

## **BAB II**

### **SISTEM PANASBUMI**

#### **2.1 Pengertian Panasbumi**

Menurut Pasal 1 UU No. 27 Tahun 2003 tentang panasbumi yang telah direvisi, pengertian panasbumi didefinisikan sebagai berikut, “Panasbumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, dan batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetis semuanya tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panasbumi”.

Sedangkan dalam kata lain, panasbumi juga biasa disebut dengan *Geothermal*. Dalam bahasa Yunani, *Geothermal* berasal dari dua kata, yaitu *geo* yang berarti bumi dan *thermal* yang berarti panas, berarti geotermal adalah panas yang berasal dari dalam bumi.

Dari kedua definisi diatas, dapat disimpulkan bahwa panasbumi merupakan sumber energi panas yang terbentuk secara alami di bawah permukaan bumi. Sumber energi tersebut berasal dari pemanasan batuan dan air bersama unsur-unsur lain yang terkandung dalam sistem panasbumi yang tersimpan di dalam kerak bumi. Untuk pemanfaatannya, diperlukan kegiatan panambangan berupa eksplorasi dan eksploitasi guna mentransfer energi panas tersebut ke permukaan dalam wujud uap panas, air panas, atau campuran uap dan air serta unsur-unsur lain yang terkandung Sistem Panasbumi

##### **2.1.1 Sistem Panasbumi**

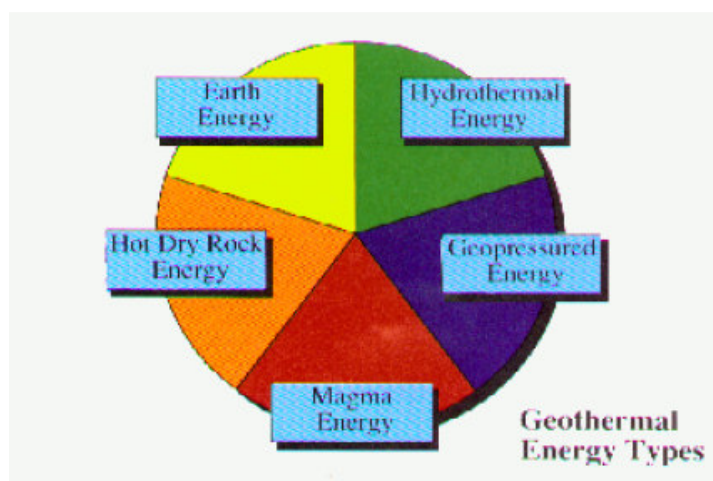
Secara umum, Sistem Panasbumi adalah sistem penghantaran panas di antara Selubung Bumi (*mantle*) dan kerak Bumi (*crust*), dimana panas dipindahkan dari sumber panas (*heat source*) menuju suatu tempat penampungan panas (*heat sink*). Jika diasosiasikan dengan permukaan Bumi, maka panas merambat dari dalam bumi menuju ke permukaan bumi. Proses penghantaran panas pada sistem panasbumi melibatkan fluida termal yang bisa berupa batuan yang meleleh, gas, uap, air panas,

dan lain-lain. Dalam penjalarannya, fluida termal yang berupa uap dan atau air panas dapat tersimpan dalam suatu formasi batuan yang berada diantara sumber panas dan daerah tampungan panas. Formasi batuan tersebut dikatakan sebagai reservoir.

Secara garis besar, sistem panasbumi terdiri dari 3 bagian utama, yaitu Sumber Panas (*Heat Source*), Reservoir Fluida, dan Lapisan Penutup (*Cap Rock*). Sistempanasbumi yang terpengaruh kuat oleh adanya uap dan atau air panas dikatakan sebagai sistem *hydrothermal*. Untuk mengenal bagaimana Sistem Panasbumibekerja, maka perlu ditinjau dari struktur lapisan Bumi.

### 2.1.2 Energi Panasbumi

Energi panasbumi adalah energi panas yang terdapat dan terbentuk di dalam kerak bumi. Temperatur di bawah kerak bumi bertambah seiring bertambahnya kedalaman. Energi panasbumi termasuk energi yang ramah lingkungan karena emisi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan energi fosil, disamping itu pengembangan panasbumi dapat menjaga kelestarian hutan karena untuk menjaga keseimbangan sistem panasbumi diperlukan perlindungan hutan yang berfungsi sebagai daerah resapan, serta dapat dimanfaatkan dalam waktu jangka panjang (lebih dari 30 tahun). Energi panasbumi ini berasal dari aktivitas tektonik di dalam bumi yang terjadi sejak planet ini diciptakan, dimana energi ini dapat diklasifikasikan ke dalam lima kategori seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.1. Energi Hidrotermal merupakan jenis energi panasbumi yang sering ditemui di Indonesia.



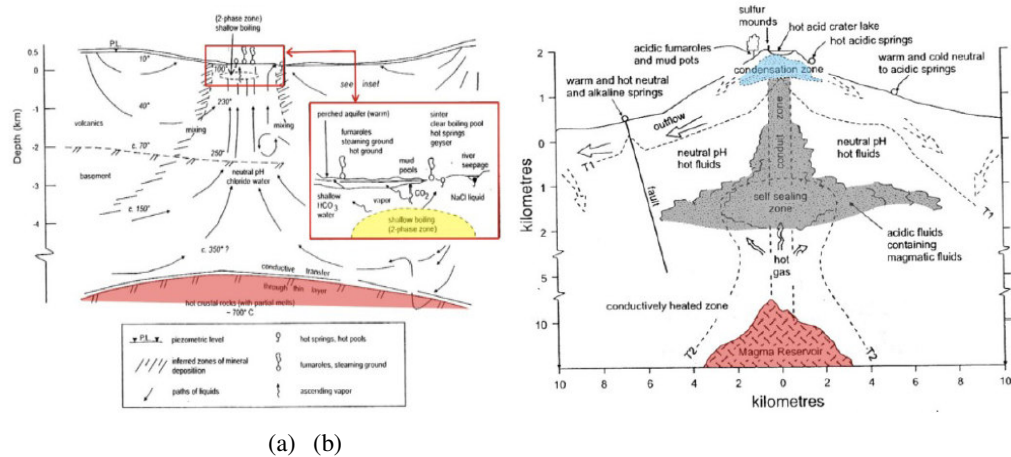
Gambar 2.1. Jenis-jenis Energi Panasbumi (Saptadji, 2012)

### 2.1.3 Sistem *Hydrothermal*

Sistem Panasbumi yang terpengaruh kuat oleh adanya fluida termal, seperti batuan yang meleleh, gas, uap, dan air panas, disebut sebagai Sistem *Hydrothermal*<sup>[5]</sup>. Sistem hidrotermal merupakan tipe dari sistem panasbumi dimana transfer panas dari sumber panas ke permukaan secara konveksi bebas, yang melibatkan fluida meteorik dengan atau tanpa fluida magmatik. Daerah luhan (discharge) cairan pada atau dekat permukaan diisi ulang oleh air meteorik yang berasal dari luar (*recharge*) yang ditarik oleh fluida yang meningkat.

Setiap Sistem Hidrotermal mempunyai karakteristik unik yang merupakan hasil interaksi berbagai faktor, yaitu ukuran dan bentuk batuan sumber panas, struktur geologi, permeabilitas, *topography*, dan hidrologi permukaan (suhu dan infiltrasi) (Saptadji, 2012). Sistem hidrotermal terdiri dari sumber panas yang besar, reservoir yang permeabel, pasokan air, lapisan atas dari tahanan batuan, dan mekanisme recharge yang baik. Sistem ini sering berasosiasi dengan pusat vulkanisme atau gunung api di sekitarnya. Apabila Sistem *Hydrothermal* lebih didominasi oleh fluida magmatik dari gunung api, sistem tersebut dikatakan sebagai Sistem Vulkanik *Hydrothermal* (*Volcanic Hydrothermal System*).

Pada dasarnya ada dua *prototype* model Sistem *Hydrothermal* bertemperatur tinggi, yaitu model Sistem *Hydrothermal* di daerah datar (*flat terrain*) atau di daerah pegunungan (*mountainous terrain*) (Saptadji, 2012). Pada Sistem *Hydrothermal* di daerah datar, proses konveksinya bebas dan melibatkan fluida meteorik (*meteoric water*), dengan atau tanpa jejak fluida magmatik. Contoh dari fluida meteorik adalah air hujan yang meresap jauh ke bawah permukaan tanah. Dan pada Sistem *Hydrothermal* di daerah pegunungan, pada dasarnya proses yang terjadi sama saja. Sistem Panasbumi yang dominan di Indonesia adalah Sistem *Hydrothermal* yang berasosiasi dengan pusat vulkanisme, dan cocok dengan kedua *prototype* model tersebut ditinjau dari iklimnya.

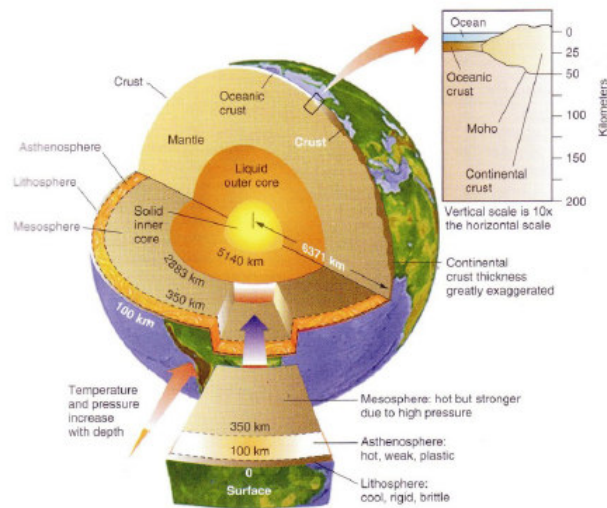


Gambar 2.2. Skema sistem hidrotermal pada (a) daerah topografi datar, dan (b) daerah pegunungan (Hochstein, 2000)

## 2.2 Proses Pembentukan Panasbumi

### 2.2.1 Struktur Lapisan Bumi

Struktur bumi dapat diketahui dari informasi gelombang seismik. Seperti terlihat pada Gambar 2.2, bumi secara garis besar terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu kerak/kulit bumi (*crust*), selubung bumi (*mantle*), dan inti bumi (*core*) (Saptadji, 2012). Kerak bumi merupakan bagian terluar dari lapisan bumi yang ketebalannya tidak sama di semua tempat. Umumnya kerak samudera (*ocean*) lebih tipis dibandingkan dengan kerak benua (*continent*), dimana variasi ketebalannya mulai dari 5 km (di bawah lautan) hingga 70 km (di daratan), sehingga ketebalan rata-ratanya sekitar 35 km. Lapisan kulit bumi bersifat dingin serta padat mengapung di atas lapisan cairan magma di dalam lapisan mantel di bawahnya.



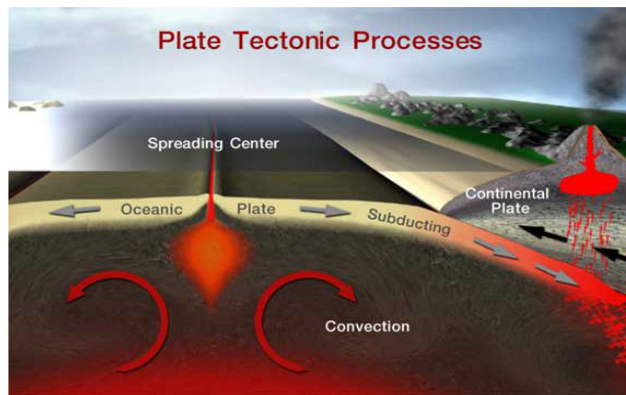
Gambar 2.3. Struktur Lapisan Bumi<sup>[6]</sup>

Lapisan selanjutnya di bawah kerak bumi adalah lapisan mantel atau disebut juga sebagai lapisan selubung. Lapisan selubung juga dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *Litosfer*, *Astenosfer*, dan *Mesosfer*. Litosfer merupakan lapisan selubung paling atas dengan ketebalan antara 50-100 km yang berupa padatan yang kaya dengan silisium dan alumunium. Astenosfer merupakan lapisan dibawah litosfer dengan ketebalan antara 130-160 km yang wujudnya berupa cairan kental tempat kerak bumi dan litosfer mengapung. Sedangkan Mesosfer merupakan lapisan paling bawah dari selubung dengan tebal antara 2.400-2.750 km.

Lapisan paling dalam dari bumi adalah inti bumi. Inti bumi dibagi menjadi dua bagian, yaitu Inti Luar (*Outer Core*) dan Inti Dalam (*Inner Core*). Inti luar berada pada kedalaman 2.900-5200 km yang diduga berupa cairan karena sifatnya yang tidak meneruskan gelombang S, dan tersusun dari materi yang mengandung silisium, besi, dan magnesium. Sedangkan inti dalam berada pada kedalaman antara 5.200-6.370 km yang tersusun dari besi dan nikel yang memiliki kerapatan massa lebih dari  $10.000 \text{ kg/m}^3$  dengan temperatur di atas  $4.500^{\circ}\text{C}$ . Lapisan inti dalam memiliki kecepatan seismik yang tinggi sehingga dapat disimpulkan bahwa lapisan inti dalam merupakan lapisan padatan yang panas.

### 2.2.2 Terbentuknya Panasbumi

Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa *lithosphere* bukan merupakan permukaan yang utuh, melainkan sejumlah lempeng-lempeng yang tipis dan kaku (Saptadji, 2012). Lempeng-lempeng itu merupakan lempeng batuan setebal 64-145 km yang mengapung di atas *asthenosphere* dan bergerak secara perlahan dan kontinu. Karena bergerak, lempeng-lempeng terpisah di beberapa tempat, dan saling mendorong di tempat lainnya dan salah satu di antaranya menunjam di bawah lempeng lainnya.

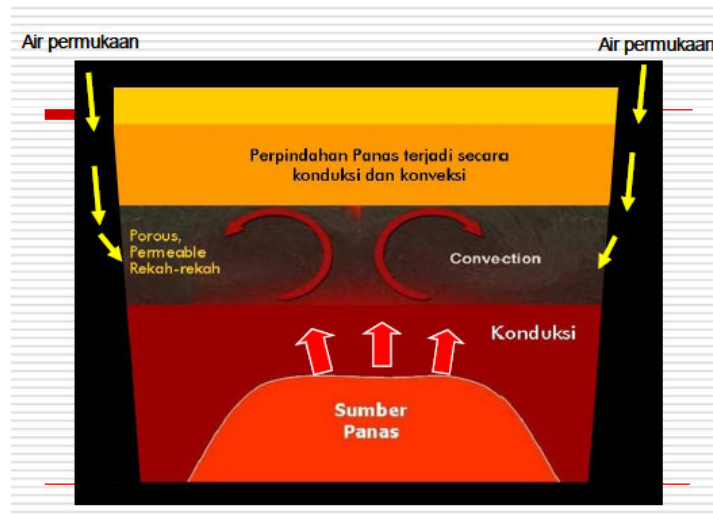


Gambar 2.4. Pergerakan Lempengan-lempengan Tektonik (Saptadji, 2009)

Ujung lempeng-lempeng yang saling menunjam akhirnya hancur meleleh dan memiliki temperatur tinggi (proses magmatisasi), karena panas dari gesekan dan panas di dalam *asthenosphere*. Pada perbatasan dua lempeng di daerah penunjaman, harga laju aliran panas akan lebih besar dari harga rata-rata laju aliran panas di permukaan Bumi, karena adanya aliran panas dari material sumber panas pada kedalaman beberapa ribu kilometer di bawah permukaan Bumi. Hasil dari perpindahan panas inilah yang membentuk Sistem Panasbumi (Saptadji, 2012).

Perpindahan panas dalam Sistem Panasbumi terjadi secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi dengan perantara batuan. Perpindahan panas secara konveksi terjadi karena gaya apung (*bouyancy*) (Saptadji, 2012). Gaya apung ini bekerja pada air, setelah air tersebut kontak dengan sumber panas dan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air tersebut naik dan air akan lebih ringan. Air yang panas akan bergerak ke atas, sedangkan air yang lebih

dingin bergerak ke bawah karena gaya gravitasi, sehingga terjadilah sirkulasi air atau arus konveksi. Secara umum, perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan sumber panas.



Gambar 2.5. Perpindahan Panas Sistem Panasbumi (Saptadji, 2012)

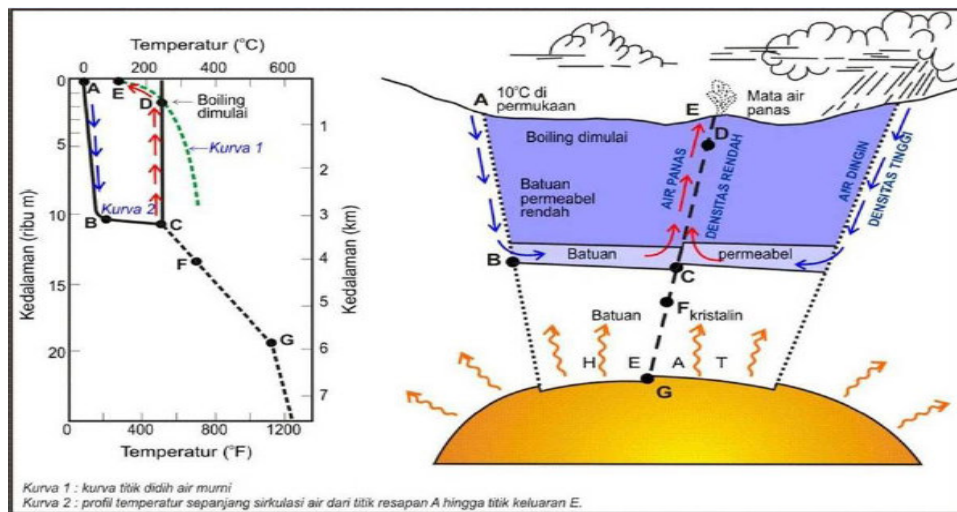
### 2.2.3 Prinsip Kerja Panasbumi

Prinsip terbentuknya panasbumi yaitu dimulai dari air tanah yang terjebak di dalam batuan yang kedap dan terletak di atas dapur magma atau batuan yang panas karena kontak langsung dengan magma, otomatis akan memanaskan air tanah yang terletak di atasnya sampai suhu yang cukup tinggi ( $100\text{-}250^{\circ}\text{C}$ ), sehingga air tanah yang terpanaskan akan mengalami proses penguapan. Apabila terdapat rekahan atau sesar yang menghubungkan tempat terjebaknya air tanah yang dipanaskan tadi dengan permukaan, maka pada permukaan akan terlihat manifestasi termal. Salah satu contoh yang sering dijumpai adalah mata air panas, selain solfatara, fumarol, geyser yang merupakan contoh manifestasi termal yang lain (Kaliti, 1980).

Energi panasbumi diekstrak dari energi panas intrusi magma di bawah permukaan bumi. Di bawah permukaan bumi, air dalam akuifer dipanasi oleh magma yang dapat mencapai  $150\text{-}200^{\circ}\text{C}$  (Singarimbun, 1997). Karena berada dalam tekanan tinggi, maka air tersebut tetap berupa wujud air. Air yang panas bertekanan tinggi inilah yang digunakan sebagai pembawa energi ke permukaan bumi yang siap

dimanfaatkan. Untuk mengkonversikan energi panas menjadi energi listrik, diperlukan sistem pembangkit listrik (*Power Plant*).

Pada prinsipnya suatu sistem panasbumi bekerja ketika uap hasil penguapan air tanah yang terdapat di dalam tanah akan tetap berada di dalam tanah jika tidak ada saluran yang menghubungkan daerah tempat keberadaan uap dengan permukaan. Uap yang terkurung akan memiliki nilai tekanan yang tinggi dan apabila pada daerah tersebut kita bor sehingga ada saluran penghubung ke permukaan, maka uap tersebut akan mengalir keluar. Uap yang mengalir dengan cepat dan mempunyai entalpi tinggi inilah yang kita manfaatkan dan kita salurkan untuk memutar turbin sehingga dihasilkanlah energi listrik (tentunya ada proses-proses lain sebelum uap memutar turbin). Setelah uap memutar turbin dan uap telah kehilangan tekanan dan entalpi maka uap tersebut akan mengalami proses pengembunan sehingga uap akan berubah kembali menjadi air. Air hasil pendinginan (*condensation*) yang didinginkan dengan kondenser akan dikumpulkan dan akan diinjeksikan kembali ke dalam tanah, sehingga volume air tanah tidak akan berkurang secara drastis. Salah satunya karena proses injeksi inilah kenapa energi geotermal disebut dengan energi yang terbarukan (*renewable*) dan energi yang ramah lingkungan (Katili, 1980).



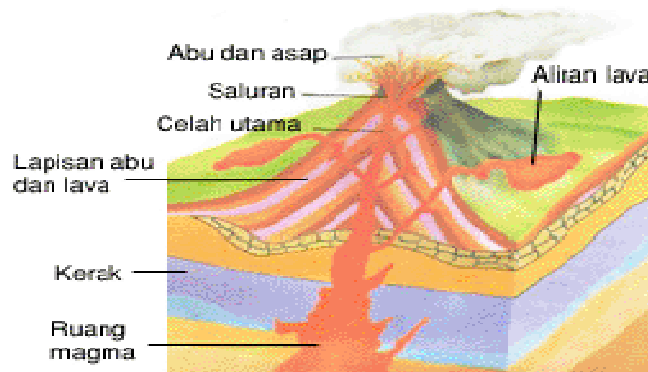
Gambar 2.6. Kurva temperatur terhadap kedalaman (kiri) dan skema ilustrasi pada daerah panasbumi (kanan).

## 2.3 Komponen-Komponen Sistem Panasbumi

Di Indonesia, sistem panasbumi yang paling umum ditemukan adalah Sistem Hidrotermal, sehingga komponen yang dimaksud adalah komponen-komponen dari sistem panasbumi jenis hidrotermal. Komponen-komponen penting dari sistem hidrotermal pada dasarnya terdiri darilima komponen, yaitu sumber panas, *reservoir*, daerah resapan (*recharge*), daerah luhan (*discharge*), dan manifestasi permukaan.

### 2.3.1 Sumber Panas

Sepanjang waktu panas dari dalam bumi ditransfer menuju permukaan bumi dan seluruh muka bumi menjadi tempat tampungan panas (*heat sink*). Namun di beberapa tempat, energi panas ini dapat terkonsentrasi dalam jumlah besar dan melebihi jumlah energi per satuan luas rata-rata. Contohnya adalah gunung api, yang konsentrasi panasnya sangat besar dan bersifat *intermittent*, yang artinya sewaktu-waktu dapat dilepaskan dalam bentuk letusan gunung api. Gunung api menjadi sumber panas potensial dari Sistem Panasbumi di dekatnya. Indonesia, yang berada pada jalur cincin api (*ring of fire*) diklaim memiliki potensi Panasbumi terbesar di dunia.



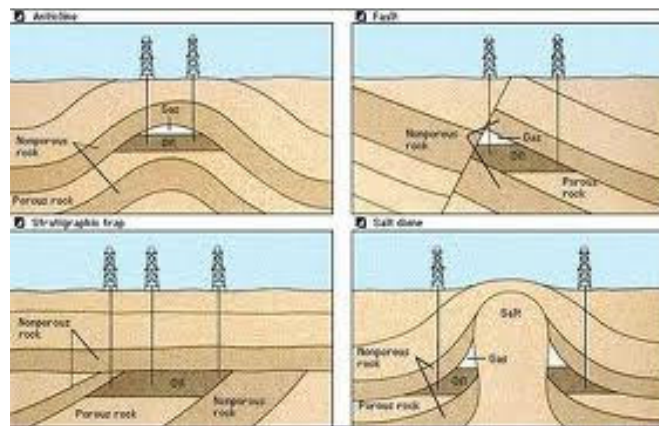
Gambar 2.7. Gunung Api, Salah Satu Sumber Panas Panasbumi<sup>[7]</sup>

Berbeda dengan gunung api, Sistem Panasbumi biasa bersifat kontinu. Daerah lain yang berpotensi menjadi sumber panas, yang intensitasnya tidak sebesar gunung api, adalah: daerah dengan tekanan litostatik lebih besar dari normal (misalnya *geopressured system*), daerah yang memiliki kapasitas panas tinggi akibat peluruhan

radioaktif yang terkandung dalam batuan, dan daerah yang memiliki magmatisme dangkal di bawah *basement*.

### 2.3.2 Reservoir

Reservoir adalah formasi batuan yang berada di antara sumber panas dan tempat tampungan panas, yang menjadi tempat penyimpanan fluida termal, sekaligus tempat mengalirnya fluida termal yang terdapat dibawah permukaan bumi yang memiliki cukup porositas dan permeabilitas yang baik untuk meloloskan fluida (sumber energi panasbumi) yang terperangkap di dalamnya. Porositas berperan dalam menyimpan fluida termal dan permeabilitas berperan dalam mengalirkan fluida termal.



Gambar 2.8. Skema Reservoir Panasbumi (www.wikipedia.com)

Reservoir Sistem Panasbumi bisa saja ditudungi atau dikelilingi lapisan batuan yang permeabilitasnya sangat kecil (*impermeable*), yang dikenal sebagai lapisan penudung (*cap rock*). Pada lapisan penudung, banyak dijumpai jenis mineral lempung, yaitu kaolinite dan smectite hasil alterasi (Nelson, 2009 dan Herdianita, 2008). Sifat konduktif dari lapisan ini dapat dideteksi dengan survei Magneto-Tellurik (MT), sehingga posisi lapisan konduktif ini dapat terpetakan, dan posisi reservoir dapat diperkirakan, karena reservoir Panasbumi biasanya berada di bawah lapisan konduktif ini.

Reservoir diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu :

- a. Entalpi rendah, memiliki batas temperatur  $< 125^{\circ}\text{C}$  dengan rapat daya spekulatif  $10 \text{ MW/km}^2$  dan konversi energi 10%.
- b. Entalpi sedang, memiliki temperatur berkisar antara  $125 - 225^{\circ}\text{C}$  dengan rapat daya spekulatif  $12.5 \text{ MW/km}^2$  dan konversi energi 10%.
- c. Entalpi tinggi, memiliki batas temperatur  $> 225^{\circ}\text{C}$  dengan rapat daya spekulatif  $15 \text{ MW/km}^2$  dan konversi energi 15%.

#### 2.3.3 Daerah Resapan (*Recharge*)

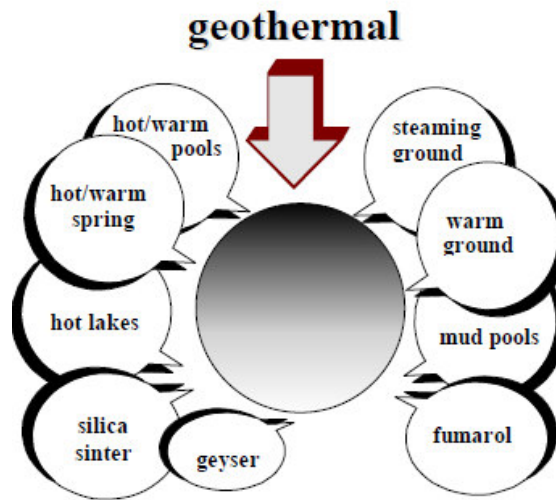
Daerah resapan merupakan daerah dimana arah aliran air tanah di tempat tersebut bergerak menjauhi muka tanah, dengan kata lain, air tanah di daerah resapan bergerak menuju ke bawah permukaan bumi. Daerah resapan yang terjaga dengan baik akan menopang tekanan di dalam fluida reservoir karena adanya fluida yang mengisi pori di dalam reservoir secara kontinu.

#### 2.3.4 Daerah Luahan (*Discharge*)

Daerah luahan adalah daerah dimana arah aliran air tanah di tempat tersebut bergerak menuju muka tanah, dengan kata lain, air tanah di daerah luahan akan bergerak menuju ke atas permukaan bumi. Daerah luahan ditandai dengan adanya manifestasi permukaan.

#### 2.3.5 Manifestasi Panasbumi di Permukaan

Manifestasi permukaan adalah tanda-tanda yang tampak di permukaan Bumi yang menunjukkan adanya Sistem Panasbumi di bawah permukaan di sekitar kemunculannya. Manifestasi Panasbumi di permukaan diperkirakan terjadi karena adanya perambatan panas dari bawah permukaan atau karena adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan fluida termal Panasbumi (uap dan air panas) mengalir ke permukaan.



Gambar 2.9 Jenis-jenis Manifestasi Permukaan Panasbumi

Manifestasi permukaan bisa keluar secara langsung (*direct discharge*), seperti mata air dan fumarol. Fumarol adalah uap panas (*vapour*) yang keluar melalui celah-celah batuan dengan kecepatan tinggi yang akhirnya berubah menjadi uap air (*steam*). Manifestasi permukaan juga bisa keluar secara terdifusi, seperti pada kasus tanah beruap (*steaming ground*) dan tanah hangat (*warm ground*), dan keluar secara tersembunyi, seperti dalam bentuk rembesan di sungai. Secara umum, manifestasi permukaan yang sering muncul pada sistem-sistem Panasbumi di Indonesia adalah: mata air panas, fumarole, *steaming ground*, *warm ground*, kolam lumpur panas, solfatara (uap air yang keluar melalui rekahan batuan yang bercampur dengan  $H_2S$ ,  $CO_2$ , dan kadang  $SO_2$ , serta dapat mengendapkan sulfur), dan batuan teralterisasi (batuan yang terubahkan karena adanya reaksi antara batuan dengan fluida Panasbumi).



(a)

(b)



(c)

(d)

Gambar 2.10. Kenampakan manifestasi panasbumi di lapang Kamojang, Kab. Bandung, Indonesia, (a) dan (b) *steaming ground*, (c) *fumarol*, (d) *warm pool* dan *mud pool* (Foto : Mayangsari,2014)

## 2.4 Jenis-jenis Sistem Panasbumi

Sistem Panasbumi yang dominan di Indonesia adalah Sistem *Hydrothermal* (Saptadji, 2012). Sistem *Hydrothermal* dibedakan menjadi dua, berdasarkan pada jenis kandungan fluida utamanya, yaitu sistem satu fasa yang meliputi *warm water* (air hangat), *hot water* (air panas), dan *superheated steam* (uap panas lanjut), dan sistem dua fasa yang meliputi *liquid dominated system* (sistem dominasi air) dan *vapour dominated system* (sistem dominasi uap).

#### 2.4.1 Sistem Satu Fasa

Pada sistem satu fasa, fluida yang terdapat dalam reservoir terdiri dari satu jenis fasa, yaitu fasa air saja atau fasa uap saja. Sistem yang berisi air mempunyai temperatur dibawah  $250^{\circ}\text{C}$  sedangkan untuk sistem yang berisi uap mempunyai temperatur diatas  $250^{\circ}\text{C}$  dengan tekanan yang tidak terlalu tinggi karena sebagian tidak memiliki batuan penudung (*cap rock*) yang mampu menahan tekanan dan temperatur.

##### a. Warm Water

Pada sistem air hangat (*warm water*) ini reservoir memiliki temperatur berkisar  $90\text{-}180^{\circ}\text{C}$  dan tidak terjadi pendidihan bahkan selama eksploitasi. Sistem air hangat ini biasa dimanfaatkan untuk kebutuhan secara langsung dan non-listrik, seperti kebutuhan pertanian dan penghangat ruangan. Contoh dari sistem ini adalah Lapangan Panasbumi di Tianjin (Cina) dan Waiwera (Selandia Baru).

##### b. Hot Water

Pada sistem ini reservoir terdiri dari air panas (*hot water*) secara keseluruhan yang memiliki temperatur berkisar  $200\text{-}250^{\circ}\text{C}$  dan biasanya baru terjadi proses pendidihan setelah dieksploitasi yang ekstensif dilakukan, dimana hal ini disebabkan oleh kandungan gas di reservoir yang bersangkutan. Contoh dari sistem ini adalah Achuachapan, Salton Sea, dan Krafla.

##### c. Superheated Steam

Pada sistem ini reservoirnya berupa uap panas. Jika uap telah melampaui titik kritis tekanan maupun temperaturnya dan telah diproduksi, maka akan terjadi penurunan tekanan yang menyebabkan uap akan menjadi uap kering jenuh yang bercampur dengan uap *superheated*.

#### 2.4.2 Sistem Dua Fasa

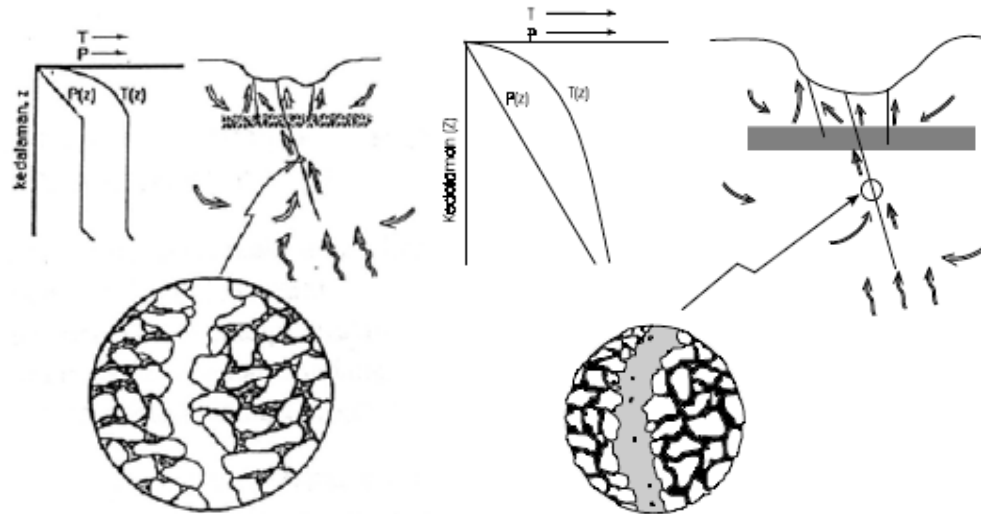
Sistem ini memiliki fluida dengan dua fasa pada reservoirnya, yaitu air dan uap air. Berdasarkan dominasi fasanya, dibedakan atas reservoir dominasi air dan dominasi uap.

##### a. Sistem Dominasi Air (*Liquid Dominated System*)

Sistem Dominasi Air adalah Sistem Panasbumi yang sumur-sumurnya menghasilkan fluida dua fasa yang sebagian besarnya berisi air panas. Dalam sistem dominasi air, air diperkirakan mengisi rongga-rongga, saluran terbuka atau rekahan-rekahan. Pada sistem dominasi air, temperature berkisar 200-300°C dengan tekanan maupun temperature tersebut tidak konstan terhadap kedalaman. Contoh lapangan diantaranya ialah Lapangan Awibengkok, Lahendong, dan Dieng.

##### b. Sistem Dominasi Uap (*Vapour Dominated System*)

Sistem dominasi uap adalah Sistem Panasbumi dimana sumur-sumurnya memproduksi uap kering atau uap basah karena rongga-rongga batuan reservoirnya sebagian besar berisi uap panas. Uap diperkirakan mengisi rongga-rongga, saluran terbuka, atau rekahan-rekahan. Sedangkan air memasuki pori-pori batuan. Saturasi airnya sama, atau hanya sedikit lebih besar dari saturasi air konat ( $S_{wc}$ ) karena jumlah air yang terkandung di dalam pori-pori lebih sedikit, sehingga air terperangkap dalam pori-pori batuan dan tidak bergerak. Contoh lapangan sistem dominasi uap diantaranya ialah Lapangan Kamojang dan Darajat, dimana sumur-sumur umumnya menghasilkan uap kering.



Gambar 2.11. Skema Karakteristik Sistem Dominasi Uap (kiri) dan Sistem Dominasi Air (kanan)  
(Saptadji, 2012).

## 2.5 Potensial Sistem Panasbumi

### 2.5.1 Potensi Panasbumi

Potensi panasbumi terbagi kedalam 2 (dua) kategori, yaitu sumber daya dan cadangan.

#### 2.5.1.1 Sumber Daya

Kriteria sumber daya terdiri dari :

- Spekulatif, dicirikan oleh terdapatnya manifestasi panasbumi aktif dimana luas reservoir dihitung dari penyebaran manifestasi dan data batasan geologi yang tersedia, sedangkan temperatur dihitung dengan geotermometer, serta rapat daya per satuan luasnya ditentukan berdasarkan asumsi.
- Hipotesis, diindikasikan oleh manifestasi panasbumi aktif dengan data dasar hasil survei regional geologi, geokimia, dan geofisika. Luas daerah prospek ditentukan berdasarkan penyebaran manifestasi dan batasan

geologi, sementara penentuan suhu berdasarkan geotermometer (air, gas atau isotop).

#### 2.5.1.2 Cadangan

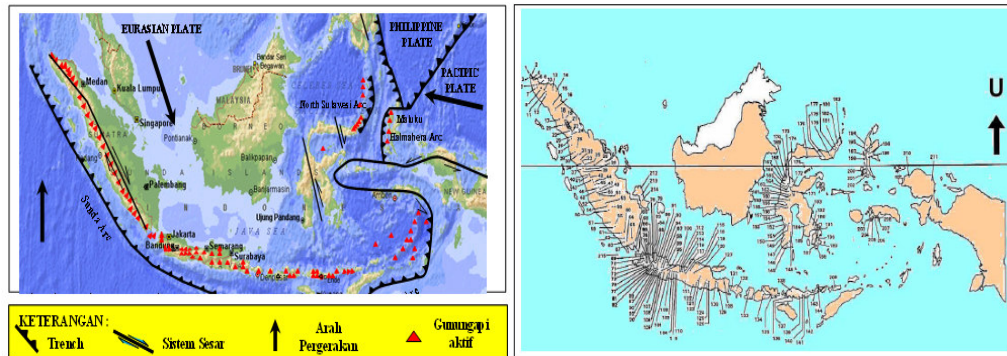
Kriteria cadangan terdiri dari :

- a. Terduga, dibuktikan oleh data pemboran landaian suhu dimana estimasi luas dan ketebalan reservoir serta parameter fisika batuan dan fluida diestimasi berdasarkan data ilmu kebumian terpadu, yang digambarkan dalam bentuk model tentatif.
- b. Mungkin, dibuktikan oleh sebuah sumur eksplorasi yang berhasil menyemburkan uap/air panas, dimana estimasi luas dan ketebalan reservoir didasarkan pada data sumur dan hasil penyelidikan ilmu kebumian rinci terpadu. Parameter batuan, fluida, dan temperatur reservoir diperoleh dari pengukuran langsung dalam sumur dan/atau data analisis laboratorium.
- c. Terbukti, dibuktikan oleh lebih dari satu sumur eksplorasi yang berhasil mengeluarkan uap/air panas, dimana estimasi luas dan ketebalan reservoir didasarkan kepada data sumur dan hasil penyelidikan ilmu kebumian rinci terpadu. Parameter batuan dan fluida serta temperatur reservoir didapatkan dari data pengukuran langsung dalam sumur dan/atau data analisis laboratorium serta simulasi reservoir.

#### 2.5.2 Potensial Sistem Panasbumi di Indonesia

Di Indonesia, sumber panasbumi yang terkandung dibawah permukaan bumi memiliki potensi yang besar, yaitu 40% potensi yang ada di dunia. Hal ini karena Indonesia merupakan negara yang terletak di jalur Cincin Api dunia, dan mempunyai sekitar 129 gunung api aktif yang tersebar di Kepulauan Indonesia, meliputi Sumatera, Jawa, Sulawesi, Bali, dan Nusa Tenggara (Grandis, 2002). Total potensial panasbumi yang dimiliki oleh Indonesia ialah sebesar 29.038 MW di 276 lapangan panasbumi, dengan jumlah sumber daya sebesar 13.171 MW dan jumlah cadangan sebesar 15.867 MW. Namun kapasitas yang telah terpasang hanya 1.196 MWe, atau

4,12 % dari seluruh potensi panasbumi di Indonesia(Kementerian Sumber Daya Alam Mineral dan Gas, 2011).



Gambar 2.12. Peta Penyebaran Prospek Panasbumi di Indonesia (Direktorat Jenderal Migas, 1996).

## 2.6 Sifat Batuan dan Fluida Panasbumi

Sebagian besar reservoir panasbumi terdapat pada batuan vulkanik dengan aliran utama melalui rekahan. Parameter penting yang menerangkan sifat batuan reservoir panasbumi adalah porositas, permeabilitas, densitas batuan, konduktifitas panas dan panas spesifik batuan. Selain sifat batuan, pada reservoir juga terdapat parameter penting mengenai sifat fluida panasbumi (uap dan air) yang meliputi volume spesifik, densitas, energi dalam, entalphi dan panas laten, entropi, dan viskositas.

### 2.6.1 Sifat Batuan

Sebesar 99% batuan reservoir adalah batuan sedimen, namun secara teoritis semua batuan, baik batuan beku maupun batuan metamorf dapat bertindak sebagai batuan reservoir. Jenis batuan reservoir ini akan berpengaruh terhadap besarnya porositas dan permeabilitas. Selain itu, fasa fluida yang mengisi pori-pori tersebut berhubungan atau tidak satu sama lainnya dapat mempengaruhi batuan reservoir.

#### 2.6.1.1 Porositas

Porositas merupakan perbandingan volume pori-pori batuan terhadap volume batuan secara keseluruhan/total volume batuan. Reservoir panasbumi umumnya

ditemukan pada batuan rekah alami, dimana batumannya terdiri dari rekahan-rekahan dan rongga-rongga atau pori-pori yang mengandung fluida panasbumi. Volume rongga-rongga atau pori-pori batuan tersebut umumnya dinyatakan sebagai fraksi dari volume total batuan dan didefinisikan sebagai porositas ( $\Phi$ ) atau ' $n$ '.

Secara matematis porositas dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\Phi = \frac{\text{volume pori - pori}}{\text{volume keseluruhan batuan}} \times 100\%$$

$$\Phi = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% \quad (2.1)$$

Berdasarkan sifat-sifat batuan reservoir, maka porositas dapat dibagi menjadi porositas efektif dan porositas absolut. Porositas efektif yaitu perbandingan volume pori-pori yang saling berhubungan terhadap volume batuan secara keseluruhan. Porositas absolut adalah perbandingan volume pori-pori total tanpa memandang saling berhubungan atau tidak, terhadap volume batuan secara keseluruhan. Porositas efektif biasanya lebih kecil daripada rongga pori-pori total yang biasanya berkisar dari 10 sampai 15% (Kusumadinata, 1980). Berikut adalah persamaan porositas efektif, yakni :

$$n_e = \frac{\text{volume pori - pori bersambung}}{\text{volume batuan keseluruhan}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Porositas dapat diukur dengan beberapa metode, yaitu :

- Metode langsung dengan mengukur volume bahan curah lalu mengukur volume komponen per bagian.
- Metode optis dengan menggunakan mikroskop.
- Metode tomografi komputer dengan menggunakan pemindaian CT untuk membuat pencitraan tiga dimensi dari geometri eksternal dan internal, termasuk ruang kosong di dalamnya.

- Imbibisi yaitu menenggelamkan batuan berpori ke dalam fluida yang dilakukan di dalam ruang vakum. Fluida yang dipilih adalah fluida yang mampu membasahi bahan secara mendalam dan tidak bereaksi dengan batuan.
- Metode pengurapan air.
- Intrusi raksa.
- Metode ekspansi gas, dan lain-lain.

Pada lapangan panasbumi yang telah dilakukan pemboran, porositas dapat pula ditentukan dari logging atau dengan perkiraan pemeriksaan secara mikroskopik.

#### 2.6.1.2 Permeabilitas ( $k$ )

Permeabilitas batuan adalah suatu sifat batuan reservoir untuk dapat meloloskan fluida melalui pori-pori yang berhubungan, tanpa merusak partikel pembentuk atau kerangka batuan tersebut. Permeabilitas merupakan parameter penting untuk menentukan kecepatan alir fluida di dalam batuan rekah alami.

Berdasarkan jumlah fasa yang mengalir dalam batuan reservoir, permeabilitas dibedakan menjadi tiga, yaitu :

- a. Permeabilitas absolut, yaitu kemampuan batuan untuk melewatkan fluida dimana fluida yang mengalir melalui media berpori tersebut hanya satu fasa atau disaturasi 100%.
- b. Permeabilitas efektif, yaitu kemampuan batuan untuk melewatkan fluida dimana fluida mengalir lebih dari satu fasa, dan harganya dinyatakan sebagai  $K_o, K_g, K_w$ , dimana masing-masing untuk minyak, gas, dan air.
- c. Permeabilitas relatif, merupakan perbandingan antara permeabilitas efektif terhadap permeabilitas absolute pada kondisi saturasi tertentu.

Faktor yang ikut mempengaruhi permeabilitas adalah bentuk dan ukuran batuan, sementasi, serta retakan dan pelarutan.

Permeabilitas yang biasanya dinyatakan dalam satuan mD (mili Darcy), di bidang geotermal sering kali dinyatakan dalam  $m^2$ , dimana 1 Darcy besarnya sama dengan  $10^{-12} m^2$ . Besarnya permeabilitas tidak sama ke segala arah (anisotropy), umumnya permeabilitas pada arah horizontal lebih besar dari permeabilitas pada arah vertikal. Batuan reservoir panasbumi umumnya mempunyai permeabilitas matriks sangat kecil, dimana reservoir mempunyai permeabilitas antara 1 sampai 100 mD dan transmisivitas (hasil kali permeabilitas dengan ketebalan) antara 1 sampai 100 Dm (Darcy meter).

#### 2.6.1.3 Densitas ( $\rho$ )

Densitas batuan merupakan perbandingan antara massa batuan dengan volume total pada batuan tersebut. Suatu batuan memiliki dua komponen, yaitu komponen padatan dan komponen rongga (pori), dimana keduanya memiliki nilai yang beragam pada tiap-tiap batuan, sehingga massa jenis dari suatu batuan berbeda dengan massa jenis batuan lainnya. Komponen padatan yang terdapat pada batuan juga dapat memiliki massa jenis yang berbeda-beda pula. Massa jenis ini dikenal dengan istilah densitas matriks, yang dapat dirumuskan melalui persamaan :

$$\rho_m = \frac{\text{massa}}{\text{Volume}} \quad (2.3)$$

Dengan demikian, hubungan antara densitas matriks dengan densitas total dari suatu batuan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\rho = \rho_m(1 - \Phi) \quad (2.4)$$

Densitas yang diperlukan dalam perhitungan cadangan potensi panasbumi adalah densitas batuan dalam kondisi kering dan dalam kondisi basah, yang keduanya dapat ditentukan oleh alat “Piknometer” yang dapat ditentukan densitasnya dengan satuan  $gr/cm^3$ .

#### 2.6.1.4 Konduktivitas Panas (Cv)

Konduktivitas panas batuan merupakan parameter yang menyatakan besarnya kemampuan batuan tersebut untuk menghantarkan panas dengan cara konduksi

apabila pada batuan tersebut ada perbedaan temperatur (gradien temperatur). Secara matematis konduktivitas panas dinyatakan sebagai berikut :

$$C_v = \frac{Q}{\left(\frac{dT}{dz}\right)} \quad (2.5)$$

Dimana Q adalah laju aliran panas persatuan luas dan  $dT/dZ$  adalah gradien temperatur. Konduktivitas panas tidak sama untuk setiap batuan. Konduktivitas panas suatu batuan tidak hanya ditentukan oleh jenis batuan atau mineral-mineral penyusunnya, tetapi juga ditentukan oleh struktur Kristal yang membentuk batuan tersebut. Mungkin ini pulalah yang menyebabkan harga konduktivitas berlainan ke semua arah. Hal ini menyebabkan panas merambat dengan laju yang berbeda ke arah yang berlainan.

#### 2.6.1.5 Panas Spesifik Batuan ( $C_p$ )

Panas spesifik batuan adalah suatu parameter yang menyatakan banyaknya panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa batuan tersebut sebesar  $1^\circ\text{C}$ . Panas spesifik yang digunakan dalam perhitungan cadangan panasbumi adalah panas yang terbentuk di bawah permukaan atau panas reservoir yang dianggap bertekanan tetap. Nilai ini dapat ditentukan dari besaran temperature di bawah permukaan yang dikorelasikan dengan grafik dari standar “Specific Heat Capacity” internasional, yang telah diteliti berdasarkan hukum termodinamika sejak tahun 1936, pada batasan tekanan 1000 atm dan temperatur  $1300^\circ\text{C}$  (Saptadji, 2001).

Panas spesifik batuan umumnya mempunyai tiga harga sebagai berikut :

- a. Pada temperatur rendah  $\rightarrow 0.75 - 0.85 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- b. Pada temperatur sedang  $\rightarrow 0.85 - 0.95 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- c. Pada temperatur tinggi  $\rightarrow 0.95 - 1.10 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

#### 2.6.2 Sifat Fluida

Pada reservoir panasbumi, fluida dapat berada pada keadaan cair dan/atau gas tergantung dari tekanan dan temperatur yang mempengaruhinya. Pada keadaan tertentu, fluida berada dalam fasa cair apabila temperaturnya bernilai lebih kecil dari

temperatur titik didih atau temperatur saturasi, dan fluida berada dalam fasa gas/uap apabila temperaturnya lebih besar dari temperatur titik didih air atau temperatur saturasi. Selain jenis fluida, sifat fluida juga sangat dipengaruhi oleh besarnya tekanan dan temperatur di dalam sistem (Saptadji, 2001).

#### 2.6.2.1 Jenis dan Tipe Air Panasbumi

Pada reservoir dan manifestasi yang muncul di permukaan untuk daerah panasbumi pada umumnya terdapat tiga tipe air, yakni air klorida, air sulfat, dan air bikarbonat.

##### a. Air Klorida (Cl)

Tipe air klorida menunjukkan air reservoir yang mengandung 0.1 hingga 1.0 wt.% Cl, dimana perbandingan antara Cl/SO<sub>4</sub> umumnya tinggi, serta mengandung kation utama berupa unsure Na, K, Ca, dan Mg yang berasosiasi dengan gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. pada air klorida pH sekitar asam, namun dapat sedikit asam dan basa tergantung CO<sub>2</sub> terlarut. Dicitrakan dengan air yang sangat jernih dan berwarna kebiruan pada mata air natural, kaya akan SiO<sub>2</sub> dan sering terdapat HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, serta terbentuk endapan permukaan sinter silica (SiO<sub>2</sub>).

##### b. Air Sulfat (SO<sub>4</sub>)

Tipe air yang terbentuk di bagian paling dangkal sistem panasbumi akibat kondensasi uap air ke dalam air permukaan (*steam heated water*). Dicitrakan dengan tingginya kandungan SO<sub>4</sub> (mencapai 1000 ppm) akibat oksidasi H<sub>2</sub>S di zona oksidasi dan menghasilkan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> juga mengandung beberapa ppm Cl, bersifat asam, ditunjukkan dengan kenampakan kolam lumpur dan pelarutan batuan sekitar, dan juga tidak dapat digunakan sebagai geotermometer. Di lingkungan gunung api, air asam SO<sub>4</sub> – Cl terbentuk akibat kondensasi unsur volatil magmatik menjadi fasa cair.

c. Air Bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ )

Tipe air yang terbentuk pada daerah pinggir dan dangkal sistem geotermal akibat adsorpsi gas  $\text{CO}_2$  dan kondensasi uap air ke dalam air tanah. Dicirikan dengan anion utamanya berupa  $\text{HCO}_3$  dan kation utamanya adalah Na, terdapat kandungan Cl yang rendah dan  $\text{SO}_4$  yang bervariasi, di bawah muka air tanah bersifat asam lemah namun dapat juga bersifat basa oleh hilangnya  $\text{CO}_2$  yang terlarut di permukaan, serta dapat membentuk endapan sinter travertine ( $\text{CaCO}_3$ ) di permukaan.

#### 2.6.2.2 Sifat Fluida Satu Fasa

a. Volume Spesifik

Volume spesifik suatu zat adalah volume persatuan massa suatu zat karena kebalikan dari kerapatan/rapat massa. Volume spesifik suatu fasa fluida didefinisikan sebagai perbandingan antara volume dengan massa dari fasa fluida tersebut dengan satuan  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Besarnya temperatur dan tekanan dapat mempengaruhi nilai volume spesifik air ( $V_f$ ) dan volume spesifik uap ( $V_g$ ).

b. Densitas Fluida

Sama halnya dengan densitas pada batuan, densitas fluida juga merupakan perbandingan antara massa fluida dengan volume total pada fasa fluida tersebut, dimana besarnya temperatur dan tekanan juga mempengaruhi nilai densitas air ( $\rho_f$ ) dan densitas uap ( $\rho_g$ ) dengan harga yang ditentukan dari harga volume spesifik. Adapun persamaannya ialah sebagai berikut :

$$\rho = 1/V \quad (2.6)$$

c. Energi Dalam

Energi dalam (*internal energy*) menyatakan banyaknya panas yang terkandung di dalam suatu fasa persatuan massa, dengan satuan kJ/kg. Energi dalam juga dapat didefinisikan sebagai total energi kinetik dan energi

potensial yang ada di dalam sistem. Namun karena besar energi kinetic dan energi potensial pada sebuah sistem tidak dapat diukur, maka besar energi dalam sebuah sistem juga tidak dapat ditentukan, yang dapat ditentukan adalah besar perubahan energi dalam ( $\Delta U$ ) suatu sistem. Perubahan energi dalam dapat diketahui dengan mengukur jumlah kalor ( $Q$ ) dan kerja ( $W$ ) yang akan timbul bila suatu sistem bereaksi. Perubahan energi dalam dapat bernilai nol jika kalor yang masuk sama besar dengan kerja yang dilakukan, dan jika kalor yang dikeluarkan sama besar dengan kerja yang dikenakan pada sistem. Ini artinya tidak ada perubahan energi dalam yang terjadi pada sistem.

Besarnya energi dalam air ( $U_f$ ) dan energi dalam uap ( $U_g$ ) ditentukan dari Tabel Uap yang bergantung terhadap tekanan dan temperatur.

#### d. Entalpi dan Panas Laten

Jika suatu proses pada tekanan tetap dilakukan dengan tanpa adanya kerja yang dilakukan pada proses tersebut, maka panas yang dipindahkan per unit massa adalah entalpi zat tersebut. Entalpi juga merupakan jumlah dari energi dalam ( $U$ ) dengan energi yang dihasilkan oleh kerja tekanan, dengan satuan kJ/kg. Hubungan dari energi dalam dengan entalpi adalah :

$$h_f = u_f + p/v_f \quad (2.7)$$

$$h_g = u_g + p/v_g \quad (2.8)$$

Panas laten ( $h_{fg}$ ) adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk mengubah fasa 1 kg zat (J/kg). Pada pemanasan air, saat air mencapai suhu 100°C, proses kenaikan suhu akan berhenti dan terjadi perubahan fasa air dari cair menjadi uap/gas. Energi yang diperlukan untuk mengubah fasa inilah yang disebut sebagai panas laten suatu zat. Satuan dari panas laten adalah kJ/kg.

Besarnya entalpi air ( $h_f$ ) dan entalpi uap ( $h_g$ ) serta besarnya panas latentergantung dari tekanan dan temperaturnya dengan harga yang dapat ditentukan dari Tabel Uap.

e. Entropi

Entropi adalah salah satu besaran termodinamika yang mengukur energi dalam sistem per satuan temperatur yang tak dapat digunakan untuk melakukan usaha yang merupakan nilai tertentu untuk mengukur berapa banyak energi yang dilepaskan dalam sistem ketika berubah menjadi energi potensial terendah. Entropi menilai jumlah gangguan, dipahami sebagai perubahan dalam panas, dari titik sebelumnya ke titik kemudian dalam waktu. Entropi menggambarkan kecenderungan sistem untuk keluar dari keadaan organisasi yang lebih tinggi ke keadaan organisasi terendah pada tingkat molekuler. Entropi mempunyai dimensi energi dibagi temperatur, yaitu (J/K). Seperti sifat termodinamika lainnya, entropi ( $s$ ) juga tergantung dari tekanan dan temperaturnya dengan harga yang dapat ditentukan dari Tabel Uap.

f. Viskositas

Viskositas adalah ukuran kekentalan suatu fluida untuk mengalir yang menunjukkan besar kecilnya gesekan internal fluida. Viskositas fluida berhubungan dengan gaya gesek antar lapisan fluida ketika satu lapisan bergerak melewati lapisan yang lain. Pada zat cair, viskositas disebabkan terutama oleh gaya kohesi antar molekul, sedangkan pada gas, viskositas muncul karena tumbukan antar molekul. Viskositas dibedakan menjadi dua, yaitu viskositas dinamik ( $\mu$ ) dan viskositas kinematik ( $\nu$ ). Viskositas kinematis adalah viskositas dinamis dibagi dengan densitasnya, yaitu :

$$\nu = \mu / \rho \quad (2.9)$$

Viskositas juga bergantung pada tekanan dan temperaturnya dengan harga yang dapat ditentukan dari Tabel Uap.

## **2.7 Kelebihan dan Kekurangan Energi Panasbumi di Indonesia**

### **2.7.1 Kelebihan**

Berbeda dengan sistem energi lainnya, sistem energi panasbumi memiliki beberapa keunggulan yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif. Beberapa keunggulan sumber energi panasbumi diantaranya adalah :

- Menyediakan tenaga listrik yang andal dengan sistem pembangkit yang relatif tidak membutuhkan tempat yang sangat luas.
- Energi panasbumi dapat menyediakan sumber tenaga yang bersih dan terbarukan serta berkesinambungan
- Memberikan tenaga beban dasar yang konstan
- Memberikan keuntungan ekonomi secara lokal yang signifikan
- Dapat dikontrol secara jarak jauh
- Tersedia melimpah karena praktis sumber panas alami dari dalam bumi tidak ada batasnya
- Nyaris tanpa polusi karena emisi energi panasbumi tidak mengandung polutan kimiawi atau tidak mengeluarkan limbah dan hanya mengandung sebagian besar air yang diinjeksikan kembali ke dalam bumi.
- Menghasilkan karbon dioksida 65 kali lebih kecil dari batubara

### **2.7.2 Kekurangan**

Faktor yang masih menghambat perkembangan industri listrik tenaga panasbumi di Indonesia antara lain adalah mahalnya biaya eksplorasi terutama untuk pemboran eksplorasi. Besarnya biaya pemboran eksplorasi berbanding secara eksponensial dengan kedalaman, padahal untuk mendapatkan temperatur yang tinggi diperlukan pemboran yang lebih dalam. Konsekuensinya sumur eksplorasi panasbumi di Indonesia masih terlalu sedikit sehingga tingkat ketidakpastian

keberhasilan masih tinggi. Kendala yang lain adalah investor ragu dengan proyek di Indonesia karena biaya eksplorasi dan pengembangan harus ditanggung dan tidak kembali sampai energi terjual kepada pelanggan.