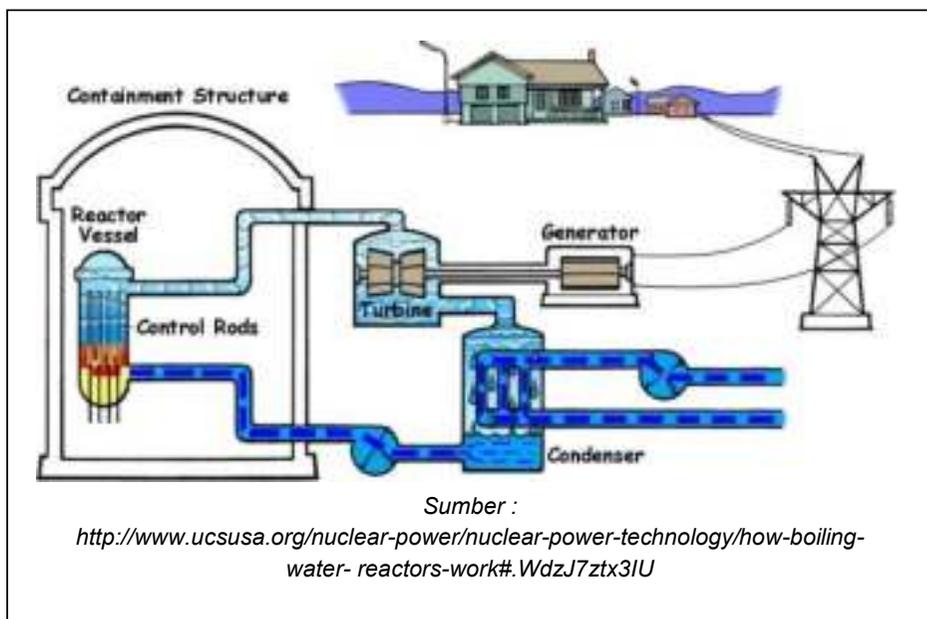
Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pada dasarnya sama dengan proses kerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yaitu didasarkan kepada teknologi mesin uap. Hanya saja sumber panas dari PLTN diperoleh dari reaksi nuklir, dimana reaktor daya yang merupakan bagian dari PLTN dalam hal ini dirancang untuk menghasilkan panas, sedangkan *neutron* yang terbebaskan dikendalikan, baik dibuang atau diserap dengan menggunakan batang kendali. Oleh karena produk reaktor daya berdaya thermal tinggi, maka seyogyanya PLTN juga dirancang untuk berkapasitas tinggi pula, dari orde ratusan hingga ribuan MW.

Reaktor daya yang banyak dioperasikan untuk PLTN saat ini adalah jenis Reaktor Air Ringan atau *LWR* (*Light Water Reactor*) yang awalnya dikembangkan di Amerika Serikat dan Rusia. Disebut Reaktor Air Ringan oleh karena menggunakan  $H_2O$  dengan tingkat kemurnian tinggi sebagai bahan moderator sekaligus pendingin reaktornya. Reaktor ini terdiri atas Reaktor Air Didih atau *BWR*

(*Boiling Water Reactor*), dan Reaktor Air Tekan atau PWR (*Pressurized Water Reactor*).

- **Reaktor Air Didih (BWR-Boiling Water Reactor)**, adalah jenis reaktor daya dimana panas hasil *fisi* digunakan secara langsung untuk menguapkan air, dan uap yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan turbin. Turbin uap dalam hal ini digerakkan oleh uap bertekanan tinggi (7.2 MPa) pada temperatur sekitar 290°C. Sebagian uap dapat diteruskan kembali pada turbin bertekanan lebih rendah. Dengan sistem ini dapat diperoleh efisiensi thermal sebesar 34 %, dimana efisiensi thermal ini menunjukkan presentase panas *fisi* yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik.

Setelah melalui turbin, uap akan didinginkan sehingga berubah kembali menjadi air, yang kemudian dialirkan ke teras reaktor untuk diuapkan kembali. Bahan bakar reaktor ini adalah U-235 dalam bentuk UO<sub>2</sub>, dengan tingkat pengayaan 3 - 4 %.

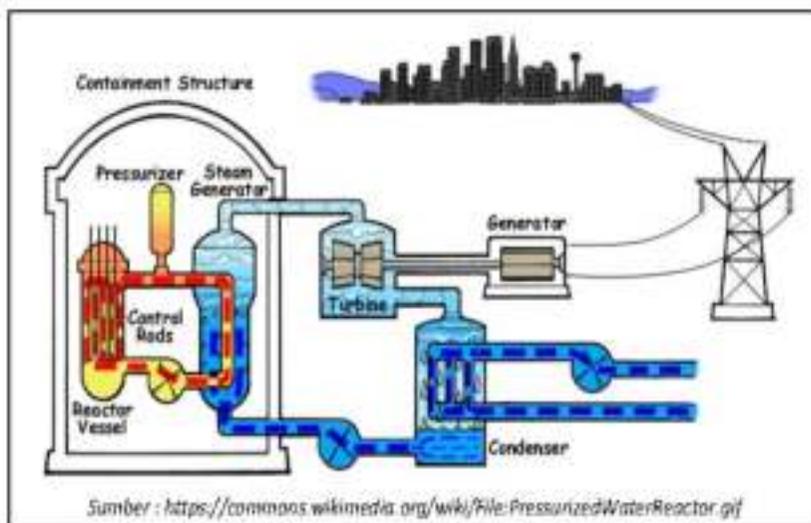


**Gambar 11.3. : Diagram Reaktor Air Didih (BWR-Boiling Water Reactor)**

- **Reaktor Air Tekan (PWR-Pressurized Water Reactor)**, seperti halnya reaktor air didih, juga menggunakan H<sub>2</sub>O sebagai moderator sekaligus pendingin (*coolant*). Hanya saja reaktor ini menggunakan dua macam *coolant*, yaitu *coolant* primer dan sekunder.

Panas yang dihasilkan dari reaksi *fisi* digunakan untuk memanaskan air *coolant* primer, yang tetap terkontrol pada tekanan 150 atm, sehingga tidak mendidih pada temperatur 300°C. Untuk itu maka reaktor ini dilengkapi dengan alat control tekanan (*pressurizer*). *Coolant* primer dialirkan kedalam sistem pembangkit uap, sehingga terjadi perpindahan panas (*heat exchange*) kepada *coolant* sekunder, yang merubahnya menjadi uap pada tekanan udara normal, pada temperatur 100°C. Uap dari *coolant* sekunder inilah yang kemudian menggerakkan turbin untuk menghasilkan tenaga listrik.

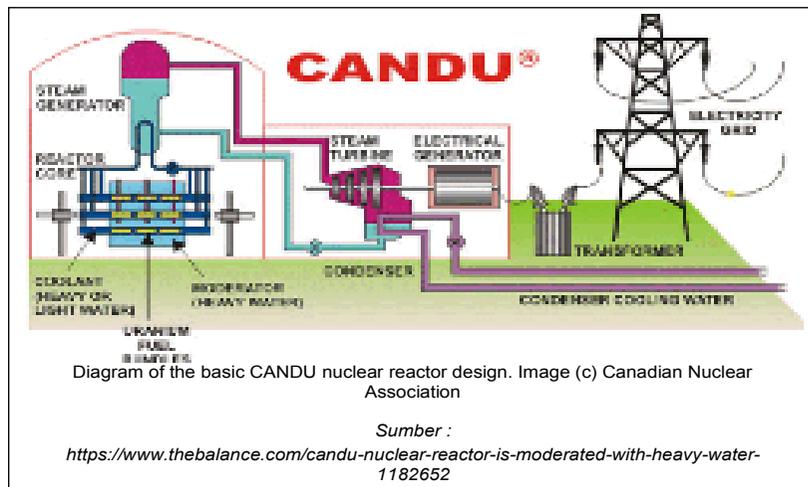
Dalam sistem air tekan ini, tidak terjadi kontak langsung antara *coolant* primer yang dapat bersifat radioaktif, dengan sistem turbin penggerak generator tenaga listriknya. Sehingga menjadi lebih aman terhadap radiasi yang diakibatkan oleh kebocoran radioaktif, yang terlarut dalam *coolant* primer, walaupun secara teknis menjadi lebih rumit dan lebih rendah tingkat efisiensinya.



**Gambar 11.4. : Diagram Reaktor Air Tekan (PWR-Pressurized Water Reactor)**

- **Reaktor Air Berat (HWR-Heavy Water Reactor)**, merupakan jenis reaktor yang menggunakan air berat ( $D_2O$ ) sebagai moderator dan *coolant*. Reaktor ini menggunakan bahan bakar *Uranium* alam sehingga perlu menggunakan air berat yang daya serapnya terhadap *neutron* sangat kecil.

PLTN dengan reaktor air berat yang dikenal diantaranya adalah CANDU (Canadian Deuterium Uranium) yang dikembangkan oleh Kanada. Seperti halnya reaktor Air tekan, reaktor CANDU menerapkan sistem *coolant* primer dan sekunder, pembangkit uap dan pengontrol tekanan.  $D_2O$  dalam reaktor CANDU hanya dimanfaatkan sebagai *coolant* primer, sedang sistem *coolant* sekundernya tetap menggunakan  $H_2O$ . Dalam pengoperasian reaktor CANDU, kemurnian  $D_2O$  dipertahankan pada tingkat 95-99,8 %. Namun air berat merupakan bahan yang harganya sangat mahal, walaupun dan secara fisik maupun kimiawi nyaris tidak dapat dibedakan dari  $H_2O$ .

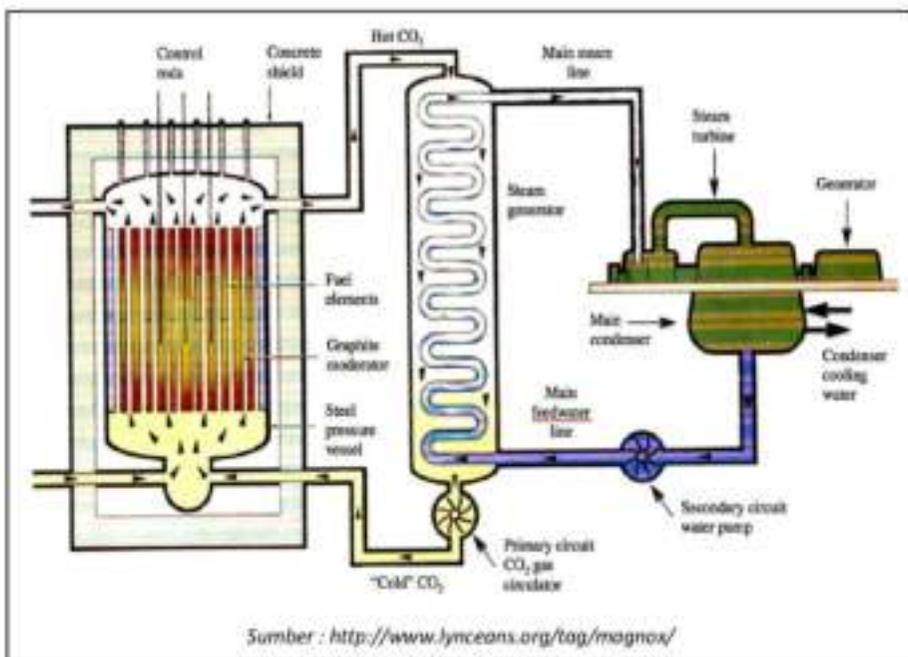


**Gambar 11.5. : Diagram Reaktor Air Berat (HWR-Heavy Water Reactor), CANDU (Canadian Deuterium Uranium)**

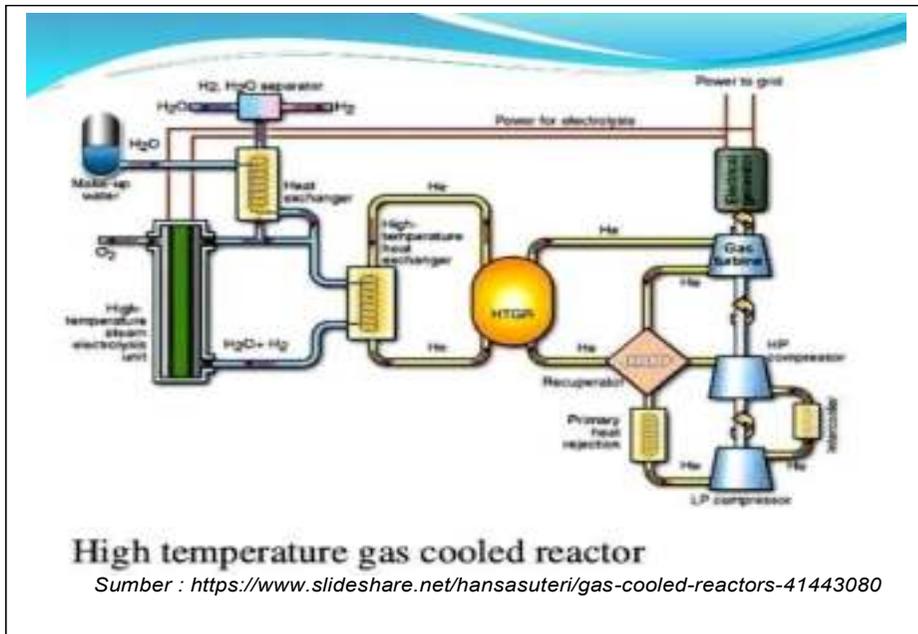
- **Reaktor Magnox (MR-Magnox Reactor)** adalah reaktor yang menggunakan bahan bakar dalam bentuk logam *Uranium* atau paduannya, yang dimasukkan kedalam selubung magnesium (Mg). Termasuk dalam reaktor jenis ini adalah reaktor penelitian yang dibangun oleh *Enrico Fermi* di Chicago-Amerika Serikat.

Reaktor Magnox menggunakan  $\text{CO}_2$  sebagai *coolant*, grafit sebagai moderator, dan *Uranium* alam sebagai bahan bakarnya. Panas hasil *fisi* diserap dengan mengalirkan gas  $\text{CO}_2$  melalui elemen bakar menuju ke sistem pembangkit uap untuk menghasilkan uap air. Uap air yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk memutar turbin.

Reaktor Magnox kemudian disempurnakan menjadi Reaktor Maju Berpendingin Gas (*AGR-Advanced Gas-cooled Reactor*). Reaktor ini juga menggunakan  $\text{CO}_2$  sebagai *coolant*, grafit sebagai moderator, namun bahan bakarnya berupa *Uranium* yang diperkaya dan dibungkus dalam selubung baja tahan karat, dengan maksud untuk meningkatkan efisiensi thermal dan fraksi bahan bakarnya.



Gambar 11.6. : Diagram Reaktor Magnox (MR-Magnox Reactor)



**Gambar 11.7. : Diagram Reaktor Temperatur Tinggi (HTR-High Temperature Reactor)**

- **Reaktor Temperatur Tinggi (HTR-High Temperature Reactor)**, adalah jenis reaktor yang menggunakan *coolant* gas Helium (He) dan moderator grafit. Reaktor ini mampu menghasilkan panas hingga 750°C, dengan tingkat efisiensi thermal sekitar 40 %.

Panas yang dihasilkan dari teras reaktor dipindahkan menggunakan *coolant* Helium (sistem primer) ke pembangkit uap. Dalam pembangkit uap ini, panas akan diserap oleh sistem uap air umpan (sistem sekunder), dan uap yang dihasilkan dialirkan untuk menggerakkan turbin. Dalam reaktor ini juga ada pemisahan antara sistem *coolant* primer yang dapat bersifat radioaktif dari sistem sekundernya, sehingga lebih aman dari radiasi akibat kebocoran sistem primernya.

## 11.4. Produksi Uranium dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Ada banyak unsur kimia yang mempunyai sifat radioaktif, namun demikian *Uranium* adalah unsur kimia radioaktif terberat yang terdapat secara alami di bumi. Unsur tersebut meliputi tiga jenis isotop *Uranium* alam, sesuai dengan yang diperoleh dari hasil penambangan, yaitu U-235, serta U-238, dan U-234 dengan kadar yang sangat kecil. Dari ketiga isotop *Uranium* tersebut, hanya U-235 yang digunakan sebagai bahan bakar fisi.

Tabel 11.1. : Daftar mineral yang mengandung Uranium.

Uranium Minerals <sup>[10]</sup>	
Primary uranium minerals	
Name	Chemical Formula
<a href="#">uraninite</a> or pitchblende	UO <sub>2</sub>
<a href="#">coffinite</a>	U <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·(OH) <sub>2</sub>
<a href="#">brannerite</a>	UTi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
<a href="#">davidsite</a>	(REE)(Y,U)(Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>2</sub> O <sub>21</sub>
<a href="#">thucholite</a>	Uranium-bearing pyrobitumen
Secondary uranium minerals	
Name	Chemical Formula
<a href="#">autunite</a>	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 8-12 H <sub>2</sub> O
<a href="#">carnotite</a>	K <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 1-3 H <sub>2</sub> O
<a href="#">gummite</a>	gum like amorphous mixture of various uranium minerals
<a href="#">salesite</a>	Mg(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 10 H <sub>2</sub> O
<a href="#">torbernite</a>	Cu(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 12 H <sub>2</sub> O
<a href="#">tyuyamunite</a>	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 5-8 H <sub>2</sub> O
<a href="#">uranocircite</a>	Ba(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 8-10 H <sub>2</sub> O
<a href="#">uranophane</a>	Ca(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (HSiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 5 H <sub>2</sub> O
<a href="#">zeunerite</a>	Cu(UO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> × 8-10 H <sub>2</sub> O

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium\\_ore](https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_ore)

*Uranium* beserta unsur kimia lain hasil peluruhannya mempunyai sifat radioaktif, yang mampu memancarkan radiasi ion, berupa sinar alfa, beta dan gamma, sehingga dapat ter- deteksi dengan alat ukur radiasi. *Uranium* bukan merupakan logam yang jarang, oleh karena keberadaannya di alam mencapai 50 kali lebih banyak dibandingkan air raksa (Hg) yang sudah lebih dahulu dikenal, walaupun tersebar tidak terkonsentrasi pada suatu cebakan. Proses alam dan geologi telah membentuknya, sehingga *Uranium* terdapat sebagai mineral dalam kerak bumi, dan juga dalam air laut.

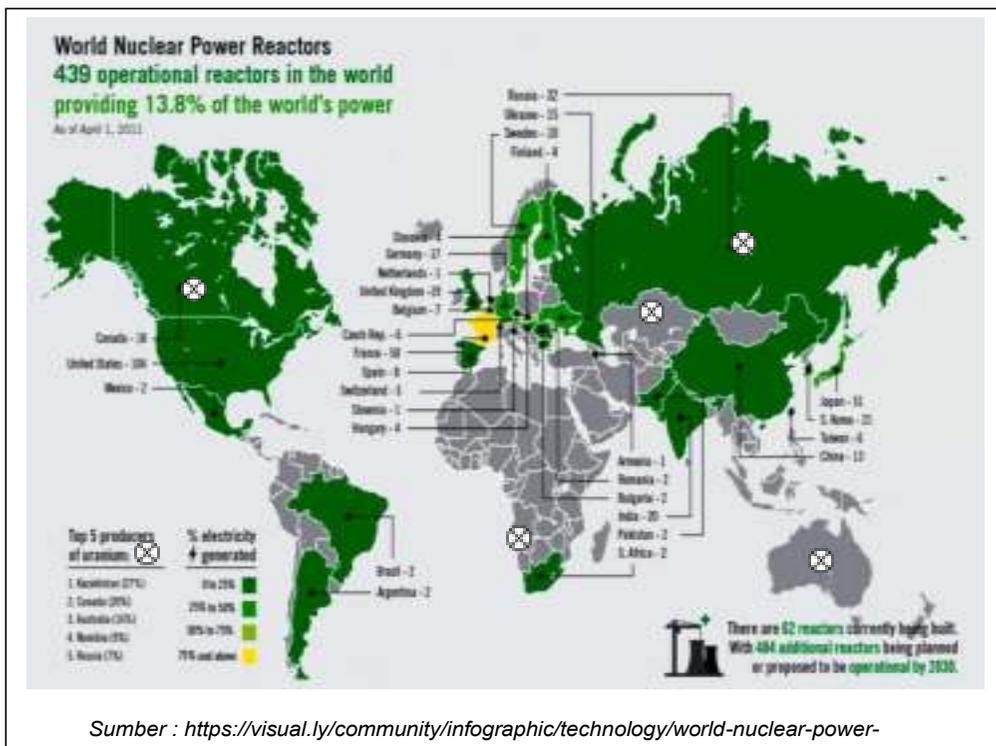
Mineral yang mengandung *Uranium* dapat terdapat dalam kerak bumi pada hampir semua jenis batuan, terutama batuan asam seperti Granit. Kadar *Uranium* dalam batuan Granit relatif tertinggi dibandingkan batuan beku lainnya, sehingga disebut sebagai pembawa *Uranium*. Batuan Granit dengan volume 1 km<sup>3</sup> misalnya, dapat membentuk cebakan *Uranium* sebanyak 2.500 ton. Namun pada umumnya *Uranium* dalam batuan ini terdistribusi secara merata dan dapat dijumpai dalam bentuk mineral *Uraninit* maupun oksida-oksida kompleks lainnya. *Uraninit* merupakan mineral dimana komponen utamanya lebih dari 80 % berupa *Uranium*. Namun *Uraninit* bukan merupakan satu-satunya mineral yang mempunyai sifat radioaktif, beberapa mineral lain seperti *monazit*, *zirkon*, *apatit* dan *xenotim*, juga dapat mempunyai sifat radioaktif pada tingkat radiasi tertentu, yang dihasilkan oleh unsur kimia lain hasil peluruhan dari *Uranium*.

Tabel 11.2. : Produksi Uranium Dunia dari tahun ke tahun, s/d tahun 2010

Country	2002	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Kazakhstan	3300	3719	4357	5279	6637	8521	14020	17003
Canada	10457	11597	11628	9862	9476	9000	10173	9783
Australia	7572	8982	9516	7593	8611	8430	7982	5900
Namibia	2036	3038	3147	3067	2879	4366	4626	4496
Niger	3143	3282	3093	3434	3153	3032	3243	4198
Russia	3150	3200	3431	3262	3413	3521	3564	3562
Uzbekistan	1598	2016	2300	2260	2320	2338	2429	2400
USA	779	878	1039	1672	1654	1430	1453	1660
Ukraine (est)	800	800	800	800	848	800	840	850
China (est)	750	750	750	750	712	769	750	827
Malawi							104	670
South Africa	758	755	674	534	539	655	563	583
India (est)	230	230	230	177	270	271	290	400
Czech Repub.	452	412	408	359	306	263	258	254
Brazil	310	300	110	190	299	330	345	148
Romania (est)	90	90	90	90	77	77	75	77
Pakistan (est)	45	45	45	45	45	45	50	45
France	0	7	7	5	4	5	8	7
Germany	104	77	94	65	41	0	0	0
total world	35 574	46 178	41 719	39 444	41 282	43 853	56 772	53 663
tonnes U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	41 944	47 382	49 199	46 516	48 683	51 716	59 875	63 285
percentage of world demand			65%	63%	64%	68%	78%	78%

Sumber : <http://adinfisika81.blogspot.co.id/2011/10/tambang-uranium-sekilas-tentang.html>

Produksi *Uranium* dunia pada tahun 2010 telah mencapai sekitar 53.663 ton, dengan Amerika Serikat sebagai produsen energi nuklir terbesar, dimana 19% kebutuhan tenaga listriknya dipasok dari pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Sedangkan Perancis adalah negara dimana presentase terbesar konsumsi tenaga listriknya dipasok dari PLTN, yaitu sekitar 80% pada tahun 2006. Sementara itu, diseluruh negara yang tergabung dalam Uni Eropa, energi nuklir memasok 30% dari kebutuhan akan tenaga listriknya, walaupun beberapa negara, seperti Austria, Estonia, Irlandia dan Italia, tidak mempunyai reaktor nuklir yang aktif.

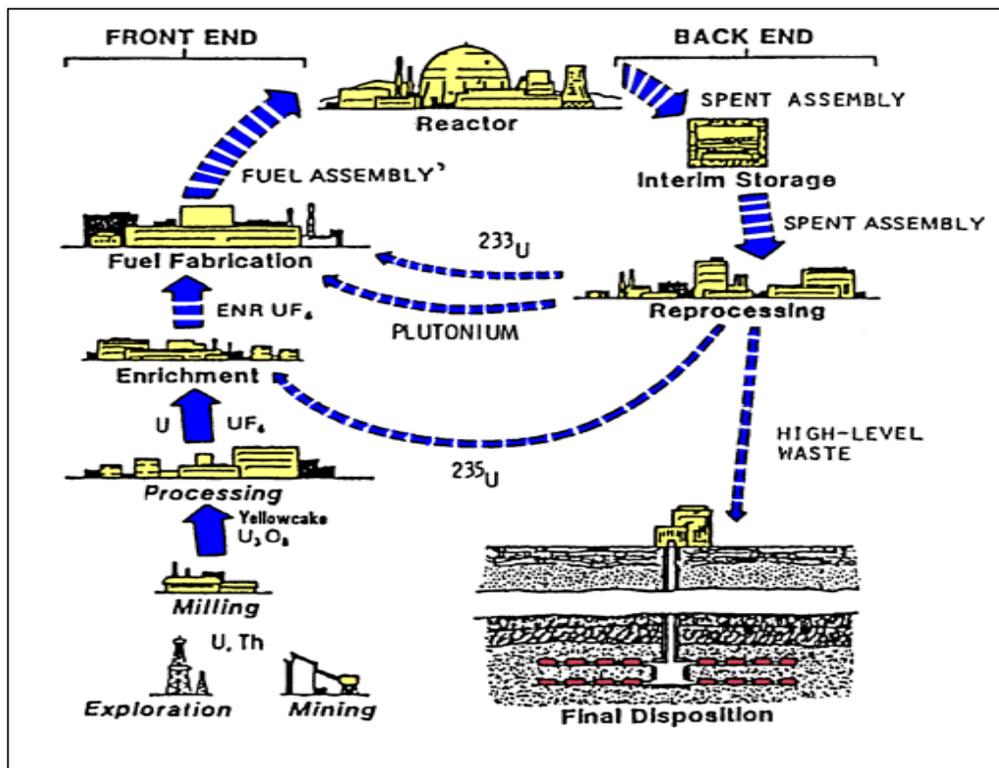


**Gambar 11.8. : Negara-negara utama dunia produsen Uranium, dan listrik tenaga nuklir**

## 11.5. Aspek Lingkungan Tenaga Nuklir

Energi nuklir dihasilkan reaksi nuklir dari unsur-unsur radioaktif, baik *Uranium* maupun unsur kimia turunannya yang masih mempunyai sifat radioaktif, yaitu dalam bentuk radiasi maupun pelepasan *neutron*. Proses nuklir tersebut bahkan berjalan terus secara alamiah, dalam bentuk peluruhan alamiah unsur-unsur radioaktif, sampai terbentuknya unsur non-radioaktif yang stabil.

Radiasi dan pelepasan *neutron* dalam suatu proses reaksi nuklir, bagaimanapun merupakan faktor yang dapat menimbulkan dampak, baik bagi kesehatan maupun lingkungan sekitarnya. Hal tersebut berpotensi terjadi pada seluruh tahapan eksploitasi nuklir, dari mulai penambangan sampai dengan pembuangan limbahnya.



Gambar 11.9. : Siklus bahan bakar nuklir, dari penambangan sampai dengan proses pembuangan limbahnya

Siklus bahan bakar nuklir berawal dari ketika *Uranium* ditambang, diperkayakan, diproduksi menjadi bahan bakar nuklir, kemudian dimanfaatkan sebagai bahan bakar, penyimpanan dan pemrosesan ulang limbah untuk dimanfaatkan kembali, sampai dengan pembuangan limbah akhirnya.

Reaktor nuklir dalam hal ini hanya merupakan bagian dari siklus bahan bakar nuklir. Sedangkan proses awalnya dimulai dari penambangan yang biasanya dilakukan secara terbuka (*open pit mining*). Kandungan *Uranium* yang ada kemudian diekstrak dari material galian tambang, dan diubah menjadi material yang lebih stabil dengan bentuk kompak yang disebut sebagai *yellowcake*. Ditempat pemrosesan, *yellowcake* diubah menjadi *Uranium Heksafuorida (UF<sub>6</sub>)*, dan kemudian diperkaya. *Uranium* yang diperkaya ini, umumnya mengandung > 0.7% U-235, kemudian dikemas menjadi bahan bakar nuklir sesuai dengan kebutuhan reaktor.

Limbah utama yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga nuklir adalah berupa sisa bahan bakar nuklir terpakai, yaitu sekitar 3 %. Bahan ini terutama terdiri dari *Uranium* yang tak terubah dan juga *aktinida transuranik*, seperti *plutonium* dan *curium*, yang walaupun secara volume sangat kecil namun masih mempunyai sifat radioaktif dalam jangka panjang.

Sisa bahan bakar nuklir terpakai pada dasarnya bersifat sangat radioaktif, namun tingkat radioaktivitasnya berkurang secara bertahap seiring waktu. Setelah 40 tahun daya radioaktifnya akan menurun 99.9%, namun 0,1% daya radioaktif yang tersisa masih berbahaya, dan baru akan meluruh secara total setelah 10 000 tahun.

Sisa limbah terpakai ini dapat dikurangi melalui proses ulang (*reprocessing*). Namun demikian daya radioaktifnya masih akan bertahan setidaknya 300 tahun apabila *aktinidanya* dihilangkan, dan dapat mencapai ribuan tahun apabila *aktinidanya* tidak dihilangkan.

Ada beberapa hal yang memberikan nilai lebih dari pemanfaatan energi nuklir, terutama untuk pembangkitan tenaga listrik, yaitu :

- Secara kuantitatif, bahan bakar radioaktif yang diperlukan sangat kecil, sehingga limbah padatnya juga sedikit. Sebagai perbandingan, 1 gram bahan bakar *Uranium* dapat menghasilkan energi listrik yang setara dengan pembakaran 3 ton bahan bakar batubara, atau 2000 liter minyak bumi.

- Biaya bahan bakar, terutama dalam hal transportasi dan penyimpanan bahan bakar maupun limbahnya dapat ditekan rendah, oleh karena jumlahnya yang sedikit.
- Bahan bakar radioaktif tidak menghasilkan emisi gas *karbon dioksida* ( $CO_2$ ), dan gas-gas berbahaya lainnya seperti *karbon monoksida* ( $CO$ ), *sulfur dioksida* ( $SO_2$ ), *aerosol*, *mercury*, *nitrogen oksida* ( $NO$ ,  $NO_2$ ), *partikulate* atau *asap fotokimia*.

Namun demikian ada pula kekurangan yang menjadi faktor kendala dalam pemanfaatan bahan bakar nuklir, diantaranya adalah :

- Material bahan bakar nuklir, sejak mulai dari proses penambangan, pengayaan, produksi, pemanfaatannya sebagai bahan bakar sampai dengan limbahnya, mempunyai sifat radioaktif yang berbahaya. Sehingga memerlukan pengelolaan khusus yang cermat dan berhati-hati.
- Industri nuklir juga menghasilkan limbah sampingan yang berbahaya dalam jumlah besar. Yaitu berupa limbah radioaktif tingkat rendah, berupa barang-barang biasa yang terkontaminasi, seperti pakaian, berbagai jenis peralatan, resin *water purifier*, dan juga material-material lain yang digunakan dalam pembangunan reaktor.
- Risiko kecelakaan dalam seluruh siklus bahan bakar nuklir, bahkan kecelakaan kecil sekalipun, dapat berdampak luas oleh karena menyangkut bahan-bahan berbahaya yang dapat menimbulkan radiasi.
- Seperti halnya pertambangan lainnya, proses penambangan *Uranium*, terutama penambangan terbuka (*open pit mining*), akan menggali sejumlah besar material bahan galian, sehingga akan merombak tata guna lahan serta bentang alam dalam skala besar.
- Limbah bahan bakar nuklir yang sudah tidak terpakai pun masih mempunyai sifat radioaktif yang bertahan sampai ribuan tahun. Sehingga rentan untuk mengalami kebocoran, atau disalahgunakan.

Tabel 11.3. : 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 <a href="#">Browns Ferry</a> - 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 <a href="#">Pembangkit listrik nuklir Pilgrim</a>	US \$1,001
26 April 1986	Chernobyl, dekat kota Pripyat, Ukraina	Ledakan yao dan kebocoran menyebabkan 4.057 kematian (lihat <a href="#">Bencana Chernobyl</a> ) 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 <a href="#">unit 2 dan 3 di Peach Bottom</a>	US \$400

Sumber : [https://id.wikipedia.org/wiki/Daya\\_nuklir](https://id.wikipedia.org/wiki/Daya_nuklir)



*Gambar 11.10. : Tambang terbuka (open pit mine) Uranium di Northern Territory-Australia*

## **11.6. Bahan Bakar Nuklir Thorium**

*Thorium* adalah unsur radioaktif lain selain *Uranium*, yang dapat dijadikan sebagai sumber energi, walaupun harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi U-232 dengan bantuan U-235. Namun berbeda dengan *Uranium*, *Thorium* tidak menghasilkan *Plutonium* dalam proses reaksi nuklirnya, sehingga setidaknya sampai saat ini, belum dapat dikembangkan menjadi senjata nuklir.

Pengembangan *Thorium* sebagai sumber energi pembangkit tenaga listrik sebenarnya sudah dimulai di Amerika Serikat pada tahun 1965, dimana *Thorium* dalam bentuk cair yang disebut sebagai *Molten Salt Reactor (MSR)* dimanfaatkan untuk hal tersebut. Namun, program tersebut dihentikan, oleh karena Amerika Serikat dalam hal ini lebih memilih pengembangan sumber energi *Uranium*, yang diharapkan dapat menghasilkan *Plutonium*, yang dibutuhkan untuk pengembangan persenjataan nuklirnya.

## 11.6.1 Tentang Unsur Radioaktif Thorium

Tabel 11.4. : Karakteristik unsur radioaktif Thorium

General Properties				
Symbol:	Th			
Atomic Number:	90			
Standard atomic weight (A <sub>r</sub> ):	232.03806(2)			
Electron configuration:	[Rn] 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>			
Atomic Properties				
Electronegativity (Pauling scale):	1.3			
Atomic Radius:	179.8 pm			
Ionic Radius:	94 pm (+4)			
1st Ionization energy:	587 kJ/mol			
Oxidation States:	2,3,4			
Physical Properties				
Standard State:	solid			
Bonding Type:	metallic			
Melting Point:	2023 K			
Boiling Point:	5093 K			
Density:	11.72 g/cm <sup>3</sup>			
Metal/Non-Metal:	actinoid			
Main isotopes of Thorium				
Isotope	% in Nature	Half Life	Decay type	Decay product
<sup>232</sup> Th	trace	18.68d		
<sup>230</sup> Th	trace	1.9118y		
<sup>231</sup> Th	trace	7340y	α	<sup>227</sup> Ra
<sup>232m</sup> Th	trace	75400y	α	<sup>228</sup> Ra
<sup>231m</sup> Th	trace	25.5h	β-	<sup>231</sup> Pa
<sup>232f</sup> Th	100%	1.405x10 <sup>10</sup> y	α	<sup>228</sup> Ra
<sup>234</sup> Th	trace	24.1d	β-	<sup>234</sup> Pa
Main ions of Thorium				
Name	Ion	Example minerals		
thorium(IV)	Th <sup>4+</sup>			
	[Th(O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ] <sup>2+</sup>			
Sumber : <a href="https://www.mindat.org/element/Thorium">https://www.mindat.org/element/Thorium</a>				

*Thorium* adalah unsur kimia, yang dalam tabel periodik berlambang Th dengan nomor atom 90. Logam *Thorium* berwarna keperakan dan bernoda hitam saat terkena udara membentuk dioksida. Unsur ini cukup keras, mudah dibentuk, dan memiliki titik lebur yang tinggi. *Thorium* adalah aktinida elektropositif yang didominasi oleh keadaan oksidasi +4, cukup reaktif dan dapat menyala di udara pada saat terbagi halus. *Thorium* adalah salah satu unsur radioaktif dengan jumlah relatif melimpah, sekitar tiga kali jumlah *Uranium* di bumi.

*Thorium* merupakan nuklida radioaktif yang pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Swedia *Jons Jakob Berzelius* (1829). Dengan waktu paruhnya yang sangat lama mencapai 14 milyar tahun, maka level radioaktivitas *Thorium* menjadi sangat rendah (waktu paruh adalah waktu yang dibutuhkan agar jumlah suatu zat berkurang menjadi setengah dari jumlah awalnya). Sehingga, *Thorium* alam pada dasarnya merupakan isotop tunggal (Th-232).

Walaupun diketahui mempunyai beberapa isotop, Th-232 adalah isotop yang paling stabil, meluruh sangat lambat melalui proses peluruhan *alfa*, memulai rantai peluruhan yang dinamai "*rangkaian thorium*" yang berakhir pada Pb-208. Di alam semesta, *Thorium* dan *Uranium* adalah dua unsur radioaktif yang masih dijumpai secara alami dalam jumlah besar sebagai elemen primordial. Namun pada kerak bumi, keberadaan *Thorium* diperkirakan tiga kali lebih besar daripada *Uranium*, terutama setelah dimurnikan dari pasir *Monazit*, yang merupakan produk sampingan dari proses ekstraksi logam-logam langka di bumi.

Logam *Thorium* memiliki modulus kompresi (ukuran ketahanan terhadap kompresi dari bahan) sebesar 54 GPa, dengan kekerasan setara dengan baja ringan, sehingga ketika dipanaskan dapat digulung menjadi lembaran dan ditarik menjadi kawat. Berat jenis *Thorium* mendekati setengah dari berat jenis *Uranium* dan *Plutonium*, namun lebih keras dari keduanya, dan bersifat superkonduktif pada suhu dibawah 1,4<sup>o</sup> K. Titik leleh *Thorium* adalah 1.750 °C, lebih tinggi dari *Aktinium* (1.227 °C) dan *Protaktinium* (1568 °C).

## 11.6.2. Sejarah Reaktor Nuklir Thorium

Teknologi reaktor nuklir berbahan bakar *Thorium* pertama kali digagas oleh *Eugene Wigner* (1944), dengan menggunakan *Thorium* sebagai bahan bakar *fertil* dan U-233 sebagai bahan bakar *fisil*. Penelitian tersebut dilanjutkan oleh *Alvin Weinberg* (1950) di *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*, yang merupakan cikal bakal dari perkembangan teknologi reaktor tipe *MSR (Molten Salt Reactor)* yang saat ini dikembangkan di berbagai negara.

Energi yang dihasilkan dari 6 kg *Thorium* dalam reaktor berbahan bakar cair mampu memproduksi tenaga listrik sebesar 66 GWh listrik, yang setara dengan 25.000 metrik ton batubara bitumin. Reaktor tipe *MSR* ini masih terus dikembangkan dan belum memasuki tahap komersial, walaupun prototypenya pernah dibangun pada tahun 1965 untuk tujuan eksperimen.

Selain *MSR*, reaktor generasi IV lain yang sedang dikembangkan dengan menggunakan *Thorium* sebagai bahan bakar adalah reaktor bertipe *HTGR (High Temperature Gas Reactor)*. *HTGR* yang dikembangkan sejak tahun 1950-an dan prototypenya pertamanya berhasil dioperasikan pada tahun 1963 hingga 1976 di Inggris untuk tujuan eksperimen, yang dikenal dengan nama reaktor *DRAGON*.

Saat ini, Tiongkok adalah salah satu negara yang mengembangkan teknologi *HTGR* dan telah memiliki prototypenya reaktor tersebut dalam skala demonstrasi untuk tujuan komersial yang dikenal dengan nama *HT10*, dioperasikan sejak tahun 2003. Walaupun masih menggunakan *Uranium*, para ilmuwan Tiongkok sudah mulai melakukan studi dan penelitian terhadap penggunaan *Thorium*.

Sesungguhnya penggunaan *Thorium* pada reaktor *HTGR* ini telah dilakukan sejak lama dalam skala eksperimen. Beberapa reaktor diantaranya adalah *AVR* di Jerman yang beroperasi pada tahun 1967-1988, *DRAGON* di Inggris pada tahun 1966-1973, dan *Peach Bottom* di Amerika Serikat pada tahun 1966-1972. Eksperimen pada reaktor-reaktor tersebut menggunakan bahan bakar campuran antara *Thorium* dan U-235. Namun, program tersebut kurang berhasil oleh karena biaya operasionalnya yang masih sangat tinggi.

Penelitian penggunaan *Thorium* juga dilakukan reaktor nuklir generasi III+ yang merupakan pengembangan dari reaktor

konvensional tipe *LWR* (*Light Water Reactor*) yang ada saat ini. Beberapa reaktor diantaranya adalah tipe *BWR*, *PWR* dan *CANDU*.

Pada tahun 1979 hingga 1988 Brazil dan Jerman bekerja sama dalam penggunaan *Thorium* pada reaktor *PWR* milik Brazil, yaitu ANGRA 1, yang berhasil didemonstrasikan pada tahun 1986 hingga tahun 1988, dengan bahan bakar metal oksida (*Th-U*)O<sub>2</sub>. Selain ANGRA 1, reaktor nuklir bertipe *LWR* lain yang pernah menggunakan *Thorium* diantaranya adalah *Shippingport* (*PWR*), *Indian Point 1* (*PWR*), *BORAX-IV* (*BWR*) di Amerika Serikat, serta *Lingen* (*BWR*) di Jerman dengan waktu uji coba sekitar lima tahun.

Hal yang menarik adalah perkembangan penelitian penggunaan *Thorium* pada reaktor tipe *CANDU*. Penelitian ini menjadikan *CANDU* ber-evolusi menjadi dua jenis reaktor nuklir yang baru, yaitu *AHWR* (*Advance Heavy Water Reactor*) yang dikembangkan oleh India, dan *AFCR* (*Advance Fuel CANDU Reactor*) yang dikembangkan oleh China. *AHWR* merupakan pengembangan dari reaktor *PHWR* yang telah lama beroperasi di India, sedangkan *AFCR* adalah pengembangan dari reaktor *Qinshan-CANDU* yang telah lama beroperasi di China.

### **11.6.3. Radioaktivitas Thorium (Th-232)**

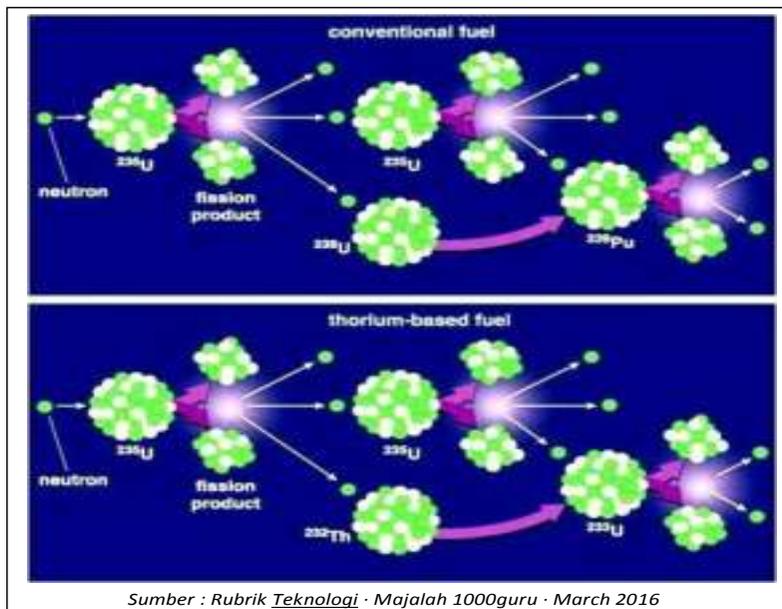
*Thorium* sejauh ini diketahui memiliki 28 isotop yang waktu paruhnya diketahui, dengan nomor massa 210 hingga 237, yang semuanya bersifat radioaktif, namun Isotop yang paling stabil adalah Th-232, dengan waktu paruh 14,05 miliar tahun dan kelimpahan hampir 100%. Isotop *Thorium* kecuali Th-232, bersifat kurang stabil. Beberapa diantaranya adalah Th-230 dengan waktu paruh 75.380 tahun, Th-229 dengan waktu paruh 7,917 tahun, Th-228 dengan waktu paruh 1,92 tahun, dan sisanya mempunyai waktu paruh kurang dari 30 hari.

Th-232 yang terdapat di alam dengan masa paruh  $1.4 \times 10^{10}$  tahun, merupakan pemancar partikel alfa. Th-232 melewati tahap peluruhan enam partikel alfa dan empat partikel beta sebelum menjadi isotop stabil, yaitu Pb-208. Satu isotop, Th-229, diketahui mempunyai memiliki isomer nuklir (keadaan metastabil) dengan energi eksitasi yang sangat rendah, terukur sebesar  $7,6 \pm 0,5$  eV.

*Thorium-232*, sebagaimana halnya *Uranium-238*, adalah termasuk material radioaktif *fertile*. Yaitu material yang tak dapat meluruh sendiri dengan energi rendah *neutron*. Dimana material *fertile* adalah inti subur (*fertile nuclei*), yang dapat dibiakkan menjadi inti yang terbelahkan (*fissile nuclei*) dengan cara menembaknya dengan *neutron*.



*Neutron* akan ditangkap oleh Th-232 dan membentuk inti majemuk Th-233, sambil melepaskan sebagian energi dalam bentuk *foton* sinar gamma. Th-233 yang tidak stabil akan meluruh dengan melepas zarah  $\beta$  (beta), demikian pula dengan inti anak (*daughter nucleus*)- nya yang juga bersifat radioaktif, sehingga terbentuk isotop *Uranium-233*. Isotop *Uranium-233* inilah yang kemudian terbelahkan (*fissile*) dan melepaskan energi. Demikian seterusnya, fisi *Uranium-233* akan memberikan *neutron* untuk memulai pembiakan berikutnya. Maka bagaimanapun, pemanfaatan Th-232 sebagai sumber energi harus diawali dengan pembiakan dengan penembakan *neutron*, yang biasanya dilakukan melalui proses fisi U-235.



Sumber : Rubrik *Teknologi* · Majalah 1000guru · March 2016

**Gambar 11.11. : Perbandingan proses fisi U-235 dengan pembiakan Th-232**

#### 11.6.4. Mineralogi Thorium

*Thorium* umumnya ditemukan dalam jumlah sedikit pada beberapa jenis mineral batuan dan tanah. Namun di kerak bumi, secara keseluruhan jumlah *Thorium* sekitar 3 kali lebih banyak daripada *Uranium*, dimana tanah pada umumnya mengandung *Thorium* sekitar 12 ppm. *Thorium* terdapat sebagai elemen dalam beberapa jenis mineral, seperti *Thorite* ( $ThO_2$ ), *Thorianite* ( $ThO_2+UO_2$ ), *Monasit* ( $Ce,La,Th$ ) $PO_4$ , *Zirkon* ( $ZrSiO_2$ ), *Xenotim* ( $YPO_4$ ) dan *Alanit* ( $Ca,Ce,La,Y$ ) $_2$ ( $Al,Fe$ ) $_3$ ( $SiO_4$ ) $_3$ ( $OH$ ). *Thorianite* adalah mineral dengan kandungan *Thorium* terbesar, yaitu sekitar 12% *Thorium oksida* ( $ThO_2$ ). Sedangkan *Monasit* mengandung *Thorium* sekitar 2,5%, *Alanit* 0,1-2% dan *Zirkon* 0,4%.

Namun pada keseluruhan kerak bumi, sebagian besar *Thorium* terdapat sebagai elemen pada mineral *Monasit*, dimana terdapat 3 jenis *Monasit* dengan komposisi yang tidak selalu mengandung elemen radioaktif (*Thorium* atau *Uranium*). Yaitu *Monasit-Ce* dengan formula ( $Ce,La,Nd,Th,Y$ ) $PO_4$ , *Monasit-La* dengan formula ( $La,Ce,Nd$ ) $PO_4$ , dan *Monasit-Nd* dengan formula ( $Nd,La,Ce$ ) $PO_4$ .

Di Pulau Bangka dan Belitung, *Thorium* dan *Uranium* terutama terdapat di dalam mineral *Monasit* yang merupakan mineral ikutan dalam penambangan Timah (*Cassiterite*) baik penambangan primer pada batuan Granit maupun penambangan sekunder pada endapan Aluvial. Cebakan *Monasit* primer terbentuk melalui fase-fase *pneumatolitik*, kontak *pneumatolitik-hidrotermal* tinggi dan fase *hipotermal-mesotermal*. Fase yang terakhir merupakan fase terpenting dalam penambangan oleh karena mempunyai arti ekonomis, dimana larutan yang mengandung Timah dan *Monasit* dengan komponen utama silika ( $SiO_2$ ) mengisi perangkap bukaan-bukaan pada jalur sesar, kekar, dan berbagai zona lemah lainnya. Sedangkan cebakan *Monasit* sekunder terbentuk dari cebakan *Monasit* primer yang mengalami pelapukan, erosi, transportasi, dan terendapkan sebagai endapan Koluvial, Kipas Aluvial, Aluvial sungai, maupun Aluvial lepas pantai.

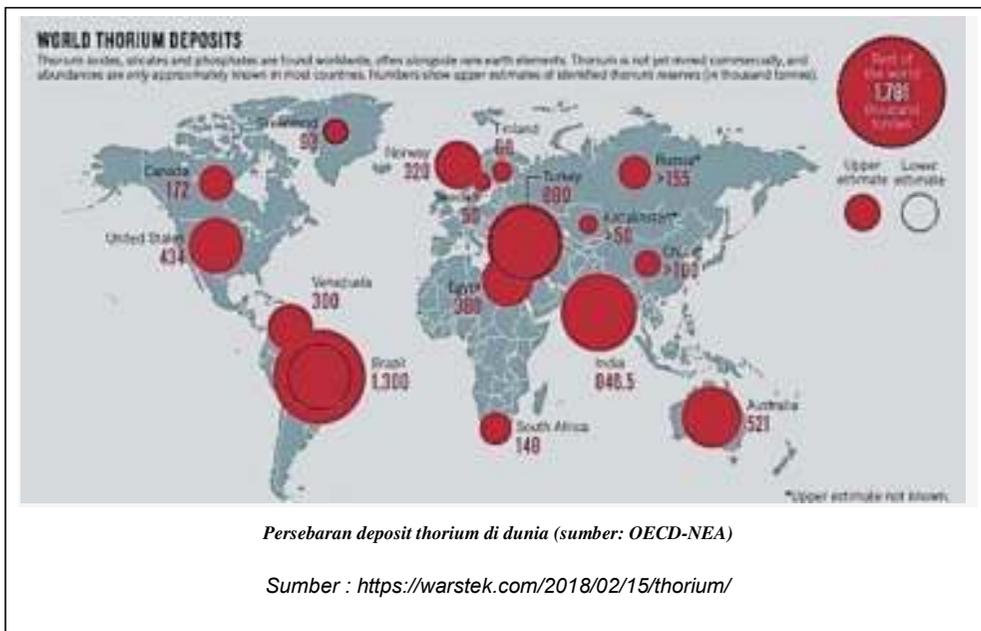
Endapan *Monasit* primer umumnya terdapat pada batuan Granit tipe S, pada daerah kontak dengan batuan yang lebih tua. Sedangkan endapan *Monasit* sekunder terdapat pada sungai- sungai tua, dan

dasar-dasar lembah, baik yang terdapat didaratan maupun dilaut. Granit tipe S dalam hal ini merupakan batuan sumber, sedangkan endapan Aluvial merupakan tempat ter-akumulasinya *Monasit* sekunder.

Secara umum jalur potensial *Monasit* di Indonesia mengikuti jalur endapan Timah terkaya di dunia, yang memanjang dari daratan Cina bagian selatan, Myanmar, Thailand, Malaysia, dan berlanjut ke Indonesia. Di Indonesia sendiri mengarah dari utara ke selatan, yaitu dari pulau Karimun, pulau Kundur, pulau Singkep, pulau Bangka, Bangkinang (Sumatera bagian tengah), serta dijumpai pula jejak-jejaknya di kepulauan Anambas, Natuna, dan Karimata.

Mengacu pada peta geologi regional yang tersedia, keberadaan batuan asam berupa batuan Granit Klabat, Batupasir Formasi Ranggam dan endapan Aluvium, wilayah Bangka Barat diperkirakan merupakan wilayah potensial bagi penambangan *Monasit*.

Sejauh ini, *Monasit* yang merupakan bijih penting bagi *Thorium*, dan juga *Lantanum* dan *Serium*, ditemukan dalam jumlah besar, dalam bentuk *endapan plaser* di India, Madagaskar dan Afrika Selatan.



**Gambar 11.12 : Sebaran endapan Thorium Dunia**

### 11.6.5. Cadangan Uranium - Thorium Indonesia

Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) memperkirakan terdapat sekitar 70 ribu ton cadangan *Uranium* dan 117 ribu ton cadangan *Thorium* yang tersebar di sejumlah lokasi di Indonesia, yang dapat bermanfaat sebagai energi alternatif di masa depan.

Potensi cadangan *Uranium* di Indonesia terdiri dari beberapa kategori, yaitu kategori terukur, terreka, teridentifikasi dan kategori hipotesis. Sedangkan potensi cadangan *Thorium* masih dalam kategori hipotesis, belum sampai terukur.

Sebagian besar cadangan *Uranium* berada di Kalimantan Barat, sebagian lainnya terdapat di Papua, Bangka Belitung dan Sulawesi Barat, sedangkan sebagian besar cadangan *Thorium* terdapat di Bangka-Belitung, dan sebagian lainnya di Kalimantan Barat.



Potensi cadangan uranium dan thorium Indonesia (sumber: twitter BATAN)

Gambar 11.13. : Sebaran potensi cadangan Uranium dan Thorium di Indonesia



# Catatan Penutup

Terbentuknya biosfer sebagai habitat hidup berbagai makhluk hidup termasuk manusia, tentu tak terlepas dari proses geologi panjang pembentukan kerak bumi, yang merupakan bagian dari proses pembentukan bumi itu sendiri secara keseluruhan. Dan juga tak terlepas dari pasokan energi, baik dari dalam bumi maupun radiasi sinar matahari dari luar, dimana keduanya merupakan pemasok energi primer dalam jumlah besar tak terbatas, dan terus menerus.

Pasokan kedua sumber energi primer tersebut, merupakan sumber energi utama yang memungkinkan bertumbuh kembangnya kehidupan dalam lingkup biosfer. Sebagian dari energi-energi tersebut menciptakan lingkungan yang memadai untuk menunjang kehidupan, sebagian lainnya terkonversi menjadi berbagai materi kehidupan dalam suatu siklus biosfer.

Sesuai dengan hukum kekekalan energi bahwa *“Jumlah energi dari sebuah sistem tertutup tidak berubah dan akan tetap sama, dimana energi tak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, namun dapat berubah dari satu bentuk energi ke bentuk energi lain (James Prescott Joule)”*, maka sejatinya biosfer tak akan pernah kekurangan energi untuk menunjang kehidupan didalamnya. Energi dalam lingkup biosfer secara alamiah akan terus terbarukan (*renewable*) dan beredar dalam suatu siklus yang mengikuti siklus biosfer, dan secara alamiah akan tersimpan sebagai cadangan manakala berlebihan tak termanfaatkan.

Manusia, dengan kelebihan kemampuan daya nalarinya, mampu untuk memanfaatkan berbagai cadangan energi yang tersimpan tak termanfaatkan tersebut, untuk memenuhi keinginannya untuk kehidupan yang lebih baik. Rekayasa teknologi, termasuk dalam pemanfaatan sumber-sumber energi, terutama pasca Revolusi Industri, terbukti telah meningkatkan populasi manusia penduduk bumi secara signifikan, sebagai hasil dari peningkatan kualitas hidup.

Namun rekayasa teknologi berangsur-angsur mulai mengurangi kemampuan daya dukung biosfer, termasuk dalam memasok sumber energi yang dibutuhkan. Potensi sumber energi biomassa semakin

berkurang dengan semakin berkurangnya luas hutan, sementara itu cadangan sumber energi fosilpun semakin menipis. Maka pembaharuan berbagai sumber daya energipun menjadi kebutuhan berikutnya. Eksplorasi sumber-sumber energi baru semakin ditingkatkan, sementara itu pemanfaatan sumber-sumber energi terbarukan semakin di optimalkan pula.

Bagaimanapun, berbagai upaya telah dan akan terus dilakukan untuk meng optimalkan berbagai potensi sumberdaya energi, baik yang terbarukan (*renewable*) maupun tak terbarukan (*non-renewable*) untuk mengatasi kebutuhan energi masa depan. Untuk ini dapat dicatat upaya-upaya optimalisasi sumber-sumber energi sebagai berikut :

- Pengembangan Teknologi Panas Bumi (*EGC-Enhanced Geothermal System*), dengan sistem Siklus Biner (*Binary Cycle*) dan *Teknologi Fracking*.
- Ekstraksi minyak dan gas bumi langsung dari batuan induknya, yang dikenal sebagai Serpih Minyak (*Oil Shale*).
- Gasifikasi dan pemanfaatan batubara ber kualitas rendah (*low rank coal*) seperti lignit dan gambut.
- Upaya optimalisasi potensi energi biomassa dengan metoda konversi, baik secara *thermokimia* maupun *biokimia*.
- Pengembangan teknologi Reaktor Pembiak Cepat (*FBR : Fast Breeder Reactor*) untuk meng optimalkan pemanfaatan energi nuklir.
- Upaya eksploitasi *Thorium* sebagai alternatif sumber energi nuklir.
- Dan sebagainya.

Disamping itu, banyak lagi upaya-upaya non-teknis yang dilakukan secara kolektif, untuk menanggulangi berbagai masalah terkait dengan energi dan lingkungan masa depan. Diantaranya adalah upaya-upaya konservasi hutan dan penghutanan kembali (*reforestation*), kesepakatan-kesepakatan *Protokol Kyoto*, *Protokol Montreal*, *Non Proliferasi Nuklir (NPT - Nuclear Non-Proliferation Treaty)*, dan sebagainya, yang kesemuanya mengandung tujuan, baik secara langsung maupun tak langsung, untuk menjamin ketersediaan energi masa depan secara aman dan terkendali.

# Daftar Pustaka

- Agus Praditya Tampubolon, Julius Christian Adiatma (2019) : "Potensi, Kapasitas Terpasang, dan Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan 2019". Laporan Status Energi Bersih Indonesia. Penyunting: Fabby Tumiwa, Jannata Giwangkara Institute for Essential Services Reform (IESR) Jakarta, Indonesia | www.iesr.or.id | iesr@iesr.or.id Publikasi: Maret 2019.*
- Andersen, S. O., K. M. Sarma and K. N. Taddonio. (2007) : "Technology Transfer for the Ozone Layer". Lessons for Climate Change. Earthscan Press, London.*
- Andika Putra Dwijayanto (2018) : "Thorium, Bahan Bakar Nuklir Masa Depan". <https://warstek.com/2018/02/15/thorium/>*
- Arif Rahmanulloh (2019) : "Indonesia Biofuels Annual Report 2019", Jakarta:USDA Foreign Agricultural Service, 2019.*
- Arindam Sinha Roy, Akoijam Chingkheihunba, Kannan Pakshirajan (2016) : "An Overview of Production, Properties, and Uses of Biodiesel from Vegetable Oil". Green Fuels Technology pp 83-105, Part of the Green Energy and Technology book series (GREEN). First Online: 11 August 2016.*
- Badan Standarisasi Nasional (1998) : "Klasifikasi dan Cadangan Batubara". SNI 5014 : 1998.*
- 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).*
- Bertani, Ruggero; Thain, Ian (July 2002) : "Geothermal Power Generating Plant CO2 Emission Survey" (PDF), IGA News (International Geothermal Association) (49):1-3.*
- Bolton, James (1977) : "Solar Power and Fuels". Academic Press, Inc. ISBN 0-12-112350-2.*

- Cass R. Sunstein (8/2008) : "Of Montreal and Kyoto : A Tale of Two Protocols". 38 ELR 10566.
- Christian, Sondakh, Rian Hambali, Erliza Indrasti, Nastiti Sisw (2019) : "Esterifikasi Bio-oil dengan Menggunakan Etanol dan Katalis Asam". <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/97651>
- Cohen, B. L., (1982) : "Concept of Nuclear Physics", Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi (1982).
- Daniels, Farrington (1964) : " Direct Use of the Sun's Energy". Ballantine Books. ISBN 0- 345-25938-6.
- Darwin (2019) : "Prinsip dan Aplikasi Teknologi Anaerobik Diges, Teknik Pengolahan Limbah dan Produksi Energi Terbarukan". Publisher: Deepublish, CV Budi Utama. ISBN: 978-623-209-009-5.
- Dewan Energi Nasional Republik Indonesia (2014) : "Outlook Energi Indonesia 2014"  
[prokum.esdm.go.id/Publikasi/Outlook%20Energi%202014.pdf](http://prokum.esdm.go.id/Publikasi/Outlook%20Energi%202014.pdf)
- E Hambali (2007) : "Teknologi Bioenergi". PT Agromedia Pustaka, Jakarta.
- E Hambali dan M Rivai (2017) : "The Potential of Palm Oil Waste Biomass in Indonesia in 2020 and 2030", *IOP Conference Series: Earth Environmental Science* 65, 2017, h. 5.
- Elizabeth May, Zoe Caron (November 2008) : "Global Warming For Dummies". ISBN: 978- 0-470-84098-6, Paperback, 384 pages.
- Encyclopaedia Britannica : "Fertile material | nuclear physics |".  
Britannica.com
- Fery Andika Cahyo (2014) : "Terminologi Batubara Dakam Dunia Industri: Thermal Coal, Coking Coal & Antrasit". GEOPANGAEA RESEARCH GROUP INDONESIA | November 13, 2014.
- 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
- Geomagz (19/03/2013) : "Serpih Minyak Menuju Sumber Energi Global".

<http://geomagz.geologi.esdm.go.id/serpilh-minyak-menuju-sumber-energi-global/>

*Halacy, Daniel (1973) : "The Coming Age of Solar Energy". Harper and Row. ISBN 0-380- 00233-7.*

*Hamilton, Michael S. (2005) : " Mining Environmental Policy: Comparing Indonesia and the USA ". (Burlington, VT: Ashgate, 2005). (ISBN 0-7546-4493-6).*

*History of the IAEA, dalam <https://www.iaea.org/about/overview/history>, diakses pada tanggal 29 Maret 2017.*

*Hunt, V. Daniel (1979) : "Energy Dictionary". Van Nostrand Reinhold Company. ISBN 0- 442-27395-9.*

*Imam Subekti (2018) : "Geologi Lingkungan". Mobius, Yogyakarta-5583. ISBN : 978-602- 51321-5-5.*

*Imam Subekti (2019) : "Mengenal Siklus Alam". Mobius, Yogyakarta-5583. ISBN : 978-602- 5874-11-6.*

*Imam Subekti (2020) : "Geologi & Sumberdaya Energi". Graha Ilmu, Yogyakarta-5583. ISBN : 978-623-228-517-0.*

*John Baylis & Steven Smith (1997) : "The Globalization of World Politics". New York : Oxford University Press Inc, 1997, pp. 351.*

*Jon Van Gerpen (2005) : "Biodiesel processing and production", Elsevier: FuelProcessing Technology 86, 2005, h. 1097 - 1107.*

*Karna Wijaya (2011) : "Biofuel dari Biomassa". Penelitian, Renewable Energy, Uncategorized. PUSAT STUDI ENERGI UNIVERSITAS GADJAH MADA. <https://pse.ugm.ac.id/biofuel-dari-biomassa/>*

*Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (2020) : "Menengok Ladang Panel Surya Terbesar di Indonesia". SIARAN PERS Tanggal: 14 Maret 2020. NO: 122.Pers/04/SJI/2020.*

*Kementerian ESDM : " Handbook of Energy & Economic". Statistics of Indonesia 2014.*

*Kompas.com : "PLTN Thorium".*

*<https://ekonomi.kompas.com/read/2011/03/16/03111198/PLTN.Thorium?page=all>*

- Mary H. Dickson and Mario Fanelli (2004) : "World Geothermal Provinces "What Is Geothermal Energy?". Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, 2004. International Geothermal Association <http://www.geothermal-energy.org>.*
- 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.*
- Mohamed El Baradei : " Atoms for Peace: A Vision for the Future". <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull45-2/45205081720.pdf>, diakses pada tanggal 2 April 2017.*
- Muchidin (2006) : " Pengendalian Mutu Dalam Industri Batubara". ITB Bandung.*
- Ngadenin, Heri Syaeful, Kurnia Setiawan Widana, Muhammad Nurdin (2014) : "POTENSI THORIUM DAN URANIUM DI KABUPATEN BANGKA BARAT POTENCY OF THORIUM AND URANIUM IN WEST BANGKA REGION". Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir - BATAN, Eksplorium ISSN 0854 - 1418 Volume 35 No. 2, November 2014: 69 -84 69.*
- Patrick Donnelly-Shores (2013) : "New study of carbon-efficacy of wind energy in the UK has implications across the pond". Berkeley Energy & Resources Collaborative.*
- Ranti Hidayawanti & Imam Subekti (2019) : "Ilmu Lingkungan (Proses Lingkungan, AMDAL & Sistem Manajemen Lingkungan)". Graha Ilmu, Yogyakarta-5583. ISBN : 978-623-228- 273-5.*
- Ridwan Arif (2019) : "Sekilas tentang Bioenergi: Proses Produksi Biodiesel di Indonesia". Koaksi Indonesia | 6 Desember 2019. <https://coaction.id/sekilas-tentang-bioenergi-proses-produksi-biodiesel-di-indonesia/>*
- Sigit Setiawan (2012) : "Energi Panas Bumi Dalam Kerangka MP3EI". Jurnal Ekonomi dan Pembangunan, LIPI.*
- 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](https://en.wikibooks.org/wiki/The_Geology_of_Indonesia/Sumatra).

SolarGIS © 2014 GeoModel Solar (2015) : "File : SolarGIS-Solar-map-Indonesia-en.png". From Wikimedia Commons, the free media repository. Description : English: Solar Radiation Map: Global Horizontal Irradiation Map of Indonesia, SolarGIS. English version. Date : 14 May 2015.

Speight, J.G., (2005) : " Handbook of Coal Analysis". John Wiley & Sons. Inc. Publication, 238 pp.

Speight, J.G. ( 2013) : "The Chemistry and Technology of Coal, 3<sup>th</sup> edition". CRC Press., 807 pp.

STAGING-POINT.COM (2018) : "Manfaat Teknologi Baru Reaktor Thorium". Jurnal IPTEK (STAGING-POINT.COM, 2018/04/16).

Stoll, W. (2005). : "*Thorium and Thorium Compounds*". *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH. doi:10.1002/14356007.a27\_001. ISBN 978-3-527- 31097-5.

Sukamdani (2005) : "Batubara dan Pemanfaatannya". Gajah Mada University Press. Yogyakarta.

Susan Solomon; Anne R. Douglass; Paul A. Newman (July 2014) : "The Antarctic ozone hole : An update". *Physics today*. Retrieved 18 September 2014.

Tiwari, G. N.; Ghosal, M. K. (2005) : "Renewable Energy Resources: Basic Principles and Applications". Alpha Science Int'l Ltd., 2005 ISBN 1-84265-125-0

UNEP (10 September 2014) : "Ozone Layer on Track to Recovery : Success Story Should Encourage Action on Climate". UNEP Retrieved 18 September 2014.

UU No. 7 Tahun 2004, Tentang Sumber Daya Air.

Ven, Te Chow (1969) : "Handbook of applied hydrology : a compendium of water- resources technology ". New York McGraw-Hill Book 1964.

"*Volcanoes of Indonesia*".[www.volcanodiscovery.com/indonesia.html](http://www.volcanodiscovery.com/indonesia.html).

*World Wind Energy Association (December 2014) : "World Wind Resource Assessment Report", WWEA Technical Paper Series (TP0114). By the WWEA Technical Committee.*

*Y. Zhou,<sup>\*a</sup> M. Hejazi,<sup>a</sup> S. Smith,<sup>a</sup> J. Edmonds,<sup>a</sup> H. Li,<sup>b</sup> L. Clarke,<sup>a</sup> K. Calvin<sup>a</sup> and A. Thomson<sup>a</sup> (2015) : "A comprehensive view of global potential for hydro-generated electricity ". the journal: Energy & Environmental Science. Issue 9, 2015.*

*Berbagai Artikel Terseleksi Dari Berbagai Website, Tanpa Identifikasi. (Various Selected Articles, From Non-Identified Website).*

# Mengenal

## SUMBER-SUMBER ENERGI TERBARUKAN (RENEWABLE ENERGY)

Energi terbarukan atau yang populer dengan sebutan renewable energi, merupakan istilah yang semakin menjadi topik pembicaraan akhir-akhir ini. Secara kebetulan hal tersebut tumbuh bersamaan dengan isu-isu lain, seperti isu pemanasan global dan perubahan iklim, isu semakin menipisnya cadangan energi konvensional, dan berbagai isu lainnya.

Tak dapat dipungkiri, isu-isu tersebut memang saling terkait satu dengan lainnya, baik secara langsung maupun tak langsung. Sehingga menimbulkan kerancuan pengertian diantara satu dengan lainnya.

Buku ini disusun untuk dapat memberikan pengertian tentang energi terbarukan (renewable energy). Yaitu mulai dari sumber-sumber utamanya, proses konversi, serta siklus keterbaruannya. Dan juga diuraikan secara ringkas dalam buku ini, sumber-sumber energi fosil yang dinilai tak terbarukan (non-renewable) sebagai bahan perbandingan.

Peran perkembangan teknologi pemanfaatan sumber-sumber energi, juga disinggung dalam buku ini. Oleh karena bagaimanapun teknologi beserta perkembangannya, tentu sangat berperan dalam menentukan status keterbaruan suatu sumber energi.

Maka buku ini disusun, diantaranya untuk menghapus atau setidaknya mengurangi kerancuan pengertian tentang energi terbarukan dengan pengertian tentang berbagai isu terkait lainnya, yang secara kebetulan tumbuh berkembang bersamaan dengan isu tentang energi terbarukan.



Penerbit :

**INSTITUT TEKNOLOGI**

Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat,  
Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat 11750  
Telp : (021) 544 0342, 544 0344

ISBN 978-623-86763-3-8 (PDF)



9 786239 676339

ISBN 978-623-86763-2-2



9 786239 676322