



Penerbit :  
INSTITUT TEKNOLOGI PLN



# *Mengenal* **Energi Panas Bumi (Geothermal)**

IMAM SUBEKTI • RANTI HIDAYAWANTI

---

**Mengenal**  
**ENERGI PANAS BUMI**  
**(GEO THERMAL)**

---

---

# Mengenal **ENERGI PANAS BUMI (GEO THERMAL)**

---

Imam Subekti  
Ranti Hidayawanti



Penerbit :

**INSTITUT TEKNOLOGI PLN**

**2021**

## **Mengenal ENERGI PANAS BUMI (GEOTHERMAL)**

Oleh : **Imam Subekti  
Ranti Hidayawanti**

Penerbit : **INSTITUT TEKNOLOGI PLN**  
Alamat : Menara PLN, Jl. Endang Luar Barat,  
Duri Kosambi, Cengkareng,  
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 12 dan 13 Undang-Undang Republik Indonesia No. 18 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, Maret 2027

Editor : **Ranti Hidayawanti**

Design & Layout : **Akhmad Fauzi**

ISBN : **978-623-91414-6-2**

# Synopsis

Panas bumi yang dikenal dengan istilah *geothermal*, adalah bentuk energi panas yang terkandung dalam perut bumi. Energi panas ini telah terbentuk sejak awal terbentuknya bumi, yaitu berada pada inti bumi yang padat beserta lapisan tebal *mantel* cair yang menyelimutinya. Sumber panas yang sedemikian besar tersebut tertanam jauh di bawah permukaan bumi, terselimuti oleh kerak bumi yang tebal sehingga tak termanfaatkan.

Namun pergerakan lempeng-lempeng kerak bumi menyebabkan terpecahnya kerak bumi, membuka celah yang memungkinkan cairan panas bumi menerobos mendekati bahkan muncul ke permukaan bumi. Maka pada daerah-daerah seperti inilah potensi energi panas bumi berpeluang untuk dimanfaatkan.

Pemanfaatan energi panas bumi telah dikenal manusia sejak jaman dahulu, namun pemanfaatan modern untuk pembangkitan tenaga listrik baru dikenal pada awal abad 20, walaupun sejauh ini masih bertumpu pada teknologi mesin uap. Kendala tersebut menyebabkan energi panas bumi harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi tenaga uap, sebelum dikonversikan menjadi tenaga listrik. Sehingga memerlukan berbagai komponen alam penunjang lainnya, seperti reservoir air tanah beserta pasokan air permukaannya, adanya lapisan penutup dan sebagainya.

Indonesia sebagai wilayah yang berada pada zona Cincin Api (*Ring of Fire*), dengan jumlah gunung api aktif terbesar di dunia, merupakan wilayah yang memiliki potensi sumberdaya energi panas bumi yang sangat besar. Potensi ini merupakan prospek berharga, mengingat sifatnya yang terbarukan (*renewable*) dan akrab lingkungan, sehingga sudah selayaknya untuk dikembangkan.



# Kata Pengantar

Energi adalah unsur yang diperlukan oleh manusia untuk dapat melanjutkan kehidupannya. Untuk itu, bumi sebagai habitat hidupnya telah menyediakan berbagai sumberdaya energi untuk mendukungnya, yang salah satunya adalah energi panas bumi, atau geothermal.

Sumberdaya energi panas bumi tersedia dalam jumlah yang nyaris tak terbatas di dalam perut bumi, dan bersifat selalu terbarukan (*renewable*). Namun demikian, letaknya yang jauh di bawah permukaan bumi, dan hanya pada tempat-tempat tertentu saja mendekati permukaan bumi, bahkan terkadang muncul kepermukaan bumi, menyebabkan hambatan untuk memanfaatkan potensi yang terkandung di dalamnya.

Dalam buku ini, diuraikan potensi sumberdaya energi panas bumi yang tersedia, beserta dengan proses-proses geologi terkait, yang menyebabkan potensi sumberdaya tersebut muncul atau mendekati permukaan bumi, sehingga membuka peluang untuk dimanfaatkan.

Pengetahuan tentang energi panas bumi diuraikan dalam buku ini, mulai dari proses pembentukannya, potensi, sejarah serta perkembangan teknologi pemanfaatannya, termasuk pula metoda eksplorasi dan eksploitasinya.

Indonesia sebagai negara pemilik gunung api dengan jumlah terbesar di dunia, memiliki potensi sumber energi panas bumi yang besar pula. Potensi besar tersebut, membuka peluang untuk dikembangkan sebagai sumber energi masa depan yang akan selalu terbarukan (*renewable*). Maka seyogyanya pengetahuan tentang energi panas bumi ini dikenali, dan diperkenalkan kepada berbagai pihak, sehingga akan dapat disikapi dan dimanfaatkan dengan sebaik baiknya.

**Penulis**



# Daftar Isi

Kata Pengantar .....	i
Daftar Isi .....	iii
Daftar Tabel .....	vi
Daftar Gambar .....	vii
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PROSES PEMBENTUKAN BUMI &amp; ALAM SEMESTA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Teori “Big Bang” .....	4
2.2. Pembentukan Tata Surya .....	8
2.3. Proses Pembentukan Bumi .....	10
2.4. Struktur Interior dan Eksterior Bumi .....	11
2.5. Kerak Bumi .....	16
2.6. Sumber Panas Bumi .....	17
<b>3. GEOLOGI PANAS BUMI .....</b>	<b>21</b>
3.1. Teori Tektonik Lempeng .....	22
3.1.1. Pergerakan Divergen .....	25
3.1.2. Pergerakan Konvergen .....	28
3.1.3. Batas Transform .....	31
3.2. Ke Gunung Apian dan Panas Bumi .....	32
3.3. Cincin Api Pasifik (Pacific Ring of Fire) .....	36
<b>4. EKSPLOKASI PANAS BUMI .....</b>	<b>41</b>
4.1. Sistem Panas Bumi .....	41
4.2. Penyelidikan Geologi Permukaan .....	45
4.3. Geokimia Panas Bumi .....	49
4.4. Penyelidikan Geologi Bawah Permukaan .....	56
4.4.1. Pemboran Eksplorasi .....	56
4.4.2. Pendugaan Seismik .....	58
4.4.3. Pendugaan Geolistrik .....	65
4.4.4. Metode Magnetotelurik .....	69
4.4.5. Metoda Gravitasi .....	73

4.4.6. Metoda Geomagnetik .....	77
4.5. Perhitungan Potensi Panas Bumi .....	84
<b>5. TEKNOLOGI PANAS BUMI .....</b>	<b>89</b>
5.1. Teknologi Panas Bumi Konvensional .....	92
5.1.1. Pembangkit Uap Kering (dry steam) .....	93
5.1.2. Pembangkit Flash Steam .....	94
5.2. Pengembangan Teknologi Panas Bumi (Enhanced Geothermal System) .....	96
5.2.1. Pembangkit Siklus Biner (binary cycle) .....	97
5.2.2. Teknologi Fracking .....	98
5.3. Proses Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi ..	103
5.4. Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi .....	104
5.5. Keekonomian Panas Bumi .....	110
<b>6. PROSPEK DAN POTENSI PANAS BUMI .....</b>	<b>113</b>
6.1. Sejarah Pemanfaatan Panas Bumi .....	113
6.2. Prospek Pengembangan Energi Panas Bumi .....	115
6.3. Prospek Tenaga Panas Bumi Indonesia .....	118
<b>7. ASPEK LINGKUNGAN LAPANGAN PANAS BUMI .</b>	<b>121</b>
7.1. Dampak Konfigurasi Geologi Panas Bumi .....	121
7.2. Emisi Gas .....	123
7.3. Zat Terlarut .....	129
7.4. Aspek Tata Ruang .....	130
7.5. Aspek Teknologi .....	131
<b>8. LAPANGAN PANAS BUMI DI BERBAGAI NEGARA .....</b>	<b>133</b>
8.1. Lapangan Panas Bumi Lardellerro - Monte Amiata (Italia -Tuscany) .....	134
8.1.1. Lapangan Panas Bumi Lardellerro .....	137
8.1.2. Lapangan Panas Bumi Monte Amiata .....	140
8.2. Lapangan Panas Bumi di New Zealand .....	143
8.3. Lapangan Panas Bumi di Rusia - Kamchatka .....	147
8.4. Lapangan Panas Bumi di Islandia (Iceland) .....	151

8.5.	Lapangan Panas Bumi di Amerika Serikat - The Geysers .....	156
8.5.1.	Geo - Tektonik Setting .....	157
8.5.2.	Pengembangan Lapangan Panas Bumi The Geysers .....	160
8.5.3.	Upaya Peningkatan Sistem Panas Bumi (EGS- Enhanced Geothermal System) .....	164
<b>9.</b>	<b>LAPANGAN PANAS BUMI DI INDONESIA .....</b>	<b>167</b>
9.1.	Posisi dan Konfigurasi Tektonik Kepulauan Indonesia .....	169
9.2.	Sejarah Perkembangan Pemanfaatan Energi Panas Bumi Indonesia .....	173
9.3.	Lapangan Panas Bumi Kamojang - Jawa Barat .....	176
9.4.	Lapangan Panas Bumi Dieng - Jawa Tengah .....	181
9.5.	Lapangan Panas Bumi Lahendong - Sulawesi Utara .....	187
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>192</b>

# Daftar Tabel

Tabel 4.1. : Mineral-mineral hydrothermal dengan temperatur pembentukannya .....	48
Tabel 4.2. : Kisaran resistivitas berbagai jenis batuan (M.H.Looke - 2000) .....	48
Tabel 5.1. : Berbagai jenis fluida kerja pembangkit panas bumi siklus biner .....	98
Tabel 5.2. : Perbandingan biaya produksi tenaga listrik berbagai jenis pembangkit .....	111
Tabel 6.1. : Kapasitas pembangkit listrik tenaga panas bumi dunia .....	117
Tabel 7.1. : Indikasi dan bahaya kadar gas hydrogen sulfida	126
Tabel 7.2. : Daftar fluida kerja panas bumi siklus biner .....	132
Tabel 8.1. : Daftar pembangkit listrik tenaga panas bumi di New Zealand .....	146
Tabel 8.2. : Daftar pembangkit listrik tenaga panas bumi di Kamchatka - Rusia .....	149
Tabel 8.3. : Daftar PLTP lapangan panas bumi The Geysers - California .....	163
Tabel 9.1. : Daftar PLTP di Indonesia tahun 2018 .....	168

# Daftar Gambar

Gambar 2.1.	: Sistem tata surya Matahari .....	3
Gambar 2.2.	: Diagram Big Bang & Big Crunch .....	6
Gambar 2.3.	: Diagram siklus Big Bang .....	7
Gambar 2.4.	: Diagram hipotesis nebula, pembentukan sistem tata surya matahari .....	9
Gambar 2.5.	: Diagram Struktur Interior Bumi .....	12
Gambar 2.6.	: Struktur atmosfer bumi .....	16
Gambar 2.7.	: Diagram siklus arus konveksi dalam mantel dan pergerakan lithosfer .....	17
Gambar 2.8.	: Diagram proses reaksi fusi nuklir pada Matahari .....	18
Gambar 2.9.	: Grafik gradien panas bumi untuk kerak samudera dan kerak benua .....	20
Gambar 3.1.	: Inti bumi sebagai sumber panas bumi .....	21
Gambar 3.2.	: Diagram siklus tektonik .....	23
Gambar 3.3.	: Pecahan kerak bumi menjadi lempeng-lempeng tektonik (tectonic plates) .....	24
Gambar 3.4.	: Diagram pergerakan divergen lempeng-lempeng tektonik .....	25
Gambar 3.5.	: Mid-Atlantic Ridges, pergerakan divergen yang memisahkan benua Afrika dengan Amerika Selatan .....	26
Gambar 3.6.	: Eslandia (Iceland), kepulauan yang terbentuk dari Mid-Atlantic Ridges .....	27
Gambar 3.7.	: Geysir di Eslandia .....	27
Gambar 3.8.	: Laut Merah, Rift Valley yang terbuka menjadi lautan .....	28
Gambar 3.9.	: Pergerakan konvergen lempeng-lempeng tektonik .....	29
Gambar 3.10.	: Konvergensi lempeng samudera Hindia-Australia dengan lempeng benua Eurasia, membentuk Pegunungan volkanik Bukit Barisan di Sumatera .....	29

Gambar 3.11. :	Proses terbentuknya pegunungan Himalaya, sebagai akibat konvergensi antara anak benua India dengan benua Eurasia .....	30
Gambar 3.12. :	Kepulauan Aleutian, kepulauan vulkanik hasil konvergensi lempeng samudera Pasifik dan Amerika Utara. ....	30
Gambar 3.13. :	Batas transform dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik .....	31
Gambar 3.14. :	San Andreas Fault, batas transform lempeng Pasifik dengan Amerika Utara .....	32
Gambar 3.15. :	Sketsa proses pembentukan gunung api .....	33
Gambar 3.16. :	Rangkaian Pegunungan Alpide dan Lingkar Pasifik .....	34
Gambar 3.17. :	Peta Gunung Api dunia, menggambarkan hubungan antara batas lempeng kerak bumi dengan sebaran gunung api dan titik-titik panas (hot spot) .....	35
Gambar 3.18. :	Wilayah-wilayah potensial panas bumi dunia .....	36
Gambar 3.19. :	Jalur pegunungan Circum Pacific, yang disebut sebagai Ring of Fire .....	36
Gambar 3.20. :	Erupsi Explosif gunung St. Helena, 22 Juli 1980 .....	38
Gambar 3.21. :	Erupsi gunung Sopotan - Sulawesi Utara (2018) .....	39
Gambar 3.22. :	Erupsi gunung Gamalama - Halmahera (2018) .....	39
Gambar 4.1. :	Contoh diagram model panas bumi (Dickson & Fanelli, 2004) .....	43
Gambar 4.2. :	Manifestasi semburan uap air panas (Cisolok - Banten) .....	48
Gambar 4.3. :	Manifestasi endapan travertin (pemandian air panas Tirta Sayaga - Bogor) .....	49
Gambar 4.4. :	Diagram ternary Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> (Nicholson,1993) .....	51
Gambar 4.5. :	Diagram ternary Cl-Li-B .....	52
Gambar 4.6. :	Diagram ternary Na-K-Mg (Giggenbach,	

	1988) .....	52
Gambar 4.7.	: Diagram ternary N <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> -Ar .....	53
Gambar 4.8.	: Perhitungan geothermometer berdasarkan unsur-unsur kimia terlarut .....	53
Gambar 4.9.	: Sumur bor panas bumi di Kamojang - Jawa barat. (Kawah Kereta Api, kedalaman 60 m, di bor tahun 1926) .....	58
Gambar 4.10.	: Prinsip Huygens .....	60
Gambar 4.11.	: Contoh skema perambatan gelombang pada metoda seismik refraksi .....	61
Gambar 4.12.	: Contoh perhitungan dalam metoda seismik refraksi .....	62
Gambar 4.13.	: Skema perambatan pantulan gelombang dalam metoda seismik refleksi .....	63
Gambar 4.14.	: Skema pemantulan gelombang seismik pada batas dua medium berbeda nilai IAnya .....	64
Gambar 4.15.	: Contoh profil seismik refleksi dan penafsirannya .....	65
Gambar 4.16.	: Diagram pendugaan geolistrik dengan memasukan arus listrik kedalam tanah .....	66
Gambar 4.17.	: Konfigurasi Wenner dan Konfigurasi Schlumberger susunan elektroda dalam pendugaan geolistrik .....	67
Gambar 4.18.	: Contoh profil resistivitas bawah permukaan pada lapangan panas bumi Olkaria-Domes .	69
Gambar 4.19.	: Prinsip Metode Magnetotelurik (Unsworth, 2006) .....	70
Gambar 4.20.	: Diagram konfigurasi metoda magnetotelurik .....	71
Gambar 4.21.	: Contoh profil magnetotelurik pada lapangan panas bumi Pampa Lirima .....	72
Gambar 4.22.	: Ilustrasi pengaruh struktur geologi bawah permukaan terhadap profil medan gravitasi di permukaan .....	73
Gambar 4.23.	: Contoh alat Gravitymeter .....	74
Gambar 4.24.	: Contoh peta Anomali Bouger daerah gunung Tangkuban Perahu, beserta dengan	

	penafsirannya .....	77
Gambar 4.25.	: Daftar nilai kerentanan magnet (susceptibility) berbagai batuan .....	80
Gambar 4.26.	: Contoh peralatan magnetometer portable ....	81
Gambar 4.27.	: Contoh pemodelan Reservoir Panas bumi menggunakan Data Magnetik di Desa Bora, Kabupaten Sigi .....	83
Gambar 4.28.	: Contoh peta geomagnetik beserta penafsirannya, di daerah Panas Bumi Pamacalan-Lebak, Banten .....	84
Gambar 5.1.	: Diagram perbandingan prinsip kerja PLTU dengan PLTP .....	91
Gambar 5.2.	: Diagram Pembangkit Uap Kering (dry steam) .....	94
Gambar 5.3.	: Diagram pembangkit single flash steam .....	95
Gambar 5.4.	: Diagram pembangkit double flash steam ....	96
Gambar 5.5.	: Diagram pembangkit Siklus Biner (binary cycle) .....	97
Gambar 5.6.	: Proses hydraulic fracturing .....	100
Gambar 5.7.	: Contoh visualisasi proses hydraulic fracturing .....	101
Gambar 5.8.	: Diagram pemanfaatan tenaga panas bumi dengan teknologi Fracking .....	102
Gambar 5.9.	: Bagan alir prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) .....	103
Gambar 5.10.	: Contoh kepala sumur panas bumi (wellhead geothermal well) .....	105
Gambar 5.11.	: Contoh Steam Receiving Header .....	105
Gambar 5.12.	: Contoh Separator uap panas bumi .....	107
Gambar 5.13.	: Contoh Demister .....	107
Gambar 5.14.	: Diagram Turbin-Generator pembangkit listrik tenaga panas bumi .....	108
Gambar 5.15.	: Diagram proses pendinginan uap oleh Kondensor dan Menara Pendingin .....	109
Gambar 5.16.	: Menara Pendingin PLTP Kamojang .....	110
Gambar 6.1.	: Peta sebaran hot spot di permukaan bumi ...	115
Gambar 6.2.	: Produksi tenaga listrik panas bumi tahun 2010, dan zonasi potensi panas bumi dunia.	116

Gambar 6.3.	: Peta Gunung Api Indonesia .....	119
Gambar 6.4.	: Peta pengembangan potensi panas bumi Indonesia (2016) .....	119
Gambar 7.1.	: Diagram contoh terjadinya blow out pada sumur panas bumi .....	122
Gambar 7.2.	: Gas-gas Vulkanik yang tersebar di atmosfer pada saat erupsi .....	123
Gambar 7.3.	: Perbandingan emisi gas CO <sub>2</sub> panas bumi dengan berbagai bahan bakar fosil .....	125
Gambar 7.4.	: Diagram contoh lay out PLTP .....	130
Gambar 7.5.	: Contoh proposal standard lay-out PLTP, yang diusulkan pada 2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS) .....	131
Gambar 8.1.	: Lokasi lapangan panas bumi Lardellerro - Monte Amiata .....	134
Gambar 8.2.	: Sketsa kerangka tektonik jazirah Italia .....	135
Gambar 8.3.	: Sketsa perbandingan tektono-stratigrafi lapangan panas bumi Lardellerro vs Monte Amiata .....	136
Gambar 8.4.	: Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lardellerro - Italia .....	137
Gambar 8.5.	: Generator listrik tenaga uap panas bumi pertama di Lardellerro .....	138
Gambar 8.6.	: Model lapangan panas bumi Lardellerro .....	138
Gambar 8.7.	: Profil geologi dan gradien panas bumi plapangan panas bumi Lardellerro .....	140
Gambar 8.8.	: Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Monte Amiata - Italia .....	141
Gambar 8.9.	: Geologi-Hidrogeologi lapangan panas bumi Monte Amiata .....	142
Gambar 8.10.	: Konfigurasi Tektonik-Vulkanik New Zealand (North Island) .....	143
Gambar 8.11.	: Diagram konfigurasi geologi bawah permukaan, lapangan panas bumi Wairakei	145
Gambar 8.12.	: Lokasi lapangan panas bumi New Zealand .	146
Gambar 8.13.	: Lokasi geografis semenanjung Kamchatka ..	147

Gambar 8.14. :	Tektonik setting semenanjung Kamchatka ...	148
Gambar 8.15. :	Profil tektonik semenanjung Kamchatka .....	149
Gambar 8.16. :	Pembangkit listrik tenaga panas bumi Musnovskaya (50 MW) .....	150
Gambar 8.17. :	Lokasi Islandia (Iceland) .....	152
Gambar 8.18. :	Konfigurasi Geo-tektonik Islandia .....	153
Gambar 8.19. :	Peta sebaran lapangan panas bumi Islandia, menunjukkan titik-titik lokasi sistem ber- temperatur tinggi dan ber-temperatur rendah .....	154
Gambar 8.20. :	Pembangkit listrik tenaga panas bumi Nesjavellir (120 MW) .....	156
Gambar 8.21. :	Lokasi lapangan panas bumi The Geysers - California .....	157
Gambar 8.22. :	Konfigurasi tektonik lapangan panas bumi The Geysers .....	158
Gambar 8.23. :	Diagram pembentukan busur volkanik Cascade (Cascade Arc/Range) .....	159
Gambar 8.24. :	Cross section Geologi lapangan panas bumi The Geysers .....	160
Gambar 8.25. :	Ilustrasi perbandingan antara Enhanced Geothermal System dengan teknologi fracking (hot rock system) dengan teknologi panas bumi konvensional (hydrothermal system) .....	165
Gambar 9.1. :	Peta sebaran potensi panas bumi Indonesia (2012) .....	167
Gambar 9.2. :	Konfigurasi tektonik kepulauan Indonesia (Simandjuntak & Barber, 1996) .....	170
Gambar 9.3. :	Jalur-jalur orogen (orogenic belt) pembentuk kepulauan Indonesia (Simanjuntak & Barber, 1996) .....	172
Gambar 9.4. :	Lokasi PLTP Kamojang (140 MW) .....	176
Gambar 9.5. :	Sketsa Geologi lapangan panas bumi Kamojang. ....	177
Gambar 9.6. :	Kawah Mati - Kamojang .....	178
Gambar 9.7. :	Kawah Hujan .....	178
Gambar 9.8. :	Manifestasi berupa kolam lumpur, diantara	

	Kawah Hujan - Kawah Cibuliran .....	179
Gambar 9.9. :	Kawah Cibuliran .....	180
Gambar 9.10. :	Lokasi lapangan panas bumi dan dataran tinggi Dieng - Jawa Tengah .....	181
Gambar 9.11. :	Citra satelit dataran tinggi Dieng - Jawa Tengah .....	182
Gambar 9.12. :	Sketsa geologi lapangan panas bumi Dieng .	185
Gambar 9.13. :	Pembangkit listrik tenaga panas bumi Dieng .....	186
Gambar 9.14. :	Lokasi lapangan panas bumi Lahendong - Sulawesi Utara .....	187
Gambar 9.15. :	Peta geologi lapangan panas bumi Lahendong - Sulawesi Utara .....	188
Gambar 9.16. :	Lokasi sumur bor, lapangan panas bumi Lahendong .....	190
Gambar 9.17. :	Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong - Sulawesi Utara .....	191



# 1

## PENDAHULUAN

Panas bumi atau *geothermal* adalah energi panas yang tersimpan dalam bumi. Istilah *geothermal* sendiri diambil dari bahasa Yunani, dimana *geo* berarti bumi dan *therme* berarti panas. Namun menurut Undang-undang No.27 tahun 2003 tentang Panas Bumi, pasal 1 : *“Panas Bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem Panas Bumi, dan untuk pemanfaatannya diperlukan proses penambangan”*.

Tak ada catatan pasti sejak kapan manusia memanfaatkan energi panas bumi untuk kehidupannya. Diduga sejak awal peradabannya, manusia telah memanfaatkan sumber panas bumi untuk berbagai keperluan sederhana, seperti mandi air panas, memasak, dan pengobatan. Sedangkan penggunaannya secara lebih kompleks diketahui dari temuan arkeologi sekitar 2000 tahun yang lalu, dimana bangsa Romawi memanfaatkan panas bumi yang keluar dari mata air panas untuk membangun pemandian di kota-kotanya. Salah satu reruntuhannya yang masih tersisa adalah fasilitas pemandian air panas *Badenweiler* di *Rhine Rift Valley*, di bagian selatan Jerman. Energi panas bumi yang sejak lama telah dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan pemanasan, baik pemanasan air maupun pemanasan ruangan pada musim dingin, pada saat sekarang lebih banyak dimanfaatkan untuk menghasilkan tenaga listrik. Sekitar 10 Giga Watt (GW) pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) telah dioperasikan diseluruh dunia pada tahun 2007, dan menyumbang sekitar 0.3% total produksi tenaga listrik dunia.

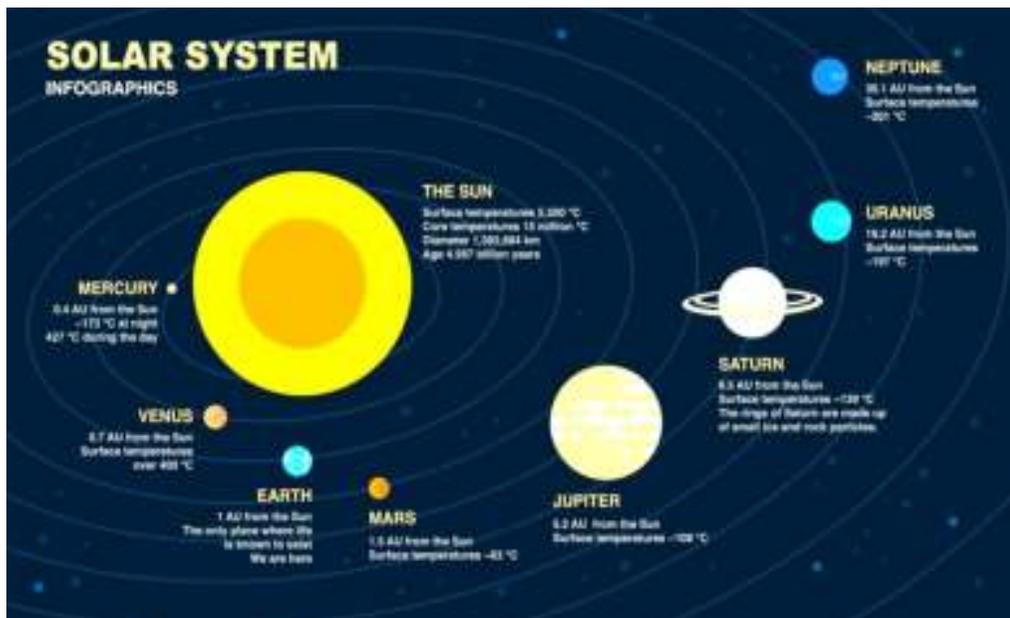
Energi panas bumi sendiri merupakan energi panas yang terdapat dan terbentuk dalam kerak bumi, dimana temperatur dalam

kerak bumi bertambah seiring dengan meningkatnya kedalaman, atau disebut sebagai *gradien geothermal*. Hal tersebut menunjukkan adanya sumber panas jauh dibawah permukaan bumi, dimana temperatur pada pusat bumi diperkirakan mencapai 5400 °C. Panas bumi terbawa oleh berbagai fluida, naik ke permukaan atau mendekati permukaan bumi, setelah dimanfaatkan kembali turun kedalam bumi sebagai cairan yang telah mendingin, demikian seterusnya membentuk suatu siklus, sehingga dapat dimanfaatkan dalam jangka waktu yang sangat lama. Maka panas bumi merupakan salah satu energi terbarukan, oleh karena dapat dikatakan tidak akan pernah habis. Walaupun tekanan pada reservoir fluidanya dapat saja berkurang oleh karena berkurangnya masa fluida.

# 2

## PROSES PEMBENTUKAN BUMI & ALAM SEMESTA

Bumi sebagai bagian dari tata surya matahari, hanyalah merupakan salah satu noktah kecil dari ber-milyard benda angkasa yang melayang di alam semesta, bahkan sistem tata surya matahari pun hanya bagian yang sangat kecil dari sistem alam semesta. Maka, proses pembentukan dan perkembangan bumipun tak terlepas dari proses terbentuknya alam semesta.



Sumber : <https://pixfeeds.com/images/topic/5382/1200-5382-solar-system-photo2.jpg>

Gambar 2.1. : Sistem tata surya Matahari

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. Namun sebagian besar permukaan bumi meleleh oleh berbagai tumbukan dengan benda-benda angkasa lainnya, dimana sebuah tumbukan besar diduga menyebabkan kemiringan sumbu bumi dan menghasilkan bulan. Seiring waktu, maka bumipun mulai mendingin, membentuk inti padat yang diselimuti cairan panas, dengan kerak padat pada permukaannya.

## 2.1. Teori “Big Bang”

Teori *big bang* bagaimanapun adalah teori yang setidaknya sampai saat ini diakui sebagai teori tentang pembentukan alam semesta yang diakui secara ilmiah.

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

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

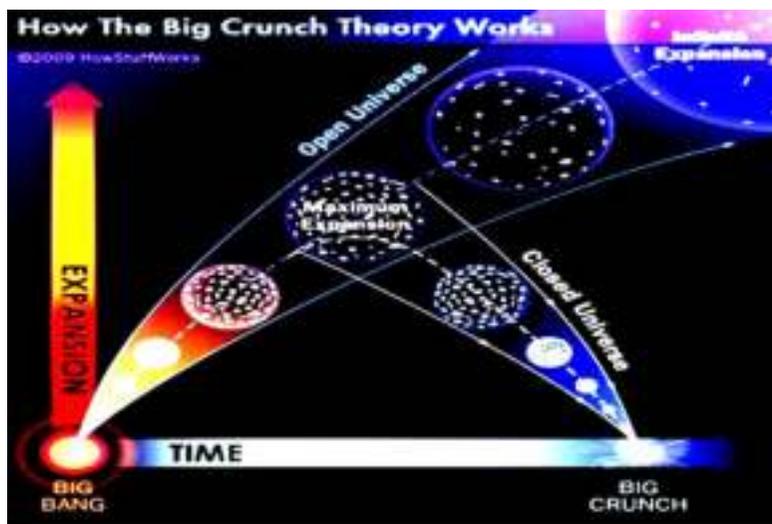
1929 *Hubble* menemukan korelasi antara jarak dan kecepatan resesi, yang sekarang dikenal sebagai *hukum Hubble*. *Lemaître* (1931) lebih jauh menyatakan, bahwa pengembangan alam semesta seiring dengan berjalannya waktu memerlukan syarat, bahwa alam semesta mengerut seiring berbaliknya waktu sampai pada 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*. Jika alam semesta tidak memiliki permulaan, dan jika ia 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 Penziaz* dan *Robert Wilson* (1965), yang menemukan 'radiasi latar kosmis', yang tidak terlihat memancar dari satu sumber tertentu namun meliputi keseluruhan ruang angkasa. Sehingga disimpulkan bahwa radiasi tersebut berasal dari sisa radiasi peninggalan tahapan awal peristiwa *big bang*.

Pada tahun 1989, NASA meluncurkan satelit *Cosmic Background Explorer* (COBE) ke ruang angkasa dan berhasil menemukan sisa ledakan raksasa yang telah terjadi pada awal pembentukan alam semesta. Hal ini dinyatakan sebagai penemuan astronomi terbesar sepanjang masa, dan diakui sebagai pembuktian teori *big bang*.

Namun bagaimanapun, mengingat sangat luasnya alam semesta yang meliputi dimensi jarak dalam satuan waktu tahun cahaya, masih tersembunyi apakah peristiwa *big bang* merupakan titik awal dari proses pembentukan alam semesta. Setidaknya teori *big bang* telah mendapat sanggahan dari *Sir Fred Hoyle* pada pertengahan abad 20, yang dengan teorinya *Steady-State* menyatakan bahwa alam semesta berukuran tak terhingga dan kekal sepanjang masa, sehingga tidak memiliki awal.

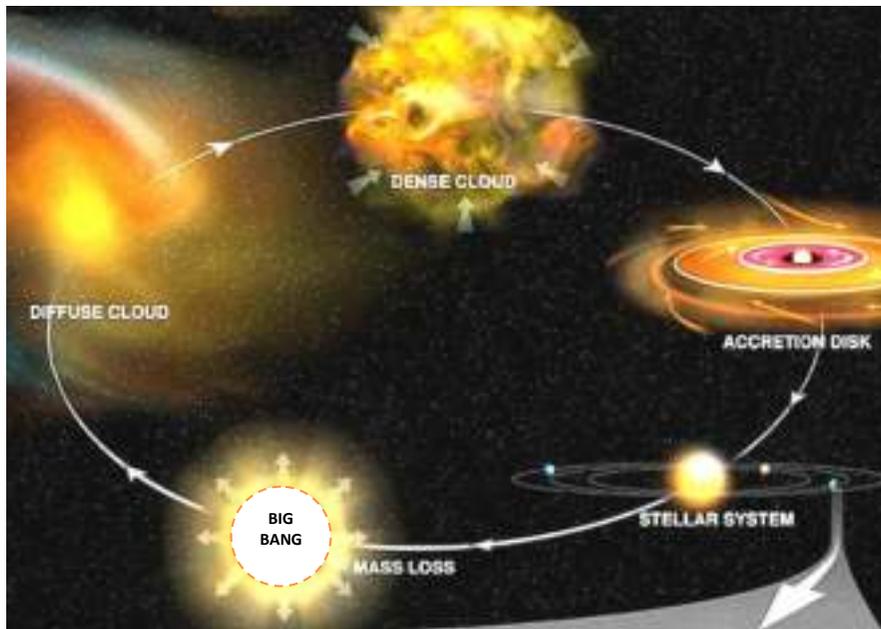
Teori *big bang* memang menyatakan bahwa alam semesta ini diawali dengan meledaknya suatu masa padat raksasa, sehingga hancur menjadi partikel-partikel gas yang tersebar. Namun teori *big bang* juga menjelaskan bahwa alam semesta memiliki siklus yang berulang, dimana pada suatu titik alam semesta akan berhenti mengembang dan mulai menyusut. Semua materi akan ditarik dan menyisakan lubang hitam besar yang disebut sebagai *big crunch*, yang merupakan kelanjutan teori dari *big bang*.



Sumber : [https://www.physicsoftheuniverse.com/images/bigbang\\_bigcrunch.jpg](https://www.physicsoftheuniverse.com/images/bigbang_bigcrunch.jpg)

Gambar 2.2. : Diagram Big Bang & Big Crunch

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, dimana hal inilah yang menjadi pokok sanggahan dari Sir Fred Hoyle dalam teorinya *Steady-State*.



Sumber :

Modifikasi <http://www.everythingselectric.com/wp-content/uploads/planet-formation-theory-debunked-nebular-hypothesis.jpg>

**Gambar 2.3. :** Diagram siklus Big Bang

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

Bukan mustahil pula bahwa peristiwa *big bang* hanya merupakan salah satu bagian dari siklus alam semesta yang lebih besar dengan berbagai *big bang* didalamnya. Dimana gumpalan-gumpalan nebula yang tersebar oleh ledakan dahsyat *big bang* ber-angsur-angsur kembali mendingin, menggumpal dan memadat untuk kembali meledak oleh *big bang* berikutnya, dan seterusnya terjadi berulang secara periodik.

## 2.2. Pembentukan Tata Surya

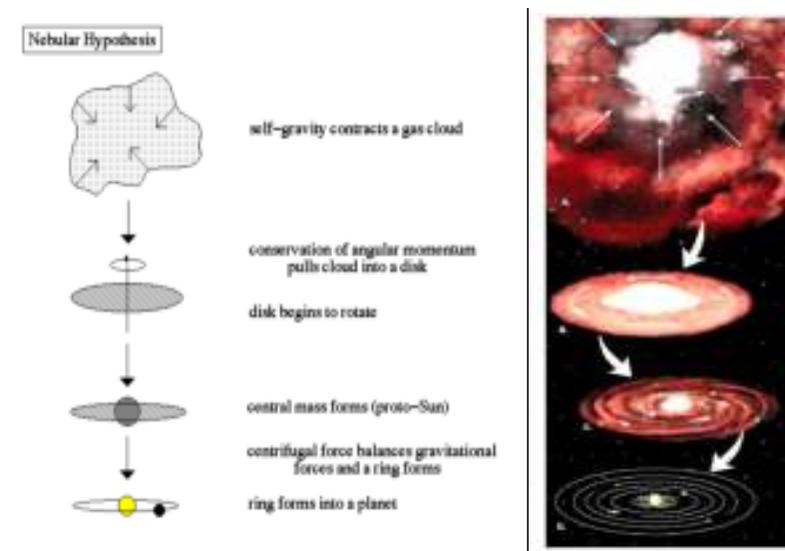
Berdasarkan teori *big bang* proses pembentukan bumi berawal puluhan milyar tahun yang lalu, dimana terdapat gumpalan nebula raksasa yang berputar pada porosnya. Putaran tersebut memungkinkan bagian-bagian kecil dan ringan terlempar keluar sedangkan bagian yang besar terkumpul pada pusat poros putaran 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 membentuk sistem tata surya, dimana bagian ringan yang terlempar keluar juga mengalami kondensasi sehingga membentuk gumpalan-gumpalan yang mendingin dan memadat, menjadi planet-planet salah satunya adalah planet bumi.

Berbagai hipotesa tentang proses pembentukan alam semesta, termasuk tata surya matahari beserta bumi didalamnya, telah dikemukakan oleh banyak peneliti. Namun pada umumnya sepakat bahwa *hipotesa nebula* (teori kabut) adalah proses pembentukan alam semesta 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* secara independen 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.

Model standar inilah yang diakui dan diyakini oleh para peneliti sebagai proses pembentukan sistem tata surya, yang disebut sebagai *hipotesis nebula*. Dalam model ini, tata surya terbentuk dari awan antarbintang, yang terdiri dari himpunan debu dan gas yang berputar yang disebut *nebula surya*, yang terdiri dari hidrogen dan helium yang tercipta sesaat setelah peristiwa dentuman besar atau *big bang* 13,8 miliar tahun yang lalu. Baru sekitar 4,5 miliar tahun yang lalu *nebula* tersebut mulai ber-kontraksi, yang kemungkinan dipicu oleh gelombang kejut dari *supernova* yang berdekatan, dimana gelombang kejut juga telah menyebabkan *nebula* tersebut berputar. Seiring dengan semakin cepatnya perputaran awan atau *nebula* maka momentum sudut, gravitasi, dan kelembaman meratakannya menjadi bentuk cakram protoplanet, yang tegak lurus terhadap sumbu rotasinya. Pengaruh tumbukan serta pengaruh momentum sudut dari puing-puing besar memungkinkan protoplanet mulai terbentuk dan mengorbit terhadap pusat *nebulanya*.



Sumber 1 : [http://abyss.uoregon.edu/~js/images/nebular\\_hypothesis.gif](http://abyss.uoregon.edu/~js/images/nebular_hypothesis.gif)

Sumber 2 : <http://web.arc.losrios.edu/~borougt/SolarNebulaTheory.jpg>

**Gambar 2.4.** : Diagram hipotesis nebula, pembentukan sistem tata surya matahari

Pada saat yang bersamaan gumpalan *nebula* yang lebih kecilpun, yang terlempar dari gumpalan besarnya, membentuk masa yang lebih kecil. Materi-materi tersebut tumbuh semakin besar dan terus bergerak secara teratur, ber-rotasi pada porosnya dan beredar mengelilingi matahari dalam orbit yang tetap, menjadi planet-planet yang membentuk sistem tata surya matahari.

### **2.3. Proses Pembentukan Bumi**

Gumpalan *nebula* yang lebih kecil pada proses pembentukan tata surya yang terlempar dari gumpalan besarnya, membentuk masa yang lebih kecil. Materi-materi tersebut tumbuh semakin besar dan terus bergerak secara teratur, ber-rotasi pada porosnya dan beredar mengelilingi matahari dalam orbit yang tetap, menjadi planet-planet yang membentuk sistem tata surya matahari.

Sejarah bumi bagaimanapun berkaitan dengan perkembangan planet bumi sebagai salah satu planet dalam sistem tata surya matahari, dimana usia bumi diperkirakan sepertiga dari usia alam semesta, 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. Namun sebagian besar permukaan bumi meleleh oleh karena aktivitas vulkanik yang ekstrem dan seringnya tumbukan dengan benda angkasa lain, dimana salah satu tumbukan 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.

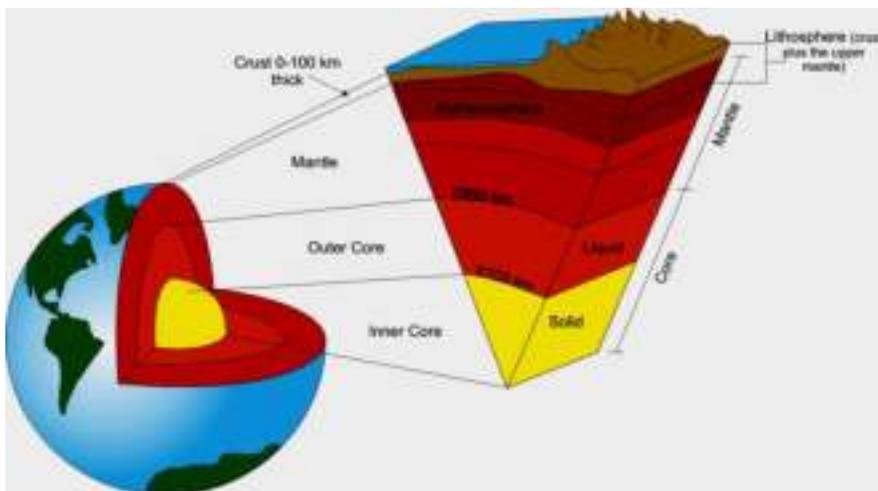
Semakin mendinginnya bumi memungkinkan cairan berupa air terbentuk pada permukaannya, yang lama kelamaan ter-akumulasi menjadi badan air yang besar berupa lautan dan danau-danau, yang dinamakan hidrosfer. Maka bentuk-bentuk kehidupan awalpun mulai tumbuh pada sekitar 2,8 dan 2,5 miliar tahun yang lalu. Diikuti dengan kehidupan fotosintesis yang mulai muncul 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.

## **2.4. Struktur Interior dan Eksterior 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 pemberaian 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.

Metoda seismik, yang mengukur sifat rambat gelombang seismik dari getaran gempa bumi, merupakan salah satu hipotesa yang dapat menggambarkan struktur interior bumi. Gelombang seismik yang terdiri dari gelombang primer (P), atau gelombang longitudinal, dan gelombang sekunder (S), atau gelombang transversal, mempunyai

karakter rambatan yang berbeda. Yaitu bahwa gelombang P dapat merambat baik pada material yang ber-fasa padat maupun cair, sedangkan gelombang S tidak dapat merambat pada material yang ber-fasa cair. Maka struktur interior bumi kemudian disimpulkan dari sifat rambat gelombang seismik dari gempa bumi, yang tercatat diberbagai stasiun pencatatan gempa di berbagai tempat. Menghilangnya gelombang S dan perubahan kecepatan gelombang P pada beberapa stasiun pengamatan, menunjukkan bahwa mantel atau astenosfer merupakan masa padat. Sedangkan inti bumi pada bagian dalamnya merupakan masa padat, yang diselimuti oleh masa cair pada bagian luarnya (seperti ditunjukkan dengan menghilangnya gelombang S).



Sumber : <https://kaiserscience.files.wordpress.com/2015/01/internal20earth20structure.jpg>

**Gambar 2.5. : Diagram Struktur Interior Bumi**

Berdasarkan hipotesa hasil pengamatan rambatan gelombang seismic tersebut, maka disimpulkan struktur interior bumi (jari-jari sekitar 6 371 Km) sebagai berikut :

- **Inti Bumi** : Merupakan bagian terdalam dari bola bumi dengan jari-jari sekitar 3 300 Km, dan menjadi pusat dari massa bumi sehingga sangat padat. Pada lapisan inilah terdapat aktivitas magnetik dan gravitasi bumi. Inti bumi terdiri dari :

*Inner core* : berbentuk bola padat dengan densitas 10 – 13 g/cm<sup>3</sup>, dengan jari-jari sekitar 1100 Km, terdiri dari campuran besi - nikel, dan suhu mencapai 9 000<sup>0</sup> sampai 13 000<sup>0</sup> 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 8 000<sup>0</sup> sampai 11 000<sup>0</sup> F.

- *Astenosfer* atau *mantel* : Masa padat yang menyelimuti inti bumi setebal sekitar 2 900 Km, dengan densitas sekitar 3.4 g/cm<sup>3</sup>. 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<sup>0</sup> sampai 4000<sup>0</sup> 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* : Masa padat dengan ketebalan 5 – 200 Km, terdiri dari : Kerak Benua, densitas sekitar 2.7 g/cm<sup>3</sup>, 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 g/cm<sup>3</sup>, 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 X 10<sup>12</sup> Km<sup>3</sup>
- Masa bumi : 5,9736 x 10<sup>24</sup> Kg
- Masa jenis rata2 : 5,5153 g/cm<sup>3</sup>
- Percepatan gravitasi permukaan di khatulistiwa : 9,780327 m/sec<sup>2</sup>

- Keliling khatulistiwa : 40 075,02 Km
- Luas permukaan bumi : 510 072 000 Km<sup>2</sup> terdiri dari 29,2 % daratan (148 940 000 Km<sup>2</sup>), 70,8 % lautan (361 132 000 Km<sup>2</sup>).

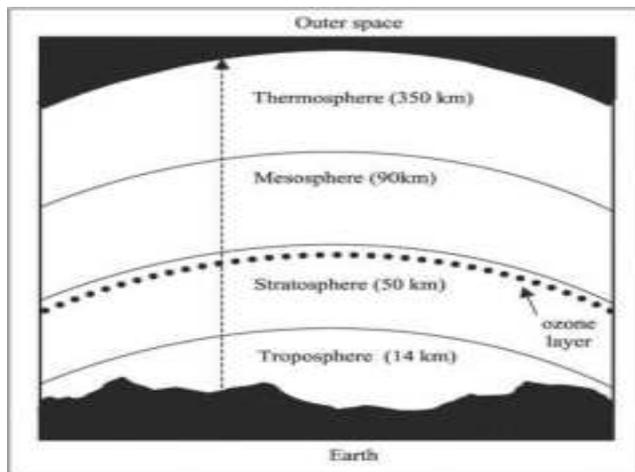
Atmosfer adalah bagian dari debu dan gas-gas dari gumpalan kabut yang terpisah dari gumpalan kabut matahari sebagai gumpalan induknya, namun tidak ikut terpadatkan bersama dengan bola bumi, sehingga masih melayang menyelimuti bola bumi, dan disebut sebagai bagian dari eksterior bumi. Komposisi atmosfer secara umum terdiri dari gas-gas Nitrogen (N<sub>2</sub>) 78.08 %, Oksigen (O<sub>2</sub>) 20.95 %, Argon 0.93 %, Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) 0.04 %, Uap air (H<sub>2</sub>O) sekitar 1 % dan bervariasi sesuai iklim, serta gas-gas lainnya dalam jumlah kecil. Namun komposisi tersebut tidak tersebar merata pada seluruh lapisan atmosfer.

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 gumpalan2 awan, dan iklim yang mempengaruhi permukaan bumi. Semakin keatas suhu akan berkurang secara ber-angsur 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 kadang2 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<sub>3</sub>). 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 molekul2 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 kepermukaan bumi. Hal tersebut akan dapat meningkatkan suhu dipermukaan bumi, atau menyebabkan pemanasan global. Hal ini tentu akan mempengaruhi system 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 kristal2. Hal inilah yang menyebabkan meteor2 yang memasuki atmosfer terbakar hancur, sehingga tidak mencapai permukaan bumi. Meskipun sisa2 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 meteoritik berterbangan secara bebas.



Sumber :

<http://www.dummies.com/education/science/environmental-science/what-causes-the-hole-in-the-ozone-layer/>

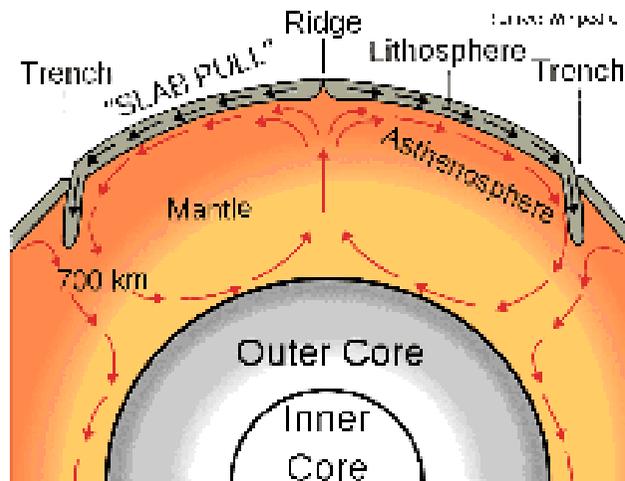
Gambar 2.6. : Struktur atmosfer bumi

## 2.5. Kerak Bumi

Kontak dengan ruang angkasa yang dingin, mendinginkan bagian permukaan dari bola bumi, sehingga mendingin dan membentuk kerak padat atau *lithosfer*, sementara pada bagian bawahnya masih tetap cair oleh karena terpanaskan oleh inti bumi. Maka terjadilah *arus konveksi* pada masa cair dibawah kerak bumi yang disebut sebagai *mantel* atau lebih dikenal sebagai magma. Partikel-partikel mantel yang panas dan lebih ringan bergerak keatas dan memberai di permukaan, sementara partikel-partikel mantel yang dingin dan lebih berat bergerak turun kearah inti bumi yang panas untuk terpanaskan kembali. Demikian terjadi seterusnya membentuk siklus arus konveksi dalam mantel.

Pada permukaan bumi, kerak bumi padat yang berasal dari magma yang mendingin dan membeku mengapung diatas masa cair mantel, terbawa bergerak mengikuti pergerakan arus konveksi pada permukaan bumi. Maka pada titik-titik dimana arus konveksi memberai, kerak bumi terpecahkan dan turut memberai bergerak secara divergen saling menjauhi, dan kerak bumi baru terbentuk dari masa cair mantel atau magma yang keluar ke permukaan sebagai *lava* yang kemudian mendingin dan membeku. Sementara itu pecahan-pecahan kerak bumi bergerak saling bergesekan, saling bertumbukan

secara konvergen, menunjam kedalam mantel dan meleleh kembali menjadi magma, dan bergerak mengikuti siklus arus konveksi dalam mantel. Sebagian daripadanya, oleh tekanan konvergensi terdorong menerobos kerak bumi atau keluar ke permukaan sebagai lava, membentuk busur-busur vulkanik. Secara keseluruhan, proses pergerakan lempeng-lempeng pecahan kerak bumi tersebut disebut sebagai proses *tektonik*. Sedangkan lempeng-lempeng pecahan kerak buminya, yang terdiri dari lempeng kerak benua dan kerak samudera, disebut sebagai *lempeng tektonik*.

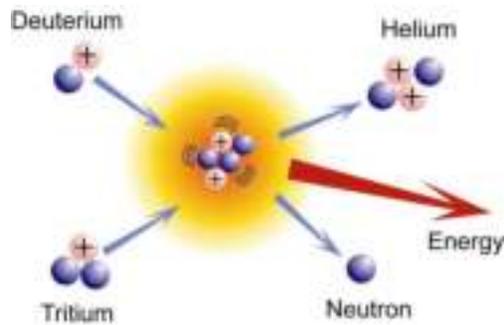


Sumber : <http://www.learnz.org.nz/sites/learnz.org.nz/files/bg-what-causes-geohazards-03.jpg>

**Gambar 2.7. :** Diagram siklus arus konveksi dalam mantel dan pergerakan lithosfer

## 2.6. Sumber Panas Bumi

Panas bumi berasal dari energi yang merupakan sisa-sisa panas dari hasil reaksi nuklir, yang pernah terjadi pada awal mula terbentuknya bumi dan alam semesta. Reaksi nuklir yang masih terjadi secara alamiah di alam semesta pada saat ini adalah reaksi *fusi nuklir* yang terjadi di matahari dan juga pada bintang-bintang yang tersebar di alam semesta, dimana reaksi *fusi nuklir* alami tersebut menghasilkan energi panas yang sangat tinggi.



**Reaksi fusi nuklir di dalam inti Matahari**

Sumber :

<http://astro-event.blogspot.co.id/2013/10/bagaimana-cara-matahari-memproduksi.html>

*Gambar 2.8. : Diagram proses reaksi fusi nuklir pada 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 untuk setiap unit reaksi.

Sumber utama panas bumi berasal dari inti bumi yang diperkirakan memiliki suhu mencapai 6000<sup>0</sup> 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.

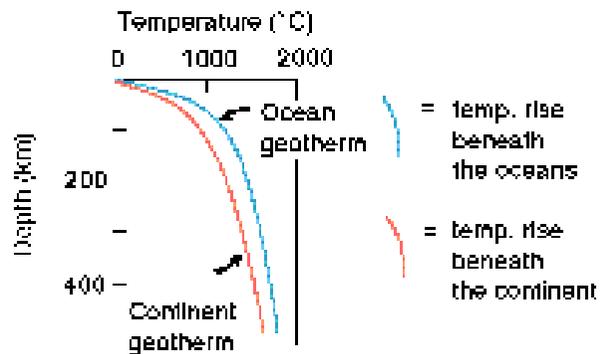
Permukaan bumipun pada mulanya memiliki panas yang sangat tinggi, namun dengan berjalannya waktu, suhu permukaan bumi mulai menurun dan akhirnya tinggal bagian dalam bumi saja, yang diantaranya berupa cairan mantel dan inti bumi, yang masih panas dan menjadi sumber energi panas bumi. Disamping panas sisa dari proses awal terbentuknya bumi, inti bumi juga mendapatkan panas sebagai akibat dari peluruhan dari berbagai kandungan unsur radioaktif didalamnya, seperti uranium-238, uranium-235, thorium-232, dan potassium-40, yang tenggelam kedalam inti bumi dan mengalami tekanan gaya gravitasi yang sangat tinggi.

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. Maka panas pada mantel yang berpindah secara konveksi inilah yang kemudian memanaskan lapisan kerak bumi.

Panas bumi mengalir secara konstan dari dalam bumi menuju ke permukaan, dengan aliran panas rata-rata  $65 \text{ mW/m}^2$  di atas kerak benua dan  $101 \text{ mW/m}^2$  di atas kerak samudra, yang berarti rata-rata panas yang mengalir  $0.087$  watt per meter persegi. Walaupun nilai ini memang sangat kecil dibandingkan dengan energi panas matahari yang ditangkap oleh permukaan bumi, namun lebih terkonsentrasi pada titik-titik tertentu, dimana panas dipindahkan melalui mekanisme konveksi, seperti pada punggung-punggungan laut (*oceanic ridges*), dan rekahan-rekahan kerak bumi. Kerak bumi sendiri secara efektif bertindak sebagai insulator tebal, sehingga panas dipaksa untuk dilepaskan melalui bukaan-bukaan pada kerak bumi secara konveksi, seperti pada gunung berapi dan geyser. Bentuk perpindahan panas lainnya adalah dengan mekanisme konduksi melalui lithosfer yang lebih banyak terjadi di lautan, oleh karena kerak samudra yang lebih tipis dan berusia lebih muda dibandingkan kerak benua.

Semakin dalam masuk ke dalam bumi, semakin mendekati sumber panas, maka temperatur kerak bumi semakin meningkat pula. Secara umum, setiap penurunan 1 km ke dalam perut bumi temperatur akan naik sebesar  $25 - 30^\circ \text{C}$ , atau sekitar  $2,5$  sampai  $3^\circ \text{C}$  untuk setiap peningkatan kedalaman 100 meter. Sehingga semakin jauh ke dalam perut bumi temperatur batuan akan semakin meningkat. Pertambahan panas tersebut dikenal sebagai gradien panas bumi atau gradien geothermal, walaupun untuk tempat-tempat tertentu di sekitar daerah vulkanik gradiennya dapat lebih besar, dengan variasi  $1 - 25^\circ \text{C} / 100 \text{ m}$ . Gradien panas bumi pada kerak samudra juga sedikit lebih tinggi

daripada pada kerak benua, disebabkan oleh komposisi kandungan logamnya yang berbeda.



Sumber : <https://fs.magnet.fsu.edu/~odom/1000/magmas/mag.html>

**Gambar 2.9.** : Grafik gradien panas bumi untuk kerak samudera dan kerak benua

Pergerakan kerak bumi menimbulkan rekahan, yang memungkinkan magma sebagai cairan mantel dapat menerobos keluar. Magma yang menerobos kerak bumi, bertemu dengan fluida atau material lainnya, sehingga kembali terjadi transfer panas. Sumber panas inilah yang kemudian dapat di-eksploitasi sebagai sumber energi.

# 3

## GEOLOGI PANAS BUMI

Sumber panas bumi berasal dari inti bumi, yang tersalurkan melalui mantel yang bagian atasnya merupakan masa batuan lunak sampai dengan cair kental, dengan temperatur 1600<sup>o</sup> sampai 4000<sup>o</sup> F. Mantel yang panas tersebut terselimuti oleh masa padat kerak bumi yang tebal dengan ketebalan dapat mencapai 200 km, sehingga kandungan panas bumi didalamnya sulit untuk dapat mencapai permukaan. Namun proses geologi menyebabkan lapisan kerak bumi menipis dan ter pecah-pecah menjadi lempeng-lempeng tektonik, membentuk celah-celah bukaan yang memungkinkan masa cair mantel yang panas menerobos mendekati atau bahkan keluar ke permukaan bumi.



Sumber : <http://aeothermal.marin.org/GEOresentation/sld00x.htm>

**Gambar 3.1.** : Inti bumi sebagai sumber panas bumi

### 3.1. Teori Tektonik Lempeng

Teori ini lahir pada pertengahan tahun 60 an, didukung oleh hipotesa Pemekaran Tengah Samudera (*Sea Floor Spreading*) yang bermula pada pematang tengah samudera (*Mid Oceanic Ridge*) yang diajukan oleh Hess (1962). Teori Tektonik Lempeng juga ter-inspirasi dari hipotesis *continental drift* (Alfred Wegener, 1912) dalam bukunya "*The Origin of Continents and Oceans (1915)*", dimana benua-benua yang ada sekarang, pada awalnya adalah satu bentang permukaan yang bergerak saling menjauh seolah terlepas dari perut bumi, seperti halnya bongkahan es dengan masa jenis yang rendah mengambang diatas masa yang lebih padat. Berikutnya, dukungan atas teori ini dikemukakan oleh ahli geologi Inggris Arthur Holmes (1920), yang menyatakan bahwa tautan bagian-bagian kerak bumi tersebut kemungkinan berada dibawah laut, dengan arus konveksi didalam mantel bumi sebagai kekuatan penggerakannya.

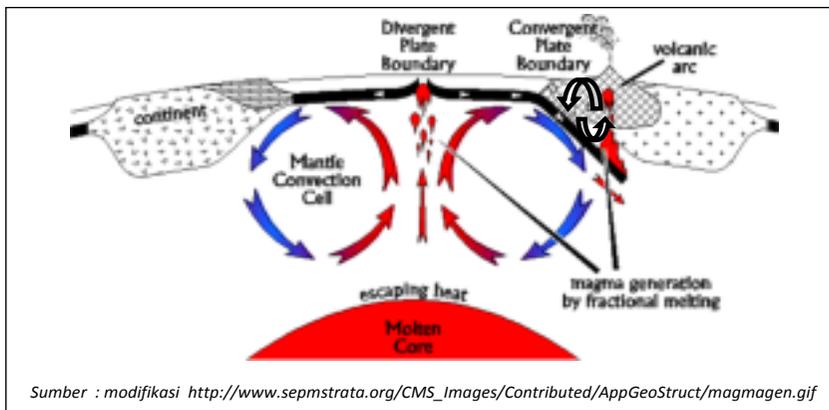
Bukti pertama bahwa lempeng-lempeng tersebut memang mengalami pergerakan diperoleh dari penemuan perbedaan arah orientasi medan magnet dalam batuan-batuan yang berbeda umur. Penemuan ini dinyatakan pertama kali dalam simposium di Tasmania tahun 1956. Walaupun pada awalnya penemuan ini dimasukkan kedalam teori ekspansi bumi, namun dalam perkembangannya lebih mengarah pada pengembangan teori tektonik lempeng (*plate tectonic*), yang menjelaskan bahwa penyebaran (*spreading*) yang terjadi adalah merupakan konsekuensi dari pergerakan vertikal (*upwelling*), dengan mengabaikan ekspansi pembesaran ukuran bumi (*expanding earth*), yaitu dengan memasukkan faktor adanya zona penunjaman (*subduction zone*) dan sesar translasi (*translation fault*). Maka pada saat itulah teori tektonik lempeng (*plate tectonic*) yang awalnya merupakan sebuah teori yang radikal, dapat diterima secara luas di kalangan ilmuwan. Teori tektonik lempeng telah terbukti berhasil menjelaskan berbagai peristiwa geologi, seperti gempa bumi, *tsunami*, erupsi gunung berapi, juga tentang pembentukan pegunungan, benua, dan samudera.

Menurut teori Lempeng Tektonik, lapisan terluar bumi terbentuk dari lempengan-lempengan kerak padat yang tipis dan keras, yang masing-masing saling bergerak relatif terhadap yang lainnya secara terus-menerus sejak bumi terbentuk hingga sekarang. Lempeng

tektonik dibentuk oleh kerak benua (*continental crust*), kerak samudra (*oceanic crust*), dan lapisan batuan teratas dari mantel bumi (*earth's mantle*), yang dinamakan *lithosfer*. Yaitu dengan kepadatan material kerak samudera yang lebih tinggi daripada kepadatan kerak benua, demikian pula dengan elemen-elemen pembentuk kerak samudera (*mafic*) yang lebih berat daripada elemen-elemen pembentuk kerak benua (*felsic*).

Dibawah *lithosfer* terdapat lapisan batuan cair yang dinamakan *astenosfer*, yang oleh karena suhu dan tekanan yang sangat tinggi, maka batu-batuan pada lapisan ini dapat bergerak mengalir seperti halnya cairan (*fluida*). Pergerakan tersebut digerakkan oleh arus konveksi didalam masa mantel, sehingga memecahkan kerak bumi atau *litosfer* menjadi beberapa lempeng tektonik yang kemudian saling ber-interaksi satu dengan lainnya.

**SIKLUS TEKTONIK**

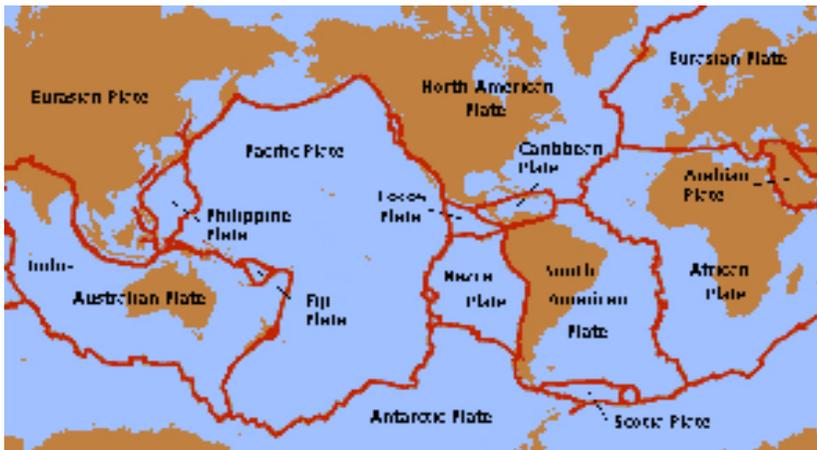


**Gambar 3.2. :** Diagram siklus tektonik

Pergerakan arus konveksi pada cairan mantel dibawah kerak bumi, menyebabkan gerakan-gerakan pada kerak bumi yang mengapung diatasnya. Arus konveksi yang mengalir keatas, kemudian bergerak menyebar ke berbagai arah ketika mencapai permukaan, memecah lapisan kerak bumi dan menggesernya mengikuti arah penyebaran arus konveksi tersebut. Proses pergerakan kerak bumi beserta berbagai dampaknya, seperti peretakan,

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

### Plate Tectonic Map



Sumber : [http://earth.rice.edu/mtpc/geo/geosphere/topics/2plate\\_tectonics.html](http://earth.rice.edu/mtpc/geo/geosphere/topics/2plate_tectonics.html)

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

Proses tektonik, memecah kerak bumi menjadi lempengan-lempengan kerak bumi yang disebut sebagai lempeng-lempeng tektonik atau *tectonic plates*. Lempeng-lempeng tektonik tersebut meliputi lempeng-lempeng besar sebagai berikut :

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

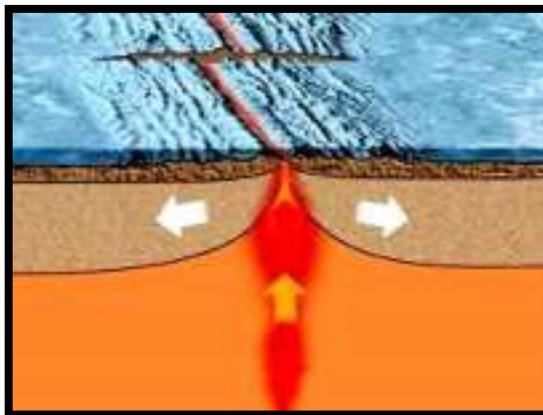
Disamping itu dapat pula dicatat beberapa sub-lempeng tektonik yang lebih kecil, yang merupakan pecahan dari lempeng-lempeng tektonik besar diatas, seperti :

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

Pergerakan lempeng-lempeng tektonik dapat terjadi secara *divergen* memberai saling menjauhi, saling bertumbukan dan mendesak secara *konvergen*, atau saling menggesek sepanjang *batas transform* diantara dua lempeng tektonik yang berbeda.

### 3.1.1. Pergerakan Divergen

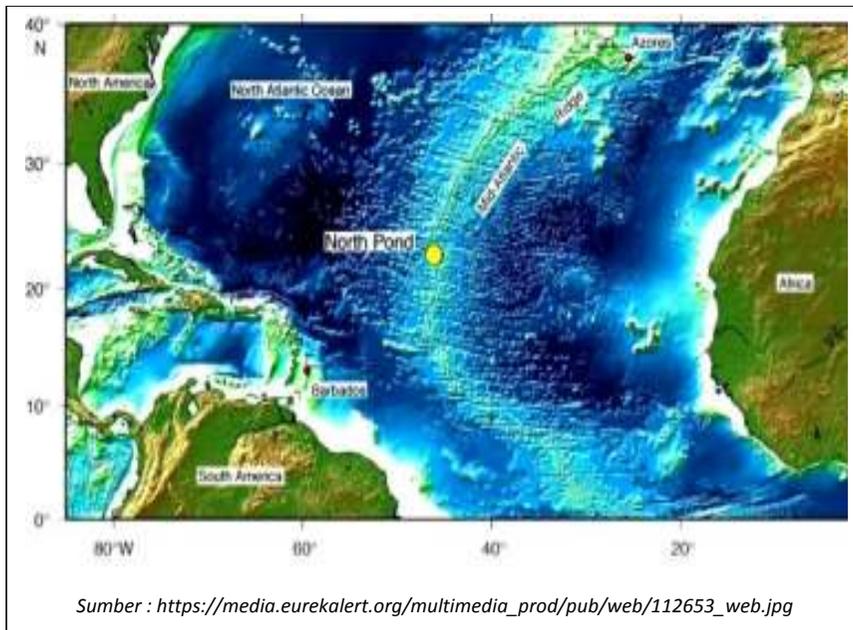
Pada titik lokasi dimana arus konveksi bergerak keatas mencapai permukaan, untuk kemudian menyebar, kerak bumi di atasnya akan menipis, kemudian terbelah menjadi lempeng-lempeng tektonik. Lempeng-lempeng tektonik tersebut kemudian memberai, bergerak saling menjauhi. Pergerakan ini merupakan pergerakan divergen, dimana pada lempeng samudera proses ini menyebabkan pemekaran dasar samudera atau *seafloor spreading*, sedangkan pada lempeng benua akan membentuk lembah retakan atau *rift valley*.



Gambar 3.4. : Diagram pergerakan divergen lempeng-lempeng tektonik

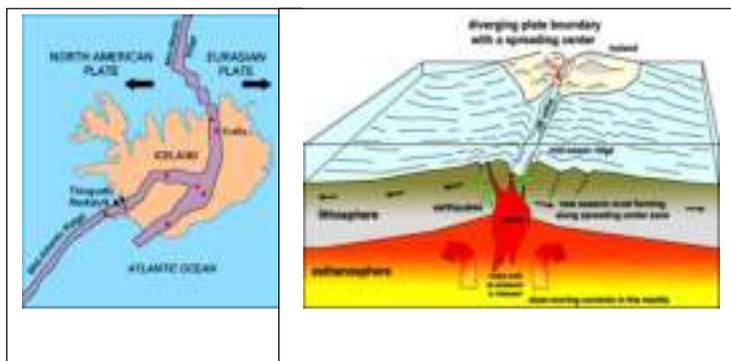
Pergerakan divergen yang memecah dan membelah kerak bumi, membuka celah untuk keluarnya permukaan bagian mantel yang cair dan panas. Cairan mantel tersebut kemudian mendingin, membeku membentuk kerak samudera yang baru. Demikian proses ini berjalan terus menerus, sehingga membentuk punggung (*ridge*) yang terus berkembang, membentuk pematang-pematang ditengah samudera atau *mid ocean ridge*.

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



**Gambar 3.5. :** *Mid-Atlantic Ridges*, pergerakan divergen yang memisahkan benua Afrika dengan Amerika Selatan

Penipisan dan peregakan kerak bumi akibat pergerakan divergen, membuka peluang bagi cairan mantel beserta kandungan energi panas buminya menerobos mendekati permukaan bumi, bahkan dapat mencapai permukaan bumi sebagai aktivitas vulkanik. Mendekatnya cairan mantel ke permukaan inilah yang berpotensi untuk dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas bumi. Seperti perpanjangan punggung *Mid Atlantic Ridge* ke arah utara, yang bahkan muncul ke permukaan laut, membentuk daratan pulau yang menjadi negara Eslandia, dengan fenomena panas bumi berupa gunung-gunung api dan *geyser*.



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

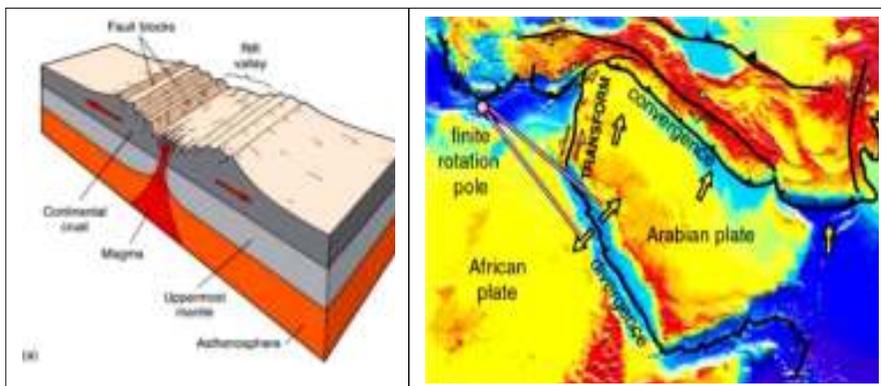
**Gambar 3.6.** : Eslandia (Iceland), kepulauan yang terbentuk dari Mid-Atlantic Ridges



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

**Gambar 3.7.** : Geyser di Eslandia

Sementara itu, laut Merah (*Red Sea*) adalah satu contoh lokasi, fase awal dari *seafloor spreading*, yang memisahkan lempeng benua Arabia dari lempeng benua Afrika, dimana keduanya bergerak memberai saling menjauhi. Dimulai dengan terbentuknya *rift valley*, yang kemudian berangsur membuka celah lantai samudera yang kemudian terisi oleh air laut menjadi celah laut yang sempit laut Merah. Celah ini ber-angsur angsur akan semakin terbuka melebar, untuk kelak menjadi lautan terbuka.

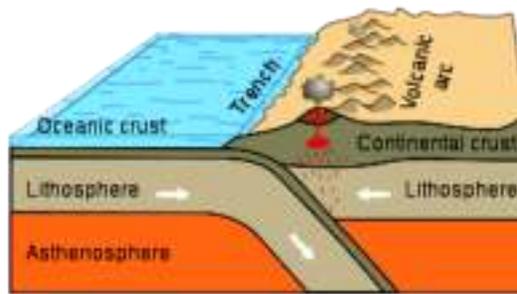


Sumber : [structuralgeology.weebly.com/extensional/the-parting-of-the-red-sea](http://structuralgeology.weebly.com/extensional/the-parting-of-the-red-sea)

**Gambar 3.8.** : Laut Merah, Rift Valley yang terbuka menjadi lautan

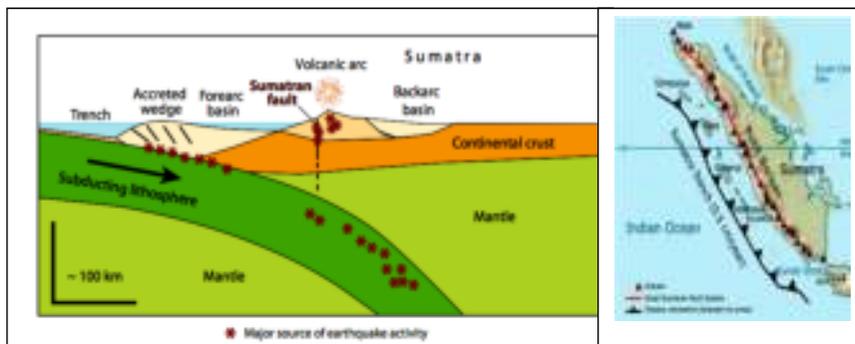
### 3.1.2. Pergerakan Konvergen

Pergerakan konvergen terjadi manakala lempeng-lempeng tektonik bergerak saling mendekati, saling bertumbukan dan mendesak satu dengan lainnya. Maka lempeng samudera yang lebih teguh dan berat akan tertunjam ke bawah kedalam perut bumi memasuki lapisan mantel yang panas. Sementara itu lempeng benua yang lebih plastis dan ringan akan menggelembung dan ter-lipat lipatan, membentuk jalur pegunungan di daratan. Gempa tektonik sering terjadi pada batas konvergen ini, sebagai akibat dari pergesekan maupun pelepasan energi saat bagian lempeng-lempeng tektonik tersebut terpatahkan.



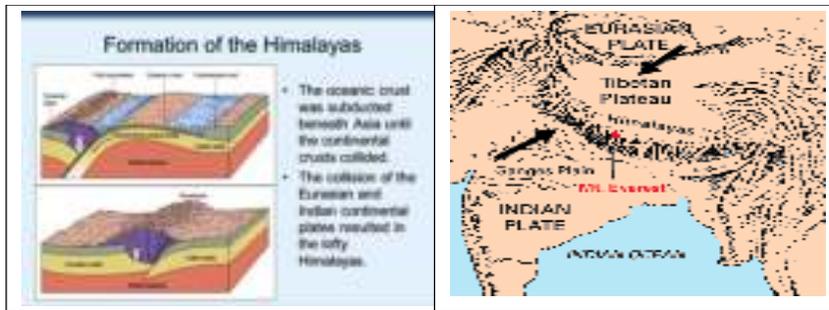
**Gambar 3.9.** : Pergerakan konvergen lempeng-lempeng tektonik

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



Sumber : Virtual Upper Mantle of the Earth – [www.virtualuppermantle.info](http://www.virtualuppermantle.info)

**Gambar 3.10.** : Konvergensi lempeng samudera Hindia-Australia dengan lempeng benua Eurasia, membentuk Pegunungan vulkanik Bukit Barisan di Sumatera



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

**Gambar 3.11.** : Proses terbentuknya pegunungan Himalaya, sebagai akibat konvergensi antara anak benua India dengan benua Eurasia

Konvergensi lempeng benua dengan lempeng benua akan menunjamkan salah satu lempeng benua ke bawah lempeng benua lainnya. Namun oleh karena lempeng benua ini ringan tidak terlalu padat dan teguh, maka tidak cukup berat untuk menunjam ke dalam mantel. Maka dalam hal ini tidak memicu aktivitas vulkanik, walaupun kegempaan tetap terjadi. Akan tetapi lempeng tektonik pada batas konvergensi ini akan menggelembung dan menebal, sehingga membentuk jalur pegunungan yang non-vulkanik. Contoh dari model konvergensi ini adalah pegunungan Himalaya dan Plato Tibet, yang terbentuk dari konvergensi antara lempeng benua Eurasia dengan lempeng anak benua India. Fenomena panas bumi jarang muncul pada konvergensi ini, oleh karena magma sebagai sumber panas bumi akan tertimbun jauh dibawah kerak bumi yang sangat tebal.



Sumber : [jschwartz.com/GE/Images/AlaskaSubduction.jpg](http://jschwartz.com/GE/Images/AlaskaSubduction.jpg)

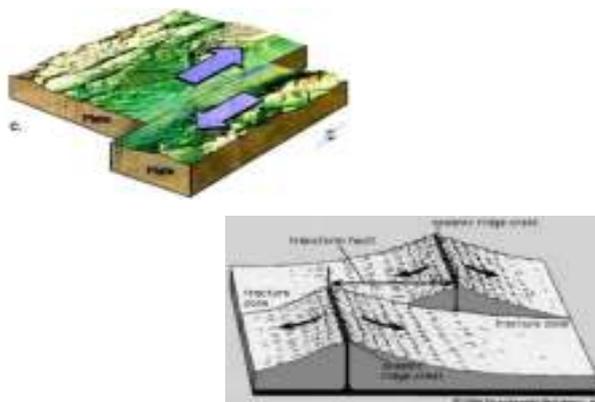
**Gambar 3.12.** : Kepulauan Aleutian, kepulauan vulkanik hasil konvergensi lempeng samudera Pasifik dan Amerika Utara.

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

### 3.1.3. Batas Transform

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

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



*Gambar 3.13. : Batas transform dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik*



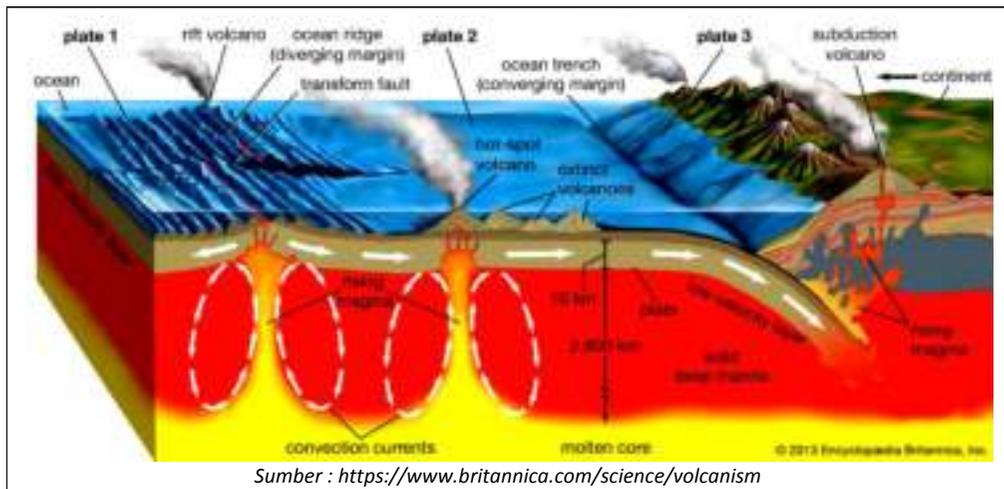
*Gambar 3.14. : San Andreas Fault, batas transform lempeng Pasifik dengan Amerika Utara*

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

### **3.2. Ke Gunung Apian dan Panas Bumi**

Aktivitas gunung api adalah suatu proses dimana cairan magma dari dalam perut bumi naik menerobos kerak bumi hingga keluar kepermukaan 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 dibawah 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 mendekati atau bahkan keluar dari permukaan bumi.



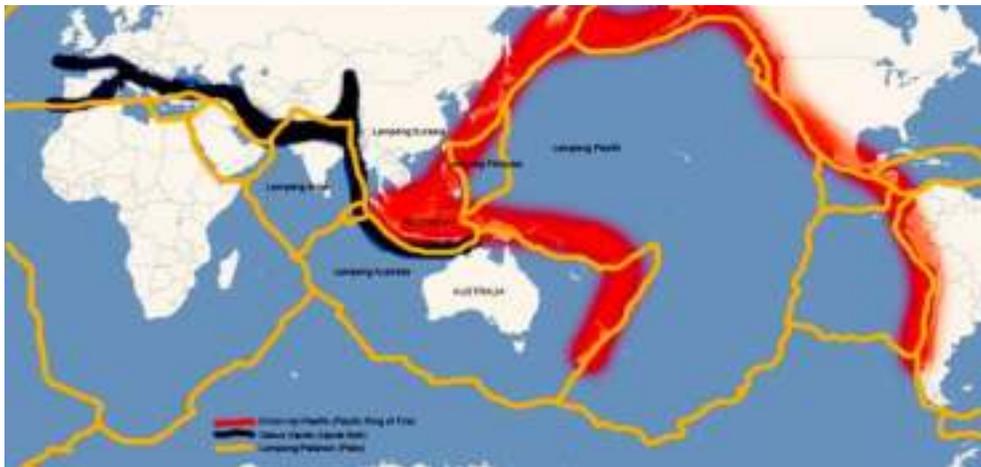
**Gambar 3.15.** : Sketsa proses pembentukan gunung api

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*.

Pada batas konvergen, lempeng samudera yang teguh akan menunjam kebawah masuk kedalam mantel yang bersuhu sangat tinggi, sehingga meleleh dan mencair menjadi magma. Cairan lempeng samudera yang meleleh ini bersifat lebih kental dan umumnya ber-komposisi lebih asam atau *granitis*. Tekanan yang tinggi dari konvergensi diantara lempeng-lempeng tektonik mendorong magma kepermukaan sehingga menimbulkan aktivitas gunung api (*subduction volcano*). Kekentalan dan tekanan konvergensi menyebabkan sifat erupsi yang eksplosif pada gunung-gunung api pada daerah ini.

Konvergensi diantara lempeng-lempeng benua umumnya tidak diikuti dengan aktivitas vulkanik, meskipun mengakibatkan aktivitas kegempaan. Hal tersebut oleh karena kerak benua yang relatif ringan, sehingga tidak cukup berat untuk menunjam kedalam mantel yang panas dan melelehkannya menjadi *magma*.

Adalah dua rangkaian utama pegunungan di dunia, yang keduanya terkait dengan batas lempeng tektonik, yaitu rangkaian atau jalur pegunungan Mediterania (*Mediterranean Belt*) yang juga disebut *Alpide Belt*, dan rangkaian pegunungan Lingkar Pasifik (*Circum Pacific*).



Sumber :

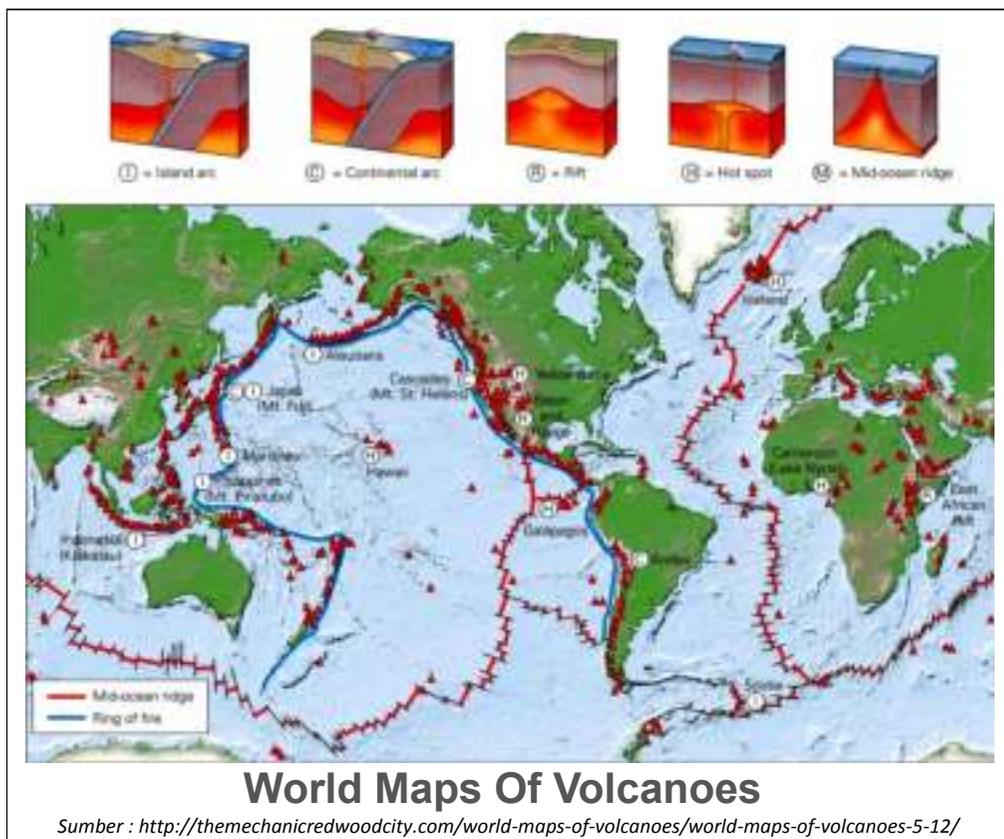
<http://visitorguide-indonesia.blogspot.com/2016/02/indonesia-neqara-diantara-cincin-api.html>

**Gambar 3.16.** : Rangkaian Pegunungan Alpide dan Lingkar Pasifik

Rangkaian pegunungan *Alpide*, memanjang mulai dari Eropa Selatan, yang merupakan batas pertemuan antara lempeng Eurasia dengan lempeng Afrika. Memanjang ke timur, lempeng Eurasia berbatasan disebelah selatannya dengan lempeng Arabia, kemudian lempeng India yang merupakan lempeng benua, baru pada ujung timurnya ber konvergensi dengan bagian lempeng samudera dari lempeng tektonik Hindia - Australia. Maka jalur pegunungan vulkanik ini terputus menjadi non-vulkanik pada wilayah konvergensi antara lempeng Eurasia dengan lempeng benua India, untuk

kemudian berlanjut kembali menjadi busur vulkanik pada bagian timurnya, yaitu di sepanjang pulau Sumatera, Jawa sampai ke kepulauan Nusa Tenggara. Sedangkan rangkaian pegunungan Lingkar Pasifik, melingkar disepanjang tepian samudera Pasifik, adalah jalur pegunungan vulkanik dengan deretan gunung-gunung api aktif didalamnya, sehingga disebut juga sebagai lingkaran cincin api atau *ring of fire*.

Bagaimanapun, ada saling keterkaitan antara aktivitas gunung api dan fenomena panas bumi, dengan proses interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi. 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. Pada daerah-daerah ini pulalah potensi energi panas bumi berpeluang untuk didaya gunakan.



**Gambar 3.17.** : Peta Gunung Api dunia, menggambarkan hubungan antara batas lempeng kerak bumi dengan sebaran gunung api dan titik-titik panas (*hot spot*)



\*A world map showing the major tectonic plates and location of the world's geothermal provinces (circled in red).

Sumber : <http://science-aboutgeo-2017.weebly.com/usage.html>

Gambar 3.18. : Wilayah-wilayah potensial panas bumi dunia

### 3.3. Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*)

Cincin Api Pasifik, yang juga disebut sebagai Sabuk Lingkar-Pasifik (*Circum-Pacific Belt*), adalah jalur di sepanjang tepian samudra Pasifik, yang dicirikan oleh deretan gunung api aktif, dan peristiwa gempa bumi yang sering terjadi. Melingkar sepanjang 40 000 km (24 900 mil), *ring of fire* ini berada pada batas-batas antara beberapa lempeng tektonik, meliputi lempeng Pasifik, Juan de Fuca, Cocos, Indo-Australia, Nazca, Amerika Utara, dan Lempeng Filipina.



Sumber : [www.dawainews.com](http://www.dawainews.com)

Gambar 3.19. : Jalur pegunungan Circum Pacific, yang disebut sebagai Ring of Fire

Sebanyak 452 gunung api membentang dari ujung selatan Amerika Selatan, sepanjang pantai Amerika Utara, melintasi selat Bering, kemudian ke arah Jepang, Indonesia, dan Selandia Baru. Namun, beberapa gunung berapi aktif dan tidak aktif yang ada di Antartika, "menutup" cincin ini. Sebagian besar gunung api aktif pada Cincin Api Pasifik ini, ditemukan di tepi barat semenanjung Kamchatka-Rusia, melalui pulau-pulau Jepang dan Asia Tenggara, berlanjut ke Selandia Baru.

Gunung Ruapehu dengan ketinggian 2 797 meter di atas permukaan laut (mdpl) di Selandia Baru adalah salah satu gunung berapi yang paling aktif di *ring of fire*, dengan letusan kecil tahunan dan letusan besar yang biasa terjadi pada periode ulang sekitar 50 tahun. Gunung api tersebut adalah bagian dari *volcanic arc Taupo*, dimana lempeng Pasifik yang padat berada dibawah lempeng Australia.

Gunung Fuji, gunung tertinggi di Jepang juga merupakan gunung api aktif dalam *ring of fire* Pasifik. Terakhir erupsi pada tahun 1707, namun aktivitas gempa yang terjadi di Jepang timur menjadikannya dalam keadaan kritis. Gunung Fuji berada di persimpangan dimana tiga lempeng tektonik, yaitu lempeng Amur, lempeng Okhotsk, dan lempeng Filipina, saling berinteraksi.

Bagian timur Cincin Api mempunyai sejumlah daerah vulkanik aktif, yaitu meliputi kepulauan Aleutian, pegunungan Cascade di Amerika Serikat bagian barat, sabuk vulkanik Trans-Meksiko, dan pegunungan Andes. Gunung St. Helena, di negara bagian Washington adalah gunung api aktif di pegunungan Cascade, dimana dibawahnya lempeng Juan de Fuca tertunjam kebawah lempeng Amerika Utara. Gunung St. Helena sendiri terletak pada bagian kerak bumi yang sangat lemah, yang menjadikannya lebih rentan terhadap erupsi. Letusannya yang bersejarah terjadi pada tahun 1980, berlangsung 9 jam dan menutupi area terdekat dengan abu vulkanik.



**Gambar 3.20.** : Erupsi Explosif gunung St. Helena, 22 Juli 1980.

Gunung Popocatepetl, adalah gunung rapi berbahaya lainnya di *ring of fire* Pasifik, oleh karena terletak dekat dengan daerah perkotaan Mexico City dan Puebla. Gunung ini merupakan gunung api paling aktif di Meksiko, dengan 15 erupsinya yang tercatat sejak tahun 1519, terletak pada sabuk volkanik Trans-Meksiko (*Trans-Mexico volcanic belt*), yang merupakan hasil dari proses subduksi lempeng Amerika Utara terhadap lempeng Cocos kecil.

Indonesia, walaupun secara umum merupakan tepi baratdaya dari *ring of fire* Pasifik, namun sesungguhnya adalah daerah pertemuan antara jalur pegunungan *Alpide* dengan *ring of fire* Pasifik. Yaitu dimana wilayah bagian barat sepanjang Sumatera, Jawa dan Nusa Tenggara, merupakan bagian dari jalur *Alpide*, sedangkan bagian timur merupakan bagian dari *ring of fire* Pasifik, diantaranya terdapat gunung-gunung api Karangetang dan Sopotan (Sulawesi Utara), serta gunung-gunung api Dukono, Gamalama dan Gamakonora (Halmahera Utara).



PHOTO: AGENCE FRANCE-PRESSE

Sumber :

<https://www.straitstimes.com/asia/se-asia/alert-raised-as-indonesias-mount-soputan-erupts>

**Gambar 3.21. : Erupsi gunung Soputan – Sulawesi Utara (2018)**



Sumber : <http://www.majalah-holiday.com/2018/10/qununa-qamalama-di-maluku-utara-meletus.html>

**Gambar 3.22. : Erupsi gunung Gamalama – Halmahera (2018)**

Aktivitas ke gunung apiian diseputar *ring of fire* Pasifik, menunjukkan adanya pergerakan magma mendekati permukaan bumi. Dengan demikian, sangat mungkin terdapat sumber panas bumi pada wilayah yang berada dalam jalur *ring of fire* Pasifik. Bahkan sebagian besar negara produsen tenaga listrik panas bumipun, kecuali Italia,

berada pada wilayah ini. Potensi panas bumi yang berada di wilayah Indonesiapun, umumnya ber-asosiasi dengan gunung api, yang secara umum berada pada posisi tepian baratdaya jalur *ring of fire* Pasifik, terutama yang terdapat di pulau Sulawesi, kepulauan Maluku, sampai dengan cekungan samudera Pasifik.

Namun demikian, wilayah diseputar *ring of fire* Pasifik, yang disebut juga Sabuk Lingkar Pasifik, juga merupakan daerah dengan tingkat kegempaan yang tinggi. Dimana 90% dari gempa bumi yang terjadi dan 81% dari gempa bumi terbesar, terjadi disepanjang cincin api ini. Sedangkan 5-6% dari seluruh gempa dan 17% dari gempa terbesar, terjadi pada Sabuk Alpide (*Alpide Belt*), yang membentang dari Jawa ke Sumatra, Himalaya, Mediterania hingga ke samudera Atlantik, dan sisanya terjadi disepanjang *Mid-Atlantic Ridge* dan lainnya.

# 4

## EKSPLORASI PANAS BUMI

Sumber panas bumi yang berasal dari cairan mantel, pada awalnya berada jauh dibawah permukaan bumi dan tertutup oleh selimut kerak bumi yang ketebalannya dapat mencapai puluhan bahkan ratusan kilometer, sehingga kandungan energi panasnya nyaris terpendam dan terserap kerak bumi dan tak dapat dimanfaatkan. Proses geologilah yang membentuk rekahan-rekahan dan bukaan pada kerak bumi, yang memungkinkan cairan mantel beserta kandungan energi panasnya, yang disebut magma, menerobos mendekati bahkan keluar permukaan bumi, sehingga memungkinkannya untuk dimanfaatkan bagi berbagai keperluan.

Salah satu pemanfaatan energi panas bumi yang terpenting saat ini adalah untuk pembangkitan tenaga listrik. Namun teknologi pemanfaatannya, sejauh ini masih mengacu kepada teknologi mesin uap, sehingga eksplorasinyapun umumnya masih ter fokus pada identifikasi uap panas bumi.

Bagaimanapun, sumber panas bumi masih berada dibawah permukaan bumi, sehingga kondisi geologi bawah permukaan perlu dikenal untuk meng-identifikasi potensi panas bumi yang dapat dimanfaatkan.

### **4.1. Sistem Panas Bumi**

Sistem panas bumi (*geothermal system*) secara umum diartikan sebagai sistem penghantaran panas didalam mantel dan kerak bumi, dimana panas dihantarkan dari suatu sumber panas menuju suatu

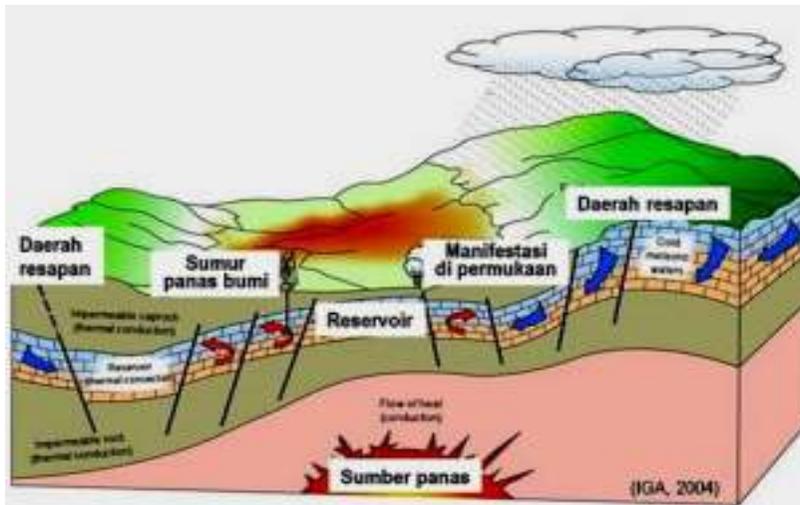
tempat penampungan panas. Dalam hal ini, panas merambat dari dalam bumi mendekati permukaan bumi sebagai tempat penampungan panas.

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 tersimpan dalam suatu formasi batuan penampung yang berada diantara sumber panas dan permukaan bumi. Formasi batuan inilah yang selanjutnya disebut sebagai reservoir.

Ada beberapa jenis sistem panas bumi, yaitu sistem hidrothermal (*hydrothermal system*), sistem bertekanan tinggi (*geopressured system*), sistem batuan panas kering (*hot dry rock system*) dan sistem magmatik (*magmatic system*). Namun dari keempat sistem tersebut, 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 ber-asosiasi 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 4.1. :** 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 panasnya, juga meliputi batuan reservoir sebagai penampung 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 ter-akumulasi dalam jumlah besar walaupun bersifat *intermittent*, dimana sewaktu-waktu dapat dilepaskan dalam bentuk erupsi gunung api, 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 keberadaan magma yang 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 (*geopressed system*), daerah-daerah dengan kapasitas panas

tinggi yang diakibatkan peluruhan unsur radioaktif dalam batuan, dan daerah-daerah yang memiliki magmatisme dangkal dibawah basemen. Namun pada kasus-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 ter-akumulasi 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 Ka dan Ca, sedemikian rupa sehingga menyebabkan lapisan tersebut menjadi sangat konduktif. Sifat konduktifitas dari lapisan ini dapat di-deteksi dengan melakukan pengukuran *magneto-tellurik (MT)*, sehingga posisinya dibawah permukaan dapat ter-identifikasi. 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 dibawah 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.

## **4.2. Penyelidikan Geologi Permukaan**

Penyelidikan geologi dalam rangka eksplorasi panas bumi, pada dasarnya sama dengan penyelidikan geologi secara umum untuk kepentingan lainnya. Yaitu dengan meng-identifikasi dan memetakan konfigurasi formasi batuan dan struktur geologi di permukaan, serta menafsirkan kondisi bawah permukaannya. Namun dalam eksplorasi panas bumi, faktor-faktor yang berkaitan dengan komponen sistem panas bumi mendapatkan perhatian dan penekanan secara khusus, yaitu keberadaan sumber panas, batuan reservoir beserta lapisan penudungnya (*cap rock*), dan juga daerah resapan (*recharge area*).

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 dibawah 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 *fumarol*. Juga dapat keluar secara ter-difusi, 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.

Mata air panas adalah manifestasi permukaan dari sistem reservoir panas bumi yang di-dominasi 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 meng-indikasikan 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*).

*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

*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*.

*Tabel 4.1. : Mineral-mineral hydrothermal dengan temperatur pembentukannya.*

MINERALS	TEMPERATURE °C	
	100	200 300
Chalcedony	—————	
Mordenite	————— ·····	
Calcite	—————	
Pyrite	—————	
Chlorite	- - - - -	
Illite	- - - - -	
Albite	—————	
Adularia	—————	
Quartz	—————	
Sphene	—————	
Wairakite	—————	
Prehnite	—————	
Epidote	—————	
Biotite	—————	
Actinolite	—————	
Garnet	- - - - -	

Common hydrothermal alteration minerals used as geothermometers and their temperature stability ranges. Dotted sections indicate mineral outside their usual stability ranges (modified from Reyes, 1990).

Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Common-hydrothermal-alteration-minerals-used-as-geothermometers-and-their-temperature\\_fig6\\_228541741](https://www.researchgate.net/figure/Common-hydrothermal-alteration-minerals-used-as-geothermometers-and-their-temperature_fig6_228541741)



**Uap air panas Cisolok**

Sumber :

<https://m-edukasi.kemdikbud.go.id/medukasi/produk-files/kontenkm/km2016/KM201624/materi4.html>

*Gambar 4.2. : Manifestasi semburan uap air panas (Cisolok – Banten)*



Sumber :

<http://www.trianarepa.com/2019/06/bocca-travertin-di-pemandian-tirta.html>

**Gambar 4.3. :** Manifestasi endapan travertin (pemandian air panas Tirta Sayaga – Bogor)

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.

### **4.3. Geokimia Panas Bumi**

Fluida panas bumi umumnya berasal dari air permukaan (*meteoric water*) yang meresap dari daerah resapan masuk kebawah permukaan, melalui rekahan maupun ruang antar butiran batuan, dan membentuk kantong-kantong fluida atau reservoir, namun dapat juga dapat berasal dari air magmatik (*juvenil*). Analisis kimia terhadap fluida panas bumi, dalam hal ini akan dapat memberikan informasi tentang asal-usul fluida, interaksi fluida dengan batuan sekitarnya, pencampuran fluida reservoir dengan fluida lainnya, serta dapat memberikan petunjuk tentang temperatur reservoir (*geothermometer*).

*Nicholson* (1993) meng-identifikasikan fluida air panas bumi berdasarkan kandungan anionnya, yaitu  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , dan  $\text{HCO}_3^-$ .

- **Air klorida (Cl<sup>-</sup>)** adalah jenis fluida panas bumi dalam (*deep geothermal fluid*), yang umumnya ditemukan pada sistem panas bumi ber temperatur tinggi. Mata air panas jenis air klorida ini memiliki temperatur tinggi, debit yang besar, rasio Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>=</sup> yang tinggi, pH 5-9 dan kandungan klorida tinggi yang berasal langsung dari reservoir.
- **Air Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>)** merupakan jenis fluida panas bumi yang terbentuk akibat kondensasi gas panas bumi pada air permukaan. Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S) yang terdapat dalam uap panas tersebut mengalami oksidasi menjadi sulfat. Jenis air panas ini juga disebut sebagai *steam-heated water* dan sering ber-asosiasi dengan aktivitas vulkanik. Biasanya berasal dari reservoir dangkal, memiliki pH rendah, kandungan klorida rendah dan kadar sulfat yang tinggi.
- **Air Bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)** merupakan jenis fluida panas bumi yang terbentuk akibat kondensasi uap dan gas dalam air permukaan yang minim oksigen. Jenis Air Bikarbonat biasanya memiliki pH mendekati netral, oleh karena reaksinya dengan batuan selama perjalanan migrasinya.

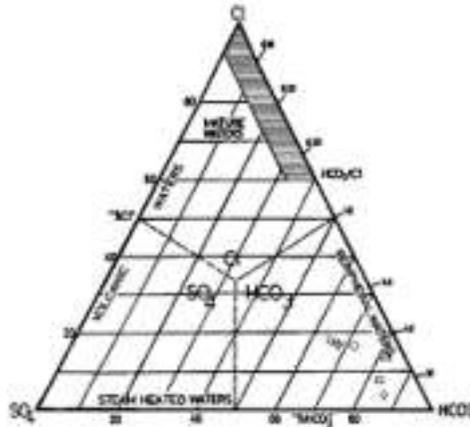
Sementara itu, *Giggenbach (1988)* membedakan zat-zat terlarut dalam fluida panas bumi dalam dua katagori, yaitu *tracer* dan *geoindikator*.

- **Tracer** adalah zat yang secara geokimia bersifat *inert* (seperti Li, Rb, Cl dan B), yang apabila dicampurkan kedalam fluida, bersifat tetap tak berubah, sehingga dapat ditelusuri sumbernya.
- **Geoindikator** adalah zat terlarut yang bersifat reaktif, seperti Na dan K, sehingga dapat memberikan gambaran tentang lingkungan keseimbangannya (*equilibrium*).

Jenis *geoindikator* kimia panas bumi dalam hal ini adalah (*Giggenbach and Goguel, 1989*) :

- a. Geoindikator Cl-SO<sub>4</sub><sup>=</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>
- b. Geoindikator Cl-B
- c. Geoindikator Na-K-Mg
- d. Geoindikator N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-Ar

- **Geoindikator  $\text{Cl}^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{HCO}_3^-$**



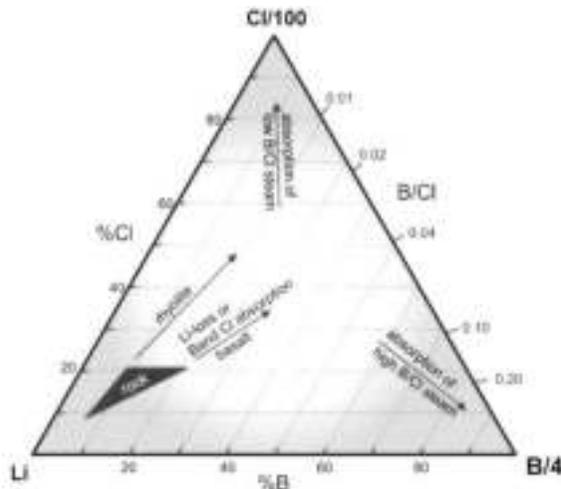
Sumber : [http://ijens.org/Vol\\_13\\_I\\_03/137203-4646-IJBAS-IJENS.pdf](http://ijens.org/Vol_13_I_03/137203-4646-IJBAS-IJENS.pdf)

**Gambar 4.4.** : Diagram ternary  $\text{Cl}^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{HCO}_3^-$  (Nicholson,1993)

Diagram ternary  $\text{Cl}^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{HCO}_3^-$  merupakan sebuah metode yang digunakan dalam penentuan jenis fluida reservoir, dimana untuk menentukan karakteristik dan kandungan relatif suatu reservoir, yang digunakan sebagai parameter adalah kandungan ion-ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ), bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) dan sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

- **Geoindikator Cl-Li-B**

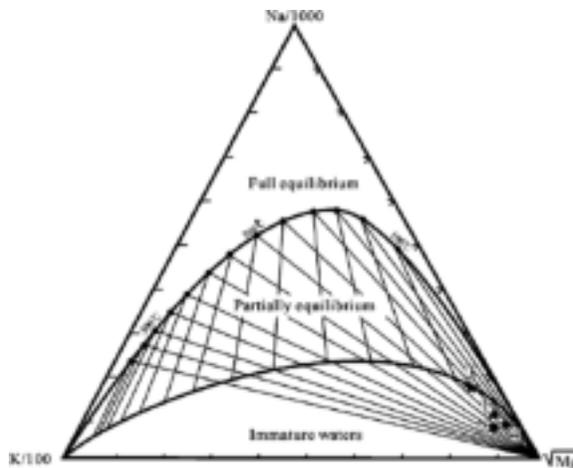
Diagram segitiga Cl-Li-B digunakan untuk meng-evaluasi proses pendidihan dan pengenceran berdasarkan perbandingan konsentrasi  $\text{Cl}/100$  dan  $\text{B}/4$  yang telah diubah dalam satuan persen. Selain itu metode ini juga digunakan untuk menentukan zona upflow dan zona outflow dari sebuah sistem panas bumi.



Sumber : <http://digilib.unila.ac.id/109/15/BAB%20III.pdf>

Gambar 4.5. : Diagram ternary Cl-Li-B

- **Geoindikator Na-K-Mg**



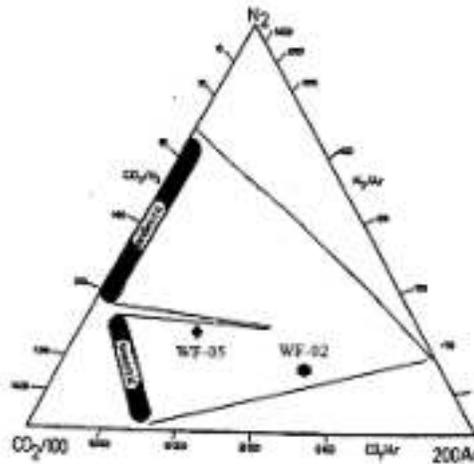
Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Ternary-diagram-of-the-water-rock-equilibration-temperatures-as-modified-from\\_fig4\\_233540489](https://www.researchgate.net/figure/Ternary-diagram-of-the-water-rock-equilibration-temperatures-as-modified-from_fig4_233540489)

Gambar 4.6. : Diagram ternary Na-K-Mg (Giggenbach, 1988)

Diagram ternary segitiga dari Na/1000-K/100-√Mg ditunjukkan oleh Giggenbach (1988) merupakan sebuah metode yang digunakan untuk pendugaan temperatur reservoir, dan untuk mengetahui air yang mencapai keseimbangan dalam lithologi.

- **Geoindikator N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-Ar**



Sumber : <https://digilib.unila.ac.id/109/17/BAB%20V.pdf>

**Gambar 4.7. :** Diagram ternary N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-Ar

<b>Geotermometer Unsur Terlarut</b>	
1. Kuarsa – no steam loss	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273$
2. Kuarsa – max steam loss	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1522}{5.75 - \log \text{SiO}_2} - 273$
3. Na-K (Fournier)	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1271}{\log (\text{Na/K}) + 1.483} - 273$
4. Na-K (Giggenbach)	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1390}{\log (\text{Na/K}) + 1.75} - 273$
5. Na-K-Ca	$T^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log (\text{Na/K}) + \beta[\log (\text{Ca}^{137}\text{Na}) + 2.06]} + 2.47} - 273$
6. K-Mg	$T^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{14.0 - \log (\text{K}^2/\text{Mg})} - 273$

SiO<sub>2</sub>, Na, K, Ca dan Mg dalam mg/kg

Sumber : Geothermal Energy for Everyone - <https://slideplayer.info/slide/2860733/>

**Gambar 4.8. :** Perhitungan geotermometer berdasarkan unsur-unsur kimia terlarut

Proses interaksi antara fluida panas bumi dengan batuan yang dilaluinya, merupakan indikator penting dalam menentukan temperatur panas bumi. Konsep ini di-adopsi menjadi metoda *geothermometer*, yang merupakan pendekatan dalam menentukan temperatur reservoir panas bumi, yang didasarkan pada kelarutan unsur-unsur tertentu dalam fluida panas bumi. Asumsinya adalah, apabila fluida bergerak cepat ke permukaan dari reservoir maka komposisi kimianya akan tetap atau sedikit saja perubahannya. Namun apabila berjalan lambat, maka akan terjadi reaksi dan pencampuran dengan formasi batuan yang dilaluinya, sehingga terjadi perubahan pada komposisi kimianya. Maka, analisis geokimia fluida panas bumi, dalam hal ini akan memberikan informasi komposisi kimia, yang kemudian menjadi dasar dalam perhitungan *geothermometer*.

- **Geothermometer Silika (Fournier, 1977)**

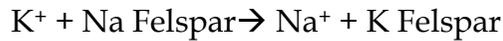
Perhitungan geothermometer silika disusun berdasarkan tingkat kelarutan berbagai jenis senyawa silika (SiO<sub>2</sub>) dalam air, yang merupakan fungsi dari temperatur, yang ditentukan dengan percobaan atau eksperimen. Reaksi yang menjadi dasar pelarutan silika dalam air adalah :



Namun pada kebanyakan sistem panas bumi, fluida di kedalaman mengalami keseimbangan dengan kuarsa, dimana pada fluida reservoir dengan  $t > 220^\circ\text{C}$ , kuarsa mengendap pada proses pendinginan yang lambat, akan tetapi pada pendinginan yang berlangsung sangat cepat, seperti pada mulut mata air, silika diendapkan dalam bentuk amorf. Maka, perhitungan geothermometer silika umumnya digunakan untuk reservoir dengan  $t > 150^\circ\text{C}$ , oleh karena pada  $t < 150^\circ\text{C}$  kandungan siliknya dikontrol oleh kalsedon (Simmons, 1998).

- **Geothermometer Na-K (Fournier, 1979 ; Giggenbach, 1988)**

Perhitungan geothermometer ini didasarkan pada respon rasio konsentrasi ion Na<sup>+</sup> terhadap K<sup>+</sup>, yang menurun dengan meningkatnya temperatur fluida, dimana terjadi reaksi pertukaran kation, yang tergantung pada temperatur, yaitu :



Geothermometer Na-K dapat diterapkan untuk reservoir air klorida dengan  $t > 180^\circ\text{C}$ . Metoda geothermometer ini mempunyai kelebihan, yaitu tidak banyak terpengaruh oleh *steam loss*, namun kurang baik apabila digunakan pada  $t < 100^\circ\text{C}$  (Simmons, 1998).

- **Geothermometer Na-K-Ca (Fournier dan Truesdell, 1973)**

Perhitungan geothermometer ini diterapkan pada air panas bumi dengan konsentrasi  $\text{Ca}^{++}$  yang tinggi. Geothermometer ini bersifat empiris, walaupun landasan teorinya belum dipahami secara sempurna (Giggenbach, 1988). Batasan teoritis untuk geothermometer ini adalah keseimbangan antara Na dan K Felspar, serta konversi mineral kalsium alumino silikat (seperti plagioklas) menjadi kalsit (Simmons, 1998). Asumsi yang digunakan perhitungan geothermometer Na-K-Ca adalah sebagai berikut :

- a. Adanya kelebihan silika
- b. Aluminium tetap berada pada fasa padat

Dengan rumus perhitungan :

$$t^\circ\text{C} = [1647 / (\log (\text{Na}/\text{K}) + \beta (\log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} + 2,06) + 2,47))] - 273,15$$

Dengan catatan :

1. Jika  $[\log \sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} + 2,06] < 0$ , gunakan  $\beta = 1/3$
2. Jika  $[\log \sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} + 2,06] > 0$ , gunakan  $\beta = 4/3$
3. Jika  $t$  terhitung  $100^\circ\text{C}$ , hitung ulang  $t^\circ\text{C}$  dengan  $\beta = 1/3$

Kisaran temperatur yang baik untuk penggunaan perhitungan geothermometer Na-K-Ca adalah  $120 - 200^\circ\text{C}$ . Namun ada kendala, dimana temperatur sangat dipengaruhi oleh perubahan konsentrasi karena *boiling* dan *dillution*. *Boiling* menyebabkan kehilangan  $\text{CO}_2$ , terjadinya pengendapan kalsit, dan keluarnya  $\text{Ca}^{++}$  dari larutan, sehingga  $t$  hasil perhitungannya menjadi lebih tinggi (Simmons, 1998).

- **Geothermometer K-Mg (Giggenbach, 1988)**

Perhitungan geothermometer ini diterapkan pada kondisi dimana  $\text{Na}^+$  terlarut dan  $\text{Ca}^{++}$ , antara cairan dan batuan belum diseimbangkan. Maka, geothermometer ini akan menyeimbangkannya kembali dengan cepat pada suhu dingin, yang berhubungan dengan reaksi kimia :



#### **4.4. Penyelidikan Geologi Bawah Permukaan**

Dari penyelidikan geologi permukaan, termasuk identifikasi manifestasi panas bumi yang ter-deteksi, memang telah dapat diperoleh informasi tentang konfigurasi geologi permukaan maupun bawah permukaan secara umum disekitar area yang diperkirakan berpotensi untuk pengembangan panas bumi. Namun bagaimanapun, letak formasi batuan reservoir maupun sumber panas buminya, berada jauh dibawah permukaan bumi. Sehingga untuk mendapatkan informasi potensi energi panas bumi yang lebih rinci dan terukur, perlu dilakukan penyelidikan geologi bawah permukaan.

Pemboran sejauh ini adalah metoda pendugaan bawah permukaan secara langsung yang paling akurat. Namun demikian pemboran memerlukan biaya yang sangat mahal, sehingga perlu ditunjang dengan pendugaan secara tak langsung, yaitu dengan pendugaan secara geofisika.

##### **4.4.1. Pemboran Eksplorasi**

Pemboran eksplorasi dilakukan pada titik-titik yang ditentukan, apabila informasi geologi, geokimia, dan geofisika yang diperoleh dari hasil penyelidikan geologi permukaan menunjukkan adanya indikasi potensi sumberdaya panas bumi yang layak untuk dikembangkan.

Tujuan pemboran sumur eksplorasi adalah untuk membuktikan keberadaan sumberdaya panas bumi, dan menguji model sistem panas bumi yang diperoleh dari data-data hasil penyelidikan permukaan. Dari pemboran eksplorasi ini, akan diperoleh informasi visual, baik

contoh dalam bentuk *core* (inti) ataupun *cutting*, konfigurasi formasi-formasi batuan secara vertikal, terutama formasi batuan reservoir dengan lapisan penudungnya. Namun demikian, data-data hasil pemboran tidak menggambarkan konfigurasi tersebut secara lateral, sehingga untuk hal tersebut diperlukan sejumlah titik pemboran. Jumlah titik pemboran sumur eksplorasi tentu tergantung dari luasnya daerah yang diduga mengandung potensi energi panas bumi. Pada satu wilayah yang prospektif, biasanya dibor 3 - 5 titik, dengan kedalaman tergantung perkiraan dari hasil penyelidikan permukaan, yang umumnya berkisar antara 1000 - 3000 meter. Umumnya, dengan penyelidikan geologi permukaan yang tepat, ditunjang dengan pendugaan geofisika, tingkat keberhasilan (*success ratio*) pemboran sumur panas bumi lebih tinggi daripada pemboran minyak bumi, yaitu berkisar antara 50 - 70% (Cataldi, 1982).

Pada sumur bor panas bumi juga dapat dilakukan pengujian-pengujian untuk mendapatkan informasi/ data yang lebih rinci tentang :

1. Jenis dan sifat fluida produksi.
2. Kedalaman reservoir.
3. Jenis reservoir.
4. Temperatur reservoir.
5. Sifat batuan reservoir.
6. Laju alir massa fluida, entalpi, dan fraksi uap pada berbagai tekanan kepala sumur.
7. Kapasitas produksi sumur (dalam MW).

Pengujian-pengujian tersebut meliputi :

- Uji hilang air (*water loss test*)
- Uji permeabilitas total (*gross permeability test*)
- Uji panas (*heating measurement*)
- Uji produksi (*discharge/ output test*)
- Uji transien (*transient test*)

Pemboran eksplorasi panas bumi, seyogyanya didahului dengan pendugaan-pendugaan secara geofisika, sehingga dapat ditetapkan lokasi titik bor yang tepat. Disamping itu pendugaan geofisika dapat memberikan informasi tentang penyebaran formasi batuan yang merupakan komponen-komponen panas bumi secara lateral. Bagaimanapun biaya pemboran sangat mahal, sehingga perlu di minimalkan, dan dilakukan pada titik-titik lokasi yang tepat.



*Sumber :*

*<https://ksmtour.com/informasi/tempat-wisata/jawa-barat/kawah-kamojang-keunikan-wisata-uap-panas-di-jawa-barat.html>*

**Gambar 4.9. :** Sumur bor panas bumi di Kamojang – Jawa barat.  
(Kawah Kereta Api, kedalaman 60 m, di bor tahun 1926)

#### **4.4.2. Pendugaan Seismik**

Salah satu metode geofisika yang sering digunakan dalam penyelidikan bawah permukaan, terutama dalam perminyakan, pembangunan terowongan dan juga eksplorasi panas bumi, adalah metode seismik. Metode ini mampu meng-identifikasi konfigurasi bawah permukaan secara luas meskipun secara tak langsung, sehingga sangat efisien dan efektif dibandingkan dengan metode yang lainnya.

Prinsip kerja metode seismik adalah dengan memanfaatkan perambatan gelombang seismik kedalam permukaan bumi untuk mengetahui kondisi bawah permukaan bumi, dimana sifat-sifat fisik formasi batuan akan mempengaruhi kecepatan rambat gelombangnya.

Metoda seismik didasarkan pada prinsip perambatan gelombang yang mengikuti *Hukum Snellius*, *Hukum Fermat*, dan *Hukum Huygen*.

- *Hukum Snellius*

Ketika gelombang seismik melalui lapisan batuan dengan impedansi akustik yang berbeda dari lapisan batuan yang dilalui sebelumnya, maka gelombang akan terbagi. Gelombang tersebut sebagian akan dipantulkan (*reflected*) kembali ke permukaan dan sebagian lainnya akan diteruskan merambat dibawah permukaan.

Apabila di-analogikan dengan gelombang cahaya, apabila gelombang cahaya datang dari medium optis yang kurang rapat ke medium optis yang lebih rapat, maka gelombang cahaya tersebut akan dibiaskan mendekati garis normal, sehingga sudut datangnya akan lebih besar dari sudut biasanya, dan demikian pula sebaliknya.

- *Hukum Fermat*

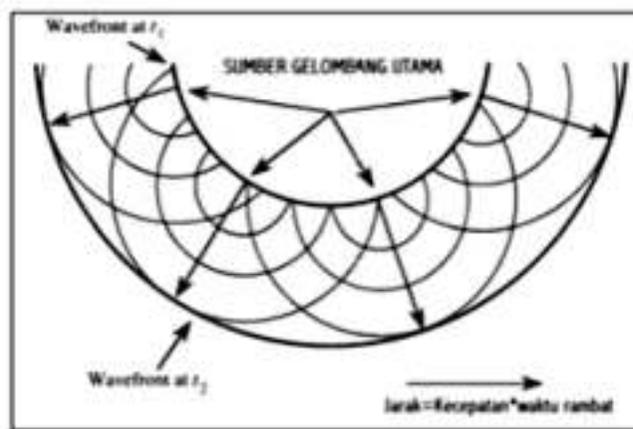
Menurut *Fermat*, besarnya sudut pantul suatu gelombang, akan sama dengan sudut datangnya. Gelombang akan merambat dari satu titik ke titik lainnya, melalui jalur rambat tersingkat. Sehingga, manakala gelombang melalui media-media yang mempunyai sifat kecepatan rambat gelombang yang ber-variasi, maka gelombang akan cenderung merambat melalui media dengan sifat kecepatan rambat gelombang yang tinggi, dan menghindari media dengan sifat kecepatan rambat gelombang yang rendah.

- *Hukum Huygens*

*Prinsip Huygen* menyatakan, bahwa setiap titik pada muka gelombang merupakan sumber bagi gelombang baru. Maka, posisi dari muka gelombang akan dapat ditemukan, dengan membentuk garis singgung permukaan untuk semua *wavelet* sekunder. *Prinsip Huygens* juga mengungkapkan suatu

mekanisme, dimana sebuah pulsa seismik akan kehilangan energinya seiring dengan meningkatnya kedalaman.

Metoda pendugaan seismik dapat dilakukan dengan memanfaatkan sifat pembiasan gelombang (*refraction seismic*), atau sifat pemantulan gelombang (*reflection seismic*). Namun cara pemantulan gelombang (*reflection seismic*), sering digunakan dalam berbagai eksplorasi minyak bumi dan panas bumi, oleh karena daya jangkau kedalamannya yang lebih tinggi.



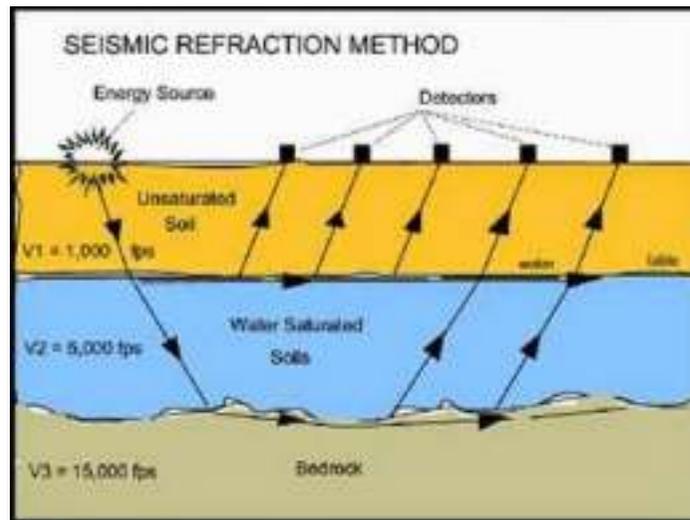
Sumber : <http://seputargeofisika.blogspot.com/2016/06/metode-seismik.html>

**Gambar 4.10.** : Prinsip Huygens

#### - Metoda Seismik Refraksi

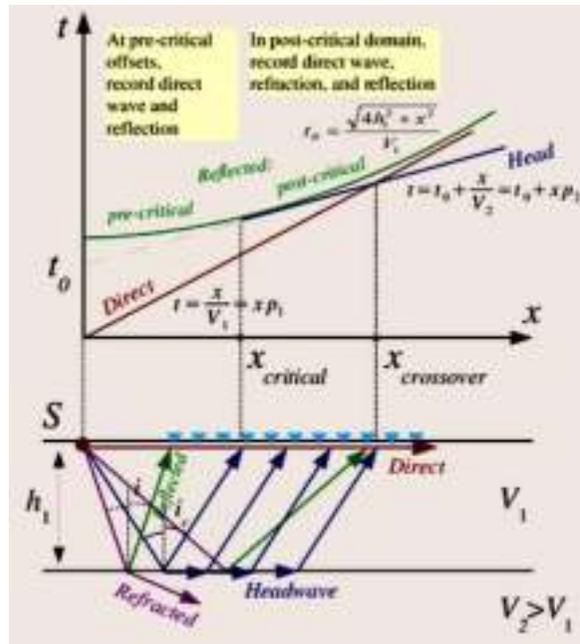
Prinsip metode *seismik refraksi* adalah perambatan gelombang yang mengikuti *hukum Snellius*. *Hukum Snellius* menjelaskan bahwa perambatan gelombang akan mengalami pembiasan (*refracted*), manakala memasuki medium dengan kepadatan atau rapat masa yang berbeda, dan kecepatan rambat gelombangnyapun meningkat pada medium yang lebih padat. Perubahan kecepatan rambat gelombang inilah yang diidentifikasi dalam metode *seismik refraksi*, yang kemudian di konversikan menjadi kedalaman batas medium yang berbeda tersebut.

Peralatan yang digunakan dalam pendugaan *seismik refraksi*, biasanya terdiri dari satu sumber gelombang, yang dapat berupa ledakan dinamit ringan atau sekedar pukulan palu, dan sejumlah detektor berupa *geophone* (biasanya 12 -24 channel yang dipasang pada interval 2 - 5 meter).



*Gambar 4.11. : Contoh skema perambatan gelombang pada metoda seismik refraksi*

Rekaman seismik (*shot gathers*) yang diterima oleh detektor adalah *first break*, yaitu sinyal pertama yang terekam oleh detektor sebagai penerima. Sinyal tersebut dapat berasal dari *direct wave* atau *head wave*. Dimana *direct wave* adalah gelombang yang merambat dari sumber melalui lapisan pertama, sedangkan *head wave* adalah gelombang yang melalui lapisan pertama dan merambat disepanjang lapisan kedua yang lebih padat. Demikian *head wave* berikutnya merambat sepanjang lapisan ketiga dan seterusnya, dengan catatan lapisan berikutnya lebih padat dari lapisan sebelumnya.



Sumber :

<http://ensiklopediseismik.blogspot.com/2010/11/seismik-refraksi.html>

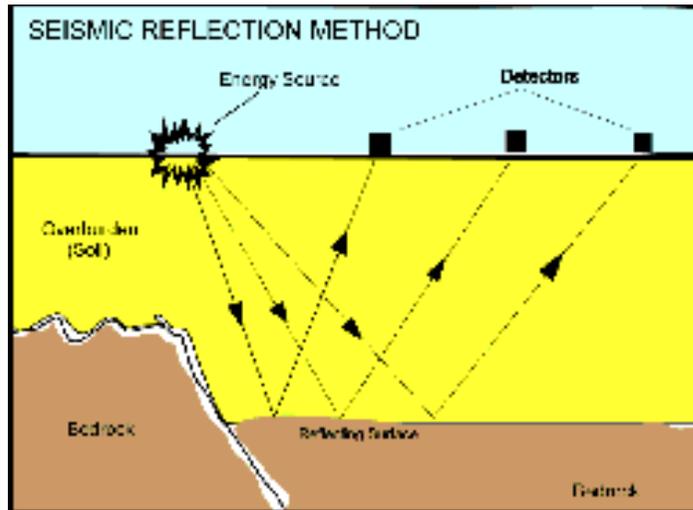
Gambar 4.12. : Contoh perhitungan dalam metoda seismik refraksi

Pendugaan *seismik refraksi* secara teknis cukup praktis, oleh karena peralatan yang digunakan bersifat portabel, sehingga mudah dibawa dan dipindahkan, namun terkendala dengan jangkauan kedalamannya yang relatif rendah.

- **Metoda Seismik Refleksi**

*Seismik refleksi* adalah metode pendugaan yang menggunakan prinsip pemantulan gelombang. Metode *seismik refleksi* ini merupakan metode geofisika aktif yang memanfaatkan sumber gelombang seismik buatan (dapat berupa ledakan, pukulan, dll). Gelombang seismik buatan tersebut akan merambat melalui medium tanah/batuan di bawah permukaan, dimana perambatan gelombang tersebut akan memenuhi hukum-hukum elastisitas, merambat ke-segala arah dan mengalami pemantulan maupun pembiasan, manakala melalui pelapisan medium yang berbeda, sebagai akibat dari adanya perbedaan sifat kecepatan

rambat. Pada jarak tertentu di permukaan, pergerakan gelombang seismik tersebut direkam sebagai fungsi waktu, yang kemudian di-konversikan dalam bentuk lapisan/struktur formasi batuan di bawah permukaan.



*Gambar 4.13. : Skema perambatan pantulan gelombang dalam metoda seismik refleksi*

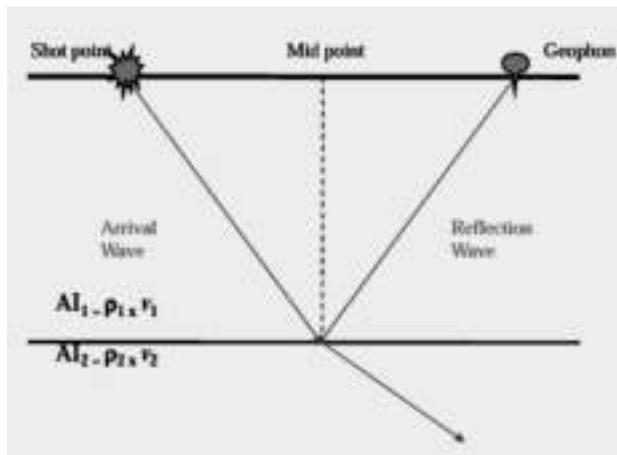
Bumi sebagai medium rambat gelombang seismik tersusun dari perlapisan batuan yang memiliki sifat fisis yang berbeda-beda, diantaranya sifat fisis kepadatan (*densitas*) batuan ( $\rho$ ) dan cepat rambat gelombang ( $v$ ). Sifat-sifat fisis tersebut akan mempengaruhi reflektivitas gelombang seismik yang melaluinya. Sehingga dengan berdasarkan konsep tersebut, maka kemudian dapat ditafsirkan perkiraan bentuk lapisan/struktur bawah permukaannya. Penerapan konsep tersebut, kemudian disebut sebagai *Impedansi Akustik (IA)*, dimana karakteristik akustik suatu batuan merupakan hasil perkalian dari *densitas* dan cepat rambat gelombang pada medium yang bersangkutan :

$$IA = \rho \cdot v$$

Maka, apabila terdapat dua lapisan batuan yang saling berbatasan dan memiliki nilai *impedansi akustik* berbeda, refleksi gelombang seismik dapat terjadi pada bidang batas tersebut, dengan nilai refleksi yang dinyatakan sebagai *Koefisien Refleksi (KR)* :

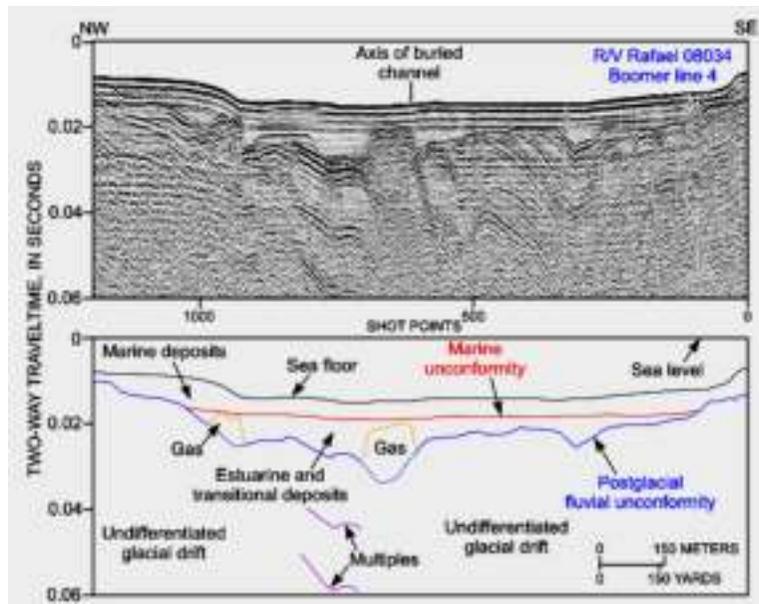
$$KR = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{IA_2 - IA_1}{IA_2 + IA_1}$$

*Koefisien refleksi (KR)* menunjukkan perbandingan amplitudo (energi) gelombang pantul dan gelombang datang, dimana semakin besar amplitudo seismik yang terekam maka semakin besar pula *koefisien refleksinya*. Metode *seismik refleksi* memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode geofisika lainnya. Dimana dengan metode ini dapat ditafsirkan dan dipetakan gambaran konfigurasi struktur geologi bawah permukaan secara lateral maupun vertikal, sehingga dapat digunakan dalam penyelidikan bawah permukaan yang berkedalaman tinggi, seperti dalam eksplorasi minyak bumi dan panas bumi.



Sumber : <https://geohazard009.wordpress.com/2015/02/16/metode-seismik-refleksi/>

**Gambar 4.14.** : Skema pemantulan gelombang seismik pada batas dua medium berbeda nilai IA nya.



Segment of Boomer high-resolution seismic-reflection profile and interpretation from RV Rafael cruise 08034 line 4 across the buried channel that extends seaward beneath Edgartown Harbor. Estuarine and transitional deposits fill the buried channel, and some of these deposits contain gas-charged sediment.

Sumber :

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/RV\\_Rafael\\_cruise\\_08034\\_line\\_4.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/RV_Rafael_cruise_08034_line_4.gif)

*Gambar 4.15. : Contoh profil seismik refleksi dan penafsirannya*

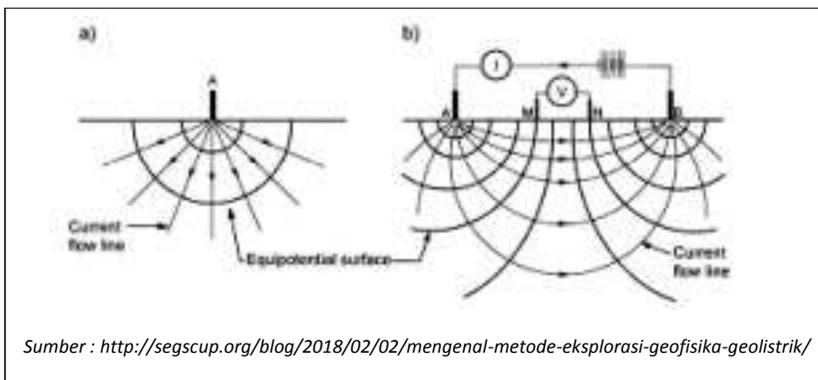
Metode *seismik refleksi* memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode geofisika lainnya. Dimana dengan metode ini dapat ditafsirkan dan dipetakan gambaran konfigurasi struktur geologi bawah permukaan secara lateral maupun vertikal, sehingga dapat digunakan dalam penyelidikan bawah permukaan yang berkedalaman tinggi, seperti dalam eksplorasi minyak bumi dan panas bumi.

#### **4.4.3. Pendugaan Geolistrik**

Metode *pendugaan geolistrik* merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk penyelidikan bawah permukaan, dengan memanfaatkan sifat aliran listrik dibawah permukaan bumi, dengan cara men-deteksinya di permukaan bumi. Yaitu dengan

mengukur beda potensial dan arus listrik yang terjadi, sebagai akibat injeksi arus listrik kedalam bumi melalui sepasang elektroda arus.

Cara kerja dari *pendugaan geolistrik* ini pada dasarnya adalah mengukur resistivitas atau tahanan jenis dari batuan, dimana resistivitas atau tahanan jenis merupakan besaran atau parameter yang menunjukkan tingkat hambatannya terhadap arus listrik. Batuan dengan resistivitas besar menunjukkan bahwa batuan tersebut sulit untuk dialiri oleh arus listrik, dan sebaliknya. Disamping itu metode *pendugaan geolistrik* juga dapat dimanfaatkan untuk menentukan sifat-sifat kelistrikan lainnya seperti potensial diri (*self potential*) dan medan induksi, sehingga sesuai untuk digunakan dalam eksplorasi panas bumi.



**Gambar 4.16.** : Diagram *pendugaan geolistrik* dengan memasukkan arus listrik kedalam tanah

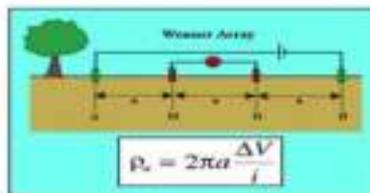
Resistivitas batuan diukur dengan cara memasukkan arus listrik kedalam tanah melalui 2 titik elektroda dipermukaan, dan 2 titik elektroda lainnya dipasang untuk mengukur beda potensial. Hasil *pendugaan geolistrik* dapat berupa peta sebaran tahanan jenis, baik secara *horizontal mapping* maupun *vertical sounding*.

Tabel 4.2. : Kisaran resistivitas berbagai jenis batuan (M.H.Looke – 2000)

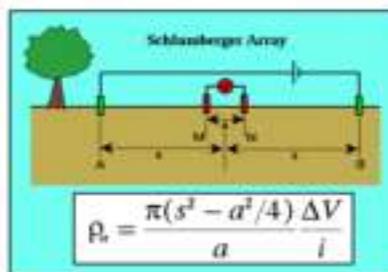
Material	Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	Conductivity (Siemen/m)
<b>Igneous and Metamorphic Rocks</b>		
Granite	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-4} - 2 \times 10^{-4}$
Basalt	$10^2 - 10^4$	$10^{-4} - 10^{-3}$
Slate	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 1.7 \times 10^{-3}$
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^3$	$4 \times 10^{-4} - 10^{-2}$
Quartzite	$10^2 - 2 \times 10^4$	$5 \times 10^{-4} - 10^{-2}$
<b>Sedimentary Rocks</b>		
Sandstone	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Shale	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Limestone	$50 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
<b>Soils and waters</b>		
Clay	1 - 100	0.01 - 1
Alluvium	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Groundwater (fresh)	10 - 100	0.01 - 0.1
Sea water	0.2	5
<b>Chemicals</b>		
Iron	$9.074 \times 10^4$	$1.102 \times 10^7$
0.01 M Potassium chloride	0.708	1.413
0.01 M Sodium chloride	0.843	1.185
0.01 M acetic acid	6.13	0.163
Xylene	$6.998 \times 10^{14}$	$1.429 \times 10^{-17}$

Tabel nilai tahanan jenis batuan (M.H. Loke -2000)

Sumber : <http://scienceofgeography.blogspot.com/2011/03/metode-interpretasi-nilai-tahanan-jenis.html>



Dimana faktor geometri (k) =  $2\pi a$



Faktor geometri (k) =  $\frac{\pi(s^2 - a^2)}{2a}$

Sumber :

<https://fitawidiyatun.wordpress.com/2013/01/08/metode-resistivitas/>

Gambar 4.17. : Konfigurasi Wenner dan Konfigurasi Schlumberger susunan elektroda dalam pendugaan geolistrik

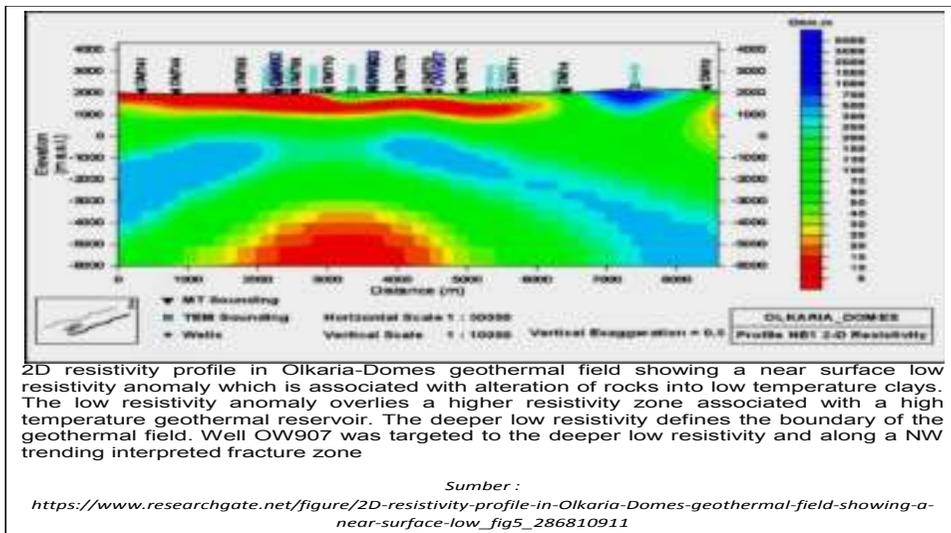
*Pendugaan geolistrik* dilakukan dengan konfigurasi susunan elektroda arus (A & B) dan elektroda potensial (M & N) sedemikian rupa dalam satu garis lurus. Namun dalam penyusunan jarak antar elektrodanya setidaknya dikenal dua macam konfigurasi, yaitu *Konfigurasi Wenner* dan *Konfigurasi Schlumberger*, yang masing-masing mempunyai perhitungan tersendiri dalam menghitung tahanan jenis batuan dan ketebalannya.

- *Konfigurasi Wenner*

Pengukuran ini dilakukan dengan cara menyusun titik-titik elektroda dengan jarak satu yang sama ( $AM = MN = NB = a$ ). Konfigurasi ini memiliki kelebihan dalam ketelitian pembacaan, oleh karena memiliki nilai eksentrisitas yang tidak terlalu besar ( $1/3$ ), dan menghasilkan sinyal yang baik. Namun kelemahan dari metode ini adalah tidak dapat men-deteksi homogenitas batuan dekat permukaan, sehingga dapat mempengaruhi hasil perhitungan.

- *Konfigurasi Schlumberger*

Pengukuran ini dilakukan dengan cara yang sama dengan Wenner, namun dengan jarak elektroda arus tidak sama dengan jarak elektroda potensial, dan dapat diubah. Nilai eksentrisitas dari konfigurasi ini berkisar antara  $1/3$  atau  $1/5$ , dan apabila sudah melewati batas eksentrisitas maka posisi jarak elektroda potensial dapat disesuaikan, agar nilai yang didapatkan masih dapat terbaca. Konfigurasi ini dapat men-deteksi adanya non-homogenitas lapisan batuan pada permukaan, dengan cara membandingkan nilai resistivitas semu ketika dilakukan shifting. *Konfigurasi schlumberger* biasanya digunakan untuk *sounding*, yaitu pengambilan data yang difokuskan secara vertikal.



**Gambar 4.18. :** Contoh profil resistivitas bawah permukaan pada lapangan panas bumi Olkaria-Domes

#### 4.4.4. Metode Magnetotelurik

Metode magnetotellurik merupakan metode geofisika eksplorasi dengan memanfaatkan medan listrik dan medan magnet alami yang terdapat di alam.

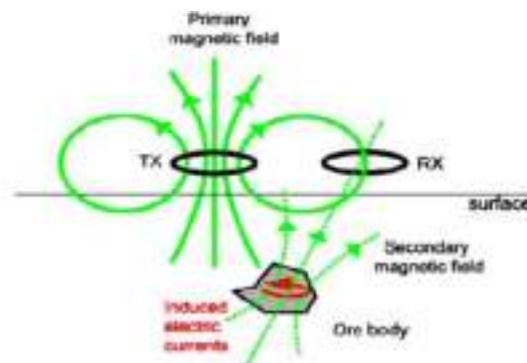
Metode magnetotelurik yang biasa disebut MT merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengetahui sebaran tahanan jenis batuan dibawah permukaan dengan memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Metode ini sering digunakan dalam eksplorasi

panas bumi oleh karena memiliki kemampuan penetrasi yang lebih dalam (>5 km), dan lebih sensitif terhadap lapisan konduktif apabila dibandingkan dengan metode geolistrik lainnya. Sumber alami medan elektromagnetik secara garis besar berasal dari tiga sumber yang dicirikan dari frekuensi sinyalnya, yaitu :

- Sinyal frekuensi tinggi (>1 Hz) berasal dari aktivitas petir.
- Sinyal frekuensi sedang (<1 Hz) berasal dari resonansi lapisan ionosfer bumi.
- Sinyal frekuensi rendah (<<1 Hz) berasal dari bintik hitam matahari (sun-spots).

Prinsip kerja *metoda magnetotelurik* didasarkan pada proses penjalaran gelombang dan induksi elektromagnetik yang terjadi pada anomali bawah permukaan.

Salah satu sumber yang dapat menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi dibawah 1 Hz adalah interaksi antara lapisan *magnetosphere* bumi dengan *solar wind*. Ketika mengenai lapisan *magnetosphere* bumi, proton dan elektron yang terkandung dalam plasma *solar wind* akan dibiaskan dengan arah yang saling berlawanan sehingga menghasilkan medan listrik. Variasi intensitas dan kecepatan dari *solar wind* ini menghasilkan gelombang elektromagnetik yang bervariasi terhadap waktu.



Prinsip Metode MT (Unsworth, 2006)

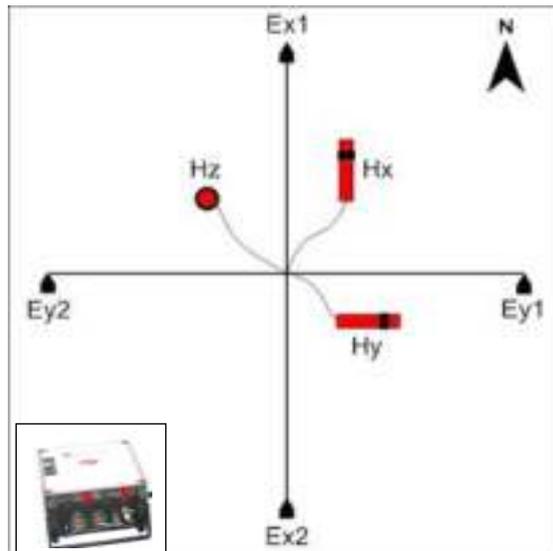
Sumber : Unsworth, Martyn, 2006, *Electromagnetic and Potential Field Methods*

**Gambar 4.19.** : Prinsip Metode Magnetotelurik (Unsworth, 2006)

Konsep gelombang elektromagnetik yang mendasari *metode magnetotelurik* ini adalah konsep persamaan *Maxwell*, khususnya dalam persamaan *Hukum Ampere* dan persamaan *Hukum Faraday* (Simpson, 2005).

Nilai medan yang terukur di permukaan akan memberikan informasi tentang konduktivitas batuan yang berada dibawah permukaan. Sehingga dengan mengukur medan listrik dan medan magnet secara bersamaan pada suatu lokasi, dan dengan menggunakan perbandingan dari nilai medan tersebut pada berbagai frekuensi, maka nilai konduktivitas batuan untuk setiap kedalaman dapat ditentukan.

Data yang diukur pada metode MT adalah perubahan medan listrik dan medan magnet pada arah tertentu. Kedua medan tersebut diukur pada arah x ( $Ex1$  &  $Ex2$ ) dan y ( $Ey1$  &  $Ey2$ ). Medan listrik diukur menggunakan *porous pot*, sedangkan medan magnet diukur menggunakan *coil*.



Sumber :

<https://gagethermalgo.blogspot.com/2017/03/akuisisi-mt-pengukuran-di-lapangan.html>

**Gambar 4.20. :** Diagram konfigurasi metoda magnetotelurik

Untuk mengukur medan magnet diperlukan sepasang *porous pot* yang dipasang terpisah pada jarak tertentu, dimana sensor akan mengukur beda potensial diantara keduanya. Nilai yang diperoleh dibagi dengan jarak antar *porous pot* dan didapatkan medan listrik. Satu pasang *porous pot* mengukur satu komponen medan listrik pada arah tertentu. *Poros pot* dipasang pada empat arah, utara, selatan, timur, dan barat. *Poros pot* pada arah utara-selatan berfungsi untuk mengukur  $Ex$ , sedangkan *porous pot* pada arah barat-timur berfungsi untuk mengukur  $Ey$ . Sedangkan untuk mengukur medan magnet ( $Hx$ ,  $Hy$ , dan  $H_z$ ), digunakan *Coil*.  $Hx$  dan  $Hy$  merupakan data medan magnet mendatar pada arah x dan y, sedangkan  $H_z$  untuk arah z (vertikal).

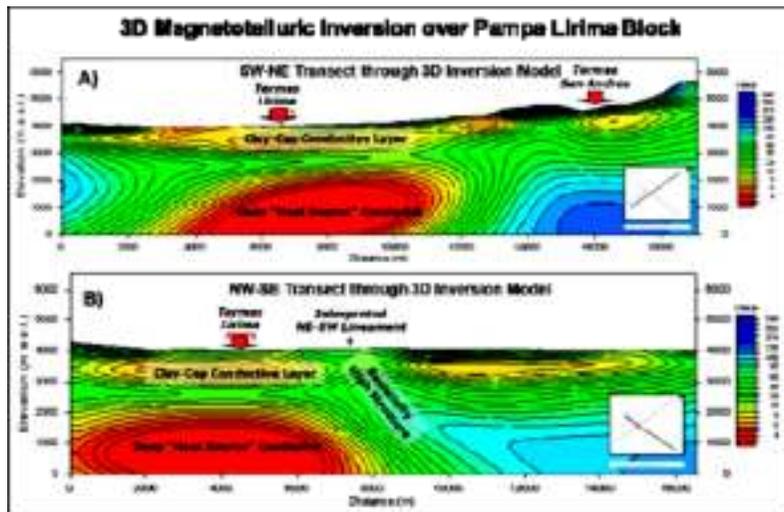
*Porous pot* berfungsi sebagai sensor medan listrik bumi, dimana medan listrik bumi tidak dapat diukur secara langsung. Maka untuk mendapatkan medan listrik bumi, perlu diukur beda potensial antara 2 titik. Beda tersebut potensial kemudian dibagi dengan jarak kedua titik tersebut hingga diperoleh besarnya medan listrik, atau secara matematis dapat ditulis sebagai :

$$E = \frac{V}{d}$$

Dimana E adalah medan listrik, V beda potensial, dan d adalah jarak antara 2 titik yang diukur.

*Coil* berperan sebagai perekam medan magnet mengikuti prinsip induksi, dimana arus listrik akan timbul ketika suatu kumparan mengalami paparan medan magnet yang berubah-ubah.

Hasil pengukuran *metoda magnetotelurik* (MT) yang diperoleh, kemudian dapat disajikan dalam bentuk peta tahanan jenis semu, peta tahanan jenis per kedalaman/per elevasi, dan penampang model tahanan jenis 2-D/3-D.



Magnetotelluric profile in the Pampa Lirima geothermal project

Sumber :

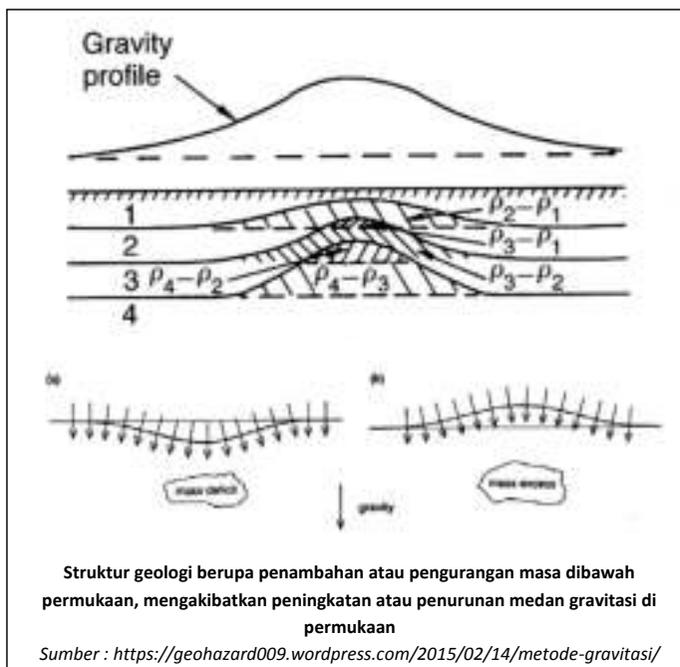
<https://www.researchgate.net/figure/3D-Magnetotelluric-inversion-results-showing-a-NE-SW-and-b->

**Gambar 4.21.** : Contoh profil magnetotelurik pada lapangan panas bumi Pampa Lirima

#### 4.4.5. Metoda Gravitasi

*Metode Gravitasi* adalah salah satu metode dalam survai geofisika, yang termasuk metode pasif, yaitu dengan mengukur perbedaan nilai medan gravitasi di permukaan bumi.

Medan gravitasi pada permukaan bumi sesungguhnya tidaklah homogen. Namun medan gravitasi dipengaruhi oleh masa jenis benda, termasuk batuan penyusun kerak bumi yang berada dibawah permukaan. Perbedaan pada masa jenis atau densitas batuan misalnya, akan menyebabkan perbedaan pula pada medan gravitasi dipermukaan bumi. Walaupun variasi medan gravitasi di permukaan bumi juga dipengaruhi oleh struktur geologi dibawah permukaan, dan juga oleh kondisi topografi/relief di permukaan bumi. Maka hal tersebut dimanfaatkan dalam survai geofisika metode gravitasi untuk menafsirkan kondisi geologi bawah permukaan, yaitu dengan mengamati variasi lateral medan gravitasi yang terekam oleh alat ukur gravitasi di permukaan, untuk kemudian ditafsirkan sebagai variasi lateral densitas batuan dibawah permukaan.



*Gambar 4.22. : Ilustrasi pengaruh struktur geologi bawah permukaan terhadap profil medan gravitasi di permukaan*

Maka metode ini dapat digunakan untuk men-deteksi struktur geologi bawah permukaan, batuan dasar (*basement*), kontak intrusi batuan beku/magma, rongga dalam masa batuan, endapan sungai purba, kandungan logam terpendam, dan sebagainya.

Walaupun nilai variasi medan gravitasi di permukaan bumi, sangat kecil dibandingkan dengan nilai gravitasi absolut, dengan teknologi alat ukur *Gravimeter* yang sangat sensitif dan presisi, perbedaan tersebut dapat di-deteksi. Namun metode ini juga memiliki sensitifitas tinggi terhadap perubahan vertikal.



LaCoste Romberg Relative Gravimetri

Sumber :

<https://hmgf.fmipa.ugm.ac.id/2015/12/16/metode-gravitasi/>

**Gambar 4.23. :** Contoh alat *Gravimeter*

Teori yang mendasari metode ini adalah *Hukum Gravitasi Universal NEWTON*, yang menyatakan bahwa gaya tarik ( $F$ ) antara dua titik masa ( $m_1$ ) dan ( $m_2$ ) yang berjarak ( $r$ ) dengan ( $G$ ) sebagai konstanta gravitasi, adalah :

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

Dan Hukum Gerak NEWTON, yang menyatakan gaya yang bekerja ( $F$ ) dipengaruhi oleh masa ( $m$ ) dan percepatan gravitasi ( $g$ ) :

$$F = mg$$

Dari kedua persamaan tersebut, maka dapat diperoleh persamaan percepatan gravitasi dipermukaan bumi ( $g$ ), sebagai berikut :

$$g = \frac{GM_E}{R_E^2}$$

Medan gravitasi merupakan konservatif, yang merupakan gradien dari suatu fungsi potensial skalar ( $U$ ). Mengingat ( $g$ ) sebagai medan vektor, maka :

$$\mathbf{g} = \frac{GM_E}{R_E^2} \mathbf{r}_1$$

Dan potensial gravitasi sebagai medan skalar ( $U$ ) menjadi :

$$U = \frac{Gm}{r}$$

Dimana potensial gravitasi ( $U$ ) merupakan usaha yang dilakukan oleh gravitasi dalam perpindahan suatu masa ke posisi ( $r$ ). Sehingga diperoleh hubungan percepatan gravitasi ( $g$ ) dengan potensial gravitasi ( $U$ ) sebagai berikut :

$$\mathbf{g} = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{Gm}{r^2}$$

Maka potensial gravitasi yang disebabkan oleh adanya distribusi masa menerus ( $m$ ) dengan densitas  $\rho$  ( $r_0$ ) dalam volume ( $V$ ), adalah :

$$U_P(r_1) = -G \int_V \frac{\rho(r_0) d^3r_0}{|r_1 - r_0|}$$

Dimana  $U_P(r_1)$  merupakan potensial medan gravitasi suatu titik (P) diluar benda.

Bagaimanapun, nilai percepatan gravitasi di permukaan bumi ber-variasi oleh karena dipengaruhi oleh :

- Distribusi masa di bawah permukaan (fungsi densitas  $\rho(r_0)$ ).
- Bentuk bumi, termasuk relief permukaannya.

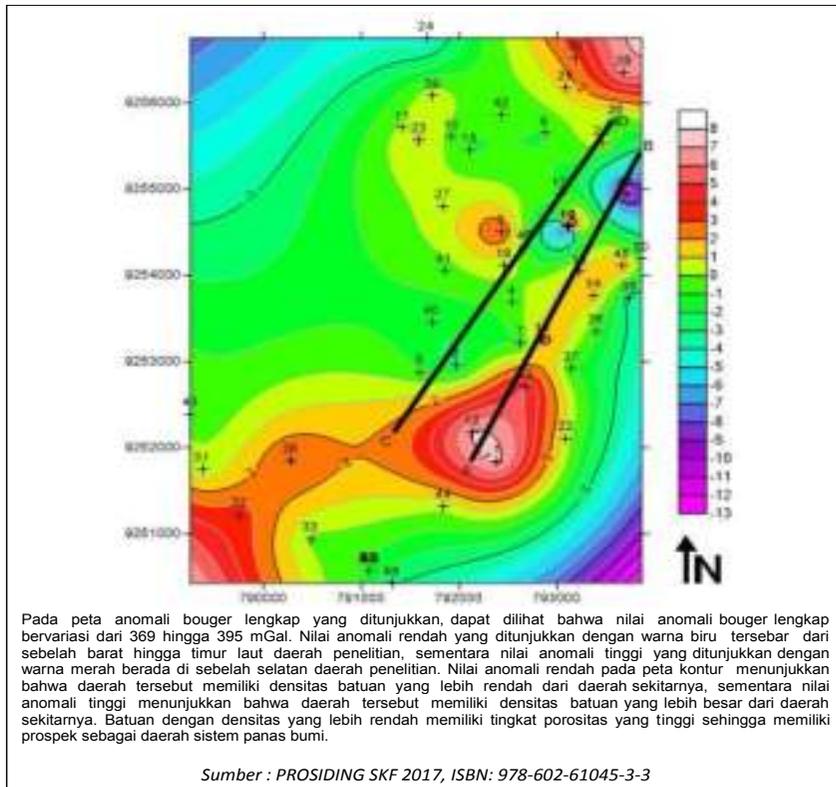
Akan selalu ada perbedaan antara medan gravitasi terukur dengan medan gravitasi teoritis, yang disebut sebagai *anomali gravitasi*, dimana medan gravitasi teoritis adalah medan gravitasi dipermukaan yang dipengaruhi oleh faktor-faktor non-geologis. Secara matematis, anomali medan gravitasi ( $\Delta g(x,y,z)$ ) merupakan selisih antara medan gravitasi terukur ( $g_{obs}(x,y,z)$ ) dengan medan gravitasi teoritis pada topografi ( $x,y,z$ ).

$$\Delta g(x,y,z) = g_{obs}(x,y,z) - g_{Teoritis}(x,y,z)$$

Survai geofisika *metoda gravitasi*, pada dasarnya adalah mengukur anomali-anomali gravitasi tersebut di permukaan, untuk mendeteksi penyebaran variasi medan gravitasi tersebut di permukaan secara lateral sebagai gambaran penyebaran bawah permukaannya. Maka, pengukuran anomali gravitasi biasa dilakukan melalui lintasan-lintasan dalam bentuk *grid*, dan hasilnya digambarkan dalam bentuk peta, yang menunjukkan variasi lateral dari anomali gravitasi.

Peta bawah permukaan hasil survai gravitasi adalah hasil akhir yang diperoleh. Disebut juga sebagai *peta anomali bouger*, yang merupakan peta gravitasi yang telah dikoreksi dengan ketinggian saat pengukuran dan gaya tarik efek medan. Peta tersebut merupakan peta distribusi medan gravitasi secara lateral, yang menggambarkan kondisi bawah permukaannya.

Dalam eksplorasi panas bumi, penyebaran anomali gravitasi dapat memberikan informasi umum tentang keberadaan komponen-komponennya, seperti keberadaan sumber panas dan lapisan reservoir.



**Gambar 4.24.** : Contoh peta Anomali Bouger daerah gunung Tangkuban Perahu, beserta dengan penafsirannya

#### 4.4.6. Metoda Geomagnetik

Metode geomagnetik merupakan salah satu metode penyelidikan geofisika, dengan mengukur medan magnet menggunakan suatu alat yang disebut *magnetometer*. Metode ini merupakan salah satu metode geofisika yang sederhana dalam pengambilan data, yang umumnya digunakan dalam eksplorasi mineral logam. Namun metode ini juga sering digunakan untuk survei pendahuluan pada eksplorasi minyak bumi, panas bumi, dan untuk keperluan pemantauan gunung api. Hal tersebut oleh karena tingkat akurasi pengukurannya yang relatif tinggi, instrumentasi dan pengoperasian yang relatif sederhana, mudah, cepat, dan koreksi pembacaan praktis praktis tidak perlu dilakukan.

Sifat magnetik bumi pertama kali diteliti oleh *Sir William Gilbert* (1540-1603), dimana ia mengamati bahwa medan magnet bumi ber

arah utara - selatan, ekuivalen dengan sumbu rotasi bumi. Penemuan tersebut kemudian dikembangkan oleh *Van Wrede (1843)* untuk melokalisasi endapan bijih besi, dengan mengukur variasi magnet di permukaan bumi. Hasil penelitiannya kemudian dibukukan oleh *Thalen (1879)*, dalam bukunya "*The Examination of Iron Ore Deposits by Magnetic Measurement*", yang kemudian menjadi pionir dalam pengukuran magnetisasi bumi (*geomagnet*)

Dalam *metode geomagnetik*, bumi diyakini sebagai batang magnet raksasa, yang menghasilkan medan magnet utama bumi. Anomali magnetik terjadi oleh karena adanya variasi medan magnet ke arah spasial secara regional yang diakibatkan oleh bahan-bahan magnetik. Pola anomali ini dicirikan oleh pergantian antara anomali positif-negatif dan sejajar dengan sumbu pemekarannya. Pola ini dikenal dengan sebutan "*zone of striped magnetic anomalies*".

Batuan yang merupakan material pembentuk kerak bumi memiliki sifat-sifat yang dapat diprediksi dan digunakan untuk membedakan satu dengan yang lainnya. Salah satu sifatnya adalah kemagnetan batuan, yang dipengaruhi oleh kandungan mineral di dalamnya. Kerentanan (*susceptibility*) magnet suatu batuan, dalam hal ini merupakan nilai magnetis suatu batuan terhadap pengaruh medan magnet, yang pada umumnya berkaitan dengan kandungan mineral dan oksida besi di dalamnya. Dimana semakin besar kandungan mineral magnetik dalam batuan misalnya, akan semakin tinggi nilai kerentanannya.

Mineral-mineral bahan pembentuk batuan sendiri mempunyai karakteristik magnetik sebagai berikut :

- **Diamagnetik**

Dalam batuan diamagnetik atom-atom pembentuk mineral batuan mempunyai kulit elektron berpasangan, dan mempunyai *spin* yang berlawanan pada tiap pasangannya. Sehingga apabila mendapat induksi medan magnet dari luar orbitnya, elektron tersebut akan menghasilkan medan magnet lemah yang melawan medan magnet luar tersebut. Mineral-mineral ini mempunyai kerentanan negatif, kecil dan tidak terpengaruh oleh medan magnet dari luar.

Contoh : Bismuth, Grafit, Gypsum, Marmer, Kuarsa, Garam.

- *Paramagnetisme*

Dalam batuan paramagnetik terdapat atom-atom dengan kulit elektron terluar yang belum jenuh, yaitu terdapat elektron dengan *spin* tidak berpasangan, dan mengarah pada arah *spin* yang sama. Maka apabila mendapat induksi medan magnet dari luar orbitnya, *spin* tersebut menghasilkan medan magnet yang searah sehingga memperkuatnya. Akan tetapi momen magnetik yang terbentuk ter-orientasi secara acak oleh agitasi thermal, sehingga mempunyai kerentanan positif dengan nilai sedikit lebih besar dari satu, namun nilai kerentanannya tergantung pada temperatur.

Contoh : Piroksen, Olivin, Garnet, Biotit, Amfibolit dll.

- *Ferromagnetik*

Dalam batuan yang bersifat ferromagnetik, terdapat atom-atom dengan kulit elektron yang hanya di isi oleh satu elektron, sehingga mudah ter-induksi oleh medan magnet dari luar. Keadaan tersebut dapat diperkuat dengan adanya kelompok-kelompok atom dengan *spin* searah, yang membentuk dipole-dipole magnet yang ber arah sama. Maka batuan-batuan ferromagnetik mempunyai kerentanan positif lebih besar dari satu, namun nilainya dipengaruhi oleh temperatur.

Contoh : Besi, Nikel, Kobalt.

- *Antiferromagnetik*

Dalam batuan yang bersifat antiferromagnetik domain-domain seperti pada batuan ferromagnetik menghasilkan dipole magnetik yang saling berlawanan arah, sehingga momen magnetik secara keseluruhan menjadi sangat kecil. Batuan antiferromagnetik yang mengalami cacat kristal akan mengalami medan magnet kecil, dengan kerentanan seperti pada batuan paramagnetik, namun nilainya naik sampai dengan titik curie, untuk kemudian turun kembali mengikuti *hukum curie-weiss*.

Contoh : Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

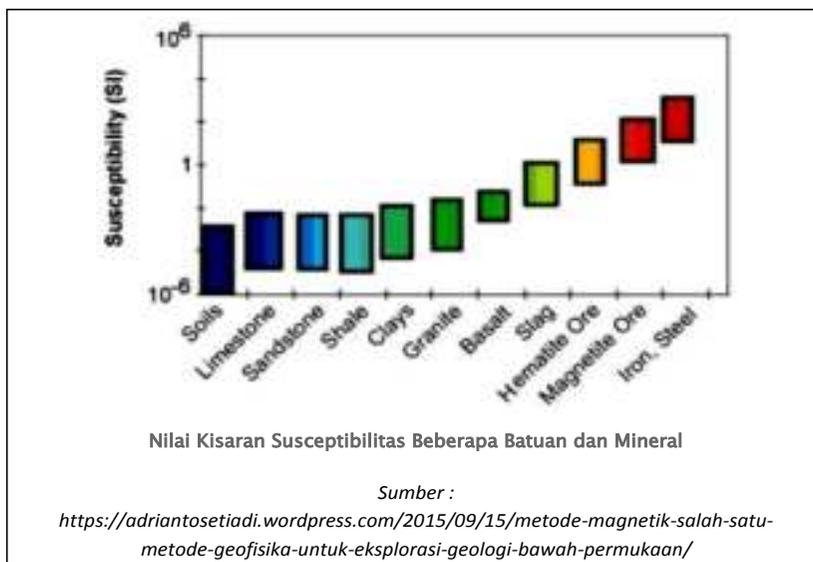
- Ferrimagnetik

Pada batuan ferrimagnetik domain-domain tersebut juga bersifat saling antiparalel, namun jumlah dipol pada masing-masing arah tidak sama sehingga masih mempunyai resultan magnetisasi yang cukup besar, dengan kerentanan tinggi dan tergantung pada temperatur pula.

Contoh : Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ), Pirhotit ( $\text{FeS}$ ).

Prinsip kerja *metoda geomagnetik* adalah meng-identifikasi tingkat kemagnetan suatu material batuan yang ter-induksi oleh medan magnet bumi, yang tentunya dipengaruhi kandungan magnetik didalamnya. Sehingga berbagai jenis batuan dapat dibedakan berdasarkan perbedaan tingkat kemagnetannya.

*Metode geomagnetik* didasarkan pada pengukuran variasi intensitas magnetik di permukaan bumi, yang disebabkan oleh variasi distribusi (anomali) benda ter-magnetisasi dibawah permukaan bumi. Variasi intensitas medan magnetik yang terukur kemudian ditafsirkan dalam bentuk distribusi bahan magnetik dibawah permukaan, untuk kemudian dijadikan sebagai dasar bagi pendugaan geologi bawah permukaan. Pengukuran intensitas medan magnetik itu sendiri dapat dilakukan di darat, laut maupun udara.



Gambar 4.25. : Daftar nilai kerentanan magnet (susceptibility) berbagai batuan.

Dalam eksplorasi panas bumi misalnya, metoda magnetik akan dapat memberikan gambaran tentang kondisi reservoir panas bumi. Yaitu dengan menafsirkan secara kuantitatif keberadaan suatu badan intrusi, dimana panas bumi sering ber-asosiasi dengan aktivitas vulkanik. Kerentanan magnetik panas bumi sendiri dipengaruhi oleh variasi batuan yang terpengaruh oleh panas. Sehingga, dengan mengetahui tingkat kerentanan magnetik ( $k$ ) batuan, akan dapat diperoleh informasi tentang sumber panas bumi. Misalnya larutan hidrotermal dapat menimbulkan perubahan sifat kemagnetan batuan, dimana alterasi hidrothermal pada batuan dapat menurunkan bahkan menghilangkan sifat kemagnetannya, sehingga dapat ditafsirkan kaitannya dengan manifestasi panas bumi.

Kelebihan *metode geomagnetik* dalam hal ini adalah :

- Metode ini sensitif terhadap perubahan vertikal, sehingga umumnya digunakan untuk mempelajari tubuh intrusi, batuan dasar, urat-urat hidrothermal yang kaya akan mineral ferromagnetik, dan struktur geologi. Umumnya batuan yang kaya akan mineral ferromagnetik ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), akan memberikan nilai kerentanan magnetik yang kontras terhadap batuan sekelilingnya.
- Mineral-mineral ferromagnetik akan kehilangan sifat kemagnetannya apabila terpanasi mendekati temperatur *Curie*. Hal ini akan memberikan informasi penting dalam eksplorasi lapangan panas bumi.

Pengukuran geomagnetik dilakukan dengan menggunakan alat yang dinamakan *Proton Precision Magnetometer (PPM)*.



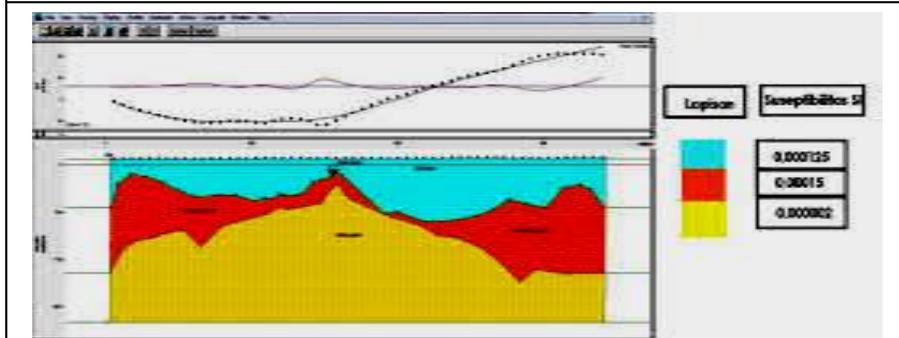
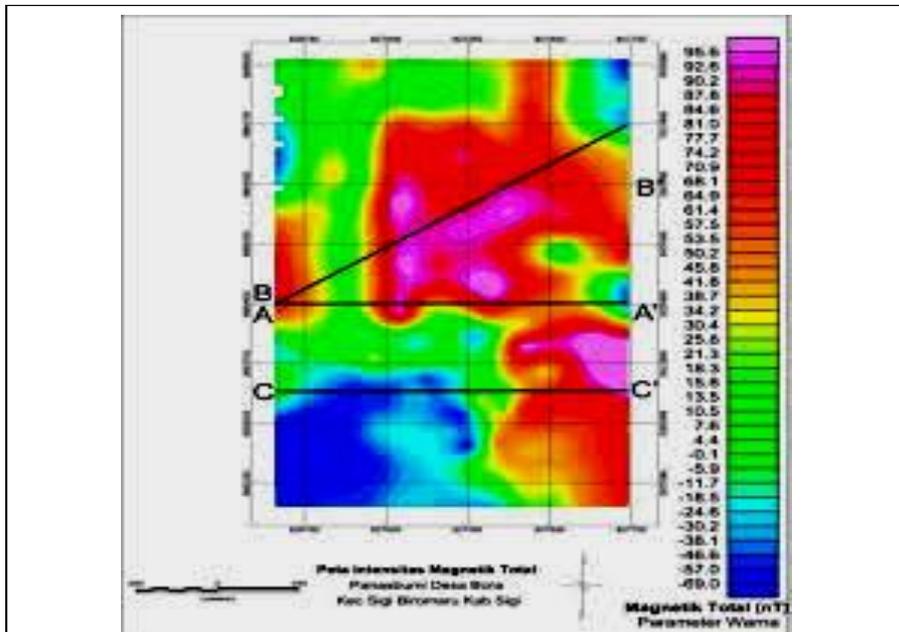
Sumber : <http://diopangulu.blogspot.com/2017/04/metode-geomagnetik.html>

**Gambar 4.26.** : Contoh peralatan magnetometer portable

Namun alat ukur medan magnet tersebut akan merekam semua data medan magnet yang ada, termasuk medan magnet utama bumi beserta variasi medan magnet bumi yang berkaitan dengan kerentanan magnetik batuan, medan magnet sisa dan variasi harian yang terkait dengan penyinaran matahari, serta faktor kemagnetan yang dipengaruhi oleh topografi. Sehingga, oleh karena yang diperlukan adalah data variasi medan magnet yang berkaitan dengan kerentanan magnetik batuan (dalam satuan *nT*- *nano Tesla*), maka hasil rekaman *magnetometer* dalam hal ini masih harus di koreksi. Informasi dari *IGRF (International Geomagnetic Reference Field)*, dalam hal ini dapat digunakan sebagai nilai medan magnet utama bumi, yang ber sama-sama dengan faktor kemagnetan sisa, faktor penyinaran matahari dan faktor topografi, dapat dimasukkan sebagai faktor koreksi.

Survai geomagnetik dilakukan dengan pengukuran kerentanan magnetik (*magnetic susceptibility*) dipermukaan, pada titik-titik pengukuran dalam lintasan-lintasan atau *grid*. Hasil pengukurannya, kemudian dituangkan dalam bentuk peta kontur yang menunjukkan konfigurasi lateral kerentanan magnetik, dan profil kerentanan magnetik secara vertikal. Kemudian dipadukan dengan peta geologi yang tersedia atau hasil pengamatan di permukaan, maka dapat ditafsirkan konfigurasi geologi secara keseluruhan, meliputi distribusi penyebaran batuan dan struktur geologinya.

Dalam eksplorasi panas bumi, konfigurasi kerentanan magnetik yang dihasilkan dapat digunakan untuk menafsirkan komponen-komponen panas bumi yang terkait, seperti sumber panas, dan batuan reservoir beserta lapisan penudungnya.

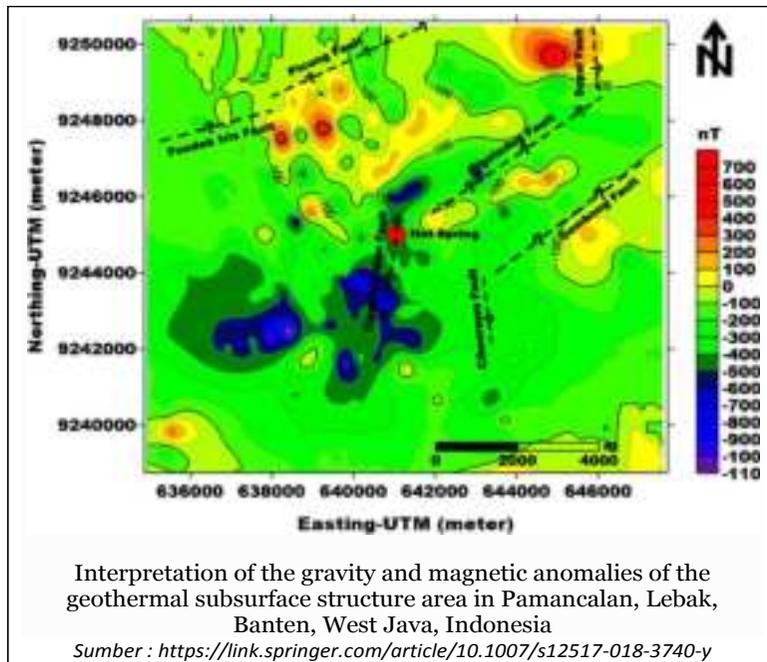


**PROFIL C – C'**

Batuan penyusun lokasi penelitian, pada lapisan pertama batuan alluvium pada kedalaman 0-1000 meter dibawah permukaan dengan nilai suseptibilitasnya 0,00001 SI, pada lapisan kedua berupa lempung pada kedalaman 70- 1800 meter dengan nilai suseptibilitas 0,000250 SI, pada lapisan ketiga adalah batuan penyusun reservoir panas bumi yaitu batupasir yang berada pada kedalaman 600 – 3000 meter dibawah permukaan dengan nilai suseptibilitasnya 0,000002 SI.

Sumber :  
*Jurnal Universitas Tadulako, Vol. 16 No. 2 Juli – Desember 2017.*  
 ISSN : 1412-2375

*Gambar 4.27. : Contoh pemodelan Reservoir Panas bumi menggunakan Data Magnetik di Desa Bora, Kabupaten Sigi*



*Gambar 4.28. : Contoh peta geomagnetik beserta penafsirannya, di daerah Panas Bumi Pamacalan-Lebak, Banten.*

## 4.5. Perhitungan Potensi Panas Bumi

Lapangan panasbumi di-definisikan 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 meng-indikasikan terdapatnya panas dan zona permeabel yang dapat langsung di-eksploitasi. Tanda-tanda keberadaan sumber panasbumi juga dapat dilihat langsung dipermukaan, baik diakibatkan oleh tekanan maupun *ebulisi* (pendidihan), yang disebut sebagai manifestasi.

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

- Sistem hidrothermal konvektif.
- Sistem geopressured.
- Sistem sedimentary.

- Sistem radiogenik.
- Sistem hot dry rock.

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

- Reservoir panasbumi bertemperatur rendah, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur < 125°C.
- Reservoir panasbumi bertemperatur sedang, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur 125-225°C.
- Reservoir panasbumi bertemperatur tinggi, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur >225°C.

Sistem panas bumi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis entalpinya, yaitu sistem entalpi rendah, sistem entalpi sedang, dan sistem entalpi tinggi, namun yang biasa digunakan sebagai dasar perhitungan adalah pengelompokkan reservoir berdasarkan temperatur.

### **Klasifikasi Potensi Panasbumi**

Berdasarkan Standar Nasional Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia tahun 1999, No. SNI 03 - 5012 - 1999, potensi energi panas bumi di Indonesia dibagi menjadi 5 (lima) kelas, yaitu :

1. *Sumberdaya Spekulatif*, yaitu adalah potensi yang besar energinya didasarkan pada studi literatur atau penyelidikan pendahuluan.
2. *Sumber daya Hipotetis*, yaitu besarnya energi yang tersimpan pada suatu daerah setelah diperkirakan dengan ilmu kebumiharian atau pengujian sumur.
3. *Cadangan Terduga (probable)*, dimana estimasi potensi energinya didasarkan pada hasil penyelidikan rinci.
4. *Cadangan Mungkin (possible)*, yaitu dimana estimasi potensi energi didasarkan pada hasil penyelidikan rinci dan telah di-identifikasi dengan bor eksplorasi (*wildcat*) serta hasil pra-studi kelayakan.
5. *Cadangan terbukti (proven)*, yaitu dimana estimasi potensi energi didasarkan pada hasil penyelidikan rinci, diuji dengan sumur eksplorasi, delineasi dan pengembangan serta dilakukan studi kelayakan.

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 :

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

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 MWth, 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_f$  : temperatur akhir ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_s$  : temperatur permukaan ( $^{\circ}\text{C}$ )

$H_{ei}$  : 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 (MWth)

$H_{el}$  : 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )

# 5

## TEKNOLOGI PANAS BUMI

Panas bumi pada awalnya banyak dimanfaatkan secara langsung untuk memenuhi berbagai kebutuhan, seperti untuk 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).

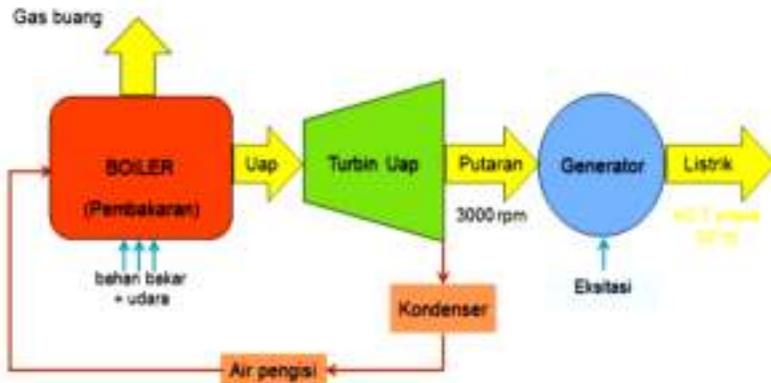
Prinsip kerja PLTP pada dasarnya sama dengan PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap). Akan tetapi yang digunakan pada PLTP adalah uap panas bumi alamiah yang telah dipisahkan dari fluida cair yang berasal dari sumber panas dalam perut bumi, sehingga biaya operasionalnya menjadi lebih murah oleh karena tidak 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. Namun uap yang keluar masih tercampur dengan air sehingga perlu dilakukan pemisahan melalui separator. Dari sini uap kering yang dihasilkan akan dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator pembangkit listrik, sementara air yang terpisah (*brine*) dialirkan kedalam sumur injeksi. Uap bekas yang keluar dari turbin kemudian dialirkan menuju kondensor untuk dijadikan air kembali. Air dari kondensor ini akan didinginkan pada tangki pendingin melalui sistem pendinginan udara untuk selanjutnya di-injeksikan kedalam sumur injeksi ber-sama sama dengan *brine*.

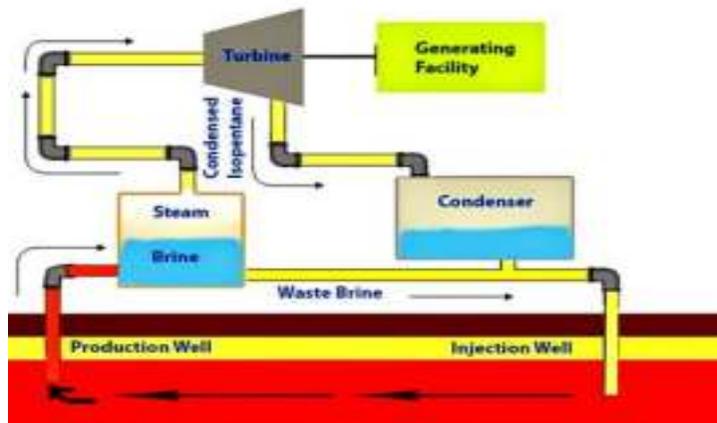
## PRINSIP KERJA PLTU



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

## PRINSIP KERJA PLTP

<http://mechbankaliventioner.blogspot.com>



Gambar 5.1. : 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.

## 5.1. Teknologi 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

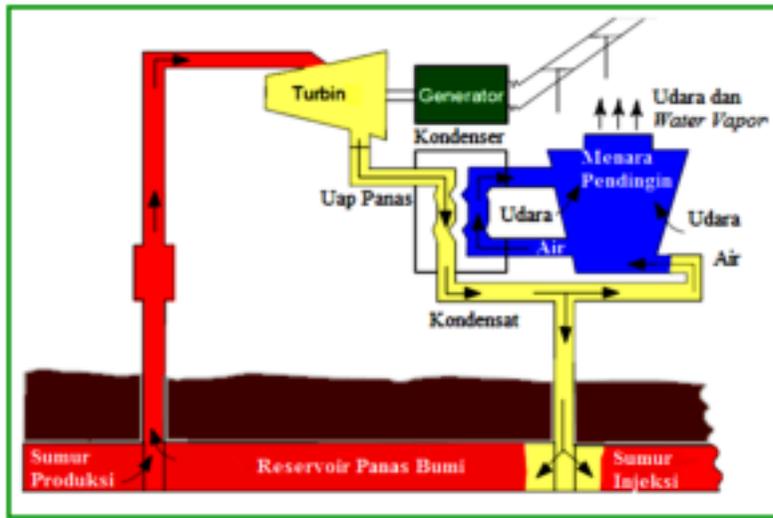
fluida alamiah dari batuan reservoir panas bumi secara langsung, untuk menggerakkan turbin pembangkit tenaga listrik. Walaupun teknologi ini kemudian disempurnakan dengan penambahan unit seperator, untuk memisahkan fraksi cair dari fraksi uap dari fluida panas bumi, oleh karena bagaimanapun dalam teknologi 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*.

### **5.1.1. 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.

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.



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

**Gambar 5.2.** : Diagram Pembangkit Uap Kering (dry steam)

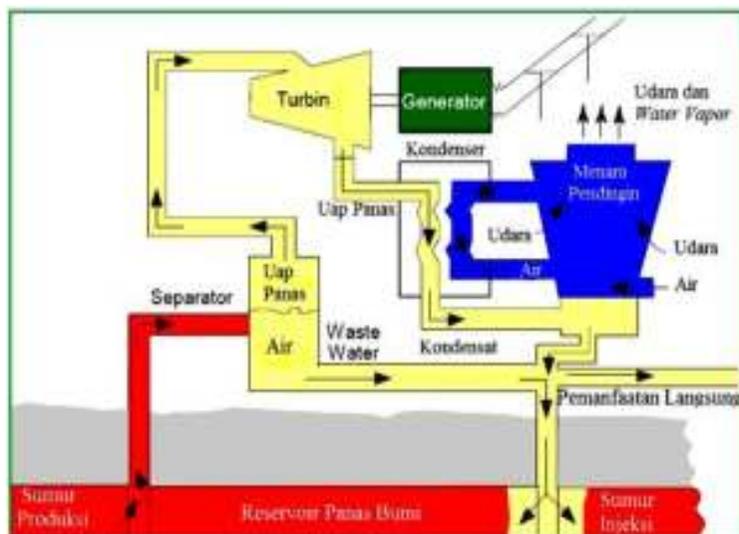
Jenis teknologi uap kering, sesuai untuk diterapkan pada PLTP berkapasitas kecil, bersuhu tinggi, dengan kandungan fluida uap dalam batuan reservoir yang tinggi pula, seperti pada contoh PLTP Kamojang (1 X 250 KW) dan PLTP Dieng (1 X 200 KW). Sedangkan PLTP jenis uap kering yang berkapasitas lebih besar, 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.

### 5.1.2. Pembangkit Flash 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 diberbagai lapangan panas bumi, oleh karena kandungan fluida cair yang umumnya men-dominasi 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*.

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 meng-aktifkan generator yang kemudian menghasilkan tenaga listrik. Sedangkan sisa fluida cair yang tidak terpakai (*brine*) dimasukkan kembali kedalam reservoir melalui sumur injeksi (*injection well*).

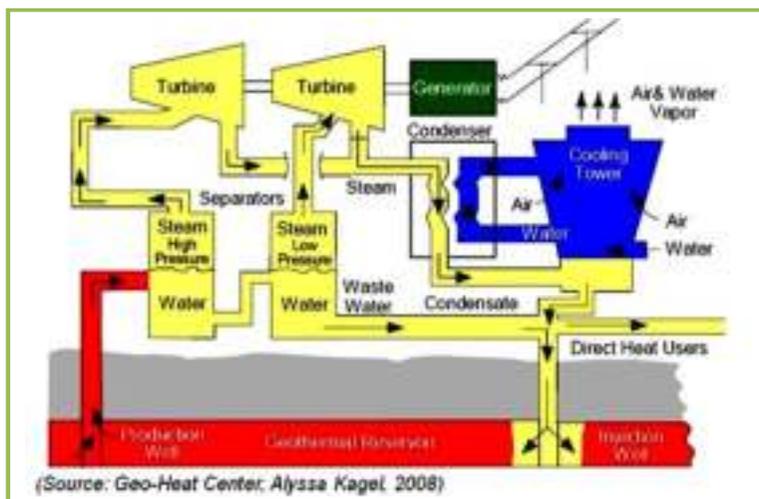


Sumber : <https://ecanblue.wordpress.com/2014/01/09/pemanfaatan-langsung-panas-bumi>

**Gambar 5.3. :** Diagram pembangkit single flash steam

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*, dikembangkan menjadi sistem *double 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 5.4. : 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.

## 5.2. Pengembangan Teknologi Panas Bumi (*Enhanced Geothermal System*)

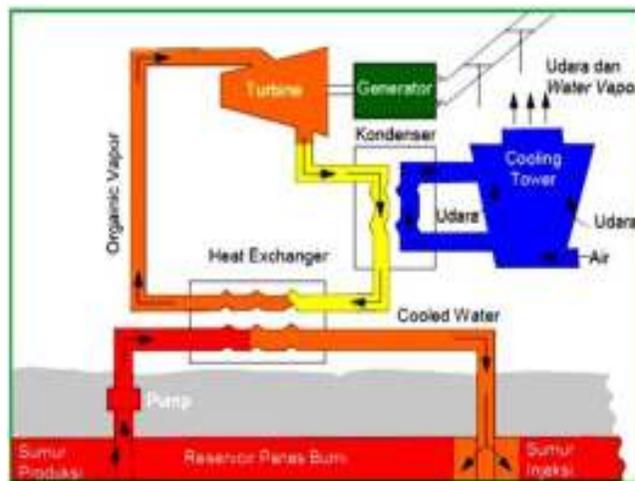
Pemanfaatan teknologi panas bumi untuk pembangkitan tenaga listrik secara konvensional, sejauh ini masih sangat tergantung pada kelengkapan komponen-komponen penunjangnya, seperti sumber

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 menyiasati dan melengkapinya. Yaitu, yang saat ini telah mulai dikembangkan, adalah teknologi pembangkit siklus biner (*binary cycle*), dan teknologi *fracking*.

### 5.2.1. 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 5.5.** : 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

(*productuion 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 5.1.** : Berbagai jenis fluida kerja pembangkit panas bumi siklus biner.

Fluid	Formula	$T_c$ °C	$T_c$ °F	$P_c$ MPa	$P_c$ lb/in <sup>2</sup>	$P_c @$ 300 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 di-operasikan 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.

### 5.2.2. 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 di-ekstraksi 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 permeabilitas batuan, dan 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 salah satu cara peningkatan kapasitas sistem panas bumi tersebut, dilakukan dengan teknologi *fracking* atau *hydraulic fracturing*.

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 dilakukan untuk 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.

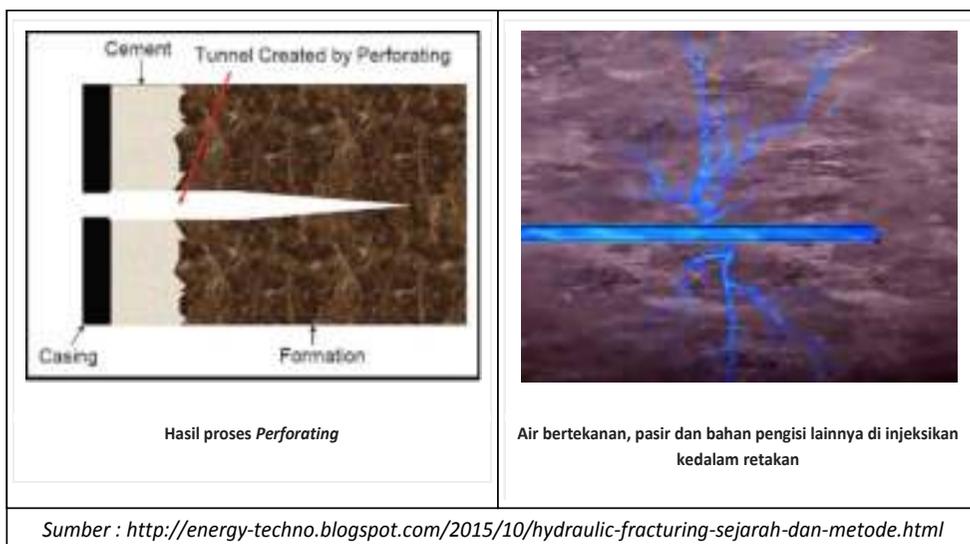
Teknik *fracking* atau yang pada awalnya dikenal sebagai *fracturing methods* sudah dikenal sejak tahun 1860-an di Amerika Serikat. Pada awalnya dilakukan untuk stimulasi sumur minyak atau air tanah dimana dinamit atau peledakan *nitroglycerin* digunakan untuk meningkatkan produksi minyak dan gas bumi.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

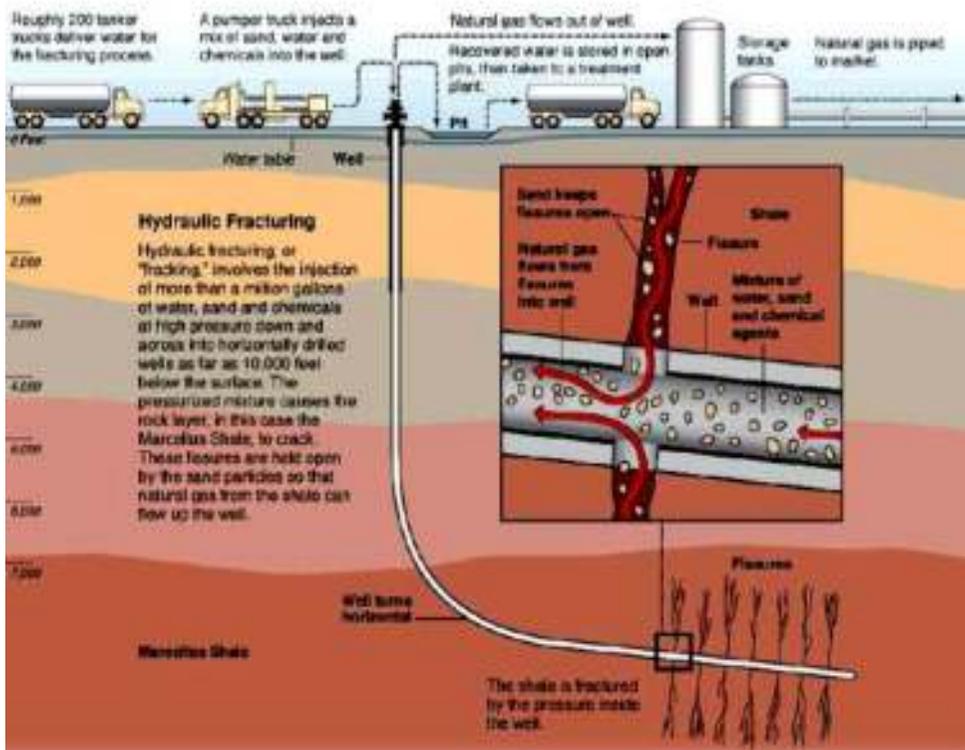
Di Uni Soviet, *hydraulic fracturing* pertama kali dilakukan pada 1952. Negara-negara lain di Eropa dan Afrika Utara yang kemudian menerapkan teknik ini antara lain Norwegia, Polandia, Republik Ceko, Yugoslavia, Hungaria, Austria, Perancis, Italia, Bulgaria, Rumania, Turki, Tunisia, dan Aljazair. Tahun 2013, *hydraulic fracturing* secara massal 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 5.6. :** Proses *hydraulic fracturing*

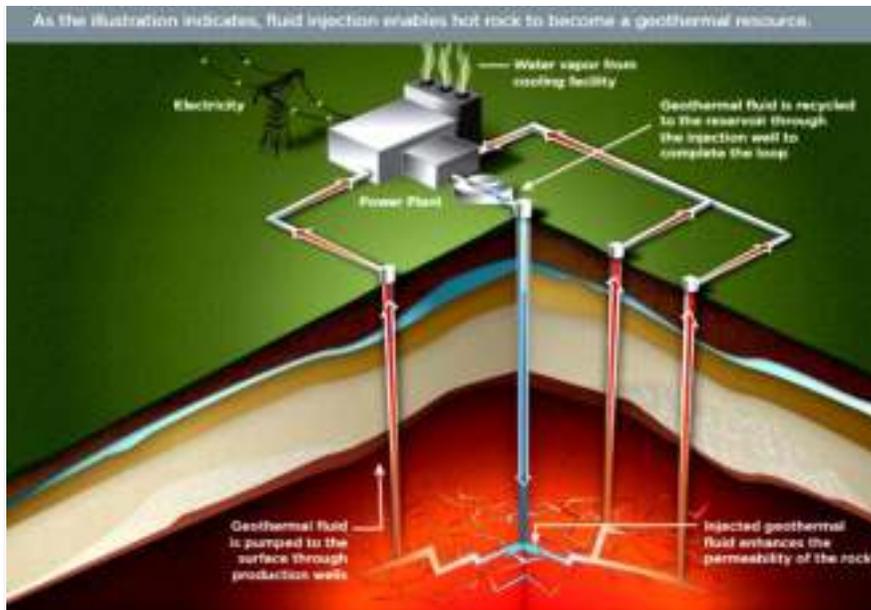


Hydraulic Fracturing Visualisation

Sumber : <http://energy-techno.blogspot.com/2015/10/hydraulic-fracturing-sejarah-dan-metode.html>

**Gambar 5.7. :** 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.



As the US DOE illustrates, fluid injection allows previously untapped hot rocks to become a geothermal source (Image: US Department of Energy)

Sumber : <http://www.impacthound.com/energy-hydraulic-fracking-for-geothermal-energy/>

*Gambar 5.8. : Diagram pemanfaatan tenaga panas bumi dengan teknologi Fracking*

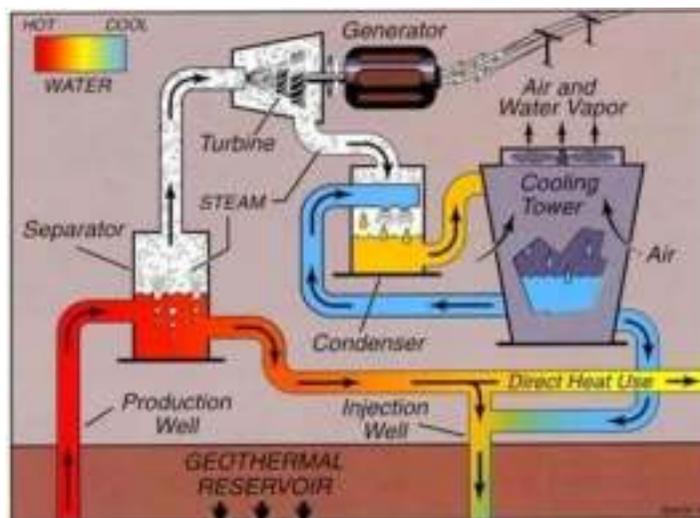
Maka, fungsi teknologi *fracking* dalam *Enhanced Geothermal System (EGS)*, adalah :

- 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.

### 5.3. Proses Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi



Sumber : <https://upseexam.blogspot.com/2014/03/power-plant-layouts.html>

**Gambar 5.9.** : Bagan alir prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Proses produksi tenaga listrik pembangkit listrik tenaga panas bumi, dimulai dari ekstraksi *fluida* panas bumi dari sumur-sumur produksi (*production well*), dialirkan ke tangki kolektor (*steam receiving header*), terutama apabila uap panas bumi dihasilkan dari beberapa sumur produksi. Dari *steam receiving header*, uap panas bumi dialirkan ke turbin melalui instalasi *separator* untuk memisahkan uapnya dari *fluida* cair. Walaupun adakalanya *separator* tidak diperlukan manakala uap yang dihasilkan merupakan uap kering (*dry steam*).

*Fluida* cair (*geothermal brine*) yang telah terpisahkan kemudian dialirkan untuk dipompakan kembali kedalam bumi melalui sumur

injeksi (*injection well*), sedangkan uap kering yang telah terpisah dialirkan ke turbin. Namun uap dilalukan melalui *demister* terlebih dahulu sebelum memasuki turbin, untuk membersihkannya dari butiran-butiran air dan partikel-partikel lainnya yang masih tersisa. Uap yang sudah bersih menggerakkan turbin yang kemudian memutar generator untuk menghasilkan tenaga listrik.

Uap yang telah terpakai untuk menggerakkan turbin kemudian di kondensasikan dalam kondensor, untuk kemudian uap yang telah ter kondensasi menjadi air dipompakan kembali kedalam bumi melalui sumur injeksi (*injection well*).

#### **5.4. Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi**

Semua komponen yang terkait proses pembangkitan tenaga listrik panas bumi terbentang mulai dari sumur produksi (*production well*), bangunan pembangkit tenaga listrik (*power house*) hingga berakhir pada sumur injeksi (*injection well*). Sebagian diantaranya berada didalam bangunan (*indoor*) dan Sebagian lainnya berada diluar bangunan (*outdoor*).

##### **- Sumur Produksi (Production Wells)**

Sumur produksi merupakan komponen utama yang berfungsi mengalirkan uap dari reservoir di bawah permukaan ke permukaan. Sumur produksi panas bumi yang umumnya *outdoor*, biasanya memiliki kedalaman sekitar 2000 - 2500 umumnya merupakan sumur bor vertical, walaupun terkadang ada pula yang dibor secara miring (*directional well*). Sepanjang lubang sumur bor diberi selubung semacam pipa baja yang disebut casing, yang direkatkan pada formasi batuan di sampingnya menggunakan semen khusus. Untuk sumur-sumur berukuran besar (*big hole*), diameter casing biasanya sebesar 13<sup>3</sup>/<sub>8</sub> inci.



Sumber :  
<https://www.slb.com/drilling/rigs-and-equipment/wellhead-systems/geothermal-wellhead-system>

**Gambar 5.10.** : Contoh kepala sumur panas bumi (wellhead geothermal well)

- **Steam Receiving Header**

*Steam receiving header* merupakan instalasi pengumpul uap dari beberapa sumur produksi sebelum uap tersebut dialirkan menuju turbin.



Sumber :  
<https://yoshimori-shumimura.blogspot.com/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html?m=0>

**Gambar 5.11.** : Contoh Steam Receiving Header

Yaitu berupa tabung pengumpul uap sementara dari beberapa sumur produksi sebelum dialirkan ke turbin, dengan dilengkapi sistem pengendalian kestabilan tekanan berupa katup dan *rupture disc* yang berfungsi sebagai pengaman dari tekanan lebih (*over pressure*). Sehingga pasokan uap ke turbin terhindar dari gangguan perubahan pasokan uap dari sumur produksi. Dimana apabila terjadi tekanan berlebih (*over pressure*) dalam *steam receiving header*, maka uap akan dibuang melalui *vent structure*, yang juga berfungsi sebagai katup pengaman yang akan membuang tekanan apabila terjadi *sudden trip*.

- **Separator**

Sumur-sumur panas bumi umumnya memproduksi campuran *fluida* uap dan air, sedangkan turbin di PLTP digerakkan oleh *fluida* uap kering. Maka *fluida* uap yang kering harus dipisahkan terlebih dahulu dari *fluida* cair dan partikel-partikel padat yang ada. Ada banyak metoda yang dapat digunakan untuk memisahkan uap dari *fluida* cair dan partikel-partikel padat yang tercampur dalam *fluida* panas bumi, yang salah satunya adalah metoda sentrifugal. Dalam metoda ini, *fluida* panas bumi dialirkan kedalam tabung silinder dan dibiarkan bergerak berputar. Gaya sertrifugal yang dihasilkan oleh perputaran tersebut, akan melemparkan material cair dan padat yang lebih berat keluar putaran, sedangkan material uap yang lebih ringan akan terkumpul di sekitar pusat putaran. Material cair dan padat yang terpisah akan jatuh ke dasar tabung silinder, untuk kemudian dialirkan ke sumur injeksi untuk dimasukkan kembali kedalam bumi. Sedangkan uap kering yang terpisah, dialirkan ke turbin melalui *demister* untuk selanjutnya menggerakkan turbin.



Sumber :

<https://ecanblue.wordpress.com/2014/01/09/peralatan-pada-pembangkit-listrik-tenaga-panas-bumi/>

**Gambar 5.12. :** Contoh Separator uap panas bumi

- **Demister**

Demister adalah komponen peralatan yang berfungsi untuk menangkap butiran-butiran air yang masih tersisa di dalam uap sesaat sebelum memasuki turbin, yang biasa dipasang tidak jauh dari turbin.



Sumber :

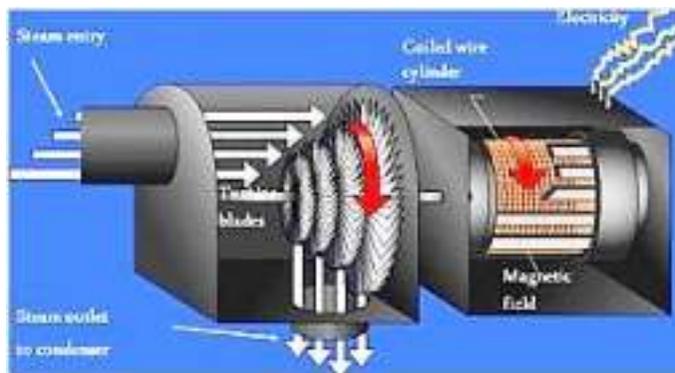
<https://ecanblue.wordpress.com/2014/01/09/peralatan-pada-pembangkit-listrik-tenaga-panas-bumi/>

**Gambar 5.13. :** Contoh Demister

*Demister* adalah sebuah alat yang berbentuk tabung silinder berukuran 14,5 m<sup>3</sup>, yang didalamnya terdapat kisi-kisi baja yang berfungsi untuk mengeliminasi butir-butir air yang masih terbawa oleh uap dari sumur-sumur panas bumi. *Demister* dipasang pada jalur uap utama setelah alat pemisah akhir (*final separator*), biasa ditempatkan pada bangunan rangka besi yang kokoh di luar gedung pembangkit.

#### - **Turbin - Generator**

Pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP), turbin berfungsi mengkonversikan energi thermal dari uap panas bumi menjadi energi mekanis, sedangkan generator selanjutnya akan mengubahnya menjadi tenaga listrik. Uap panas bumi yang masuk ke dalam turbin akan memutar roda turbin, kemudian putaran turbin memutar poros generator listrik sehingga menghasilkan tenaga listrik. Selanjutnya, tenaga listrik yang dihasilkan, setelah melalui penyesuaian tegangan (*trafo*) dan instalasi penyambung (*switch yard*), siap di distribusikan melalui jaringan transmisi tenaga listrik yang ada.



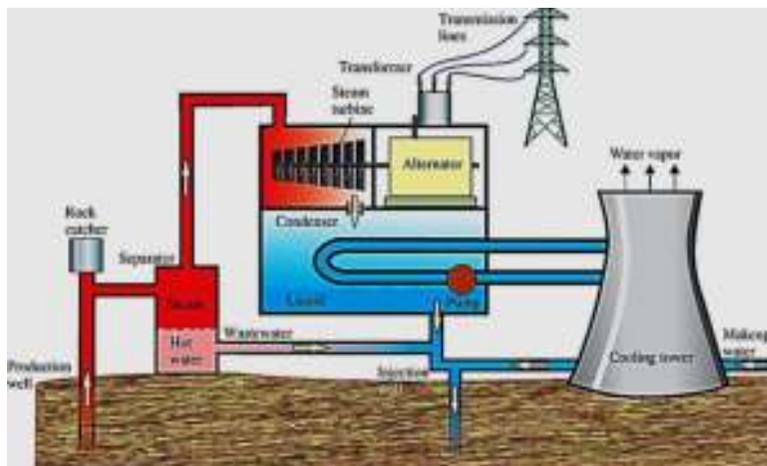
sumber: <http://www.geothermal.marin.org>

**Gambar 5.14.** : Diagram Turbin-Generator pembangkit listrik tenaga panas bumi

Selanjutnya uap yang telah terpakai untuk memutar turbin, dikeluarkan dan dialirkan untuk dikondensasikan menjadi air kondensat (*brine*) dalam *Kondensor*.

- **Kondensor – Menara Pendingin (Cooling Tower)**

*Kondensor* adalah komponen untuk mengkondensasikan uap yang telah terpakai dari turbin pada kondisi tekanan hampa. Uap bekas dari turbin yang masuk dari sisi atas *Kondensor*, akan mengalami kondensasi sebagai akibat penyerapan panas oleh air pendingin dari *menara pendingin* yang diinjeksikan melalui *spray nozzle*. Selanjutnya, air kondensat yang terbentuk (*brine*) dialirkan menuju sumur injeksi, untuk diinjeksikan kembali kedalam reservoir panas bumi. Sedangkan menara pendingin berfungsi memasok *fluida* pendingin, yang dalam hal ini adalah air, kedalam *Kondensor* untuk mendinginkan atau menyerap panas yang terkandung dalam uap sisa turbin. --Selanjutnya, air pendingin yang telah terpakai, dialirkan kembali ke *menara pendingin* untuk didinginkan dan disirkulasikan kembali ke *Kondensor*.



Sumber :

<https://electricalacademia.com/renewable-energy/types-geothermal-power-plants-geothermal-electric-power-generation/>

**Gambar 5.15.** : Diagram proses pendinginan uap oleh Kondensor dan Menara Pendingin



Sumber :

<https://yoshimori-shumimura.blogspot.com/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html?m=0>

**Gambar 5.16. : Menara Pendingin PLTP Kamojang**

#### - Sumur Injeksi

*Sumur injeksi* adalah sumur yang digunakan untuk mengalirkan air hasil pemisahan dan air kondensat kembali ke reservoir panas bumi di dalam perut bumi. Sumur ini sama seperti *Sumur Produksi*, namun dengan fungsi yang sebaliknya, yaitu untuk memompakan kembali *fluida* cair yang telah terpisah dan air kondensat, kembali ke dalam bumi. Oleh karena fungsinya tersebut, maka seyogyanya *Sumur Injeksi* diletakkan pada topografi yang lebih rendah, sehingga mengurangi beban pompa oleh karena air yang diinjeksikan dapat mengalir oleh gaya gravitasi.

### **5.5. 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 ke permukaan untuk diubah menjadi energi listrik, setelah itu dikembalikan lagi ke dalam 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 5.2. : 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 kurang dari 1 MW, berkisar antara US\$ 3.000-5.000 per kilowatt (kW). Sementara untuk kapasitas yang lebih tinggi, lebih dari 1 MW, 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 didominasi 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. Yaitu dimana energi panas yang tersedia secara abadi, harus di-konversikan terlebih dahulu menjadi tenaga uap sebelum kemudian di-konversikan kembali menjadi tenaga listrik, sehingga ketergantungannya pada keberadaan fluida panas bumi menjadi faktor utama, yang mempengaruhi nilai ke-ekonomiannya. Hal ini tentunya dapat berubah, misalnya apabila kelak ditemukan teknologi yang ekonomis, untuk meng-konversikan energi panas langsung menjadi energi listrik, tanpa melalui media uap.

# 6

## PROSPEK DAN POTENSI PANAS BUMI

### 6.1. Sejarah Pemanfaatan Panas Bumi

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. Pada tahun 1904 didirikan pembangkit pertama di Lardarello, Italia. Diawali dengan upaya Pangeran Piero Ginori Conti, yang menguji coba pembangkit listrik tenaga panas bumi pertama, pada tanggal 4 Juli 1904 di Lardarello-Italia, dimana pembangkit tersebut 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 *Lardarello* dibangun dan ber-operasi 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.

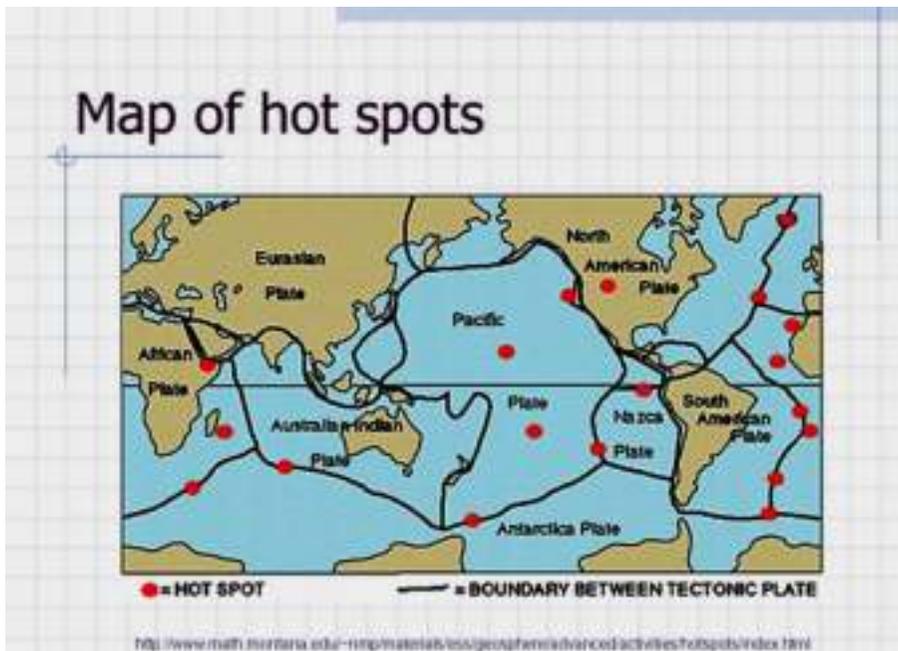
Pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan sistem siklus biner pertama kali diuji coba di Rusia, dan diperkenalkan di Amerika Serikat pada tahun 1981, untuk mengatasi krisis energi yang terjadi pada tahun 1970-an, dimana teknologi ini memungkinkan penggunaan sumber panas yang bersuhu lebih rendah. Berlanjut 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. Sementara itu 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.

Pemanfaatan energi panas bumi untuk pembangkitan tenaga listrik, belakangan menjadi semakin menarik, salah satunya oleh karena pasokan energinya yang stabil, tidak ber ubah-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. 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.

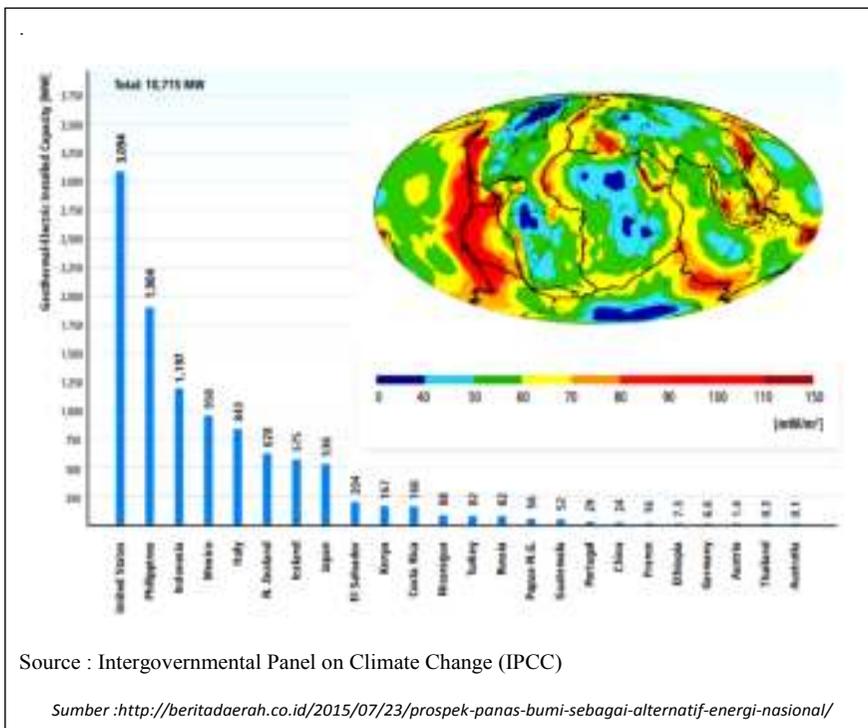


Sumber : <http://www.math.montana.edu/~nmp/materials/ess/geosphere/advanced/activities/hotspots/index.html>

**Gambar 6.1.** : Peta sebaran hot spot di permukaan bumi

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 (*International Geothermal Association - IGA*) menyatakan bahwa pada tahun 2010, dari pembangkit tenaga listrik panas bumi telah dioperasikan pembangkit-pembangkit dengan 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 6.2. :** 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*, yang merupakan ladang panas bumi 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 6.1. : 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	
 <a href="#">Amerika Serikat</a>	2.687	3.086		0,30
 <a href="#">Filipina</a>	1.969,7	1.904		27,00
 <a href="#">Indonesia</a>	992	1.197		3,70
 <a href="#">Meksiko</a>	953	958		3,00
 <a href="#">Italia</a>	810,5	843		1,50
 <a href="#">Selandia Baru</a>	471,6	628		10,00
 <a href="#">Islandia</a>	421,2	575		30,00
 <a href="#">Jepang</a>	535,2	536		0,10
 <a href="#">El Salvador</a>	204,4	204		25,00
 <a href="#">Kenya</a>	128,8	167		11,20
 <a href="#">Kosta Rika</a>	162,5	166		14,00
 <a href="#">Turki</a>	38	94	162	0,30
 <a href="#">Nikaragua</a>	87,4	88		10,00
 <a href="#">Rusia</a>	79	82		
 <a href="#">Papua Nugini</a>	56	56		
 <a href="#">Guatemala</a>	53	52		
 <a href="#">Portugal</a>	23	29		
 <a href="#">Cina</a>	27,8	24		
 <a href="#">Perancis</a>	14,7	16		
 <a href="#">Etiopia</a>	7,3	7,3		
 <a href="#">Jerman</a>	8,4	6,6		
 <a href="#">Austria</a>	1,1	1,4		
 <a href="#">Australia</a>	0,2	1,1		
 <a href="#">Thailand</a>	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 Lingkar 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.

### **6.3. Prospek Tenaga Panas Bumi Indonesia**

Indonesia dengan jumlah gunung api aktif terbesar di dunia, merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia pula. Berdasarkan data Kementerian ESDM tahun 2013, terdapat 299 titik lokasi panas bumi. Titik-titik tersebut tersebar di sepanjang jalur volkanik mulai dari Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, kemudian berbelok ke utara kearah kepulauan Maluku dan Sulawesi. Dengan potensi tenaga listrik sebesar 27 140,5 MW (status tahun 2003) atau setara dengan 40% potensi panas bumi dunia, sedangkan pemanfaatannya baru mencapai 1 197 MW pada tahun 2010, atau sekitar 4,6% dari total potensi nasional. Maka kedepan, potensi tenaga panas bumi di Indonesia mempunyai prospek menarik untuk dikembangkan, terutama untuk menggantikan sumber energi ber bahan bakar fosil yang kurang ramah lingkungan, *non-renewable*, dan semakin langka.





# 7

## ASPEK LINGKUNGAN LAPANGAN PANAS BUMI

Eksplorasi energi panas bumi untuk pembangkitan tenaga listrik (PLTP) termasuk kategori kegiatan pertambangan yang ramah lingkungan, namun industri ini juga tidak terlepas dari dampak lingkungan sejak awal proses pelaksanaan, sampai dengan akhir kegiatannya. Mengingat aktivitas utama kegiatan eksploitasi panas bumi adalah pengambilan *fluida* (uap/air) panas dari dalam perut bumi, maka dampak lingkungan dari kegiatan tersebut terutama akan berkaitan dengan pengelolaan *fluida* yang disebut sebagai *geothermal brines*, termasuk pengelolaan limbahnya. Dimana *geothermal brines* yang mengandung berbagai unsur kimia terlarut termasuk, zat kontaminan yang pada satu sisi akan dapat merusak turbin dan peralatan lainnya sehingga menurunkan tingkat efisiensi pembangkitan, dan pada sisi lain berpotensi mencemari lingkungan.

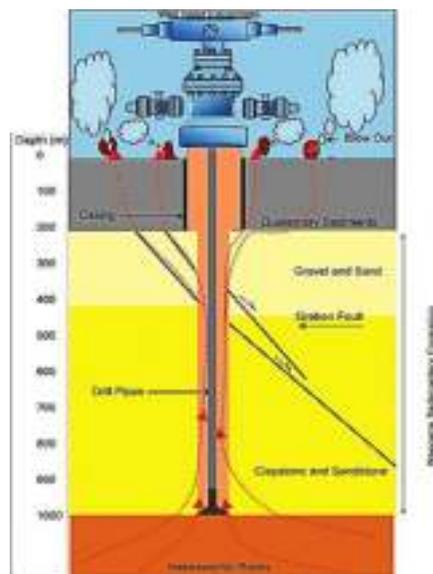
### 7.1. Dampak Konfigurasi Geologi Panas Bumi

Panas bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, serta batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Sedangkan energi panas bumi sendiri merupakan energi yang bersumber dari panas yang terkandung dalam perut bumi, yang seringkali berkaitan dengan aktivitas kegunung apian. Sumber panas yang berada jauh di bawah permukaan bumi, terbawa oleh *fluida* magma cair menerobos celah-celah pada kerak bumi untuk mendekati atau mencapai permukaan. Maka, eksploitasi energi panas bumi bagaimanapun akan membawa serta berbagai jenis *fluida* yang turut ter ekstraksi keluar dari dalam perut bumi.

Lapangan panas bumi yang potensial, bagaimanapun akan selalu berkaitan dengan konfigurasi geologi tertentu, terutama dengan kegunung apian, yang memungkinkan Bergeraknya *fluida* panas bumi ke permukaan. Biasanya melalui celah-celah retakan, sesar atau *volcanic vent*, dan muncul ke permukaan bumi dalam berbagai bentuk manifestasi panas bumi.

Kegiatan utama dalam eksploitasi energi panas bumi, adalah pemboran sumur produksi untuk memperoleh *fluida* panas bumi, baik berupa uap ataupun air panas, yang seringkali mencapai kedalaman ribuan meter. Namun demikian, disamping upaya untuk memperoleh *fluida* panas bumi, pemboran tersebut juga membuka jalan bagi berbagai *fluida* lainnya untuk menerobos keluar ke permukaan bumi.

Tidak tertutup pula kemungkinan berbagai *fluida* menerobos keluar tidak melalui lubang bor, melainkan melalui berbagai celah bukaan yang berada di sekitarnya. Bahkan dalam berbagai kasus, terobosan *fluida* tersebut menyembur secara tak terkendali, disebut sebagai *blow out*, sehingga menimbulkan korban (termasuk dalam kategori kecelakaan kerja).



Blowout geothermal well profile (modified from Toka et al. 2012)

Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Blowout-geothermal-well-profile-modified-from-Toka-et-al-2012\\_fig7\\_312026962](https://www.researchgate.net/figure/Blowout-geothermal-well-profile-modified-from-Toka-et-al-2012_fig7_312026962)

**Gambar 7.1. :** Diagram contoh terjadinya blow out pada sumur panas bumi

## 7.2. Emisi Gas

Emisi gas dalam eksploitasi panas bumi, secara umum sama dengan gas-gas yang dikeluarkan dalam suatu aktivitas gunung api. Disamping uap air yang memang diperlukan untuk proses pembangkitan tenaga listrik, termasuk pula berbagai jenis gas lain yang menyertainya, termasuk gas beracun yang berbahaya bagi kehidupan dan kesehatan. Emisi gas-gas tersebut dapat meningkat menyertai terbukanya celah yang diakibatkan oleh pemboran sumur panas bumi.

Gas-gas gunung api yang spesifik, terutama adalah uap air ( $H_2O$ ), Oksida Karbon ( $CO_2$ ,  $CO$ ), Oksida Sulfur ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ) dan oksida-oksida Nitrogen ( $NO_x$ ). Disamping itu, juga sejumlah kecil gas-gas Metan ( $CH_4$ ), Amoniak ( $NH_3$ ), Hidrogen Sulfida ( $H_2S$ ), Hidrogen ( $H_2$ ), Hidrogen Klorida ( $HCl$ ), Hidrogen Fluorida ( $HF$ ), dan Helium ( $He$ ).

Erupsi-erupsi gunung api secara akumulatif memberikan pengaruh terhadap komposisi atmosfer, sehingga bagaimanapun turut berperan dalam perubahan iklim secara global. Maka peningkatan emisi gas-gas gunung api yang di akibatkan oleh eksploitasi panas bumi, dalam jangka panjang, walaupun sedikit tentu akan berperan pula secara akumulatif.

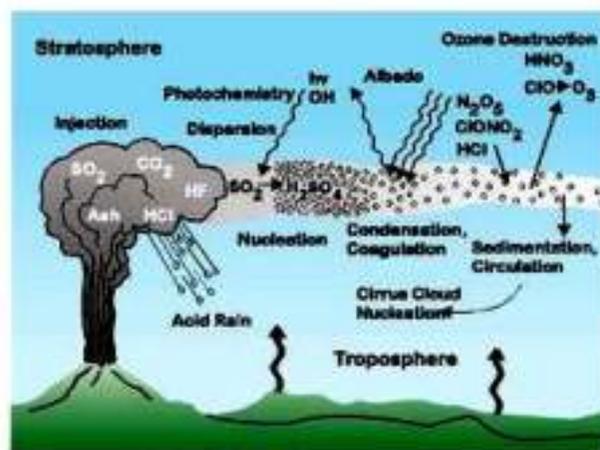


Figure modified by K. McGee et. al., from R. Turco, in *Volcanism and Climate Change*, 1992

Sumber :

[http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/vc\\_web/background/S\\_chem.html](http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/vc_web/background/S_chem.html)

**Gambar 7.2. :** Gas-gas Vulkanik yang tersebar di atmosfer pada saat erupsi

*Gas beracun gunung api*, terbentuk dari senyawa-senyawa volatile magma yang terbebaskan pada saat magma bergerak mendekati permukaan, atau sebagai produk dari reaksi kimia dengan batuan yang diterobosnya. Produk gas yang dihasilkan tidak selalu dikeluarkan pada saat erupsi, namun juga dapat diproduksi setiap saat. Gas beracun ini dapat keluar melalui celah-celah atau rekahan yang ada, baik yang terbentuk secara alamiah ataupun sebagai akibat pemboran sumur panas bumi. Gas utama yang sering muncul adalah CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, dan HCl. Namun gas beracun yang sering menimbulkan korban adalah gas CO, walaupun tidak menutup kemungkinan bahwa gas yang lainnyapun dapat menimbulkan bencana pula.

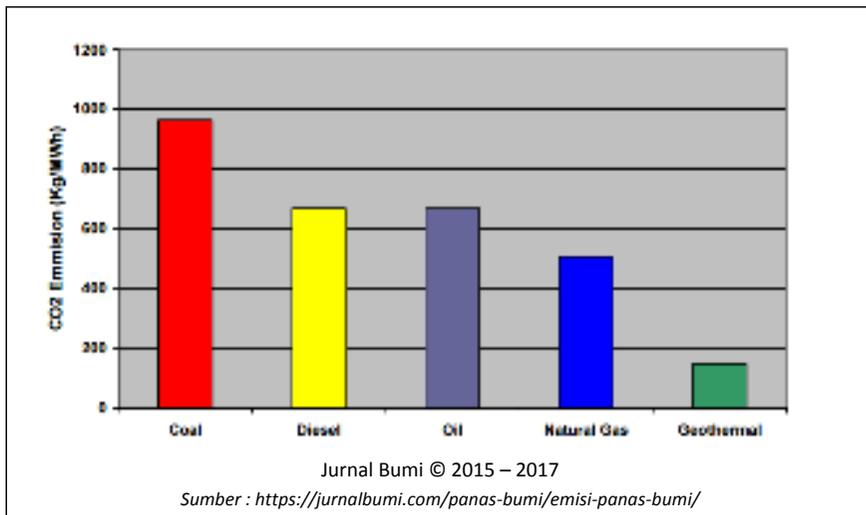
- *Gas CO ( gas karbon monoksida )*

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

Salah satu akibat masuknya gas CO ke dalam paru-paru dan pigmen merah atau hemoglobin, adalah mengakibatkan terjadinya ikatan carboxy hemoglobin yang lebih stabil dibandingkan ikatan oksidasi hemoglobin. Dengan terjadinya ikatan carboxy hemoglobin ini membuat aktivitas peredaran oksigen keseluruh tubuh menjadi terganggu, sehingga proses metabolisme otot dan fungsi enzim intra seluler juga terganggu. Kondisi ini akan lebih parah pada orang yang mengalami gangguan otot jantung atau sirkulasi darah perifer. Selain itu dampak yang diakibatkan dari gas CO ber variasi tergantung dari status kesehatan masing-masing individu. Orang yang berbadan gemuk dapat mentolerir pajanan CO sampai kadar carboxy hemoglobinnya (HbCO) mencapai 40%. Kondisi ini akan berbeda jika dialami oleh orang yang menderita penyakit jantung atau paru-paru. Kadar CO yang tinggi juga dapat menyebabkan perubahan tekanan darah, ritme jantung abnormal bahkan gagal jantung, dan kerusakan pembuluh darah perifer. Gejala yang muncul ketika terjadi keracunan gas CO pada konsentrasi rendah

mirip dengan gejala flu, pusing, pernafasan terganggu dan rasa mual. Pada konsentrasi tinggi bisa langsung menimbulkan kematian mendadak. Tindakan preventif yang bisa diambil untuk meminimalisir keadaan yang tidak diinginkan adalah dengan memasang detektor karbon monoksida. Detektor ini akan mendeteksi keberadaan gas CO pada tingkat tertentu dan memberikan peringatan dini. Selain itu juga dapat dengan cara penggunaan masker dan alat pelindung diri, serta menghindari tempat-tempat yang berpotensi mengeluarkan gas CO.

- **Gas CO<sub>2</sub> (gas karbon dioksida)**



**Gambar 7.3. :** Perbandingan emisi gas CO<sub>2</sub> panas bumi dengan berbagai bahan bakar fosil

Gas ini berbahaya oleh karena tidak berbau dan tidak berwarna. Gas ini memiliki berat jenis lebih tinggi dari udara, sehingga mudah terbawa ke tempat yang lebih rendah, seperti pemukiman penduduk ataupun lembah-lembah. Peningkatan kadar karbon dioksida dapat menimbulkan gangguan pernafasan, dengan tingkat keparahan sesuai kadarnya di dalam udara yang terhisap. Pada kadar lebih dari 5 persen gas ini dapat menimbulkan sesak nafas, sedangkan pada kadar lebih 30 persen dapat menyebabkan kematian. Dalam *Emergency Responses*

*Guidebook 2008*, Karbon dioksida termasuk gas inert yang aman dalam kadar yang masih normal namun beracun pada kadar yang tinggi. Secara akumulatif global, gas ini merupakan gas rumah kaca yang menjadi pemicu pemanasan global. Namun secara umum, emisi gas CO<sub>2</sub> dari pengoperasian PLTP relatif rendah dibandingkan dengan pembangkit-pembangkit lain, terutama yang berbahan bakar fosil, sehingga di nilai ramah lingkungan. Emisi gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) hanya sekitar kurang dari 200 kg per MWh tenaga listrik, jauh lebih kecil dibandingkan dengan emisi yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Namun tak tertutup pula kemungkinan emisi berlebih, terutama ketika terjadi kecelakaan kerja.

- ***Gas Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S)***

Gas hidrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) mempunyai sifat asam, merupakan gas tidak berwarna, berbau busuk seperti bau telur busuk, berat jenis sekitar 1.19, termasuk gas beracun, mudah terbakar dan dapat membentuk campuran yang eksplosif dengan udara. Gas ini yang lebih berat dari udara, termasuk gas berbahaya dan dapat dikenali dari baunya yang tajam. Dalam kadar rendah, gas ini dapat memicu iritasi pada mata, dan dalam kadar yang tinggi dapat mengiritasi pernafasan. Sesuai *Emergency Response Guidebook 2008*, hidrogen sulfida termasuk gas beracun dan mudah terbakar sehingga sangat berbahaya.

**Tabel 7.1. : Indikasi dan bahaya kadar gas hidrogen sulfida**

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

*Sumber : Emergency Response Guidebook 2008*

- ***Gas SO<sub>2</sub> (Sulfur dioksida)***

Gas ini mudah dikenali karena memiliki bau yang cukup menyengat. Keracunan gas ini dapat menyebabkan sulit bernafas, sakit dada, iritasi pada mata, hidung dan tenggorokan, batuk-batuk dan lain-lain. Berdasarkan pada *Emergency Response Guidebook 2008*, sulfur dioksida termasuk gas korosif, memiliki potensi bahaya pada kesehatan yaitu :

- Beracun, dapat berakibat fatal jika terhisap, tertelan dan terserap melalui kulit.
- Uap SO<sub>2</sub> dapat mengiritasi dan korosif.
- Kontak dengan gas atau gas cair dapat menyebabkan luka bakar, luka parah dan / atau radang dingin.
- Pembakaran api akan dapat menyebabkan iritasi, korosif dan / atau gas beracun.

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

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

- ***Gas NO<sub>x</sub> (oksida2 nitrogen)***

NO<sub>x</sub> adalah salah satu partikulat yang membawa dampak terhadap suhu dan kualitas atmosfer. NO<sub>x</sub> atau oksida nitrogen adalah kelompok gas yang ada di atmosfer. Oksida nitrogen terdiri dari gas NO atau nitrogen monoksida dan nitrogen dioksida atau NO<sub>2</sub>. NO adalah gas yang terbanyak dari jumlah NO<sub>x</sub> yang ada di udara. Kandungan NO<sub>x</sub> didaerah gunung api juga dipengaruhi oleh aktifitas gunung tersebut. Pembentukan dari gas NO dan NO<sub>2</sub> merupakan reaksi antara nitrogen dan oksigen yang ada diudara. Reaksi antara oksigen dan nitrogen

akan membentuk NO, sedangkan reaksi dimana kadar oksigennya lebih banyak akan menghasilkan NO<sub>2</sub>.

- Pada sekitar jam 6-8 pagi kadar NO meningkat seiring meningkatnya aktivitas manusia.
- Kadar ozon dapat meningkat seiring menurunnya kadar NO.
- Produk pencemaran NO<sub>x</sub> dapat berupa asam nitrat, yang kemudian diendapkan sebagai garam nitrat didalam air hujan dan debu.

NO<sub>x</sub> meliputi gas-gas seperti NO dan NO<sub>2</sub>, namun yang berbahaya adalah NO<sub>2</sub> oleh karena dapat berdampak keracunan sebagaimana halnya gas CO. Sementara itu gas NO diudara dalam keadaan ambient normal dapat mengalami oksidasi menjadi NO<sub>2</sub>. NO<sub>2</sub> yang terhisap akan dapat meracuni paru-paru, yaitu dimana pada kadar melebihi 100 ppm dapat menyebabkan edema paru-paru (pembengkakan pulmonari), sementara itu pada kadar 800 ppm dapat mengakibatkan kematian dalam waktu pemajanan 29 menit atau kurang. Pemajanan pada kadar 5 ppm selama 10 menit dapat mengakibatkan gangguan pernafasan.

- *Gas Hidrogen Klorida (HCl)*

Disebut juga sebagai gas Klorin, merupakan gas yang dapat dikeluarkan dalam proses gunung api, yang dalam konsentrasi tinggi (>30 ppm) dapat berdampak pada iritasi dan gangguan pernafasan. Gas ini sangat mudah larut dalam butir-butir air (droplets) di atmosfer dan akan turun ke permukaan bumi sebagai hujan asam.

- *Gas Hidrogen Fluorida (HF)*

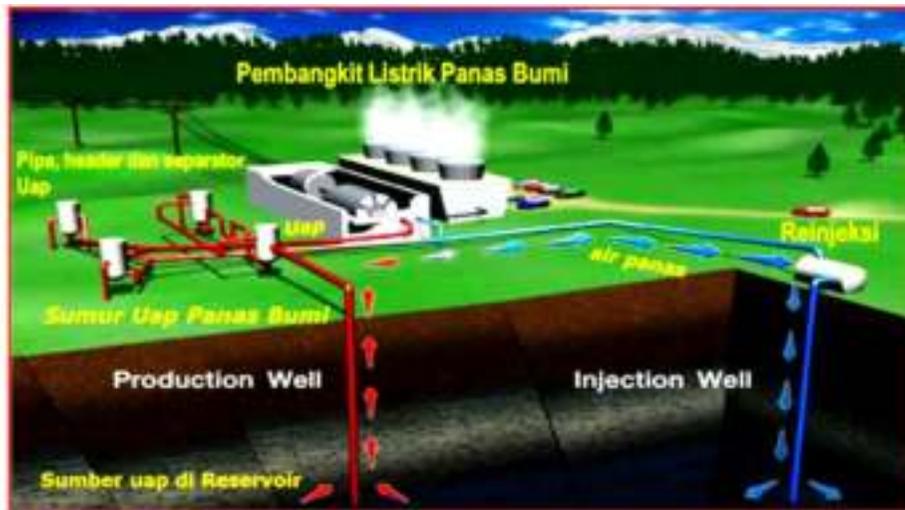
Disebut juga sebagai gas Florin, merupakan gas yang berwarna kuning pucat, juga dapat menimbulkan iritasi. Apabila menyelimuti tetumbuhan, akan dapat mengakibatkan keracunan bagi hewan ataupun manusia yang mengkonsumsinya

### 7.3. Zat Terlarut

*Fluida* panas bumi, dalam perjalanannya ke permukaan, membawa serta pula berbagai zat yang terlarut didalamnya, baik berasal dari kandungan *fluidanya* sendiri maupun dari pelarutan batuan-batuan yang dilaluinya. Beberapa diantaranya dapat terakumulasi mencemari badan air permukaan ataupun air tanah di sekitarnya.

- ***Benzene*** adalah senyawa hidrokarbon, merupakan zat yang ditemui terlarut dalam *fluida* panas bumi, terutama pada reservoir panas bumi yang terdiri dari batuan sedimen atau metamorf. Zat ini teridentifikasi sebagai *leukemogen*, yaitu zat yang dapat memicu tumbuhnya kanker darah atau *leukemia*.
- ***Mercury*** adalah sejenis logam berat, dapat berasal dari mineral *Cinnabar (HgS)*, yang merupakan produk dari mineralisasi hydrothermal. *Mercury* dalam darah dapat memicu timbulnya gangguan neurologis (*neurologic disorders*). Sebagai contoh, lapangan panas bumi Monte Amiata - Italia, sebelum dikembangkan sebagai pembangkit tenaga listrik, merupakan area penambangan *Cinnabar*.
- ***Radon & Arsenic***, adalah unsur-unsur minor yang akan dapat memberi dampak pada kesehatan manusia, apabila terakumulasi sampai dengan kadar yang tinggi. Keberadaan *Radon* dalam *fluida* panas bumi teridentifikasi pada penelitian di Imperial Valley - Amerika Serikat. Sementara itu, *Arsenic* yang merupakan zat beracun, teridentifikasi meningkat kadarnya pada sungai di New Zealand yang menampung limbah buangan dari PLTP *Wairakei*, walaupun belum ada laporan gangguan kesehatan yang diakibatkannya.

## 7.4. Aspek Tata Ruang

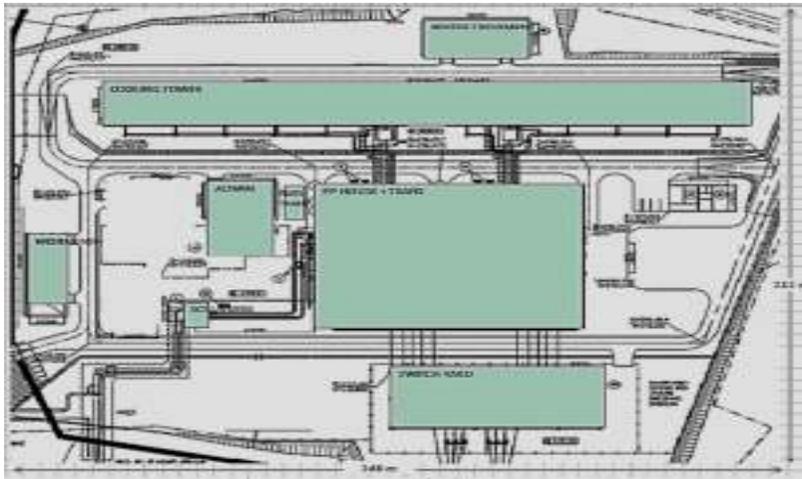


Sumber : <http://edyprastyo0105.blogspot.com/2015/04/geothermal-energi-bersih-ramah.html>

Gambar 7.4. : Diagram contoh lay out PLTP

Pembangkit listrik tenaga panas bumi, secara umum tidak memerlukan lahan yang terlalu luas. Pembangkit ini rata-rata hanya memerlukan lahan seluas  $404 \text{ m}^2$  per GWh, lebih kecil bila dibandingkan dengan PLTU Batubara ( $3\ 632 \text{ m}^2$  /GWh), atau PLTA Angin ( $1\ 335 \text{ m}^2$  /GWh). Namun demikian faktor stabilitas tanah perlu mendapat perhatian, oleh karena ekstraksi *fluida* dari dalam bumi dalam jumlah besar bagaimanapun akan menyisakan ruang kosong di bawah permukaan, sehingga berpotensi untuk runtuh atau amblas, seperti yang tercatat pernah terjadi pada lapangan panas bumi *Wairakei - New Zealand*. Maka *re-injection* dari *fluida* sisa pembangkitan yang telah di kondensasikan adalah upaya untuk menanggulangnya.

Kemungkinan penyebaran gas-gas yang tak terkondensasi, terutama gas-gas yang di kategorikan berbahaya, bagaimanapun dapat terjadi sebagai akibat kebocoran ataupun kecelakaan kerja. Hal tersebut merupakan faktor yang perlu mendapatkan perhatian dalam menyusun lay-out instalasi PLTP. Namun sejauh ini masih dalam tahap pengkajian, dan belum sampai ke dalam tahap standarisasi.



The objective function of the model is to minimize total plant layout cost yet still to take into consideration toxic gas dispersion.

Sumber : DOI:10.1109/ICETAS.2018.8629199Corpus ID: 59555608

**Gambar 7.5.** : Contoh proposal standard lay-out PLTP, yang diusulkan pada 2018 IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)

Lapangan panas bumi yang potensial, secara geologis selalu berhubungan dengan zona tektonik aktif, yaitu berada pada batas lempeng-lempeng tektonik. Maka tingkat kegempaan yang tinggi disamping kegunung apian, seyogyanya menjadi faktor kendala yang harus diperhatikan.

## 7.5. Aspek Teknologi

Eksplorasi panas bumi adalah suatu upaya industri berteknologi tinggi, mulai dari perencanaan, konstruksi, operasional sampai dengan tahap akhir produksinya. Walaupun secara alamiah relatif akrab lingkungan, namun oleh karena ketererkaitannya dengan *fluida* panas bumi dengan tekanan dan temperatur yang tinggi, potensi dampak lingkungan akan tetap ada, terutama yang diakibatkan oleh kegagalan teknologi. Yaitu dimana upaya eksploitasi panas bumi rentan terhadap kecelakaan kerja. Peristiwa ledakan pada sumur bor adalah peristiwa kecelakaan kerja serius, yang tercatat pernah terjadi. Semburan *fluida* panas bumi yang ber tekanan dan temperatur tinggi, yang menimbulkan korban tercatat pernah terjadi, baik pada tahap eksplorasi, produksi maupun pemeliharaan.

Pengembangan teknologi panas bumi juga berpotensi untuk menimbulkan dampak, yang dapat diakibatkan oleh kegagalan teknologi itu sendiri, seperti pada pengembangan energi panas bumi dengan Siklus Biner atau Teknologi Fracking.

Teknologi panas bumi dengan sistem Siklus Biner, yang menggunakan fluida kerja yang beberapa diantaranya beracun, tentu berpotensi mencemari lingkungan apabila terjadi kebocoran.

Tabel 7.2. : Daftar fluida kerja panas bumi siklus biner

Fluida	Nama Kimia	Kadar Racun	Mudah terbakar	ODP	GWP*
R-11	CCl <sub>3</sub> F	Tidak beracun	Tidak	1	1
R-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Tidak beracun	Tidak	1	4.500
R-114	C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	Tidak beracun	Tidak	0,7	5.850
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Rendah	Ya	0	3
i-Butane	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Rendah	Ya	0	3
n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Rendah	Ya	0	3
i-Pentane	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Rendah	Ya	0	3
n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Rendah	Ya	0	3
Ammonia	NH <sub>3</sub>	Beracun	Sedikit	0	0

\*Nilai GWP mengacu pada faktor GWP R11, dimana nilai GWP R11 = 1 [18].

Sumber:

<https://enerbi.co.id/2017/07/siklus-rankine-organik-pada-pembangkit-listrik-tenaga-panas-bumi/>

Proyek *Enhanced Geothermal System* di Basel – Swiss, dengan teknologi Fracking misalnya, dihentikan oleh karena memicu terjadinya gempa lokal dengan berkekuatan 3–4 SR pada 6 hari pertama injeksi air. Hal tersebut diduga berkaitan dengan terbentuknya rekah hidrolik. Peningkatan aktivitas tektonik juga diduga pernah terjadi, berkaitan dengan pemboran panas bumi di *Staufen im Breisgau*, Jerman.

Walaupun secara umum eksploitasi panas bumi relative akrab lingkungan, namun disamping bencana alam yang tak terduga (*forst majeure*), kecelakaan kerja sebagai akibat dari kegagalan penerapan teknologi merupakan, dapat merupakan sumber potensi dampak lingkungan.

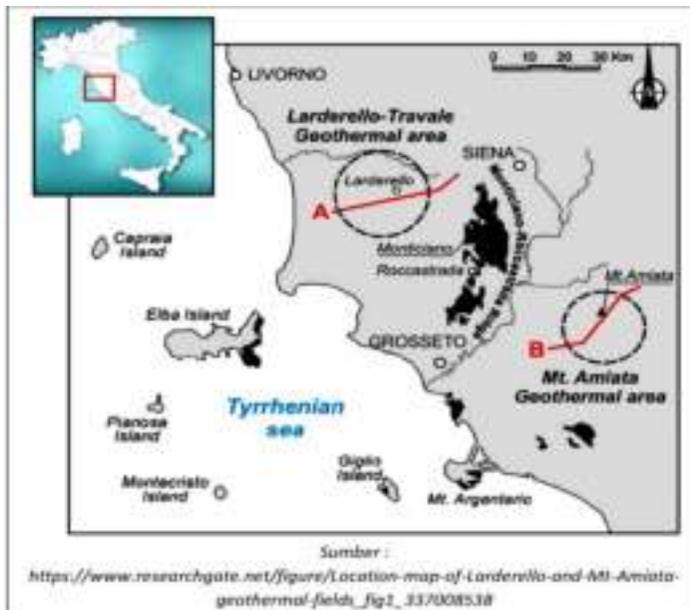
# 8

## LAPANGAN PANAS BUMI DI BERBAGAI NEGARA

Panas bumi sebagai sumber energi dari dalam bumi, dalam jumlah yang tak terbatas dan selalu terbarukan (*renewable*), telah dikenal dan dimanfaatkan sejak lama. Manusia telah memanfaatkannya sejak dahulu untuk berbagai upaya pemanasan dan kesehatan. Penemuan teknologi mesin uap semasa *Revolusi Industri*, kemudian telah meng-inspirasi pemanfaatan uap panas bumi untuk membangkitkan tenaga listrik.

Italia (1904) adalah negara pertama yang memanfaatkan uap panas bumi sebagai sumber energi penggerak turbin tenaga listrik, yaitu dengan teknologi pembangkit uap kering (*dry steam*). *New Zealand* (1958) menjadi negara yang pertama mengembangkan teknologi *flash steam* untuk memisahkan fluida air panas dari uap panas bumi, sehingga dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan tenaga listrik. Sementara itu teknologi siklus biner (*binary cycle*), untuk pertama kalinya digunakan di Rusia (1966).

## 8.1. Lapangan Panas Bumi Lardelerro – Monte Amiata (Italia – Tuscany)

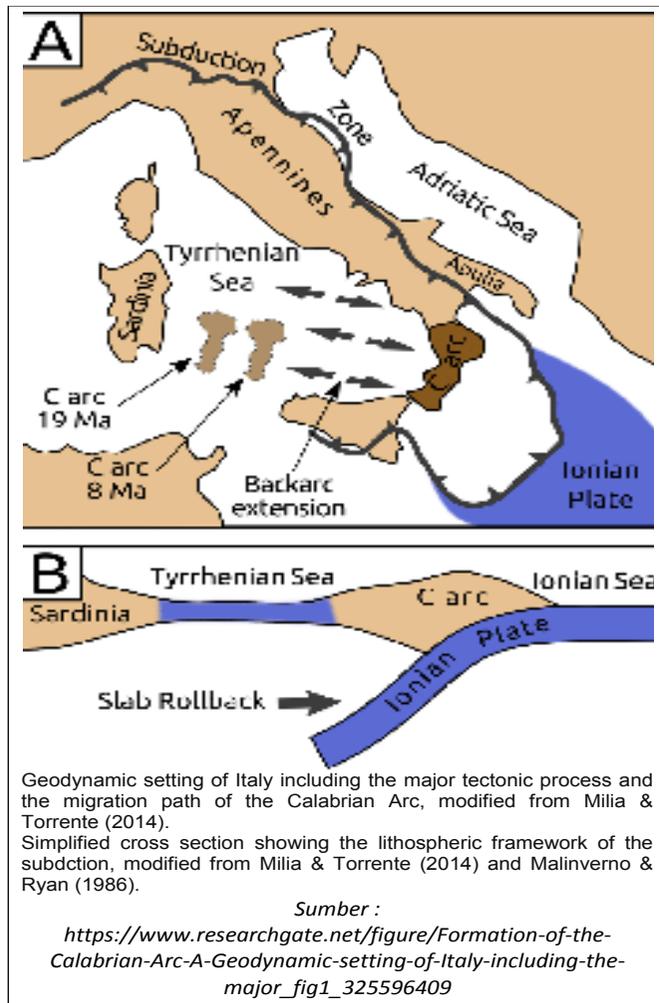


Gambar 8.1. : Lokasi lapangan panas bumi Lardelerro – Monte Amiata

Italia dikenal sebagai negara pertama yang mengembangkan pembangkit listrik tenaga panas bumi, dengan lapangan panas bumi *Lardelerro – Monte Amiata* yang terletak di wilayah *Tuscany* di sebelah utara Roma. Yaitu pada wilayah yang merupakan bagian dalam (*inner arc*) dari busur pegunungan Appenine Utara.

Busur pegunungan Appenine yang memanjang sepanjang jazirah Italia, adalah bentukan dari konvergensi antara lempeng tektonik Eurasia dengan lempeng Afrika. Lempeng benua Eurasia terangkat dan terlipat membentuk busur pegunungan Appenine, sedangkan lempeng samudera *Ionian* yang merupakan bagian dari lempeng tektonik Afrika, menunjam (*subducted*) ke bawah lempeng Eurasia disepanjang laut Adriatik. Bagian dari lempeng *Ionian* yang menunjam ke dalam mantel, meleleh membentuk kantong-kantong magma, yang menerobos kerak bumi sebagai intrusi magma, sebagian bahkan menerobos ke permukaan sebagai titik-titik gunung api. Hal tersebut

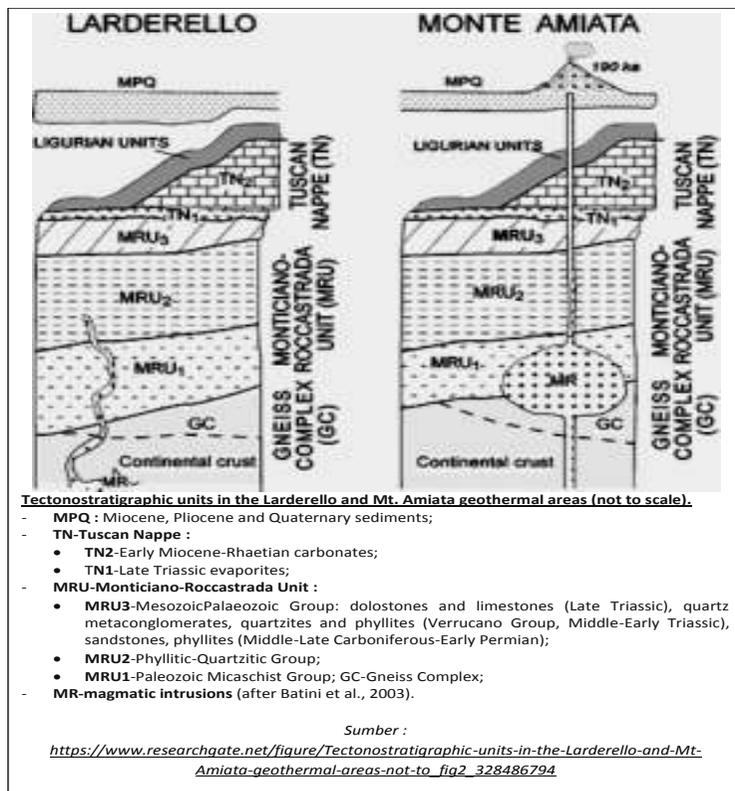
kemudian membentuk lapangan lapangan panas bumi di wilayah *Tuscany*, diantaranya adalah lapangan panas bumi *Lardelerro* dan lapangan panas bumi *Monte Amiata*.



**Gambar 8.2. :** Sketsa kerangka tektonik jazirah Italia

Sumber panas terbentuk dari intrusi magma granitis yang menerobos kerak bumi dan memanaskan batuan di atasnya. Batuan reservoir panas bumi yang terpanaskan pada kedua lokasi tersebut meliputi batuan metamorf pada bagian dalam, dan batuan sedimen pada bagian luar yang lebih dangkal. Keduanya tertutup oleh formasi batuan *Flysch*, yang berperan sebagai *cap rock*.

Sumber panas dibentuk oleh intrusi magma granitis (MR) yang menerobos kerak bumi, yang pada lapangan *Monte Amiata* pernah mencapai permukaan sebagai kerucut gunung api. Batuan yang terpanaskan pada kedua lokasi tersebut meliputi batuan metamorf pada bagian dalam (MRU2), dan batuan sedimen pada bagian luar yang lebih dangkal (TN2), yang keduanya tertutup oleh formasi batuan *Flysch (Ligurian Units)*, yang berperan sebagai *cap rock*.



**Gambar 8.3 :** Sketsa perbandingan tektono-stratigrafi lapangan panas bumi Lardelerro vs Monte Amiata

Hasil penelitian geokimia menunjukkan bahwa fluida panas bumi yang terkandung dalam batuan reservoir berasal dari *fluida meteorit*, yang terutama tersimpan secara regional dalam batuan *dolomite-anhydrite* berumur *Mesozoic* (MRU3).

### 8.1.1. Lapangan Panas Bumi Lardelerro



Sumber :

<https://www.power-technology.com/features/oldest-geothermal-plant-lardelerro/>

**Gambar 8.4.** Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lardelerro - Italia

*Lardelerro* berasal dari nama bangsawan Perancis, *Francois de Lardeler*, yang mendirikan industri penambangan *borat* yang sebelumnya dikelola secara tradisional. *Borat* merupakan bahan dasar penting dalam industri kaca/gelas, keramik, cat, peledak, juga untuk industri farmasi dan kecantikan. Dalam proses industri yang didirikan pada tahun 1827, *Lardeler* memanfaatkan panasnya uap panas bumi sebagai boiler, dan tekanannya sebagai penggerak mendukung secara antusias skema *Lardeler*, kemudian memberinya gelar *Pangeran Montecerboli*, dan memberi nama kotanya dengan *Lardelerro*, sebagai penghargaan atas jasanya menampung para pekerja pada pabrik asam borat.

Pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi sendiri diawali oleh *Prince Piero Ginori, Conti of Trevignano*, yang membangun generator tenaga listrik yang digerakkan dengan uap panas bumi pada tahun 1904, yang pada saat itu mampu membangkitkan tenaga listrik sebesar 10 kW. Berikutnya, potensi panas bumi *Lardelerro* dikembangkan pada tahun 1911 yang diselesaikan tahun 1913 dengan kapasitas 250 kW. Potensi lapangan panas bumi terus dikembangkan,

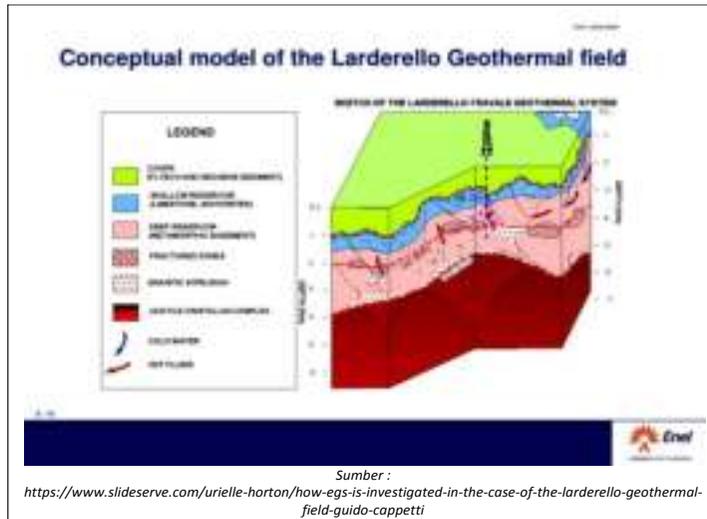
sehingga saat ini meliputi 34 unit pembangkit dengan total kapasitas 800 MW, dioperasikan oleh perusahaan listrik Italia, *Enel Green Power (EGP)*.



Pietro Simonio Cori, the first geothermal plants in Larderello (Source: Italian Geothermal Union)

Sumber : <https://avenston.com/en/articles/geothermal-energy-stage-or-step/>

**Gambar 8.5.** Generator listrik tenaga uap panas bumi pertama di Larderello



**Gambar 8.6. :** Model lapangan panas bumi Larderello

Lapangan panas bumi *Larderello* merupakan jenis batuan panas kering (*hot dry rock*), dimana walaupun wilayah *Larderello* bukan merupakan zona gunung api dan tak ditemukan indikasi adanya

magma yang keluar ke permukaan, namun manifestasi panas bumi muncul dalam bentuk erupsi freatik, yaitu berupa letusan-letusan dari akumulasi fluida dibawah permukaan yang terperangkap dalam kubah yang tertutup oleh batuan penutup (*cap rock*).

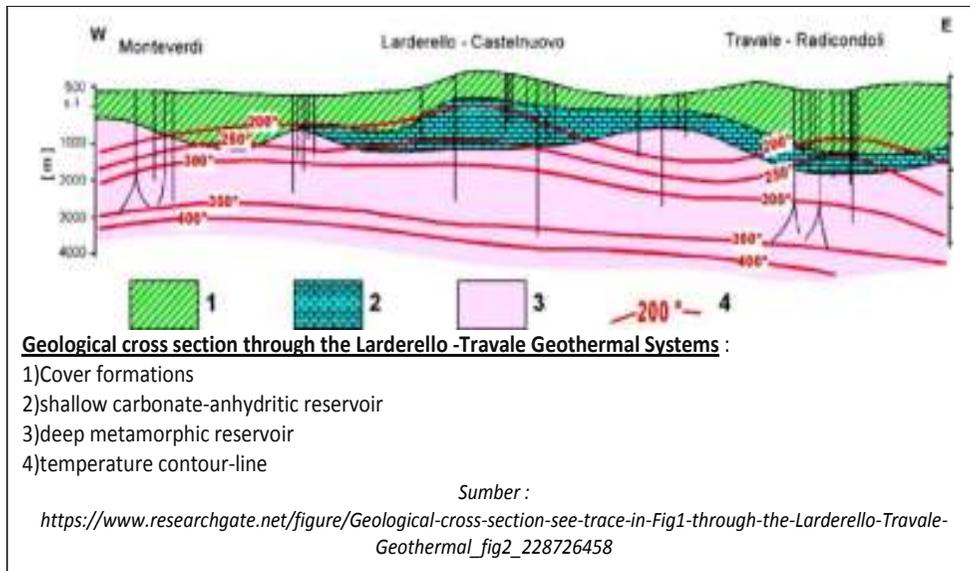
Akumulasi fluida dibawah kubah terkadang menerobos keluar kepermukaan melalui celah-celah patahan, membentuk mata-mata air panas (*hot spring*). Kawah-kawah yang terbentuk meter. Yang terbesar diantaranya adalah kawah *Lago Vecchienna* yang mengalami erupsi terakhir pada tahun 1282, dan saat ini terisi air menjadi danau *Boracifero*.

Sumber panas dari lapangan panas bumi *Lardellerro* adalah intrusi magma granitis, yang menerobos mendekati permukaan bumi, sebagai dampak dari penunjaman bagian dari lempeng tektonik Afrika kebawah lempeng tektonik Eurasia.

Batuan reservoir pada lapangan panas bumi *Lardellerro* ini terdiri dari 2 bagian, yaitu :

- *Reservoir dangkal* pada kedalaman 1000 meter, merupakan formasi batuan *carbonate-anhydrite* berumur Mesozoic, dengan temperatur 220-250°C, dan tekanan sekitar 20 bar.
- *Reservoir dalam* pada kedalaman 3000 meter, merupakan batuan metamorf yang terpecah-pecah (*fractured*), dengan temperatur 300-350°C, dan tekanan sekitar 70 bar.

Sementara itu, lapisan batuan yang berperan sebagai penutup (*cap rock*) terdiri dari serpih dan lempung dari formasi *Flysch (Ligurian Units-Cretaceous to Eocene)*.



**Gambar 8.7. :** Profil geologi dan gradien panas bumi lapangan panas bumi Lardelerro

Pembangkit listrik tenaga panas bumi *Lardelerro* adalah jenis pembangkit uap kering (*dry steam*), sesuai dengankondisi fluida dalam batuan reservoir yang di dominasi oleh uap (*vapor dominated*).

Para ahli menduga dominasi fluida uap tersebut sebagai akibat dari 2 hal, yaitu :

- Karakteristik tekanan reservoir yang jauh lebih rendah dari tekanan hidrostatik.
- Terpisahnya batuan reservoir dari akuifer eksternal oleh lapisan-lapisan dengan permeabilitas rendah, sehingga menghambat pasokan fluida air dingin kedalam reservoir.

### **8.1.2. Lapangan Panas Bumi Monte Amiata**

Lokasi lapangan panas bumi *Monte Amiata* berada pada bagian selatan *Tuscany, provinsi Siena - Italia*, terletak pada zona tektonik yang sama sengan lapangan panas bumi *Lardelerro*. *Monte Amiata* sendiri merupakan kerucut gunung api tertinggi di wilayah tersebut, dengan ketinggian 1736 meter dpl. Berstatus tidak aktif (*dormant*), dengan erupsi terakhir diperkirakan sekitar 300 ribu tahun yang lalu

berdasarkan perhitungan *radiometric dating*. Tak ada aktivitas erupsi sejak saat itu, namun indikasi aktivitas panas bumi berupa mineralisasi *Cinnabar* ( $H_2S$ ) dijumpai dekat *Bagnore*, di sebelah tenggara kubah gunung api tersebut. Pada masa lalu, endapan *Cinnabar* tersebut ditambang untuk menghasilkan air raksa (*Mercury-Hg*).



Sumber :

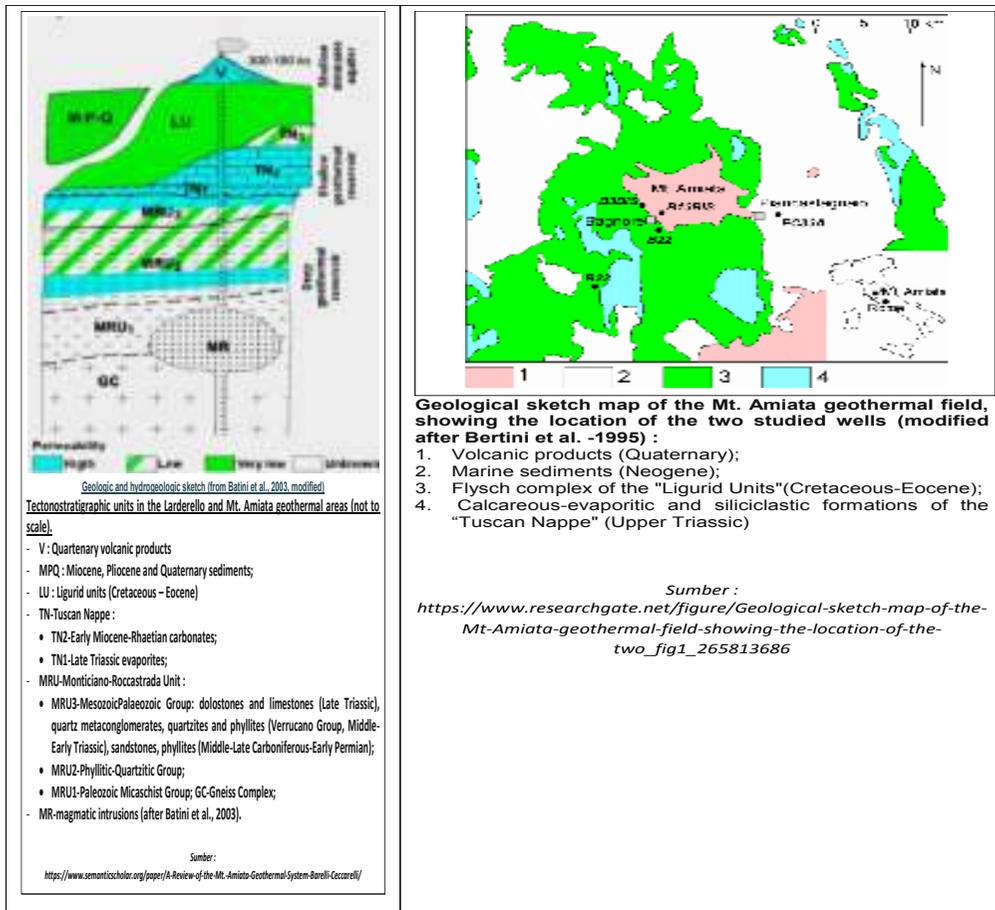
<https://www.shutterstock.com/video/clip-1006606546-bagnore-january-2018-geothermal-energy-plant-located>

**Gambar 8.8. :** Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Monte Amiata - Italia

Sistem panas bumi *Monte Amiata* yang telah menghasilkan listrik tenaga panas bumi sejak tahun 1969, dengan kapasitas terpasang sebesar 88 MW (5 unit pembangkit tenaga listrik), yang terbagi pada 2 lapangan panas bumi, yaitu lapangan panas bumi *Bagnore* dan *Piancastagnaio*, merupakan lapangan panas bumi yang di dominasi fluida cair (*water dominated*).

Eksplorasi lapangan panas bumi *Monte Amiata* dimulai sejak awal tahun 1950an, dengan melakukan berbagai penyelidikan geologi, hidrogeologi, geofisika, termasuk legih dari 100 titik pemboran dengan kedalaman 500 - 4000 meter, untuk mengetahui model panas bumi di daerah tersebut. Sehingga akhirnya ditemukan adanya 2 reservoir panas bumi yang di dominasi oleh fluida cair (*water dominated reservoir*) pada kedalaman yang berbeda, yaitu :

- *Reservoir dangkal* pada kedalaman 500 – 1000 meter, dengan temperatur 150 – 220°C, berupa formasi batuan karbonat yang berumur *Mesozoic*.
- *Reservoir dalam* pada kedalaman 2500 – 4000 meter, dengan temperatur 300 – 350°C, berupa batuan metamorf yang berumur *Paleozoic*.



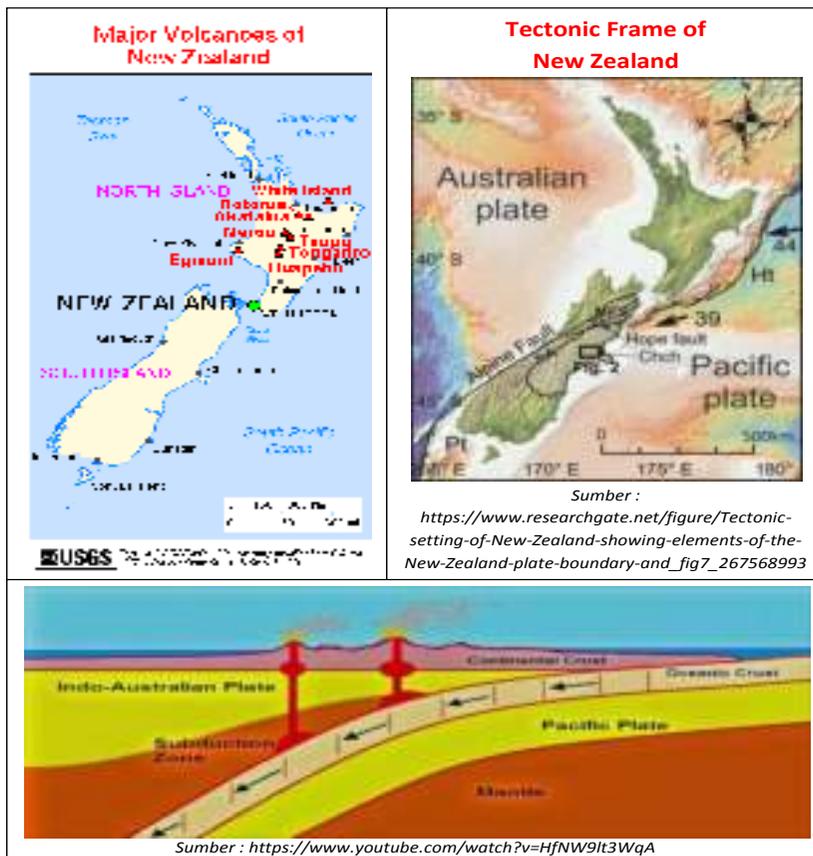
**Gambar 8.9.** Geologi-Hidrogeologi lapangan panas bumi Monte Amiata

Fluida reservoir *Monte Amiata*, diidentifikasi mengandung *Mercury* ( $H_g$ ), yang merupakan sumber dari panambangan *Cinnabar* ( $H_gS$ ). Kandungan tersebut terbebaskan ke udara sebagai  $H_2O$  yang merupakan fraksi gas yang tak ter-kondensasi, bersama dengan gas-

gas CO dan H<sub>2</sub>S, sehingga berpeluang mencemari lingkungan. Secara keseluruhan emisi fraksi gas ke udara yang dominan adalah CO (94-98%), H<sub>2</sub>S (lk 1%), sedangkan *Mercury* berkisar 1-10 mg/Nm<sup>3</sup>. Yang apabila dikaitkan dengan produksi tenaga listrik, emisi *Mercury* akan berkisar antara 300-400g/jam, atau 3-4g/jam, untuk setiap MW kapasitas terpasang.

## 8.2. Lapangan Panas Bumi di New Zealand

*New Zealand* adalah sebuah negara kepulauan dengan penduduk sekitar 4 juta jiwa di samudera Pasifik sebelah baratdaya, sekitar 1500 km tenggara Australia, diseberang laut Tasmania. Terdiri dari 2 pulau besar, yaitu pulau Utara (*North Island*) dan pulau Selatan (*South Island*), serta beberapa pulau lainnya yang lebih kecil



Gambar 8.10. : Konfigurasi Tektonik-Vulkanik New Zealand (North Island)

Pulau Selatan adalah pulau terbesar yang terbagi menjadi 2 bagian oleh pegunungan Alpen Utara yang membujur ditengahnya. Terdapat 18 puncak gunung berketinggian lebih dari 3000 meter dpl, dengan gunung *Cook/Aoraki* (3754 meter dpl) sebagai puncak tertingginya.

Pulau Utara, walaupun tidak terlalu bergunung-gunung, namun banyak terdapat gunung api. oleh gunung tertinggi di pulau Utara, yaitu gunung *Ruapehu* (2797 meter dpl). Dataran tinggi ini juga menjadi tempat bagi danau terbesar di negara ini, yaitu danau *Taupo*, yang terletak didalam kaldera *supervolcano* yang aktif.

*New Zealand* terletak pada zona konvergensi antara lempeng tektonik Pasifik disebelah timur, dengan lempeng tektonik Indo-Australia disebelah barat. Pada bagian selatan, lempeng Indo-Australia menunjam kebawah lempeng Pasifik, namun sebaliknya pada bagian utara, lempeng Pasifik yang menunjam kebawah lempeng Indo-Australia.

Dibawah pulau Utara (*North Island*), bagian lempeng Pasifik yang menunjam kebawah bersama dengan sebagian dari lempeng Indo-Australia yang turut terseret, mulai meleleh pada kedalaman sekitar 100km. Lelehan lempeng-lempeng tektonik tersebut terdorong keatas, bahkan sampai ke permukaan sebagai zona volkanik *Taupo*, dengan kerucut-kerucut gunung api aktifnya, seperti gunung api *Ruapehu*, *Tongariro* dan *Ngaruhoe* dan *Rotorua*.

Sumberdaya panas bumi *New Zealand* memiliki sejarah panjang dalam pemanfaatannya, dimana bangsa *Maori* penduduk asli *New Zealand* telah menggunakannya untuk memasak, mencuci, mandi hangat, penyembuhan serta berbagai ritual budaya lainnya, dan juga menggunakan mineral-mineral panas bumi sebagai cat, pengawet kayu dan pewarna.

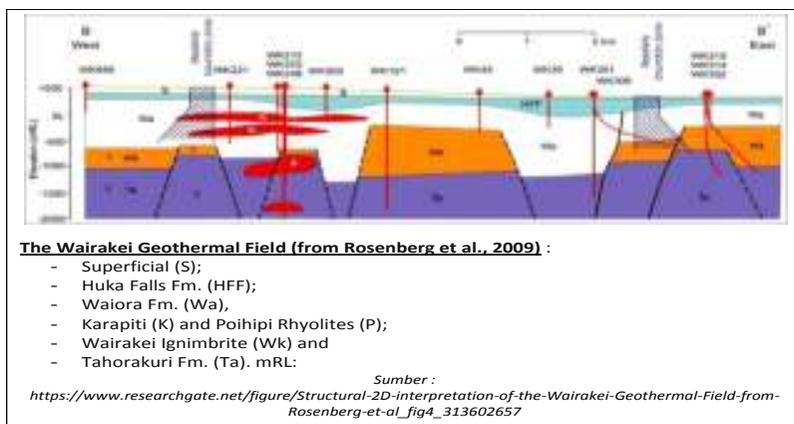
*New Zealand* juga merupakan salah satu pelopor dalam pengembangan listrik tenaga panas bumi ber-skala besar di dunia, dimana eksplorasi tenaga panas bumi telah dilakukannya sejak tahun 1950an. Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) pertama di *New Zealand* adalah PLTP *Wairakei* yang mulai ber-operasi tahun 1958. Pembangunan unit 1 dan 1A (102 MW) dimulai tahun 1956 dan selesai tahun 1960, dimana turbin pertamanya yang menghasilkan tenaga

listrik mulai di-operasikan pada tanggal 15 November 1958. Tahap ke 2 (90 MW) diselesaikan pada bulan Oktober 1963, sehingga total kapasitas terpasangnya menjadi 191 MW.

PLTP *Wairakei*, yang merupakan pembangkit listrik tenaga panas bumi kedua di dunia, dan yang pertama menggunakan teknologi *flash steam*, terletak pada zona vulkanik *Taupo* dsebelah utara kota *Taupo*, di pulau Utara dekat dengan sungai *Waikato*. Namun PLTP ini akan digantikan dengan PLTP *Te Mihi*, yang masih terletak pada zona vulkanik yang sama.

Lapangan panas bumi *Wairakei* terletak dalam zona vulkanik *Taupo*, dimana batuan reservoir utamanya adalah batuan vulkanik *Formasi Wairoa (Wa)*, yang terpanaskan oleh sumber panas magmatius, berupa kubah-kubah magma *Dacite-Rhyolite (K & P)*. Batuan reservoir tersebut terselimuti oleh lapisan penutup (*cap rock*), berupa campuran endapan-endapan kuartar yang tebal, terdiri dari endapan danau, Tufa, Ignimbrit dan berbagai produk vulkanik lainnya.

Lebih dari 290 sumur telah di bor sejak masa eksplorasi, termasuk 148 sumur produksi dan sumur injeksi, yang pad saat ini 73 sumur produksi dan 19 sumur injeksi masih ber-operasi. Umumnya sumur-sumur tersebut berkedalaman kurang dari 1000 meter, namun ada yang dikembangkan sampai mencapai kedalaman 3012 meter. Temperatur fluida panas bumi yang diperoleh, umumnya berkisar antara 209-260°C, namun ada pula yang mencapai temperatur 272°C pada kedalaman 1100 meter.



**Gambar 8.11. :** Diagram konfigurasi geologi bawah permukaan, lapangan panas bumi *Wairakei*



Representative geothermal power plants in New Zealand

Sumber :

New Zealand Geothermal Association homepage  
<http://www.nzgeothermal.org.nz/index.html>

**Gambar 8.12. :** Lokasi lapangan panas bumi New Zealand

**Tabel 8.1. :** Daftar pembangkit listrik tenaga panas bumi di New Zealand

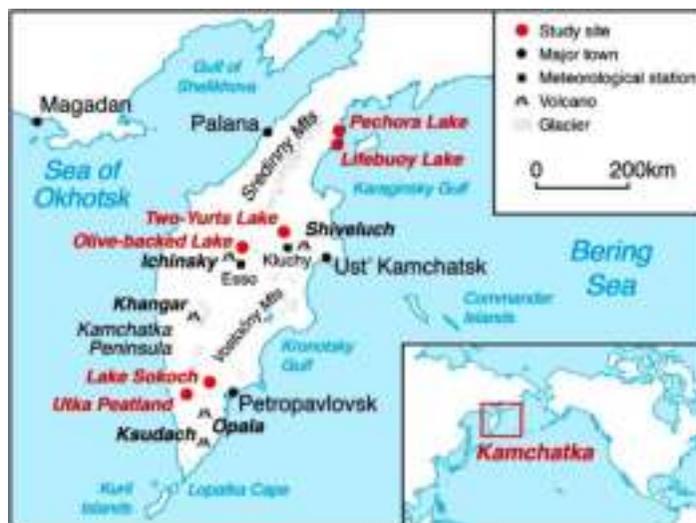
Daftar Pembangkit Listrik Panas Bumi di New Zealand						
Nama	Lokasi	Lapangan	Operator	Kapasitas (MW)	Produksi Tahunan Rata-rata (GWh)	Tahun Beroperasi
Kawerau (BoPE)	Kawerau , Bay of Plenty	Kawerau		6.3	35	1989, 1993
Kawerau (kA24)	Kawerau, Bay of Plenty	Kawerau		8.3	70	2008
Kawerau (MRP)	Kawerau, Bay of Plenty	Kawerau		100	800	2008
Mokai	barat laut dari Taupo	Mokai		112	900	2000
Nga Awa Purua	utara Taupo	Rotokawa		140	1100	2010
Ngawha	dekat Kaikohe, Northland	Ngawha		25	78	1998
Ohaaki	antara Rotorua dan Taupo	Ohaaki		70	400	1989
Poihipi	utara Taupo	Wairakei		55	350	1997
Rotokawa	utara Taupo	Rotokawa		33	210	1997
Te Huka	utara Taupo	Tauhara		23		2010
Wairakei	utara Taupo	Wairakei		161	1310	1958, 2005

Sumber : [http://renewableenergigeothermal.blogspot.com/2013/02/geothermal-di-new-zealand\\_3.html](http://renewableenergigeothermal.blogspot.com/2013/02/geothermal-di-new-zealand_3.html)

*New Zealand* merupakan negara yang mengembangkan potensi energi panas buminya dengan cepat. Segera setelah keberhasilan lapangan panas bumi *Wairakei*, berbagai lapangan panas bumi lainnya berhasil dikembangkan untuk membangkitkan tenaga listrik.

### 8.3. Lapangan Panas Bumi di Rusia – Kamchatka

*Kamchatka* merupakan semenanjung seluas 472 300 km<sup>2</sup>, yang terletak di wilayah timur Rusia. Berbatasan dengan samudera Pasifik di sebelah timur, dengan dibatasi oleh palung *Kuril–Kamchatka* (*Kuril–Kamchatka trench*). Sedangkan di sebelah barat berbatasan dengan laut *Okhotsk*. Secara fisiografi terdiri dari jalur pegunungan *Sredinny* di sebelah barat laut dan pegunungan *Vostocny* di sebelah tenggara, dengan dataran rendah *Kamchatka* diantaranya (*Central Kamchatka Depression*). Semenanjung ini juga merupakan busur vulkanik dengan puncak tertingginya gunung *Klyuchevskaya Sopka* (4750 meter dpl).



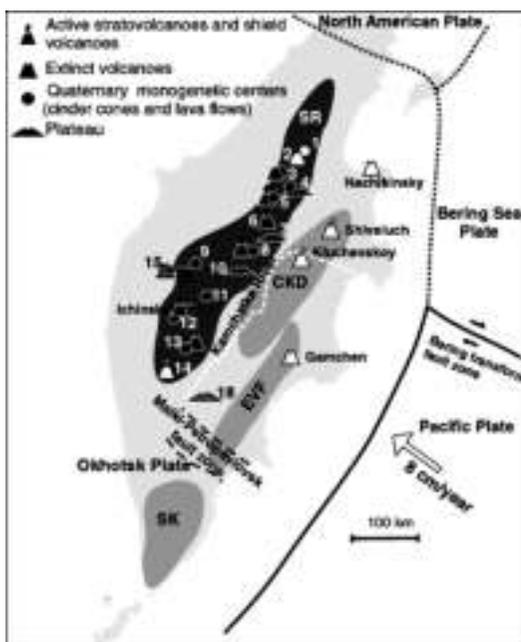
Sumber : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818115001137>

Gambar 8.13. : Lokasi geografis semenanjung Kamchatka

Secara tektonik, semenanjung *Kamchatka* berada pada posisi pertemuan diantara 3 lempeng tektonik besar, yaitu lempeng tektonik Eurasia, Amerika Utara dan Pasifik. Semenanjung *Kamchatka* berada

diatas zona penunjaman lempeng Pasifik dan Amerika Utara kebawah lempeng kecil *Okhotsk (Okhotsk microplate)* yang merupakan pecahan dari lempeng Pasifik, sehingga terangkat ke atas, dengan disertai terobosan-terobosan magma.

Aktivitas gunung api terpicu oleh konvergensi diantara lempeng-lempeng tektonik tersebut, yang mendorong intrusi magma dan erupsi *andesitic*. Zona vulkanik utama di semenanjung ini adalah jalur pegunungan *Sredinny (Sredinny Range-SR)* di sebelah barat laut, dan pegunungan *Vostocny* di sebelah tenggara yang disebut sebagai *Eastern Volcanic Front (EVF)*. Terdapat setidaknya 160 kerucut gunung api di semenanjung *Kamchatka*, dimana 29 diantaranya aktif dan berada dibawah pengawasan. Aktivitas vulkanik inilah yang menjadi sumber panas dari lapangan panas bumi di semenanjung *Kamchatka*.

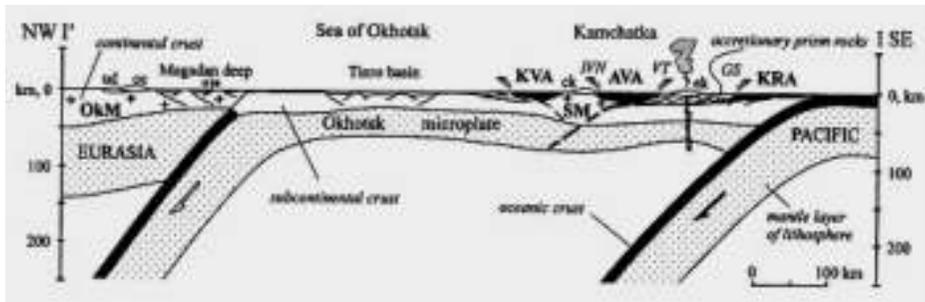


### General plate tectonic setting of Kamchatka

- CKD - Central Kamchatka Depression,  
 EVF - Eastern Volcanic Front,  
 SK - South Kamchatka.  
SR - Sredinny Range :
1. Tobeltsen cone,
  2. Spokojny volcano
  3. Tekletunup stratovolcano and cinder cones,
  4. Ozernovsky lava field, Left and Right Ozernaya plateau,
  5. Sedanka lava field and Titila volcano,
  6. Gorny Institute volcano,
  7. Dvuh'urtochnoe plateau,
  8. Alnej-Chashakondzha massif,
  9. Kekuknajsky lava field,
  10. Kruki Ridge,
  11. Esso monogenetic cones,
  12. Ichinsky stratovolcano and monogenetic lava field,
  13. Achtang stratovolcano and monogenetic cones,
  14. Khangar volcano.
  15. Daik at Khukhch Mount (Perepelov et al. 2006b);
  16. Shield volcano under Bolshoj (Perepelov et al. 2006a);
  17. Shield volcano under Belogolovsky (Churikova et al. 2001);
  18. Baking plateau (Dorendorf et al. 2000a).

Sumber : <http://kamchatka.ginras.ru/>

**Gambar 8.14. :** Tektonik setting semenanjung Kamchatka



Sumber : [americastectonics.weebly.com/okhots-plate.html](http://americastectonics.weebly.com/okhots-plate.html)

Gambar 8.15. : Profil tektonik semenanjung Kamchatka

Zona vulkanik semenanjung Kamchatka adalah wilayah yang potensial bagi pengembangan energi panas bumi, dimana lebih dari 20 lapangan panas bumi telah di eksplorasi. Berbagai jenis lapangan panas bumi terdapat disini, namun secara umum terbagi menjadi lapangan yang potensial ber-temperatur tinggi (>150°C), dan lapangan potensial yang ber-temperatur rendah (<150°C).

Tabel 8.2. : Daftar pembangkit listrik tenaga panas bumi di Kamchatka – Rusia

List of Geothermal power stations in Russia

Name	Location	Field	Operator	Capacity (MW)	Annual Generation (average GWh)	Commissioned
<a href="#">Mutnovskaya Power Station</a>	<a href="#">Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka Krai</a>		<a href="#">RusHydro</a>	50	322.93	2003
<a href="#">Pauzhetskaya Power Station</a>	<a href="#">Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka Krai</a>		<a href="#">RusHydro</a>	14.5	59.5	1966
<a href="#">Verhne-Mutnovskaya Power Station</a>	<a href="#">Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka Krai</a>		<a href="#">RusHydro</a>	12	58.3	1999
Mendelevskaya GeoPP	<a href="#">Kunashir Island, Kuril Islands</a>			1.8		2007
Okeanskaya GeoPP	<a href="#">Iturup, Kuril Islands</a>			3.6		2007 <sup>[6]</sup>

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal\\_power\\_in\\_Russia](https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_power_in_Russia)

Lapangan panas bumi *Musnovskaya*, 70 km di sebelah baratdaya *Petropavlovsk-Kamchatsky*, adalah salah satu lapangan panas bumi penting di semenanjung *Kamchatka*, yang telah menghasilkan tenaga listrik sebesar 50 MW. Lapangan ini merupakan lapangan dengan reservoir uap kering (*dry steam*) dan uap basah (*wet steam*), ber-temperatur tinggi yaitu 240°C, dengan enthalpy mencapai 660 kcal/kg. Diperkirakan masih mempunyai cadangan lebih dari 250 MW.



Sumber :

[https://en.wikipedia.org/wiki/Mutnovskaya\\_Power\\_Station#/media/File:Mutnovskaya\\_GeoTPP.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Mutnovskaya_Power_Station#/media/File:Mutnovskaya_GeoTPP.jpg)

**Gambar 8.16.** : Pembangkit listrik tenaga panas bumi *Musnovskaya* (50 MW)

Potensi panas bumi ber temperatur rendah (<150°C), terutama dimanfaatkan untuk pemanasan wilayah (*district heating, health resort, greenhouses*, dan pertanian/perikanan. Namun pada tahun 1966, Rusia juga mengembangkannya untuk pembangkitan tenaga listrik dengan teknologi siklus biner (*binary cycle*).

Rusia adalah negara yang mengembangkan pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan teknologi siklus biner yang pertama. Yaitu dengan membangun pembangkit tenaga listrik di *Pauzhetka-Kamchatka*, dengan menerapkannya pada pembangkit *Paratunskaya* (750kW) sebagai uji coba, kemudian di ikuti dengan pembangkit *Moskvicheva* dan *Popov* (1970). Maka sejak saat itu, teknologi ini mulai diterapkan diluar Rusia, sehingga mencapai total kapasitas terpasang 2000 MW (*Larjola et al. 2011*).

Metoda siklus biner tersebut dilakukan dengan memanfaatkan energi dari air panas, untuk meng-uapkan fluida kerja (*working fluid*), yang dalam hal ini adalah *Freon R12* yang merupakan senyawa organik dengan titik didih rendah, untuk menggerakkan Siklus Rankine (*Rankine Cycle*). Metoda ini kemudian mendapatkan patent internasional.

Dengan penerapan metoda tersebut, JSC "*RusHydro*" perusahaan pembangkit tenaga listrik terbesar di Rusia, dalam pilot project nya berhasil meningkatkan kapasitas pembangkit listrik tenaga panas buminya, tanpa harus melakukan pemboran sumur tambahan. Kapasitas pembangkit, yang pada awalnya 750 kW, dapat di tingkatkan menjadi 2,5 MW, dengan memanfaatkan sisa air panas (*brine*) yang masih ber temperatur 120°C.

#### **8.4. Lapangan Panas Bumi di Islandia (*Iceland*)**

Islandia atau *Iceland* adalah negara pulau yang berada ditengah samudera Atlantik. Terletak diantara *Greenland* dan *Norwegia* disekitar lingkaran Kutub Utara Artik (*Artic Circle*), merupakan pulau dengan luas 103 000 km<sup>2</sup>, dimana sekitar 80 % dari wilayahnya tak ber penghuni, dengan penduduk hanya sekitar 350 000 jiwa.

Morfologi Islandia terdiri dari dataran, pegunungan, dengan banyak lembah-lembah sempit (*fjords*) dan sungai-sungai es (*glaciers*), salah satunya yang terbesar adalah *Vatnajökull*. Disamping itu, juga banyak dijumpai air terjun, kerucut gunung api dengan dataran batuan *lava* dan semburan-semburan *geyser*.



Sumber : [https://www.researchgate.net/figure/Location-map-of-Kviarjokull-Iceland\\_fig8\\_236962509](https://www.researchgate.net/figure/Location-map-of-Kviarjokull-Iceland_fig8_236962509)

**Gambar 8.17. :** Lokasi Islandia (Iceland)

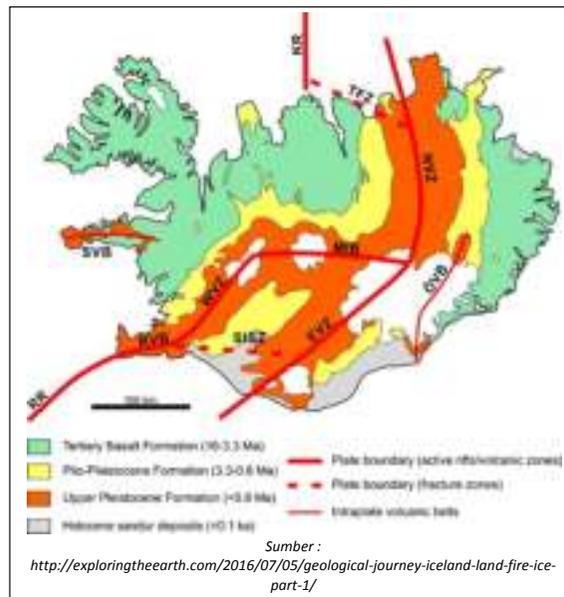
Islandia adalah daratan muda, yang terbentuk dari material-material magma dan berbagai material vulkanik yang terangkat ke permukaan dari bawah laut. Yaitu sebagai akibat dari divergensi, dimana lempeng tektonik terberainya lempeng tektonik Eurasia dan Amerika, yang bahkan sampai saat ini masih terus bergerak, dengan kecepatan rata-rata 5 cm per tahun. Divergensi tersebut merupakan perpanjangan kearah utara dari *Mid Atlantic Ridge*, yang merupakan pembaraian antara lempeng tektonik Afrika dengan Amerika Selatan.

Retakan-retakan (*fissures*) yang terbentuk memungkinkan keluarnya magma ke permukaan, membentuk zona gunung api yang aktif, dimana *Hvannadalshnjúkur* adalah gunung tertinggi diantaranya, dengan ketinggian 2119 meter dpl.

Erupsi gunung api sering terjadi pada daerah ini. Erupsi gunung api *Eyjafjallajökull* terjadi pada tahun 2010, diikuti dengan erupsi gunung api *Grímsvötn* pada tahun 2011. Kemudian gunung api *Holuhraun* mengalami erupsi panjang, dari bulan Agustus 2014 sampai Februari 2015, mengeluarkan lava sejumlah 1,4 km<sup>3</sup>, membentuk hamparan lava seluas lebih dari 85 km<sup>2</sup>, merupakan yang terluas di Islandia sejak tahun 1783.

Struktur tektonik Islandia dicirikan dengan pusat-pusat aktivitas seismik dan vulkanik, terutama pada dataran yang merupakan *rift zone* diantara *Reykjanes Ridge (RR)* disebelah selatan yang merupakan

segmen dari *Mid Atlantic Ridge*, dan *Kolbeinsey Ridge (KR)* disebelah utara.



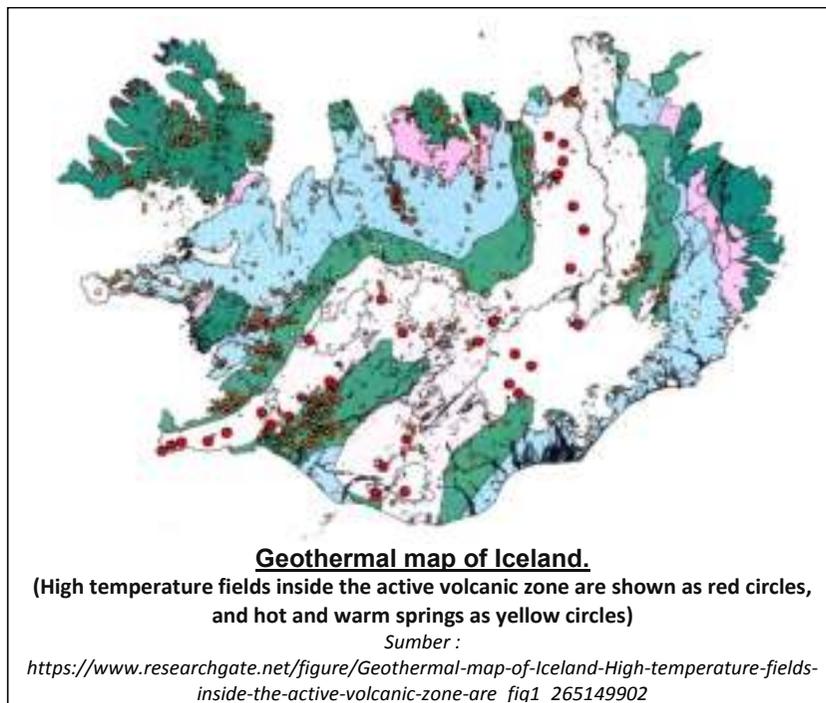
**Gambar 8.18. :** Konfigurasi Geo-tekonik Islandia

Zona vulkanik Islandia terbentuk sepanjang pusat divergensi antara lempeng tektonik Eurasia dan Amerika, yang merupakan perpanjangan dari *Mid Atlantic Ridge*, yaitu terdiri dari :

- *Western Volcanic Zone (WVB)* disebelah barat yang merupakan perpanjangan dari *Reykjanes Ridge (RR)*.
- *Eastern Volcanic Zone (EVZ)* disebelah timur, terhubung dengan *Reykjanes Ridge (RR)* melalui suatu zona retakan (*fractured zone*), yang merupakan batas lempeng tektonik.
- *Northern Volcanic Zone (NVZ)* disebelah utara merupakan perpanjangan dari *Eastern Volcanic Zone (EVZ)*, dengan gunung api *Krafla* pada daerah transisi diantara keduanya. Zona ini terhubung dengan *Kolbeinsey Ridge (KR)* di utara, oleh *the Tjörnes Fracture Zone (TFZ)*, yang merupakan pusat dari aktivitas seismik dan deformasi.

Sistem lapangan panas bumi Islandia, dalam hal ini diklasifikasikan dalam 2 sistem, yaitu :

- *Sistem temperatur tinggi (high temperature system)* dengan temperatur lebih dari 380°C, terdapat disepanjang jalur vulkanik aktif dan zona rekahan (*rift zone*), dimana sumber panasnya berasal dari intrusi magma yang mendekati atau bahkan menerobos permukaan bumi. Sehingga secara umum dapat dikatakan juga sebagai sistem vulkanik
- *Sistem temperatur rendah (low temperature system)* dengan temperature sekitar 175°C, terdapat pada batuan-batuan berumur Tersier-Kuartar, dimana sumber panas berasal dari batuan yang terpanaskan (*hot rock*) dibawahnya.



**Gambar 8.19.** : Peta sebaran lapangan panas bumi Islandia, menunjukkan titik-titik lokasi sistem ber-temperatur tinggi dan ber-temperatur rendah

Tercatat, setidaknya ada 11 lapangan panas bumi di Islandia, yang menunjukkan aktivitasnya, yaitu lapangan-lapangan panas bumi :

1. *Grimsvotn*

2. *Torfajokull glacier and vicinity*
3. *Hengill*
4. *Kverkfjoll*
5. *Krisuvik / Trolladyngja*
6. *Eldvoorp / Svartsengi*
7. *Namafjall / Krafla*
8. *Hagongur*
9. *Reykjanesta*
10. *Vonarskard*
11. *Peistareykir*

Selama berabad-abad, penduduk Islandia telah menggunakan sumber air panas untuk berbagai keperluan. Tenaga panas bumi pertama kali digunakan untuk memanaskan ruangan pada tahun 1907, ketika seorang petani membangun pipa dari sumber mata air panas ke rumahnya. Pada tahun 1930, jalur pipa pertama dibangun di Reykjavík untuk menghangatkan 2 sekolah, 60 rumah, serta rumah sakit utama di kota tersebut. Pada tahun 1945, pipa-pipa tersebut telah terhubung pada lebih dari 2850 rumah. Pemanfaatan utama tenaga panas bumi di Islandia, pada dasarnya adalah untuk pemanasan ruangan, dimana sekitar 85% perumahan dipanaskan dengan tenaga panas bumi.

Pada tahun 2016, tenaga panas bumi memasok sekitar 65% kebutuhan energi Islandia, tenaga air tercatat sebesar 20%, sedangkan bahan bakar fosil sekitar 15% diutamakan untuk memasok kebutuhan sektor transportasi.



Nesjavellir Geothermal Power Station

Sumber :

<https://www.liputan6.com/global/read/3104461/islandia-lakukan-eksperimen-energi-panas-bumi>

**Gambar 8.20. : Pembangkit listrik tenaga panas bumi Nesjavellir (120 MW)**

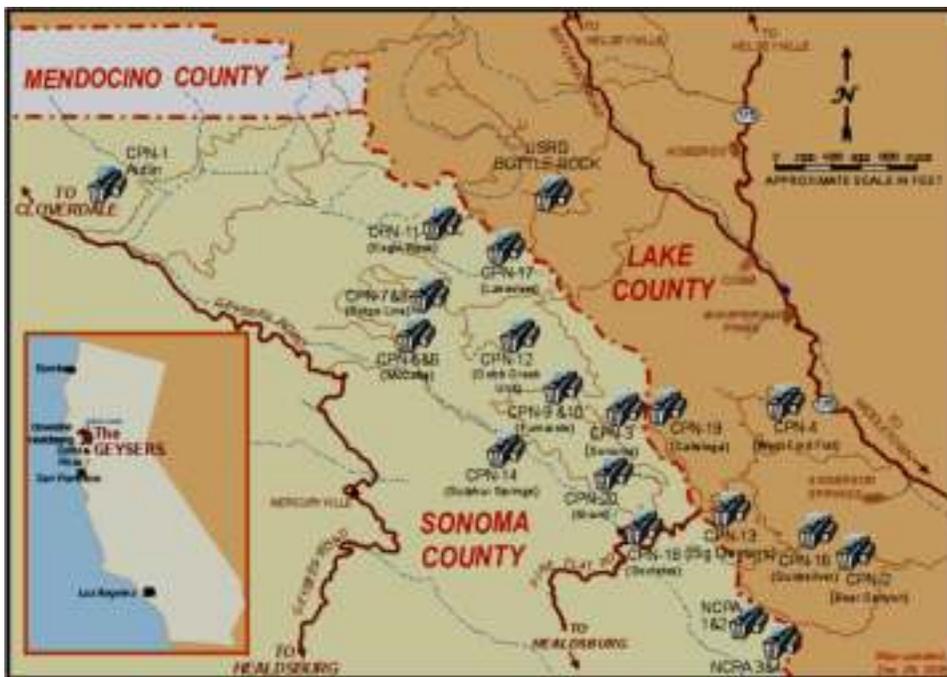
Lima unit pembangkit listrik tenaga panas bumi utama, pada tahun 2010 memasok 26,2% kebutuhan tenaga listrik di Islandia, namun untuk kebutuhan pemanasan ruangan, panas bumi memasok sekitar 87% dari kebutuhan.

Berikut ini adalah 6 pembangkit listrik tenaga panas bumi terbesar di Islandia :

1. *Hellisheiði Power Station (303 MW)*
2. *Nesjavellir Geothermal Power Station (120 MW)*
3. *Reykjanes Power Station (100 MW)*
4. *Svartsengi Power Station (76.5 MW)*
5. *Krafla Power Station (60 MW)*
6. *Þeistareykir Power Station (45 MW)*

## **8.5. Lapangan Panas Bumi di Amerika Serikat – The Geysers**

*The Geysers* merupakan lapangan panas bumi terbesar di dunia, meliputi 18 kompleks pembangkit listrik tenaga panas bumi, membentang seluas sekitar 30 mil persegi (78 km<sup>2</sup>), terletak di *Sonoma, Lake and Mendocino County* – California-Amerika Serikat, dengan pusat di area *Geysers Canyon* dan *Cobb Mountain*. Tenaga listrik dihasilkan dari uap panas bumi diperoleh dari 350 sumur panas bumi lebih, terletak di Pegunungan *Mayacamas* sekitar 72 mil (116 km) sebelah utara San Francisco - California .



Sumber :

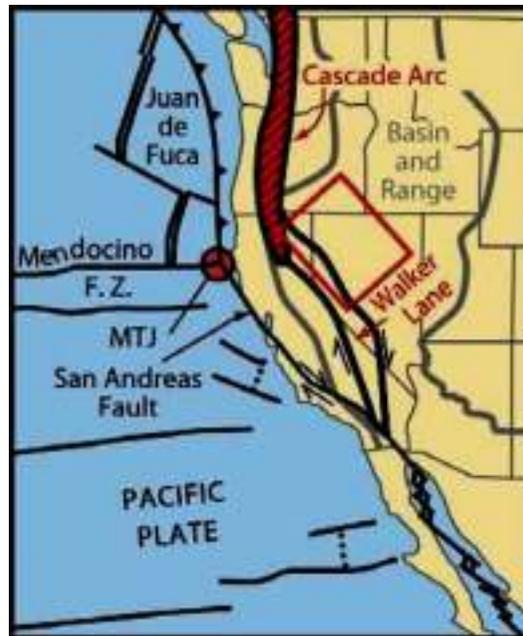
[https://www.thinkgeoenergy.com/pge-signes-extension-to-ppa-with-geysers-power-company-calpine/geysersfield\\_map\\_geysersgeothermalassociation/](https://www.thinkgeoenergy.com/pge-signes-extension-to-ppa-with-geysers-power-company-calpine/geysersfield_map_geysersgeothermalassociation/)

**Gambar 8.21. :** Lokasi lapangan panas bumi The Geysers – California

Sejumlah besar unit pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) ber operasi pada lapangan panas bumi *The Geysers*, dan dikelola oleh berbagai perusahaan. Yaitu *Calpine* sebagai pemilik sebagian besar unit PLTP, kemudian *PG&E* dan *Unocal Geothermal*, *Bottle Rock Power LLC* (perusahaan patungan antara *US Renewables Group* dan *Riverstone Holdings*), dan juga Badan Tenaga California Utara (*NCPA*) dan *Silicon Valley Power*.

### 8.5.1. Geo - Tektonik Setting

Lapangan panas bumi *The Geysers* yang terletak di bagian barat Amerika Serikat, adalah suatu cekungan besar (*great basin*), yang merupakan busur belakang (*back arc*) busur *Cascade* (*Cascade Arc/range*) di sebelah barat laut, dan *Sierra Nevada* disebelah timurlaut, yang di sebelah timurnya berbatasan dengan pegunungan *Rocky Mountains*.



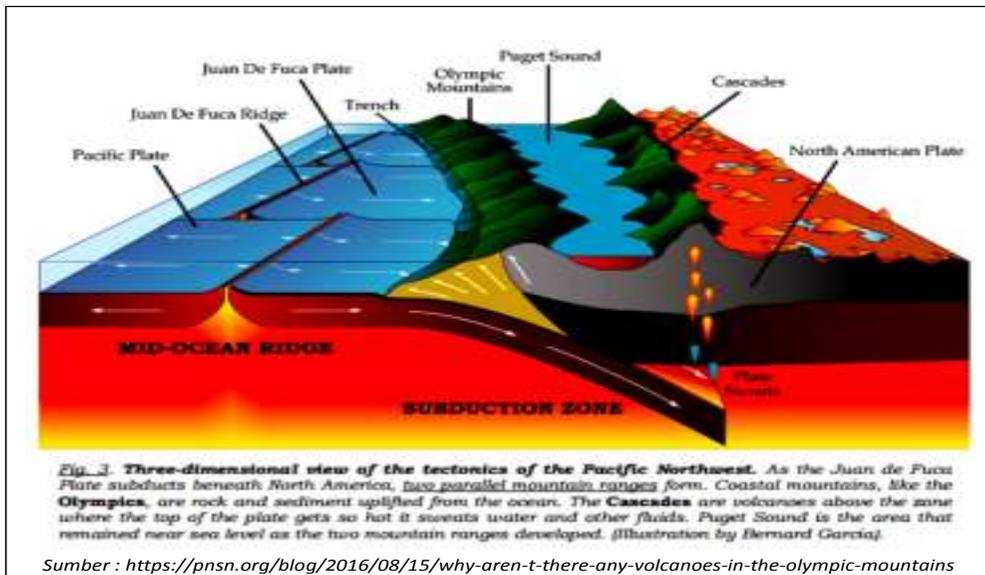
Present tectonic setting of western North America. The red box surrounds the locus of geothermal activity in the northwestern Great Basin. MTJ, Mendocino triple junction.

Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Present-tectonic-setting-of-western-North-America-The-red-box-surrounds-the-locus-of\\_fig10\\_228585834](https://www.researchgate.net/figure/Present-tectonic-setting-of-western-North-America-The-red-box-surrounds-the-locus-of_fig10_228585834)

*Gambar 8.22. : Konfigurasi tektonik lapangan panas bumi The Geysers*

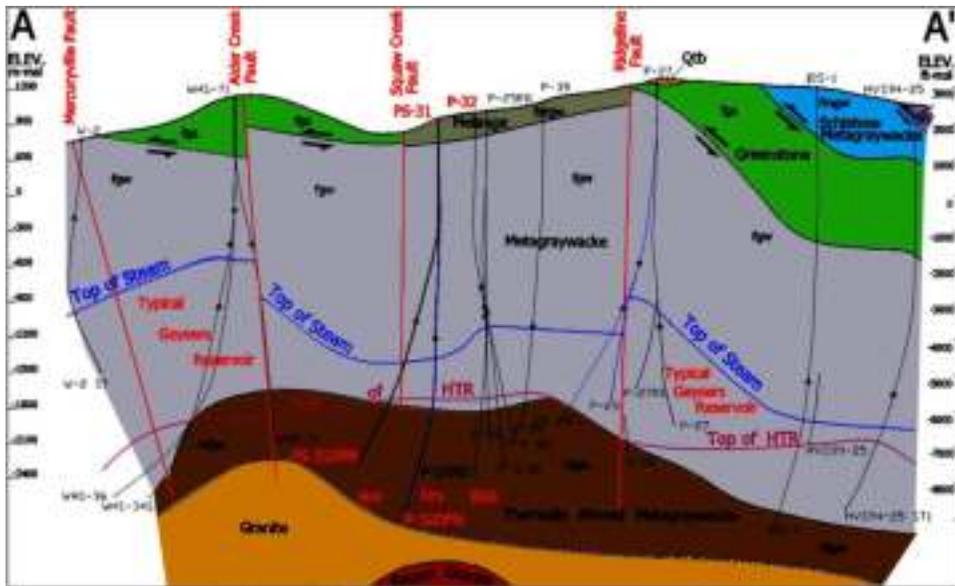
Secara tektonik, lapangan panas bumi *The Geysers* terletak pada perbatasan antara lempeng tektonik Pasifik dan lempeng tektonik Amerika Utara, yang membentuk patahan San Andreas (*San Andreas Fault*). Sementara itu lempeng tektonik kecil *Juan de Fuca* di sebelah utara ber-konvergensi dengan lempeng Amerika Utara, menunjam kebawah membentuk *Cascadia Subduction Zone*, dan mengangkat membentuk busur vulkanik *Cascade* (*Cascade Arc/Range*) di atasnya. Ketiga lempeng tektonik tersebut saling ber-interaksi pada titik yang disebut sebagai *Mendocino Triple Junction (MTJ)*.



**Gambar 8.23. :** Diagram pembentukan busur vulkanik Cascade (Cascade Arc/Range)

Lempeng tektonik *Juan de Fuca* yang menunjam dalam *Cascadia Subduction Zone (CSZ)*, kebawah lempeng tektonik Amerika Utara, pada kedalaman 100 km mulai meleleh dan melepaskan air dan berbagai kandungan fluida lainnya kedalam lapisan batuan yang menutupi mantel. Sementara itu lempeng tektonik *Juan de Fuca* yang meleleh, menerobos kerak bumi membentuk kantong-kantong magma (*intrusion body*) yang memanaskan batuan induk (*host rock*) lapangan panas bumi *The Geysers*. Sebagian lainnya menerobos sampai ke permukaan membentuk busur vulkanik Cascade (*Cascade Volcanoes*).

Lapangan panas bumi *The Geysers* sendiri terletak pada ujung selatan lapangan vulkanik *Clear Lake (Clear Lake Volcanic Field)* yang berumur *Pliocene-Holocene*, di ujung barat lempeng tektonik Amerika Utara. Yaitu dengan batuan induk sumber panas (*hot dry rock*) berupa batuan-batuan *Felcite/Granite* ber umur *Mesozoikum* dan *Graywacke* yang ter alterasi thermal (*Thermally Altered Graywacke*), dengan reservoir pada batuan *graywacke* yang ter-metamorfosa dan ter pecah-pecah (*fractured*), serta lapisan penutup (*cap rock*) berupa lapisan batuan yang telah mengalami alterasi hidrothermal (*Greenstone*).



Geologic cross-section of the Northwest Geysers and location of the EGS Demonstration Area.

Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Geologic-cross-section-A-A-of-the-Northwest-Geysers-and-location-of-the-EGS\\_fig3\\_281845305](https://www.researchgate.net/figure/Geologic-cross-section-A-A-of-the-Northwest-Geysers-and-location-of-the-EGS_fig3_281845305)

**Gambar 8.24.** : Cross section Geologi lapangan panas bumi The Geysers

Lapangan panas bumi *The Geysers* terletak di bagian timur laut antiklin *Mayacamas*, dibatasi oleh zona patahan *Collayomi* di timurlaut dan patahan *Mercuryville* di baratdaya, dimana sabuk *Fransiskan* tengah dan timur yang membentuk inti antiklin ini. Di dalam sabuk inilah terdapatnya unit batuan yang membentuk batuan reservoir berupa *graywacke* yang ter pecah-pecah (*fractured*).

### 8.5.2. Pengembangan Lapangan Panas Bumi *The Geysers*

Panas bumi *The Geysers* telah lama dikenal oleh suku-suku asli Amerika. Mereka memanfaatkan uap dan air panas untuk keperluan penyembuhan dan memasak. Berbagai suku Indian mendiami daerah sekitar Geysers, seperti kelompok-kelompok suku *Pomo*, suku *Wappo*, dan *Miwok*. Suku *Wappo* juga mengumpulkan belerang yang disebut *te'ke*, dan desa *Wappo* yang bernama *tekena'ntsonoma* terletak sekitar 12 mil (19 km) sebelah tenggara *Cloverdale* dan di *Sulphur Creek*.

Tahun 1847 survei dilakukan oleh *John Fremont* di Pegunungan *Sierra*, dan *Great Basin* oleh *William Bell Elliot*, dan menyebut daerah tersebut sebagai *The Geysers*, walaupun manifestasi panas bumi yang ditemukannya sesungguhnya adalah *fumarol*.

Tidak seperti kebanyakan sumberdaya panas bumi pada umumnya, *The Geysers* merupakan lapangan panas bumi uap kering (*dry steam*), dengan sumber panas berupa *hot dry rock*, yang menghasilkan sejumlah besar uap panas, seperti halnya lapangan panas bumi *Lardelerro* di Italia. Yaitu dihasilkan dari batuan reservoir berupa *batupasir greywacke*, dengan lapisan batuan penutup (*cap rock*) terdiri dari campuran berbagai batuan dengan permeabilitas rendah (*greenstone*). Penelitian gravitasi dan seismik menunjukkan bahwa sumber pemanasan dari reservoir uap pada lapangan ini, merupakan kantong *magma* yang besar pada kedalaman lebih dari 4 mil (6,4 km) di bawah permukaan *Clear Lake Volcanic Field*, dengan diameter lebih dari 8 mil (13 km).

Pembangkitan tenaga listrik panas bumi pertama di lembah *Geysers*, dikembangkan oleh *The Geysers Resort*, dan dibuka pada tahun 1921, dan menghasilkan 250 kW energi untuk penerangan resort. Berikutnya, pada tahun 1960, *Pacific Gas and Electric* mengoperasikan pembangkit listrik tenaga panas bumi *The Geysers*, dengan kapasitas 11 MW.

Walaupun sebagian besar lapangan panas bumi *The Geysers* merupakan lapangan panas bumi uap kering (*dry steam / steam dominated*), namun lapangan ini juga mencakup bagian yang tercatat memiliki potensi energi dengan karakteristik uap basah (*wet steam / water dominated*). Yaitu wilayah di sebelah selatan *Clear Lake*, yang sampai dengan saat itu belum dikembangkan.

Upaya pengembangan pembangkitan tenaga listrik *water dominated system* dilakukan pertama kali pada tahun 1979, di lapangan *East Mesa - Imperial Valley, California*. Yang dilakukan oleh *BC McCabe* dari *Magma Power Company*, pada beberapa lapangan termasuk *The Geysers*.

Pada tahun 1981, *DOE-Department Of Energy* Amerika Serikat, mendukung upaya pengembangan teknologi biner (*binary technology*) dalam upaya eksploitasi sumber panas bumi yang ber-temperatur

rendah, yaitu dengan penelitian yang dilakukan di *Imperial Valley of California*, yang menunjukkan hasil bahwa teknologi tersebut mempunyai tingkat kelayakan teknis dan komersial yang memadai. Yaitu seperti yang ditunjukkan dalam produksi tenaga listrik dari sumber panas bumi bersuhu sedang, yang menggunakan teknologi biner di *Raft River*.

Pada tahun 1984, tenaga listrik panas bumi pertama dengan teknologi biner di *Nevada*, mulai ber operasi menghasilkan tenaga listrik sebesar 1,3 MW. Diikuti dengan pembangkit tenaga listrik di *Roosevelt Hot Springs-Utah*, yang menghasilkan tenaga listrik 20 MW pada tahun yang sama. Sementara itu, pembangkit listrik *dual-flash Heber online* di *Imperial Valley of California* menghasilkan daya sebesar 50 MW.

Pada tahun 1989, pembangkit listrik *geopressure-geothermal hybrid* (mesin Rankine / gas organik) pertama di dunia mulai di-operasikan di *Pleasant Bayou-Texas*, dengan menggunakan panas sumberdaya *geopressured*, dan *metana* sebagai fluida kerjanya.

**Tabel 8.3. : Daftar PLTP lapangan panas bumi *The Geysers - California***

Name	Unit	Type	Status	Capacity (MW)	Commissioned	Decommissioned
Bottle Rock	BRP	Dry steam	Operational	55	March 1985 <sup>(note 1)</sup> October 2007	
Aidlin	Calpine 1	Dry steam	Operational	20	June 1989	
Bear Canyon	Calpine 2	Dry steam	Operational	20	September 1988	
Sonoma	Calpine 3	Dry steam	Operational	78	October 1983	
West Ford Flat	Calpine 4	Dry steam	Operational	27	December 1988	
McCabe	Calpine 5	Dry steam	Operational	55	December 1971	
	Calpine 6	Dry steam	Operational	55	December 1971	
Ridge Line	Calpine 7	Dry steam	Operational	55	November 1972	
	Calpine 8	Dry steam	Operational	55	November 1972	
Fumarole	Calpine 9	Dry steam	Offline since 2001	55	November 1973	
	Calpine 10	Dry steam	Offline since 2000	55	November 1973	
Eagle Rock	Calpine 11	Dry steam	Operational	110	May 1975	
Cobb Creek	Calpine 12	Dry steam	Operational	110	March 1979	
Big Geysers	Calpine 13	Dry steam	Operational	60	May 1980	
Sulfur Springs	Calpine 14	Dry steam	Operational	114	September 1980	
PG&E 15 <sup>(note 2)</sup>	Calpine 15	Dry steam	Decommissioned	62	June 1979	1997 (Dismantled)
Quicksilver	Calpine 16	Dry steam	Operational	119	October 1985	
Lake View	Calpine 17	Dry steam	Operational	119	December 1982	
Socrates	Calpine 18	Dry steam	Operational	119	February 1983	
Calistoga	Calpine 19	Dry steam	Operational	80	April 1984	
Grant	Calpine 20	Dry steam	Operational	119	October 1985	
Buckeye	Calpine	Dry steam	Planned	?	TBD	
Wild Horse	Calpine	Dry steam	Planned	?	TBD	
Coldwater Creek	CCPA 1	Dry steam	Decommissioned	65	May 1988	2000 (Dismantled)
	CCPA 2	Dry steam	Decommissioned	65	October 1988	2000 (Dismantled)
NCPA 1 & 2	NCPA 1	Dry steam	Operational	55	February 1983	
	NCPA 2	Dry steam	Operational	55	February 1983	
NCPA 3 & 4	NCPA 3	Dry steam	Operational	55	November 1985	
	NCPA 4	Dry steam	Operational	55	November 1985	
TBD	Ormat	Dry steam	Planned	30	TBD	
PG&E 1 & 2	PG&E 1	Dry steam	Decommissioned	12	September 1960	1993 (Dismantled)
	PG&E 2	Dry steam	Decommissioned	14	September 1960	1993 (Dismantled)
PG&E 3 & 4	PG&E 3	Dry steam	Decommissioned	28	March 1963	1995 (Dismantled)
	PG&E 4	Dry steam	Decommissioned	28	March 1963	1995 (Dismantled)

1. Bottle Rock was re-commissioned in October 2007 after being brought offline in 1991 by its former owner DWR.  
2. Calpine never renamed PG&E 15 due to its decommissioning two years before being acquired from PG&E and Unocal Geothermal

Sumber : [https://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Geysers](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Geysers)

Pada tahun 1999, tekanan uap pada sumur produksi lapangan *The Geysers*, ter-indikasi berkurang, sehingga berdampak pada penurunan produksi tenaga listriknya. Maka, diupayakan re-injeksi air kedalam reservoir untuk meningkatkannya kembali. Hal tersebut dilakukan dengan injeksi air limbah, yang disalurkan melalui pipa sepanjang 50 mil (80 km) dari sumbernya pada instalasi pengolahan air limbah *Lake County Sanitation*.

Pada tahun 2003, hal tersebut juga dilakukan atas kerjasama antara pemerintah Kota *Santa Rosa* dan *Calpine Corporation*, dengan membangun pipa sepanjang 42 mil, yang kemudian dikenal sebagai *SGRP-Santa Rosa Geysers Recharge Project*. Maka sejak itu, *SRGRP* mengirimkan sekitar 11 juta galon air limbah tersier per-hari untuk menginjeksi reservoir panas bumi *The Geysers*. Pada tahun 2004, 85% dari limbah yang dihasilkan oleh empat instalasi pengolahan limbah yang melayani 10 komunitas di *Lake County*, disalurkan untuk re-injeksi reservoir lapangan panas bumi *The Geysers*.

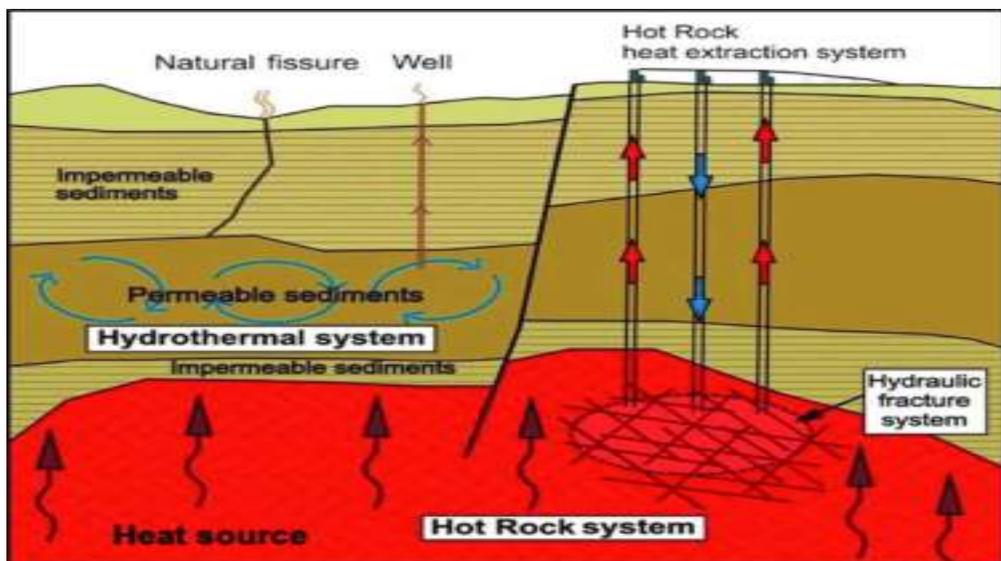
Injeksi air limbah tersebut telah menghasilkan manfaat ganda. Yaitu, pada satu sisi melindungi saluran air permukaan lokal *Lake County* dan *Clear Lake*, yang sebelumnya dialiri air limbah. Pada sisi lain lapangan panas bumi *The Geysers* yang diisi ulang dengan injeksi limbah cair tersebut, pada tahun 2004 tercatat telah kembali meningkatkan kapasitas produksi tenaga listrik setara dengan sekitar 77 MW.

### **8.5.3. Upaya Peningkatan Sistem Panas Bumi (EGS- Enhanced Geothermal System)**

Konsep peningkatan sistem panas bumi, atau yang disingkat *EGS*, pertama kali diajukan oleh sekelompok peneliti *Los Alamos*, dalam suatu simposium yang di sponsori oleh *DOE* pada tahun 1990. Konsep dasar dari *EGS* adalah upaya bagaimana pembangkitan listrik tenaga panas bumi dapat dilakukan tanpa tergantung pada sirkulasi fluida panas yang tersedia secara alamiah (*natural convective hydrothermal resources*) atau yang disebut sebagai *Hot Wet Rock (HWR) hydrothermal technology*, seperti yang berlaku umum pada saat itu. Hal ini didasari pada pengetahuan, bahwa sebagian besar (lk 98%) bahkan nyaris tak terbatas dari total potensi sumber

panas dunia, merupakan batuan dasar yang panas, namun hanya sebagian kecil saja yang didukung oleh sistem sirkulasi fluida panas secara alamiah (*natural convective hydrothermal system*). Maka fokus EGS, adalah me-maksimalkan potensi panas bumi yang terkandung dalam batuan panas, atau disebut sebagai *HDR-Hot Dry Rock*, dengan membangun suatu sistem sirkulasi fluida air panas secara artifisial.

Prinsip teknologi EGS dalam hal ini adalah, upaya meningkatkan kapasitas atau bahkan menciptakan reservoir panas bumi pada areal HDR, dengan stimulasi hidraulik. Yaitu dengan meningkatkan atau membangun permeabilitas pada batuan reservoir, melalui proses *hydraulic fracturing* atau *fracking*.



Sumber : [https://www.researchgate.net/figure/Geological-settings-of-hydrothermal-and-hot-rock-geothermal-systems-modified-from-21\\_fig2\\_329488398](https://www.researchgate.net/figure/Geological-settings-of-hydrothermal-and-hot-rock-geothermal-systems-modified-from-21_fig2_329488398)

**Gambar 8.25.** : Ilustrasi perbandingan antara Enhanced Geothermal System dengan teknologi fracking (hot rock system) dengan teknologi panas bumi konvensional (hydrothermal system)

Suatu penelitian EGS-HDR oleh *Los Alamos Laboratory*, pertama kali dilakukan di *Fenton Hill - New Mexico*, dimana pada tahun 1977 dilakukan pemboran sampai kedalaman 2,6 km, yang mencapai batuan ber-temperatur 185°C. Pada tahun 1979, dengan stimulasi

hidraulik, permeabilitas batuan tersebut dikembangkan dan di uji-operasikan selama setahun, yang hasilnya menunjukkan ekstraksi fluida panas yang memadai dari batuan kristalin, yang pada awalnya mempunyai permeabilitas rendah. Pada tahun 1986 pengujian ekstraksi panas (*heat extraction*) dilanjutkan dengan re-injeksi air ber-temperatur 20°C secara konstan. Setelah 30 hari, diperoleh peningkatan ekstraksi panas secara konstan, mencapai temperatur sekitar 190°C, yang setara dengan tingkat energi termal sebesar 10 MW.

Namun demikian pengembangan potensi panas bumi dengan teknologi *hydraulic fracturing* atau *fracking*, masih terus dikaji tingkat kelayakannya secara komersial, termasuk dampak lingkungan yang mungkin ditimbulkannya. Bagaimanapun, pengalaman terpicunya gempa induksi, seperti pada proses *hydraulic fracturing* di berbagai tempat, perlu mendapat perhatian dan dijadikan bahan pertimbangan.



Data terbaru dari *Direktorat Panas Bumi, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi* tahun 2018, mencatat sumberdaya panas bumi yang telah dimanfaatkan mencapai 1 948,5 MW (1 197 MW status 2010), terdiri dari 13 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) pada 11 Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP), belum termasuk PLTP Karaha, PLTP Sorik Marapi, PLTP Lumut Balai dan PLTP Sokoria, yang direncanakan akan beroperasi juga pada tahun 2018.

*Tabel 9.1. : Daftar PLTP di Indonesia tahun 2018*

No	PLTP	Pengembang/ Operator	Kapasitas Total	WKP, Lokasi
1	PLTP Sibayak	PT Pertamina Geothermal Energy	12 MW	Sibayak - Sinabung, Sumatera Utara
2	PLTP Sarulla	Sarulla Operation Ltd	330 MW	Sibual-buali, Sumatera Utara
3	PLTP Ulubelu	PT Pertamina Geothermal Energy	220 MW	Waypanas, Lampung
4	PLTP Salak	PT Star Energy Geothermal Salak. Ltd	377 MW	Cibeureum - Parabakti, Jawa Barat
5	PLTP Wayang Windu	Star Energy Geothermal Wayang Windu	227 MW	Pangalengan, Jawa Barat
6	PLTP Patuha	PT Geo Dipa Energy	55 MW	Pangalengan, Jawa Barat
7	PLTP Kamojang	PT Pertamina Geothermal Energy	235 MW	Kamojang - Darajat, Jawa Barat
8	PLTP Darajat	Star Energy Geothermal Drajat	270 MW	Kamojang - Darajat, Jawa Barat
9	PLTP Dieng	PT Geo Dipa Energy	60 MW	Dataran Tinggi Dieng, Jawa Tengah
10	PLTP Karaha	PT Pertamina Geothermal Energy	30 MW	Karaha Bodas, Jawa Barat
11	PLTP Matalako	PT Perusahaan Listrik Negara	2,5 MW	Matalako, NTT
12	PLTP Ulumbu	PT Perusahaan Listrik Negara	10 MW	Ulumbu, NTT
13	PLTP Lahendong	PT Pertamina Geothermal Energy	120 MW	Lahendong - Tompasso, Sulawesi Utara

Sumber :

<https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/ini-dia-sebaran-pembangkit-listrik-panas-bumi-di-indonesia>

## 9.1. Posisi dan Konfigurasi Tektonik Kepulauan Indonesia

Didalam skema lingkungan geologi global, sebagian dari kepulauan Indonesia termasuk dalam lingkungan batas lempeng (*plate boundary*), yang merupakan *konvergensi* diantara lempeng kerak benua dengan lempeng kerak samudera.

Indonesia negara kepulauan dengan lautan yang meliputi sebagian besar wilayahnya, terletak diantara *zona lautan terbuka*, samudera Hindia disebelah selatan dan samudera Pasifik disebelah timurlaut, disamping itu benua Eurasia disebelah utara dan benua Australia disebelah tenggara, menggambarkan posisi geologis kepulauan Indonesia dalam interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi besar dunia.

*Konvergensi* diantara lempeng-lempeng kerak bumi membentuk *zona laut antara (komplek transisi)*, berupa jalur palung laut dalam disebelah barat pulau Sumatera, selatan pulau Jawa dan Nusa Tenggara, menerus ke utara dengan laut Banda di Maluku, bersambung dengan palung Mindanao dan Mariana di Filipina. Sementara itu *konvergensi* menyebabkan akresi pengangkatan dan pembentukan deretan pulau-pulau yang memisahkan laut Cina Selatan, laut Sulu dan laut Sulawesi dari *zona lautan terbuka* samudera Pasifik (*disebut sebagai laut marginal*).

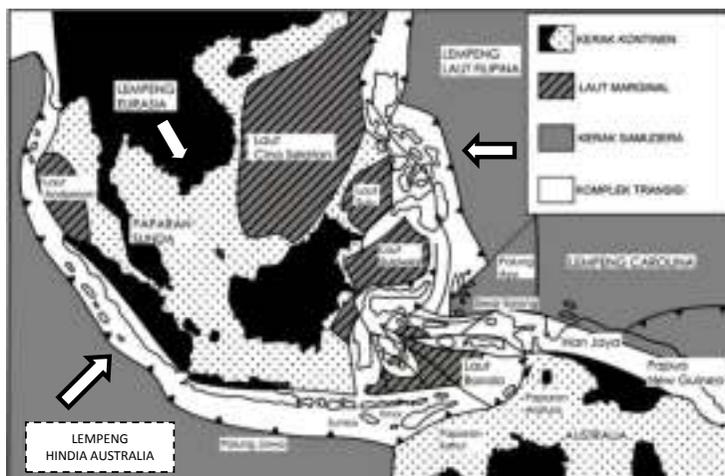
Mencairnya masa es pada akhir jaman *Holocene* menyebabkan naiknya permukaan air laut, membentuk *zona laut transgresi* yang menggenangi dataran-dataran kraton benua yang rendah. Maka sebagian dari Kraton Eurasia tergenang sebagai *zona laut transgresi*. Zona ini meliputi laut dangkal diantara pulau Jawa, Kalimantan dan Sumatera, disebut sebagai Dangkal atau Paparan Sunda (*Sundaland*). Sementara itu, bagian benua Australia yang tergenang membentuk laut Arafuru diantara Australia Utara dengan Papua, disebut sebagai Dangkal atau Paparan Sahul (*Sahuland*).

Fisiografi dan konfigurasi tektonik Kepulauan Indonesia masa kini, adalah merupakan hasil interaksi diantara tiga lempeng kerak bumi sejak jaman Neogen, yaitu : Lempeng Samudera Filipina (*Philippine Sea plate*) yang bergerak (10 cm/th) kearah NNW, Lempeng Hindia-Australia (*Hindia-Australian plate*) yang bergerak (8 cm/th) ke

arah NNE, dan Lempeng Benua Eurasia (*Eurasian plate*) yang relatif stasioner, bergerak jauh lebih lambat ke arah SE (4 cm/th).

Berdasarkan pengamatan karakteristik geologi dan geofisika, *Simandjuntak & Barber (1996)* membagi wilayah Kepulauan Indonesia menjadi 5 wilayah :

1. Wilayah tenggara Lempeng Eurasia yang membentuk wilayah *Continental Craton*, dataran Sunda (*Sundaland*) yang meliputi Sumatra, Jawa Barat, dan Kalimantan Barat.
2. Wilayah lempeng samudera Laut Filipina di timurlaut.
3. Wilayah *Continental Craton* Australia, ke utara meliputi Irian Jaya, Paparan Arafura dan Sahul.
4. Wilayah Lempeng Samudera Hindia.
5. Wilayah zona transisi yang menandai zona interaksi lempeng masa kini dengan seismisitas yang aktif dan vulkanisme mulai dari bagian barat Sumatra, Jawa, Kepulauan Nusa Tenggara dan Banda, Utara Irian melalui Sulawesi dan Maluku, ke arah utara ke Kepulauan Filipina. Di zona ini subduksi lempeng tetap aktif serta dicirikan oleh lempeng-lempeng mikrokontinen yang membentuk zona-zona tumbukan.

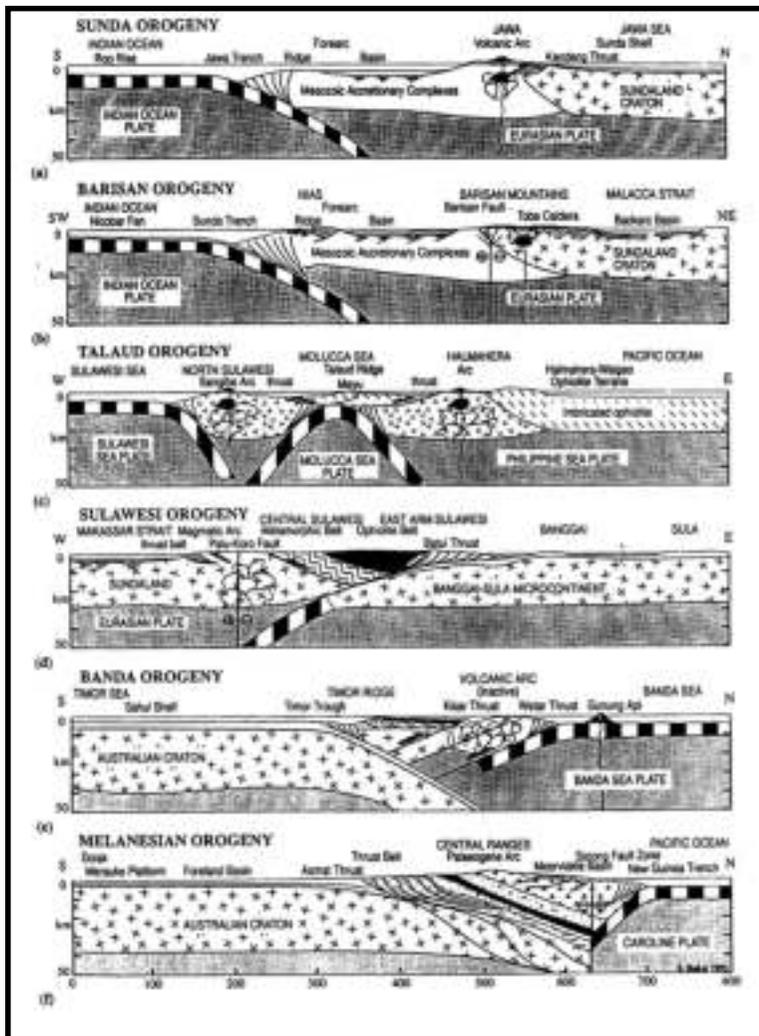


Sumber : *Simandjuntak & Barber, 1996.*

**Gambar 9.2.** : Konfigurasi tektonik kepulauan Indonesia (*Simandjuntak & Barber, 1996*)

Simandjuntak & Barber (1996) juga meng-identifikasi ada 6 jenis jalur orogen (orogenic belt) sebagai hasil interaksi diantara lempeng-lempeng kerak bumi yang membentuk Kepulauan Indonesia, yang telah berlangsung sejak kala Miosen Tengah sampai sekarang, yaitu :

- a. Orogen Sunda (*Sunda Orogeny*) di Jawa dan Nusa Tenggara, melibatkan subduksi lempeng samudera dengan arah tegaklurus, menghasilkan jalur orogen tipe *Andean* beserta palung, kompleks akresi, cekungan depan-busur (*forearc basin*), busur magmatik dimana gunungapi tumbuh di tepi kontinen *Sundaland*.
- b. Orogen Barisan (*Barisan Orogeny*) di Sumatra, dengan arah konvergen miring (*oblique convergence*) sehingga menghasilkan sistem sesar mendatar Sumatra pada busur magmatiknya, dan sepanjang sesar ini pula suatu segmen kerak kontinen bergerak ke arah utara di sepanjang bagian barat *Sundaland*.
- c. Orogen Talaud (*Talaud Orogeny*) di bagian utara Laut Maluku, merupakan konvergensi busur magmatik *oceanic* Sangihe dan Halmahera dengan Lempeng Laut Maluku.
- d. Orogen Sulawesi (*Sulawesi Orogeny*) di Sulawesi timur berupa tumbukan blok-blok mikrokontinen dengan sistem subduksi di sepanjang tepi timur *Sundaland*.
- e. Orogen Banda (*Banda Orogeny*) di Kepulauan Banda, di wilayah antara Pulau Sumba dan Tanimbar, berupa tumbukan antara tepi utara kontinen Australia dengan sistem subduksi di sepanjang bagian selatan Busur Banda.
- f. Orogen Melanesia (*Melanesian Orogeny*) di Pulau Papua, merupakan suatu tahapan lebih lanjut tumbukan tepi utara kontinen Australia dengan busur magmatik pada Lempeng Laut Filipina yang dimulai pada Miosen Awal.



Sumber : Simandjuntak & Barber, 1996

**Gambar 9.3.** : Jalur-jalur orogen (orogenic belt) pembentuk kepulauan Indonesia (Simanjuntak & Barber, 1996)

Kepulauan Indonesia bagian barat merupakan tepian dari lempeng benua Eurasia yang berbatasan dengan lempeng samudera Hindia-Australia. Yaitu meliputi bagian barat pulau Sumatera termasuk jajaran pulau disebelah baratnya, pulau Jawa bagian selatan, dan kepulauan Nusa Tenggara dari Bali sampai pulau Timor. Interaksi *konvergensi* antara lempeng samudera dengan lempeng benua ini

membentuk busur pegunungan vulkanik, yang termasuk dalam busur *Mediterrania* yang disebut juga sebagai *Alpide Belt*, disepanjang pegunungan Bukit Barisan di Sumatera (*Barisan Orogeny*), deretan gunung api disepanjang pulau Jawa sampai ke Nusa Tenggara (*Sunda Orogeny*).

Sedangkan Indonesia bagian timur, yang meliputi pulau Papua bagian utara, merupakan tepian dari lempeng benua Australia berbatasan dengan lempeng samudera Filipina dan Carolina yang merupakan pecahan dari lempeng samudera Pasifik. Batas diantara kedua lempeng kerak bumi tersebut (*Melanesian Orogeny*) lebih merupakan interaksi *transform*, sehingga tidak menghasilkan aktivitas gunung api. Namun berbelok kearah utara, lempeng samudera Filipina ber *konvergensi* dengan lempeng Eurasia, sehingga memicu aktivitas vulkanik pada tepian benua, yang dikenal sebagai jalur Lingkar Pasifik (*Circum Pasific*). Gunung-gunung api di Sulawesi Utara dan Halmahera (*Talau Orogeny*) adalah bagian dari jalur ini.

Antara pulau Sulawesi dan kepulauan Maluku (*Sulawesi Orogeny & Banda Orogeny*), merupakan zona batas lempeng yang kompleks (*Complex Plate Boundary*), adalah zona pertemuan dimana lempeng-lempeng Eurasia, Hindia-Australia dan lempeng Filipina saling berinteraksi, namun tidak atau hanya sedikit memicu aktivitas vulkanik.

Sementara itu pada bagian tengah, pulau kalimantan merupakan bagian dari Kraton Benua (*Continental Craton*) Eurasia, sedangkan sebagian dari Papua, terutama bagian selatan, adalah bagian dari Kraton Benua (*Continental Craton*) Australia.

Potensi lapangan panas bumi di Indonesia, walaupun secara umum berkaitan erat dengan busur vulkanik *Mediterrania* yang disebut juga sebagai *Alpide Belt*, dan *Circum Pasific* yang sering disebut sebagai *ring of fire*, namun secara rinci berhubungan dengan *Sunda Orogeny*, *Barisan Orogeny*, dan *Talau Orogeny*.

## **9.2. Sejarah Perkembangan Pemanfaatan Energi Panas Bumi Indonesia**

Usulan pertama tentang pemanfaatan energi dari gunung berapi berawal pada masa kolonial Belanda. Yaitu atas usulan *JB Van Dijk*

pada tahun 1918 untuk memanfaatkan sumber energi panasbumi di daerah Kamojang, Jawa Barat. Hal ini merupakan titik awal dari perkembangan panas bumi di Indonesia, yang secara kebetulan bersamaan waktu dengan tahun awal perusahaan panas bumi dunia di *Larderello-Italia*, namun belum di tindak lanjuti dengan implementasinya.

Tindak lanjut dari usulan tersebut baru dilaksanakan pada tahun 1926 - 1928, dengan melakukan pemboran eksplorasi panas bumi sebanyak 5 titik di lahan Kawah Kamojang. Dari 5 titik pemboran (KMJ-1 sd KMJ-5), satu titik (KMJ-3) berhasil mengeluarkan uap panas kering pada kedalaman 66 meter, dengan temperatur 140°C dan tekanan 3,5 - 4 bar. Sampai saat ini lubang bor tersebut masih mengeluarkan uap (140°C, 2,5 atm), dan dikenal sebagai *kawah Lokomotif*. Namun sejak tahun 1928 kegiatan perusahaan panasbumi di Indonesia praktis terhenti sampai dengan tahun 1964. Penyelidikan sumberdaya panas bumi baru dilakukan kembali secara aktif pada tahun 1964 sampai dengan tahun 1981, secara bersama oleh *Direktorat Vulkanologi, Lembaga Masalah Ketenagaan (LMK -PLN)* dan *ITB*.

Penyelidikan yang lebih komprehensif di lapangan Kamojang dilakukan pada tahun 1972, meliputi penyelidikan geokimia, geofisika, dan pemetaan geologi. Sementara itu di tahun yang sama, dilakukan pula penyelidikan di Cisolok-Jawa Barat, dan kawah Ijen-Jawa Timur. Pada tahun 1972 dilakukan pula pemboran 6 sumur panas bumi di pegunungan Dieng -Jawa Tengah, dengan kedalaman mencapai 613 meter, namun tak satupun yang menghasilkan uap panas bumi.

Suatu studi pra-kelayakan (*pre-feasibility study*) untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi dilakukan pada tahun 1972 oleh *Geothermal Energy New Zealand*. Pada tahun 1974, PERTAMINA (perusahaan minyak bumi negara) turut terjun aktif menyertai PLN dalam kegiatan panas bumi di Kamojang, dan berhasil mengembangkan pembangkit tenaga listrik PLTP Kamojang dengan kapasitas 30 MW yang di selesaikan pada tahun 1977, diresmikan pada tanggal 1 Februari 1983, dan di tingkatkan menjadi 140 MW pada tahun 1987. Disamping itu, PERTAMINA juga mengembangkan dua buah monoblok panas bumi, dengan kapasitas 2 MW di lapangan Kamojang (27 November 1978) dan Dieng (14 Mei 1981).

Di luar Pulau Jawa, sumberdaya panas bumi dikembangkan di Lahendong-Sulawesi Utara, dan di Kerinci-Lampung. Pada 1980-an usaha pengembangan panas bumi ditandai dengan diterbitkannya Keppres No. 22 Tahun 1981, dimana PERTAMINA ditunjuk sebagai pelaksana survei eksplorasi dan eksploitasi panas bumi di seluruh Indonesia, sehingga sejak tahun 1982 kegiatan di Lahendong-Sulawesi Utara dilanjutkan oleh PERTAMINA.

Tahun 1982, PERTAMINA bekerja sama dengan *Unocal Geothermal of Indonesia (UGI)*, dalam pengembangan sumur panas bumi di gunung Salak-Jawa Barat. Dan pada tahun 1994, PLTP Gunung Salak Unit I dan II, mulai ber-operasi.

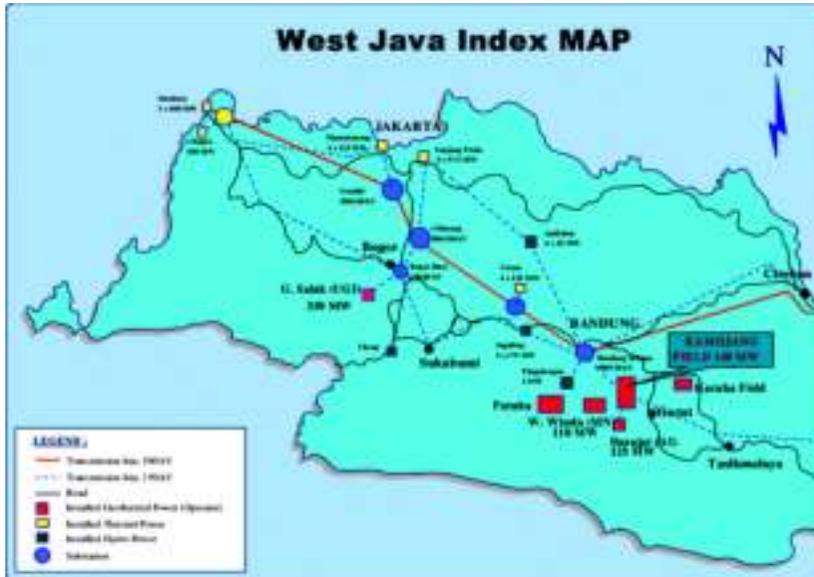
Pengusahaan panas bumi di Gunung Drajat-Jawa Barat, dilakukan PERTAMINA, bekerja sama dengan *Amoseas of Indonesia Inc.* dan *PLN (JOCEC)*, pada tahun 1994 berhasil meng operasikan PLTP di Gunung Drajat Unit I.

Pada tahun 1994 ditandatangani kontrak pengusahaan panas bumi antara PERTAMINA dengan empat perusahaan swasta. Masing-masing untuk daerah Wayang Windu-Jawa Barat (*PT Mandala Nusantara*), Karaha-Jawa Barat (*PT Karaha Bodas Company*), Dieng-Jawa Tengah (*PT Himpurna California Energy*), dan Patuha-Jawa Barat (*PT Patuha Power Limited*).

Selanjutnya tahun 1995, penandatanganan kontrak (JOC & ESC) *Pertamina Bali Energy Limited* dan PT PLN (Persero) untuk pengusahaan dan pemanfaatan panas bumi di daerah Batukahu-Bali, penandatanganan kontrak (SSC & ESC) untuk Kamojang Unit-IV dan V antara PERTAMINA dengan *PT Latoka Trimas Bina Energi*, serta ESC antara *PT Latoka Trimas Bina Energi* dengan PT PLN (Persero). Pada tahun 1995 juga disepakati MOU antara PERTAMINA dengan PT PLN untuk membangun PLTP (1×20 MW) di Lahendong-Sulawesi Utara.

Secara umum boleh dikatakan, bahwa pioner dalam pengembangan energi panas bumi di Indonesia adalah PLTP Kamojang (Jawa Barat), PLTP Dieng (Jawa Tengah), dan PLTP Lahendong (Sulawesi Utara).

### 9.3. Lapangan Panas Bumi Kamojang – Jawa Barat



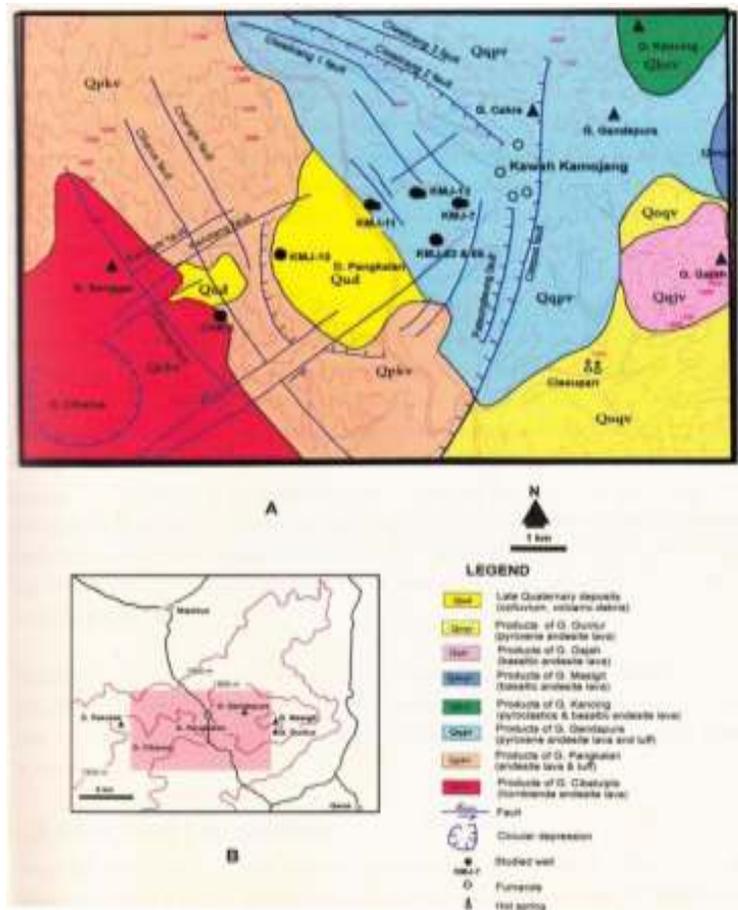
Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Location-map-of-Kamojang-West-Java-Indonesia\\_fig1\\_332033221](https://www.researchgate.net/figure/Location-map-of-Kamojang-West-Java-Indonesia_fig1_332033221)

**Gambar 9.4. :** Lokasi PLTP Kamojang (140 MW)

Lapangan panas bumi Kamojang berada dalam wilayah Kabupaten Garut-Jawa Barat, terletak sekitar 17 km di sebelah barat laut kota Garut, atau sekitar 42 km sebelah tenggara Bandung. Berada pada ketinggian 1640 – 1750 m dpl, dan posisi koordinat geografis  $107^{\circ}37,5'$  –  $107^{\circ}48'$  BT dan  $7^{\circ}5,5'$  –  $7^{\circ}16,5'$  LS.

Selain gunung Guntur (2125 m dpl) di sebelah baratnya, yang merupakan gunung api aktif, yang erupsi terakhirnya tercatat pada tahun 1840 (Robert, 1988), wilayah di sekitar lokasi yang dikenal dengan sebutan Kawah Kamojang, banyak menunjukkan manifestasi panas bumi yang muncul ke permukaan, seperti fumarola, kubangan-kubangan lumpur, tanah hangat ber-uap (*steaming ground*), dan sebagainya. Diantaranya adalah Danau Pangkalan, Kawah Manuk, Kawah Berecek dan Kawah Leutak, sedangkan Kawah Kamojang sendiri berada dalam suatu wilayah depresi yang ber-diameter sekitar 5 km.



Sumber :  
<https://docplayer.info/47713107-Bab-i-pendahuluan-tatanan-geologi-lapangan-panas-bumi-kamojang.html>

Gambar 9.5. : Sketsa Geologi lapangan panas bumi Kamojang.

Berikut adalah beberapa manifestasi panas bumi yang muncuk ke permukaan :

- **Kawah Mati - Kamojang**

Merupakan bekas kawah aktif, yang saat ini berada dalam kondisi tak aktif (*dormant*), terletak pada bagian tenggara dari Kawah Barecek. Manifestasi panas bumi ditemukan dalam bentuk kristal-kristal Sulfur, dan *steaming ground* yang menunjukkan temperatur 70,6<sup>o</sup>C. Hal tersebut meng-indikasikan masih berlangsungnya aktivitas hidrothermal dibawah permukaan.



Sumber : <http://www.andyyahya.com/2012/12/kamojang-lapangan-panas-bumi-pertama-di.html>

**Gambar 9.6. :** Kawah Mati – Kamojang

- ***Kawah Hujan***

Uap panas keluar dari rongga-rongga antar batuan, walaupun sebelah timur lokasi ini, terdapat mata air yang dingin. Air dingin ini diperkirakan berasal dari akuifer dangkal, yang tidak berhubungan dengan aktivitas hidrotermal.



Sumber : <http://www.andyyahya.com/2012/12/kamojang-lapangan-panas-bumi-pertama-di.html>

**Gambar 9.7. :** Kawah Hujan

- ***Kolam Lumpur***

Kolam lumpur ini merupakan jejak manifestasi panas bumi berupa mata air panas, yang sesekali masih mengeluarkan gas, terletak diantara kawah hujan dengan kawah Cibuliran, dimana ditemukan adanya alterasi *argillik* yang di-dominasi oleh mineral *talk* yang berwarna putih keabuan. Letupan kecil buih air pada permukaan kolam, kemungkinan berasal dari air tanah dalam akuifer dangkal, yang tertekan oleh kandungan gas dibawah permukaan. Tak jauh dari lokasi *manifestasi* ini, ditemukan adanya kawah yang telah mati dan mulai membeku.



Sumber : <http://www.andyyahya.com/2012/12/kamojang-lapangan-panas-bumi-pertama-di.html>

**Gambar 9.8.** : Manifestasi berupa kolam lumpur, diantara Kawah Hujan - Kawah Cibuliran

- ***Kawah Cibuliran***

Menunjukkan adanya *manifestasi* panas bumi berupa mata air panas yang masih terus mengalir, dengan kandungan gas yang tinggi dan mengeluarkan bau yang menyengat.



Sumber : <http://www.andyyahya.com/2012/12/kamojang-lapangan-panas-bumi-pertama-di.html>

**Gambar 9.9.** : Kawah Cibuliran

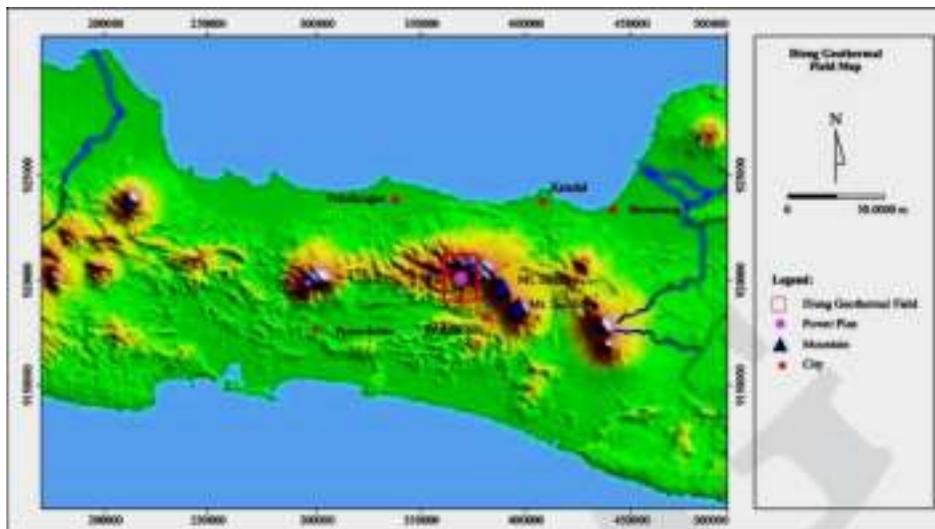
Seluruh permukaan lapangan panas bumi Kamojang tertutup oleh endapan-endapan Kuartar, terutama produk aktivitas vulkanik dari berbagai gunung api di sekitarnya. Namun secara geologis, sistem panas bumi Kamojang di-kendalikan oleh struktur geologi regional (tektonik), dan lokal (vulkanik). Pola struktur geologi regional lapangan panas bumi Kamojang menunjukkan adanya kelurusan-kelurusan struktur sesar yang ber-arah Timurlaut-Baratdaya dan Baratlaut-Tenggara. Kelurusan struktur sesar yang saling bersilangan tersebut memicu terjadinya daerah depresi.

Maka secara geologi, model sistem panas bumi Kamojang terbentuk dalam struktur depresi, atau kaldera yang mengalami keruntuhan, seperti pada danau Pangkalan dan kawah Kamojang sendiri. Sistem ini mempunyai zona *upflow* di bagian timurlaut di sekitar gunung Cakra dan gunung Gandapura, yang ditandai dengan banyaknya manifestasi panas bumi di kawasan wisata kawah Kamojang, dengan *outflow* ke-arah Tenggara yang ditandai dengan munculnya manifestasi air panas di Citepus.

Struktur depresi atau kaldera yang membentuk sistem panas bumi Kamojang, tentunya mempengaruhi pasokan air permukaan kedalam reservoir. Daerah tangkapan hujan (*catchment area*) yang

sempit, terbatas seluas wilayah depresi, membatasi jumlah air permukaan yang di pasok kedalam reservoir. Keterbatasan tersebut menyebabkan seluruh pasokan air berubah menjadi uap dengan cepat. Maka, lapangan panas bumi Kamojang menjadi sistem yang di dominasi oleh fluida uap (*dry steam*). Yaitu dengan kedalaman puncak reservoir diperkirakan berada pada elevasi 900 - 500 meter dpl, dengan temperatur sekitar 220-240°C, dan berada pada formasi batuan vulkanik yang mengalami alterasi.

#### 9.4. Lapangan Panas Bumi Dieng – Jawa Tengah

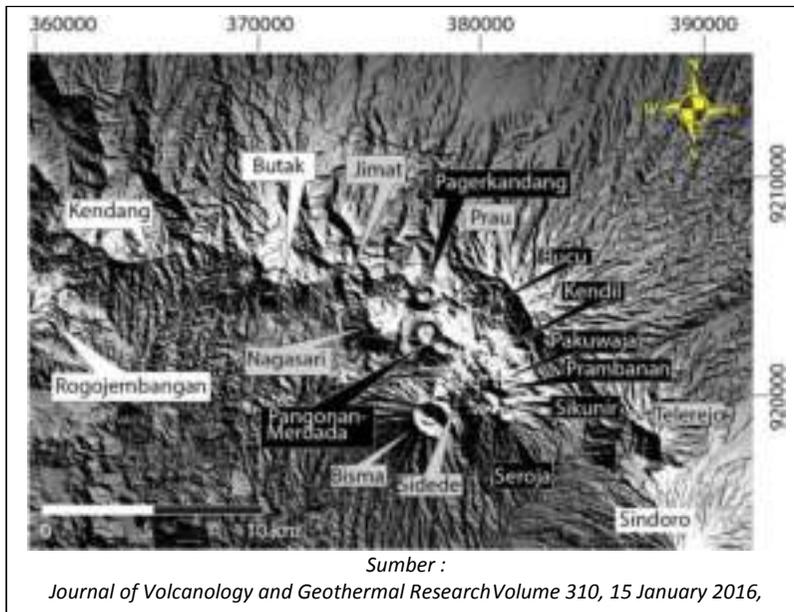


Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Locality-map-of-the-Dieng-Geothermal-Field\\_fig1\\_327315037](https://www.researchgate.net/figure/Locality-map-of-the-Dieng-Geothermal-Field_fig1_327315037)

**Gambar 9.10. :** Lokasi lapangan panas bumi dan dataran tinggi Dieng – Jawa Tengah

Dataran Tinggi Dieng adalah kawasan gunung api aktif di Jawa Tengah, yang meliputi bagian-bagian dari wilayah Kabupaten Banjarnegara dan Kabupaten Wonosobo. Merupakan dataran tinggi seluas sekitar 14 X 6 km<sup>2</sup>, berara di sebelah barat kompleks gunung Sindoro dan gunung Sumbing, dengan elevasi rata-rata sekitar 2000 meter dpl, temperatur berkisar 12-20 °C pada siang hari, dan 6-10 °C pada malam hari.



**Gambar 9.11. :** Citra satelit dataran tinggi Dieng – Jawa Tengah

Dataran tinggi Dieng, yang merupakan dataran dengan aktivitas vulkanik aktif dibawah permukaannya, sesungguhnya adalah kaldera tua dengan gunung-gunung tinggi sebagai tepiannya, seperti gunung Sumbing (3387 m dpl), gunung Sindoro (3150 m dpl), gunung Prahu (2565 m dpl), gunung Pakuwaja (2595 m dpl), dan gunung Sikunir (2463 m dpl). Danau-danau vulkanik tersebar diberbagai tempat, berisi air bercampur belerang sehingga memiliki warna khas, diantaranya adalah telaga Warna, telaga Cebong, telaga Merdada, telaga Pengilon, telaga Dringo, dan telaga Nila.

Potensi energi panas bumi di dataran tinggi Dieng, ditandai dengan munculnya berbagai manifestasi panas bumi ke permukaan. Setidaknya ada tiga lapangan hidrotermal utama, yaitu Pakuwaja, Sileri, dan Sikidang, dimana pada ketiganya terdapat fumarola (kawah uap) aktif, kolam lumpur, dan lapangan uap. Mata air panas ditemukan, misalnya, di Bitingan, Siglagah, Pulosari, dan Jojogan, dengan suhu rata-rata mulai dari 25<sup>o</sup>C (Jojogan) sampai 58<sup>o</sup>C (Siglagah).

Berbagai kawah aktif dijumpai di seputar dataran tinggi Dieng, yang terus di pantau oleh karena aktivitasnya, yaitu kawah-kawah

Candradimuka, Sibanteng, Siglagah, Sikendang, Sikidang, Sileri, Sinila, dan Timbang. Beberapa diantaranya (Sikendang, Sinila, Sikembang) bahkan berpotensi mengeluarkan gas beracun.

- ***Kawah Sibanteng***

Sibanteng terletak di Desa Dieng Kulon. Kawah ini pernah mengalami erupsi freatik pada bulan Januari 2009, menyebabkan kawasan wisata Dieng harus ditutup beberapa hari untuk mengantisipasi terjadinya bencana gas beracun. Sebelumnya, erupsi pernah pula terjadi pada bulan Juli 2003.

- ***Kawah Sikidang***

Kawah Sikidang adalah kawah yang populer sebagai tempat kunjungan wisata. Kawah ini terkenal karena lubang keluarnya gas selalu berpindah-pindah di dalam suatu kawasan luas, sehingga disebut sebagai *Sikidang* (*kidang* dalam bahasa Jawa adalah kijang).

- ***Kawah Sileri***

Kawah Sileri adalah kawah aktif yang sering mengalami erupsi (tahun 1944, 1964, 1984, Juli 2003, dan September 2009). Pada erupsi freatik tanggal 26 September 2009, muncul tiga celah kawah baru disertai dengan lontaran material setinggi 200 meter. Pada erupsi hari Minggu 30 April 2017, terjadi semburan lumpur dan lontaran kerikil / batuan, yang menyebabkan 12 orang wisatawan mengalami luka ringan.

- ***Kawah Sinila***

Kawah Sinila terletak di antara desa Batur, desa Sumberejo, dan desa Pekasiran, Kecamatan Batur. Kawah Sinila pernah mengalami erupsi besar pada tahun 1979, tepatnya 20 Februari 1979. Gempa yang ditimbulkan membuat warga berlarian ke luar rumah, namun mereka terperangkap gas beracun (CO<sub>2</sub>) dari kawah Timbang yang terpicu keluar, sehingga menimbulkan korban jiwa 149 orang.

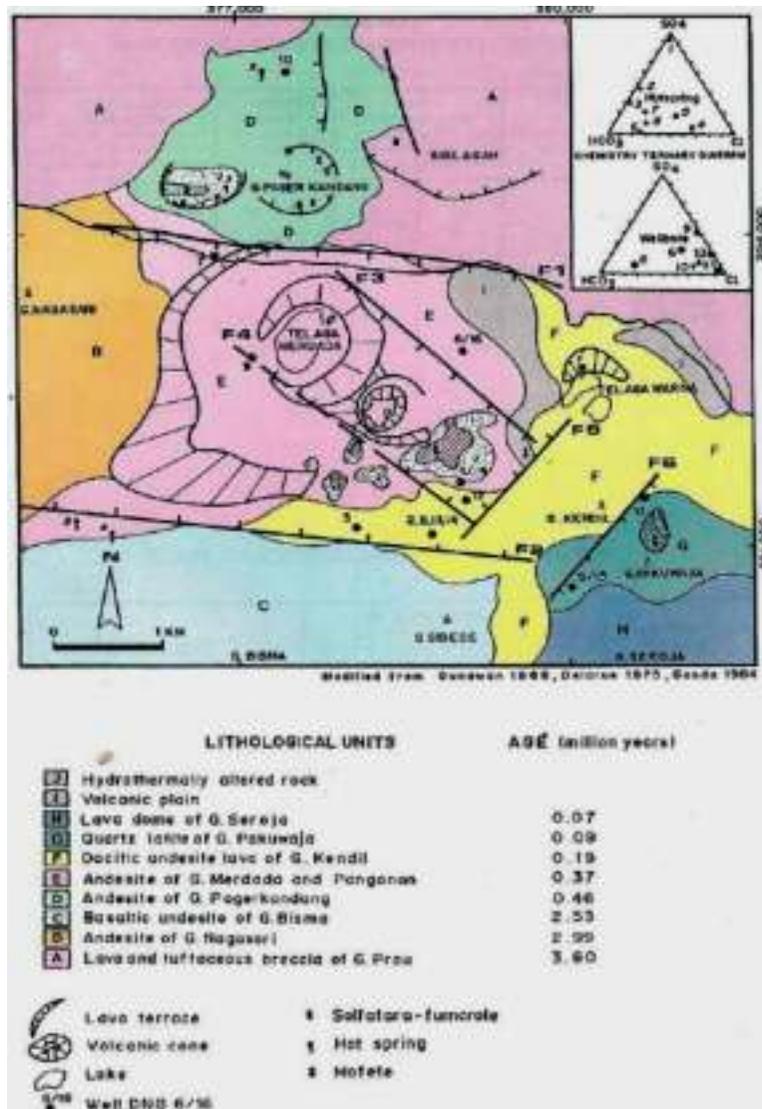
- ***Kawah Timbang***

Kawah Timbang adalah kawah yang terletak dekat kawah Sinila dan beraktivitas sedang. Meskipun kurang aktif, kawah ini

merupakan sumber gas CO<sub>2</sub> berkonsentrasi tinggi yang pernah menimbulkan ratusan korban pada tahun 1979. Kawah ini terakhir tercatat mengalami kenaikan aktivitas pada bulan Mei 2011 dengan menyemburkan asap putih setinggi 20 meter, mengeluarkan CO<sub>2</sub> dalam konsentrasi melebihi ambang batas aman (1000 ppm).

Komplek vulkanik Dieng termasuk dalam busur belakang (back arc) dari sistem Orogen Sunda (Sunda Orogeny) yang berarah Baratlaut-Tenggara memotong gunung api Kuartar termasuk gunung Sundoro dan Sumbing. Komplek kaldera tua Dieng ini meliputi beberapa kerucut gunung api strato, serta lebih dari 20 kawah-kawah dan kerucut kecil yang berumur Pleistosen hingga Holosen (Allard, dkk-1989, Siebert & Simkin-2002, vide Setijadji-2010). Kaldera tua Dieng diisi oleh sejumlah kerucut muda, kubah lava (lava dome), kawah, dan beberapa danau vulkanik. Kegiatan gunung api tersebut menghasilkan batuan yang bersifat andesite-riodacite, dengan banyak sekali manifestasi panas bumi yang muncul ke permukaan, sehingga dapat dianggap merupakan daerah prospek panas bumi.

Gunung api pada pra kaldera Dieng ditunjukkan oleh gunung Prah, yang terbentuk pada jaman Pliosen (3,6 jt thn yl). Kaldera Dieng runtuh pada jaman Pleistosen (0,5 jt thn yl) dan terisi oleh hasil erupsi gunung api yang monogenik. Satuan kaldera tertua yang terakhir adalah Pagerkandang (0,46 jt thn yl), sedangkan yang termuda adalah satuan vulkanik Saroja (0,06 jt thn yl) yang didominasi oleh produk erupsi freatik dan ditunjukkan oleh banyaknya kawah-kawah freatik. Kondisi ini menunjukkan bahwa kegiatan magmatik di kompleks dataran tinggi Dieng masih aktif berjalan. Lapangan panas bumi Dieng, dalam hal ini ber-asosiasi dengan kaldera tua terakhir, yang berumur Pleistosen Atas (Pagerkandang-0,46 jt thn yl, Pangonan/Merdada-0,37 jt thn yl).



Sumber :

[https://www.researchgate.net/figure/Location-map-of-Dieng-geothermal-field\\_fig1\\_270341709](https://www.researchgate.net/figure/Location-map-of-Dieng-geothermal-field_fig1_270341709)

**Gambar 9.12. :** Sketsa geologi lapangan panas bumi Dieng

Dataran tinggi Dieng sejak jaman Belanda dikenal sebagai penghasil sulfur. Dari eksplorasi yang dilakukan pada tahun 1921 dan 1923, diketahui terdapat cadangan 36 ribu ton material lumpur yang 41% di antaranya mengandung sulfur (Soetarjo Sigit dkk, 1969). Eksplorasi panas bumi di dataran tinggi Dieng dimulai oleh

pemerintah Belanda pada 1928, dengan dilakukannya beberapa pemboran sedalam 80 meter, namun tidak berlanjut dan tidak diketahui hasilnya. Tindak lanjut eksplorasi dilakukan oleh USGS pada tahun 1970, dengan melakukan survei geofisika, dan pada tahun 1973 pengeboran 6 sumur dangkal.



Instalasi panas bumi PT Geo Dipa Energi, Dieng. Foto: Priatna

Sumber : <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/panas-bumi-dieng/>

*Gambar 9.13. : Pembangkit listrik tenaga panas bumi Dieng*

Pada tahun 1994, *California Energy International (CEI)* menandatangani kontrak pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi (4,150 MW), dan unit 1 (60 MW) selesai dibangun pada 1998. Disamping itu, hasil pemboran pada 45 sumur pemboran mengkonfirmasi adanya potensi panas bumi sebesar 350 MW.

Sejak bulan Agustus 2001, pengelolaan panas bumi di dataran tinggi Dieng dilakukan oleh PT Geo Dipa, yang merupakan perusahaan gabungan PLN dan PERTAMINA. PT Geo Dipa mengelola dua unit pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP), dengan kapasitas 60 MW. Yaitu PLTP Dieng Unit 1 yang berada di Kecamatan Batur - Kabupaten Banjarnegara, dan PLTP Dieng Unit 2 yang terletak di Kecamatan Kejajar - Kabupaten Wonosobo, dengan kebutuhan uap yang dipasok dari 8 sumur produksi, dan 2 sumur yang berfungsi sebagai sumur injeksi.

## 9.5. Lapangan Panas Bumi Lahendong – Sulawesi Utara

Lapangan panas bumi Lahendong yang terletak sekitar 30 km di sebelah selatan kota Manado - Sulawesi Utara, merupakan lapangan panas bumi pertama yang berada di wilayah Indonesia bagian timur. Lapangan ini terletak didalam kaldera vulkanik yang besar, pada ketinggian 750 - 1000 meter dpl, yaitu kaldera Tondano dan kaldera Pengolombian. Daerah ini juga berada pada deretan gunung berapi (G. Lengkoan, G. Kasuratan, G. Tampusu), dengan kawah tergenang air yang dikenal sebagai danau Linau.



**Peta Lokasi Lapangan Panas bumi Lahendong**

Sumber : <http://stormshadowblack21.blogspot.com/2014/11/geologi-umum-lapangan-panas-bumi.html>

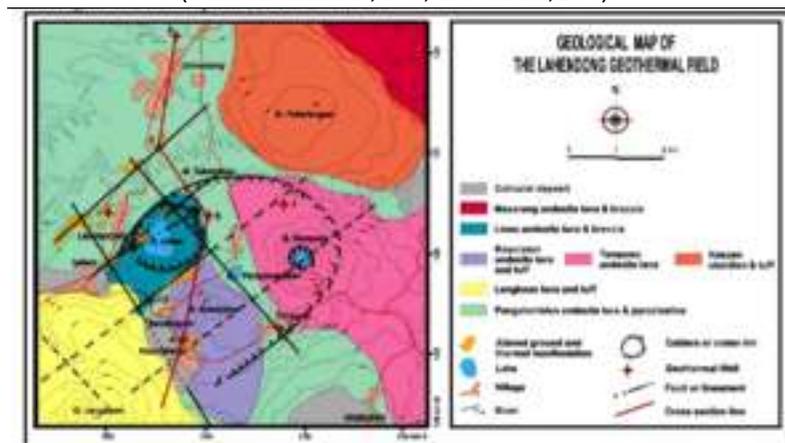
**Gambar 9.14.** : Lokasi lapangan panas bumi Lahendong - Sulawesi Utara

Daerah Tompaso yang merupakan daerah prospek lapangan panas bumi Lahendong, terletak pada lengan Utara pulau Sulawesi, merupakan bagian dari rangkaian gunung api yang berarah Baratdaya-Timurlaut, yang terdiri dari gunung-gunung Klabat,

Mahawu, Soputan dan Ambang. Prospek panas bumi tersebut dikontrol oleh kaldera besar danau Tondano yang merupakan *volcano-tectonic depression* pada *Plio-Pleistosen*. Wilayah ini juga merupakan gugusan kompleks gunung api Lembeyan yang sangat besar, yang dibatasi pada sisi utara oleh rangkaian gunung api Lokon dan Mahawu, pada bagian selatan oleh gunung Soputan, Sempu, dan gunung Rindangaen, sedangkan pada bagian timur oleh Rim danau Tondano. Produk gunung api tua Lembeyan/Tondano terdiri dari batuan piroklastik tufa batu apung dan ignimbrit, yang kemudian tertutup oleh produk gunung api kuartar. Secara keseluruhan lapangan panas bumi Lahendong - Tompasso terletak dalam daerah depresi dengan relief relatif datar, dan elevasi rata-rata 750 meter dpl. Proses *volcano-tectonic* danau Tondano, mengakibatkan daerah Lahendong sebagian terangkat dan membentuk aktivitas volkanik baru, seperti gunung Rindangen, Aesoput, Lengkoan, Tampusu dan gunung Kasuratan.

Geological map of the Lahendong geothermal field, North Sulawesi

(revised from Robert, 1987, and Siahaan, 2003).



Sumber :

OVERVIEW OF THE LAHENDONG GEOTHERMAL FIELD , NORTH SULAWESI , INDONESIA : A PROGRESS REPORT

Pri Iswati Utami, E. Siahaan, +2 authors Stuart F. Simmons

Published 2005

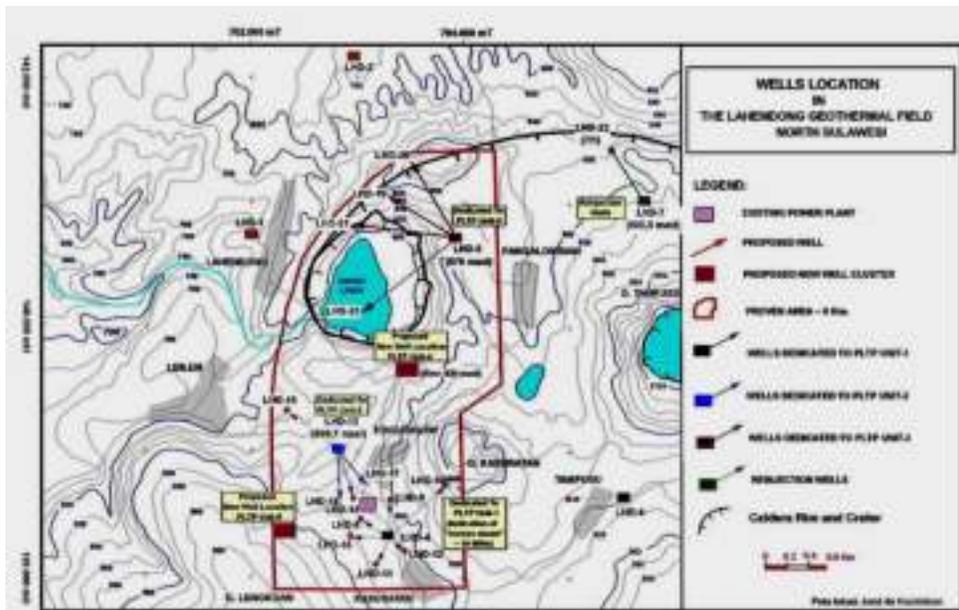
<https://www.semanticscholar.org/paper/OVERVIEW-OF-THE-LAHENDONG-GEOTHERMAL-FIELD-%2C-NORTH-Utami-Siahaan/>

Gambar 9.15. : Peta geologi lapangan panas bumi Lahendong – Sulawesi Utara

Sumber panas diperkirakan berasal dari gunung Lengkoan, gunung Sempu, gunung Manimporok-Rindengan-Aesopot dan gunung Sopotan. Sedangkan struktur patahan ditafsirkan merupakan faktor yang berperan mengendalikan sirkulasi hidrologi sistem panas bumi Lahendong, seperti yang di-indikasikan dengan munculnya berbagai manifestasi panas bumi ke permukaan. Struktur patahan, dalam hal ini berperan sebagai zona permeabilitas tinggi, yang ditafsirkan berasal dari kelurusan-kelurusan struktur yang berarah Timurlaut - Baratdaya dan mpir Timur- Barat.

Kegiatan eksplorasi lapangan panas bumi Lahendong dimulai pada tahun 1971 yang menghasilkan peta geologi sementara dan usulan pemboran lanjut. Pada tahun 1976 Vulcanological Survey of Indonesia (VSI) melakukan survei geologi, geokimia dan geofisika. Data geologi, geofisika dan geokimia yang diperoleh dari kegiatan eksplorasi memberikan indikasi adanya sumber energi panas bumi bertemperatur tinggi di daerah Lahendong. Sebagai tindak lanjut, pemboran tiga sumur dangkal yaitu LH-1, LH-2 dan LH-3 dilakukan sampai kedalaman kurang dari 500 meter di sekitar Danau Linau. Kegiatan eksplorasi lapangan panas bumi Lahendong dilanjutkan dengan pemboran sumur dalam sampai kedalaman sekitar 2000 meter oleh PERTAMINA, yaitu sebanyak 7 sumur (LHD-01 s/d LHD-07) sampai dengan tahun 1987.

Sistem panas bumi Lahendong disimpulkan merupakan sistem dominan air (*water dominated*) dengan kemungkinan zona uap, pH netral-asam, dengan temperatur sekitar 280 - 360°C. Kedalaman puncak reservoir diperkirakan pada elevasi -250 sampai dengan -1750 meter dpl (kedalaman sekitar 1100- 2600 meter), sedangkan batuan penyusun reservoir termasuk dalam satuan tufa Tondano, dan batuan pra-Tondano yang tersusun oleh batuan piroklastik (dominan tuff) dan perselingan lava dan breksi andesit.



Sumber : <http://stormshadowblack21.blogspot.com/2014/11/geologi-umum-lapangan-panas-bumi.html>

**Gambar 9.16.** : Lokasi sumur bor, lapangan panas bumi Lahendong

Sampai saat ini 27 sumur telah dibor di lapangan panas bumi Lahendong, dimana sumur LHD-01 s/d LHD-07 adalah sumur eksplorasi dalam, sedangkan sisanya adalah sumur pengembangan. Dimana hasil dari hasil pemboran tersebut, menunjukkan bahwa reservoir di lapangan panas bumi Lahendong mempunyai temperatur tinggi, yang sangat potensial untuk dimanfaatkan dalam pembangkitan tenaga listrik.

PLTP Lahendong Unit 1 yang berkapasitas 20 MW mulai beroperasi sejak 21 Agustus 2001, terletak di arah baratdaya dari lapangan (lokasi LHD-04). Unit 2 dengan kapasitas 20 MW mulai beroperasi pada tahun 2007, berada dalam lokasi yang sama dengan Unit 1. Sedangkan Unit 3 (20 MW) beroperasi tahun 2009 dan Unit 4 (20 MW) tahun 2011. Selanjutnya, Unit 5 & 6 (2 X 20 MW), mulai ber operasi tahun 2016.



Sumber : <http://ebtke.esdm.go.id/post/2016/12/07/1468/lahendong.binary.plant.potensi.bangkitkan.500.kw?lang=id>

**Gambar 9.17.** : Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Lahendong – Sulawesi Utara

Pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan menerapkan teknologi siklus biner (*binary cycle*) di uji coba pada lapangan panas bumi Lahendong. Uji coba dilakukan dengan memanfaatkan *brine* panas bumi yang berasal dari sumur-sumur pada *cluster 5*, yang digunakan memanaskan dan menguapkan *fluida kerja* organik (*n-pentana*), yang di-sirkulasikan didalam unit *binary plant*. Uap *fluida kerja* tersebut selanjutnya memutar turbin dan generator untuk menghasilkan listrik. Uji coba yang dimulai pada tahun 2012, pada akhirnya menghasilkan PLTP *Binary Cycle*, yang mulai di-operasikan pada tahun 2019. PLTP *Binary Cycle* Lahendong yang berkapasitas 500 kilowatt (*kW*) ini merupakan yang pertama di-operasikan di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agung Harijoko, Ryusuke Uruma, Haryo Edi Wibowo, Lucas Doni Setijadji, AkiraImai, Kotaro Yonezu, Koichiro Watanabe. (2016) :* "Geochronology and magmatic evolution of the Dieng Volcanic Complex, Central Java, Indonesia and their relationships to geothermal resources". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 310, 15 January 2016, Pages 209-224
- Alexander I. Nikolskiy, Andrey A. Shipkov, Valery N. Semenov, Grigory V.Tomarov, Boris E. Parshin JSC (2015) :* "Russian Geothermal Power Plants Equipped with ORC-units". "Geothem-EM", Lefortovsky val. ul. 24, 111250. Russia e-mail: geotherm@gmail.com. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015* 1
- Ali Bülbül (2015) :* "Mixing of geothermal and non-geothermal fluids in shallow aquifers in the Germencik-Nazilli area, Büyük Menderes Basin (SW Turkey)". *Journal Geodinamica Acta* Volume 27, 2015 - Issue 1, Pages 67-81 | Received 03 Jun 2014, Accepted 06 Oct 2014, Published online: 27 Nov 2014
- Andersen, S. O. and K. M. Sarma. (2002) :* "Protecting the Ozone Layer : the United Nations History". Earthscan Press. London.
- Angelo Minissale (1991):* "The Larderello geothermal field: a review". *Earth-Science Reviews*, Volume 31, Issue 2, August 1991, Pages 133-151
- Antonio Barelli, Armando Ceccarelli, Ivano Dini, Adolfo Fiordelisi, Nadia Giorgi, Ferdinando Lovari, Paolo Romagnoli (2010) :* "A Review of the Mt. Amiata Geothermal System (Italy)". Enel Green Power, via Andrea Pisano, 120, 56122 Pisa (Italy) adolfo.fiordelisi@enel.com. *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.*

- Aries R. Prima* (2016) : “Tentang Energi Panasbumi”. In *Engineer Weekly*, Nov 14, 2016, 4:42 PM. PERSATUAN INSINYUR INDONESIA (The Institution of Engineers Indonesia )
- 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).
- Beall, J.J., Wright, M.C., Pingol, A.S.,* (2010) : “Effect of high rate injection on seismicity in The Geysers”. *Geothermal Resources Council Transactions* 34 (in press and reproduced in Section 3).
- Bertani, Ruggero; Thain, Ian* (July 2002) : "Geothermal Power Generating Plant CO<sub>2</sub> Emission Survey" (PDF), *IGA News* (International Geothermal Association) (49): 1-3.
- Billing, M.P.*: “Structural Geology” 3<sup>rd</sup> Editions, 1972. Prentice-Hall Inc., N.J.
- Britvin O.V., Povarov O.A., Klochkov E.F., Tomarov G.V., Luzin V.E.* (2000) : “MUTNOVSKY GEOTHERMAL POWER COMPLEX IN KAMCHATKA”. Proceeding World Geotherman Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10,2000
- Daril Ridho Zuchrillah , Renanto Handogo , Juwari.* (2017) : “PEMILIHAN TEKNOLOGI PROSES GEOTHERMAL SECARA TEKNIS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI DI INDONESIA”. ISSN:1411-7010 *Jurnal IPTEK* Vol.21 No.2, Desember 2017 e-ISSN:2477-507X
- David W. Layton, Lynn R. Anspaugh, Kerry D. O'Banion* (1981) : “Health and Environmental Effects, Document on Geothermal Energy 1981”. Prepared for: Health and Environmental Risk Analysis Program Human Health and Assessment Division Office of Health and Environmental Research Office of Energy Research US. Department of Energy, LAWRENCE LIVERMORE LABORATORY University of California Livermore, California 94550. UCRL 53232, DE82 007989, UCRL-53232.
- DEWAN ENERGI NASIONAL RPUBLIK 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)

- Direktorat Panas Bumi, Ditjen EBTKE Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, Badan Geologi : "POTENSI PANAS BUMI INDONESIA JILID 1". Diterbitkan dan dicetak oleh: Direktorat Panas Bumi Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Agustus 2017 Jl. Pegangsaan Timur No. 1 Menteng, Jakarta 10320 Telp: 021-39830077 Fax: 021-31901087. ISBN 978-602-50394-0-9, ISBN 978-602-50394-1-6*
- Eros Bacci (2000) : "Geothermal power plants at Mt. Amiata (Tuscany-Italy): Mercury and hydrogen sulphide deposition revealed by vegetation". Article in Chemosphere 40(8):907-11 · May 2000*
- Farizal, Ariva, A. Rahman (2018) : "Geothermal Power Plant Area Layout Optimization Considering Toxic Gas Dispersion". Environmental Science, 2018 IEEE 5th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS). Published 2018, DOI:10.1109/ICETAS.2018.8629199, Corpus ID: 59555608*
- Fournier, R. O. (1977). : "Chemical Geothermometers and Mixing Models for Geothermal Systems". Geothermics. 5 : 41-50.*
- 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 13/08/2015 : "PANAS BUMI DIENG".  
<http://geomagz.geologi.esdm.go.id/panas-bumi-dieng/>*
- Giggenbach, W. F. (1988) : "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators". Geochim. Cosmochim. Acta. 52 : 2749-2765.*
- Hadiyanto, (2016) : "Pengembangan Energi Panas Bumi di Indonesia". Badan Geologi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.*
- Hamilton, W.B.(1979) : "Tectonics of The Indonesian Region". Departemen Pertambangan Indonesia-United States Agency for International Development, 1979.*

- Holmes Arthur (1978) : "Principles of Physical Geology (3rd ed.)". Wiley. pp. 640-641. ISBN 0471072516.*
- 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*
- Jack Unwin : "The oldest geothermal plant in the world". <https://www.power-technology.com/features/oldest-geothermal-plant-larderello/>*
- John Lagat (2010) : "HYDROTHERMAL ALTERATION MINERALOGY IN GEOTHERMAL FIELDS WITH CASE EXAMPLES FROM OLKARIA DOMES GEOTHERMAL FIELD, KENYA". Geothermal Development Company P. O. Box 100746, Nairobi 00101 KENYA jlagat@gdc.co.ke. Presented at Short Course V on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, GDC and KenGen, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, Oct. 29 - Nov. 19, 2010*
- Kasbani (2016) : "Sumber Daya Panas Bumi Indonesia: Status Penyelidikan, Potensi Dan Tipe Sistem Panas Bumi". Badan Geologi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.*
- Katili, J. (1974) : "Cretaceous - Recent Magmatic Arc / Subduction Zone Indonesian Archipelago". *Bibliography of Indonesian Geology*,2013.[www.vangorselslist.com](http://www.vangorselslist.com)*
- Kementerian ESDM : " Handbook of Energy & Economic". Statistics of Indonesia 2014.*
- 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>.*

- Mutia Dewi Yuniati, Eko Tri Sumarnadi Agustinus, Igna Hadi, Dyah Marganingrum, Sukristiyanti (2011) : "KONSEP PENGELOLAAN LINGKUNGAN KAWASAN INDUSTRI PANAS BUMI GUNA Mendukung Pembangunan Berkelanjutan : Aspek Pemanfaatan Limbah Padat". PROSIDING GEOTEKNOLOGI LIPI, Home > Prosiding Geoteknologi 2011 > <https://jrisetgeotam.com/index.php/proceedings/article/view/703>*
- M. Yusrizal Adi S, SH.MH (2014) : Hukum Lingkungan " BAKU MUTU LINGKUNGAN HIDUP" Fakultas Hukum Universitas Sutomo.*
- Otto Soemarwoto : "Ekologi, Lingkungan Hidup dan Pembangunan". Djembatan-Jakarta, Indonesia, 1994. Cetakan IV (revisi), ISBN : 679-428-206-5.*
- Paolo Romagnoli, Alessia Arias, Antonio Barelli, Maurizio Cei, Michele Casini. (2010) : "An updated numerical model of the Larderello-Travale geothermal system". Italy, Author links open overlay panel. Geothermics Volume 39, Issue 4, December 2010, Pages 292-313*
- Paul Brophy Marcelo J. Lippmann Patrick F. Dobson Bastien Poux (2010) : "THE GEYSERS GEOTHERMAL FIELD, UPDATE 1990-2010". Geothermal Resources Council SPECIAL REPORT NO. 20 .*
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 05 tahun 2012, tentang Jenis Rencana Usaha dan/atau Kegiatan yang wajib memiliki ANALISIS MENGENAI DAMPAK LINGKUNGAN HIDUP*
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 03 tahun 2013, tentang AUDIT LINGKUNGAN.*
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 27 tahun 2012, tentang Izin Lingkungan.*
- PERSATUAN INSINYUR INDONESIA (The Institution of Engineers Indonesia ) : "PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA NOMOR 7 TAHUN 2017 TENTANG PANAS BUMI UNTUK PEMANFAATAN TIDAK LANGSUNG. <https://pii.or.id/tentang-energi-panasbumi>*

- Petrus Rony P., Agus Didit Haryanto, Johannes Hutabarat, Dedi Kusnadi.* (2019) : "SISTEM PANAS BUMI NON-VULKANIK DAERAH BUNTUNA, TOLITOLI, SULAWESI TENGAH, BERDASARKAN PENDEKATAN GEOLOGI DAN GEOKIMIA AIR PANAS". *Padjadjaran Geoscience Journal*. Vol. 3, No. 4, Agustus 2019: 254 - 260 256.
- Ronald Di Pippo Ph.D.,* (2016) : "Magmamax Binary Power Plant, East Mesa, Imperial Valley, California, USA, in *Geothermal Power Plants (Fourth Edition)*, 2016.
- Sigit Darmawan ,Udi Harmok, dan Sugeng Widada* (2014) : "IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN METODE GEOLISTRIK KONFIGURASI SCHLUMBERGER DI AREA PANASBUMI DESA DIWAK DAN DEREKAN KECAMATAN BERGAS KABUPATEN SEMARANG". *Youngster Physics Journal* ISSN : 2302 - 7371 Vol. 3, No. 2, April 2014, Hal 159-164 159
- 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)
- Sismanto Sismanto, Uji Yasmita & Fitri Jusmi* (2018) : "Interpretation of the gravity and magnetic anomalies of the geothermal subsurface structure area in Pamancalan, Lebak, Banten, West Java, Indonesia". *Arabian Journal of Geosciences* volume 11, Article number: 396 (2018)
- Sri Indarto, Haryadi Permana, Eddy Z. Gaffar, Sudarsono, Yayat Sudrajat, Hendra Bakti, Iwan Setiawan, Ahmad Fauzi, Sunardi, Jakah :* "SISTEM PANAS BUMI DIENG JAWA TENGAH BERDASARKAN DATA MANIFESTASI PERMUKAAN DAN BAWAH PERMUKAAN". *Pusat Penelitian Geoteknologi - LIPI.* ISBN: 978-979-8636-20-2

Stefan Arnorsson, Gudni Axelsson, Kristjan Saemundsson (2008) :  
"Geothermal systems in Iceland". Iceland GeoSurvey (ÍSOR).

[https://www.researchgate.net/publication/284687553Geothermal\\_systems\\_in\\_Iceland](https://www.researchgate.net/publication/284687553Geothermal_systems_in_Iceland).

"The structure of the Monte Amiata volcano-geothermal area (Northern Apennines, Italy) : Neogene-Quaternary compression versus extension". Article (PDF Available) in International Journal of Earth Sciences 97(4):677-703 · July 2008

THINK GEOENERGY : "Successful EGS power production at Ormat Desert Peak 2 plant".  
<https://www.thinkgeoenergy.com/successful-egs-power-production-at-ormat-desert-peak-2-plant/>

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

Undang-Undang No. 32 tahun 2009, tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

"Volcanoes of Indonesia". [www.volcanodiscovery.com/indonesia.html](http://www.volcanodiscovery.com/indonesia.html).

William D. Stanley, Harley M. Benz, Mark A. Walters, and Brian D. Rodriguez : "TECTONIC CONTROLS ON MAGMATISM AND GEOTHERMAL RESOURCES IN THE GEYSER CLEAR LAKE REGION, CALIFORNIA : INTEGRATION OF NEW GEOLOGIC, EARTHQUAKE TOMOGRAPHY, SEISMICITY, GRAVITY, AND MAGNETOTELLURIC DATA". U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR U. S. GEOLOGICAL SURVEY, USGS Open-File Report 97-95, Prepared in cooperation with U.S. Department of Energy Idaho Operations Office.

Zen M.T. (1973) : "GEOTHERMY AND ITS FUTURE IN INDONESIA". PRECEEDINGS ITB VoL, 7. No, 1, 1973.

Berbagai Artikel Terseleksi Dari Berbagai Website, Tanpa Identifikasi. (Various Selected Articles, From Non-Identified Website).

# Mengenal Energi Panas Bumi (Geothermal)

Panas bumi yang dikenal dengan istilah *geothermal*, adalah bentuk energi panas yang terkandung dalam perut bumi. Energi panas ini telah terbentuk sejak awal terbentuknya bumi, yaitu berada pada inti bumi yang padat beserta lapisan tebal mantel cair yang menyelimutinya. Sumber panas yang sedemikian besar tersebut tertanam jauh di bawah permukaan bumi, terselimuti oleh kerak bumi yang tebal sehingga tak termanfaatkan.

Namun pergerakan lempeng-lempeng kerak bumi menyebabkan terpecahnya kerak bumi, membuka celah yang memungkinkan cairan panas bumi menerobos mendekati bahkan muncul kepermukaan bumi. Maka pada daerah-daerah seperti inilah potensi energi panas bumi berpeluang untuk dimanfaatkan.

Pemanfaatan energi panas bumi telah dikenal manusia sejak jaman dahulu, namun pemanfaatan modern untuk pembangkitan tenaga listrik baru dikenal pada awal abad 20, walaupun sejauh ini masih bertumpu pada teknologi mesin uap. Kendala tersebut menyebabkan energi panas bumi harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi tenaga uap, sebelum dikonversikan menjadi tenaga listrik. Sehingga memerlukan berbagai komponen alam penunjang lainnya, seperti reservoir air tanah beserta pasokan air permukaannya, adanya lapisan penutup dan sebagainya.

Indonesia sebagai wilayah yang berada pada zona Cincin Api (*Ring of Fire*), dengan jumlah gunung api aktif terbesar di dunia, merupakan wilayah yang memiliki potensi sumberdaya energi panas bumi yang sangat besar. Potensi ini merupakan prospek berharga, mengingat sifatnya yang terbarukan (*renewable*) dan akrab lingkungan, sehingga sudah selayaknya untuk dikembangkan.



Penerbit :

**INSTITUT TEKNOLOGI PLN**

Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat,  
Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat 11750  
Telp : (021) 544 0342, 544 0344

