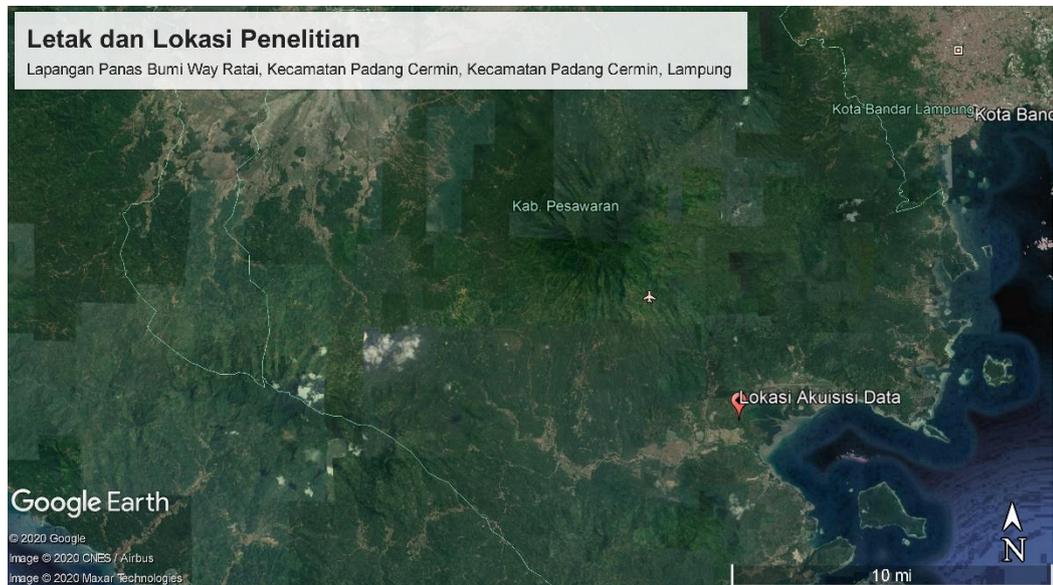


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian yang dilakukan terletak pada lapangan panas bumi Way Ratai, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Secara geografis Kabupaten Pesawaran terletak pada koordinat $5,12^{\circ}$ - $5,84^{\circ}$ LS dan $104,92^{\circ}$ - $105,34^{\circ}$ BT. Daerah penelitian bagian timur berbatasan dengan kota Bandar Lampung dan bagian barat berbatasan dengan Kabupaten Tanggamus [4].

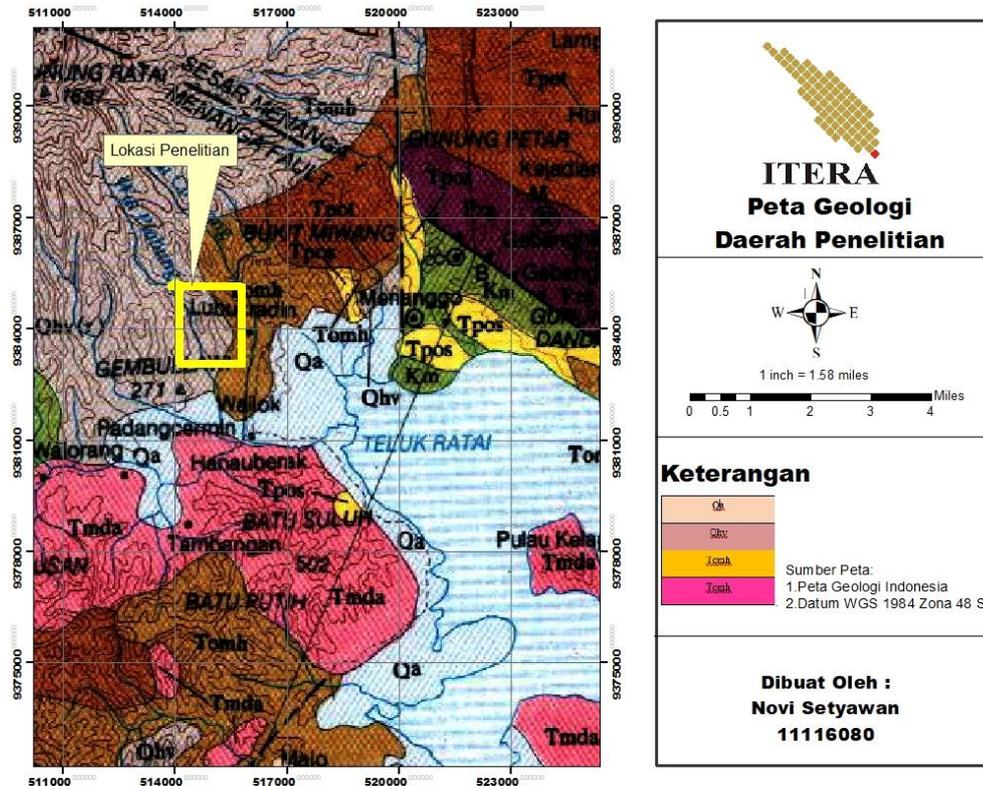


Gambar 2.1 Lokasi penelitian [5]

2.2 Geologi Regional

Pada peta geologi daerah penelitian batuan didominasi oleh batuan hasil dari gunung api muda (Qhv) yang terdiri dari batuan lava (andesit-basal), breksi, dan tuff, terdapat juga aluvium (Qa) yang terdiri atas batuan jenis batuan kerikil, pasir, lempung, dan gambut, formasi Hulusimpang (Tomh) yang terdiri atas lava andesit basal, tuf, dan breksi gunung api berubah dengan batu gamping, Formasi Sabu (Tpos) yang terdiri atas perselingan antara breksi konglomerat dengan batu pasir,

Formasi Kantur (Tm_{pk}) yang terdiri atas perselingan antara tuff, batu lempung karbonan, dan batu pasir, dan Formasi Menanga (K_m) yang terdiri atas perselingan serpih, dan batu lempung dengan basal, sisipan rijang, dan batu gamping.



Gambar 2. 2 Peta geologi regional daerah penelitian [6]

2.3 Struktur Sesar

Struktur sesar di lapangan panas bumi Way Ratai dan sekitarnya didominasi oleh struktur sesar berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya yang diduga kuat sebagai sesar normal. Di samping kedua struktur sesar normal yang disebutkan di atas, daerah penyelidikan juga dicirikan oleh kelurusan-kelurusan (*lineaments*) berarah utama timur laut-barat daya dan barat laut-tenggara. Kelurusan-kelurusan (*lineaments*) hadir cukup banyak, terutama di bagian barat, barat daya, selatan dan sedikit di bagian tengah daerah penyelidikan.

Mekanisme pembentukan sesar normal diakibatkan oleh gaya tarik (*extention*) dan cenderung menimbulkan *open space* yang cukup lebar. Karena itu, kehadirannya

dianggap penting sebab dapat menyokong tingginya permeabilitas batuan di zona reservoir panas bumi Way Ratai. Karena itu pembahasan struktur sesar adalah sangat penting, khususnya untuk struktur sesar normal berarah timur laut baratdaya, sesar normal berarah barat laut-tenggara dan kelurusan-kelurusan yang diperkirakan mempengaruhi zona prospek panas bumi di Way Ratai [6].

2.4 Geomorfologi

Lapangan panas bumi Way Ratai berada di dalam lingkungan kompleks gunung api yang memiliki dua kerucut gunung api berdampingan, yaitu Gunung Ratai di sebelah baratdaya dan Gunung Betung di sebelah timurlaut. Pembentukan bentang alam kompleks gunung api yang mendasari pembentukan sistem panas bumi daerah Way Ratai dipengaruhi oleh proses endogen dan eksogen yang terjadi selama zaman Kuartar. Proses endogen berasal dari dinamika gunung api Ratai dan Betung, serta tektonik regional yang berpengaruh di kawasan tersebut. Sementara itu, proses eksogen merupakan proses hidrosfir yang diakibatkan oleh erosi permukaan bumi. Kedua proses alam ini pada akhirnya menghasilkan suatu bentang alam berupa perbukitan dan pedataran.

Masing-masing bentang alam dikelompokkan berdasarkan karakteristik bentang alamnya, seperti bentuk atau dimensi morfologi, kemiringan lereng, tekstur dan pola aliran sungai. Berdasarkan parameter tersebut, morfologi Way Ratai dan sekitarnya dikelompokkan menjadi tujuh satuan morfologi, yaitu morfologi kubah lava, perbukitan bertekstur kasar, perbukitan bertekstur halus, perbukitan tua, pedataran bergelombang lemah, pedataran landai, dan perbukitan terisolir [6].

2.5 Panas Bumi

Panas bumi atau dikenal dengan istilah *geothermal*, berasal dari bahasa latin dan terbentuk dari dua kata 'geo' yang berarti bumi dan 'thermal' yang berarti panas.

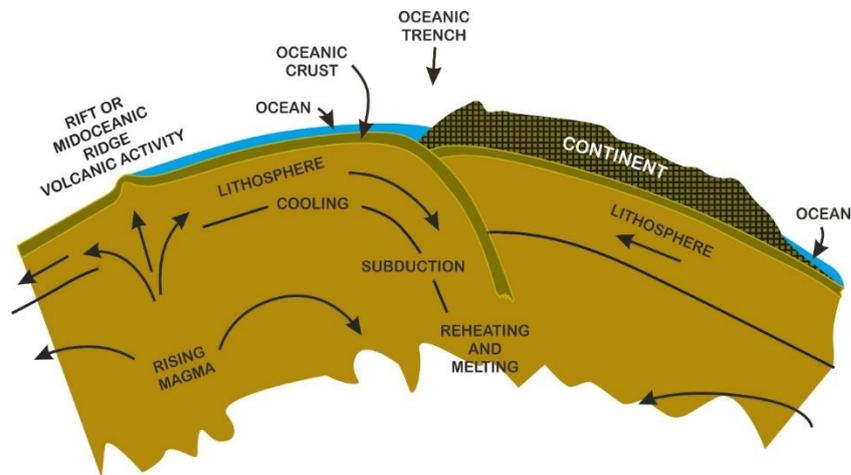
Geothermal juga dapat diartikan sebagai panas bumi yang terbentuk secara alami dibawah permukaan bumi. Panas bumi secara umum dapat diartikan sebagai kandungan panas yang tersimpan dalam bumi dan membentuk sistem panas bumi yang telah ada sejak bumi terbentuk. Dilihat kondisi geologi, suatu lokasi panas bumi mengakibatkan sistem panas bumi berbeda satu dengan yang lainnya. Berdasarkan karakteristiknya sistem panas bumi dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis yaitu *Hidrothermal*, *Geopressured*, *Hot Dry Rock (HDR)* dan *Magma* [7].

2.5.1 Terjadinya Sistem Panas Bumi

Bumi secara garis besar ini terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu kulit bumi (*crust*), selubung bumi (*mantle*) dan inti bumi (*core*). Di bawah kulit bumi terdapat suatu lapisan tebal yang disebut selubung bumi *mantle* yang diperkirakan mempunyai ketebalan sekitar 2900 km. Bagian teratas dari selubung bumi juga merupakan batuan keras. Bagian terdalam dari bumi adalah inti bumi (*core*) yang mempunyai ketebalan sekitar 3.450 kilometer. Lapisan ini mempunyai temperatur dan tekanan yang sangat tinggi sehingga lapisan ini berupa lelehan yang sangat panas yang diperkirakan mempunyai density sekitar 10,2-11,5 gr/cm³. Diperkirakan temperatur pada pusat bumi dapat mencapai sekitar 6000⁰F. Kulit bumi dan bagian teratas dari selubung bumi kemudian dinamakan *litosfer* (80-200 km). Bagian selubung bumi yang terletak tepat di bawah *litosfer* merupakan batuan lunak tapi pekat dan jauh lebih panas. Bagian dari selubung bumi ini kemudian dinamakan *astenosfer* (200 - 300 km). Di bawah lapisan ini, yaitu bagian bawah dari selubung bumi terdiri dari material-material cair, pekat dan panas, dengan density sekitar 3,3-5,7 gr/cm³ [8].

litosfer sebenarnya bukan merupakan permukaan yang utuh, tetapi terdiri dari sejumlah lempeng-lempeng tipis dan kaku. Lempeng-lempeng tersebut merupakan bentangan batuan setebal 64-145 km yang mengapung di atas *astenosfer*. Lempeng-lempeng ini bergerak secara perlahan-lahan dan menerus. Di beberapa tempat lempeng-lempeng bergerak memisah sementara di beberapa tempat lainnya lempeng-lempeng saling mendorong dan salah satu diantaranya akan menujam di

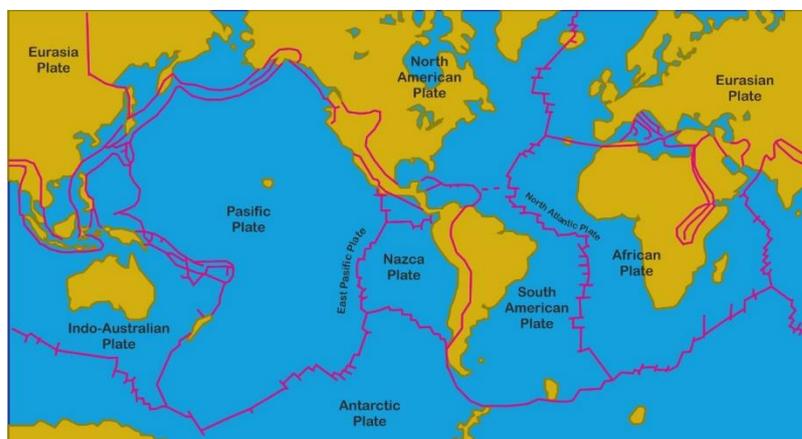
bawah lempeng lainnya. Karena panas di dalam *astenosfer* dan panas akibat gesekan, ujung dari lempengan tersebut hancur meleleh dan mempunyai temperatur tinggi (proses magmatisasi)[8].



Gambar 2.3 Gambaran pergerakan lempeng-lempeng tektonik [8]

Adanya material panas pada kedalaman beberapa ribu kilometer di bawah permukaan bumi menyebabkan terjadinya aliran panas dari sumber panas tersebut hingga ke permukaan. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan temperatur dari bawah hingga ke permukaan, dengan gradien temperatur rata-rata sebesar $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Pada sistem panas bumi di Indonesia terdapat tiga lempengan yang berinteraksi, yaitu lempeng Pasifik, lempeng India-Australia dan lempeng Eurasia (Gambar 2.4) Tumbukan yang terjadi antara ketiga lempeng tektonik tersebut telah memberikan peranan yang sangat penting bagi terbentuknya sumber energi panas bumi di Indonesia [8].



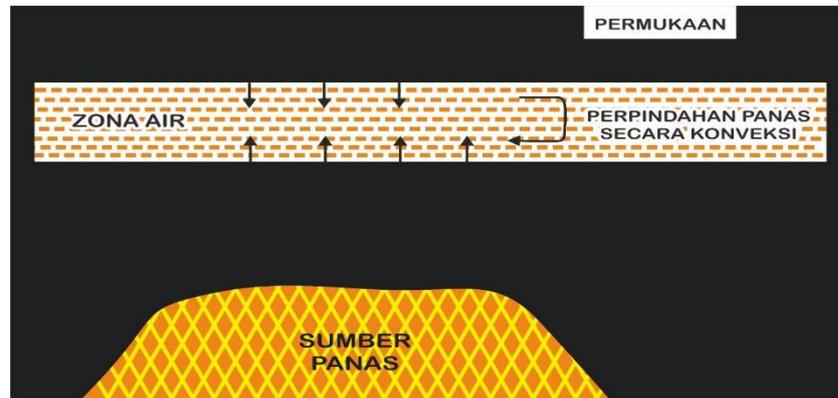
Gambar 2.4 Lempeng-lempeng tektonik [8]

Tumbukan antara lempeng India-Australia di sebelah selatan dan lempeng Eurasia di sebelah utara menghasilkan zona penunjaman (subduksi) di kedalaman 160 - 210 km di bawah Pulau Jawa-Nusa Tenggara dan di kedalaman sekitar 100 km di bawah Pulau Sumatera [9]. Hal ini menyebabkan proses magmatisasi di bawah Pulau Sumatera lebih dangkal dibandingkan dengan di bawah Pulau Jawa atau Nusa Tenggara. Karena perbedaan kedalaman jenis magma yang dihasilkannya berbeda. Pada kedalaman yang lebih besar jenis magma yang dihasilkan akan lebih bersifat basa dan lebih cair dengan kandungan gas magmatik yang lebih tinggi sehingga menghasilkan erupsi gunung api yang lebih kuat yang pada akhirnya akan menghasilkan endapan vulkanik yang lebih tebal dan terhampar luas. Oleh karena itu, reservoir panas bumi di Pulau Jawa umumnya lebih dalam dan menempati batuan vulkanik, sedangkan reservoir panas bumi di Sumatera terdapat di dalam batuan sedimen dan ditemukan pada kedalaman yang lebih dangkal. Pada Pulau Sumatera sistem penunjaman yang berbeda, tekanan atau kompresi yang dihasilkan oleh tumbukan miring (*oblique*) antara lempeng India-Australia dan lempeng Eurasia menghasilkan sesar regional yang memanjang sepanjang Pulau Sumatera yang merupakan sarana bagi kemunculan sumber-sumber panas bumi yang berkaitan dengan gunung-gunung api muda.

Pada daerah subduksi mengakibatkan zona zona rekahan yang mengakibatkan air akan masuk kedalam bumi melalui rekahan menuju lapisan yang lebih dalam hingga bertemu lapisan atau batuan panas dibawahnya. Air yang terakumulasi oleh batuan panas semakin lama semakin panas kemudian karena perbedaan tekanan antara permukaan bumi dengan bawah permukaan menyebabkan uap atau air mencari jalan menuju permukaan bumi [10].

Pada dasarnya sistem panas bumi terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan secara konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena gaya apung (*bouyancy*). Air karena gaya gravitasi selalu mempunyai

kecenderungan untuk bergerak kebawah, akan tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksi.



Gambar 2.5 Perpindahan panas di bawah permukaan [8]

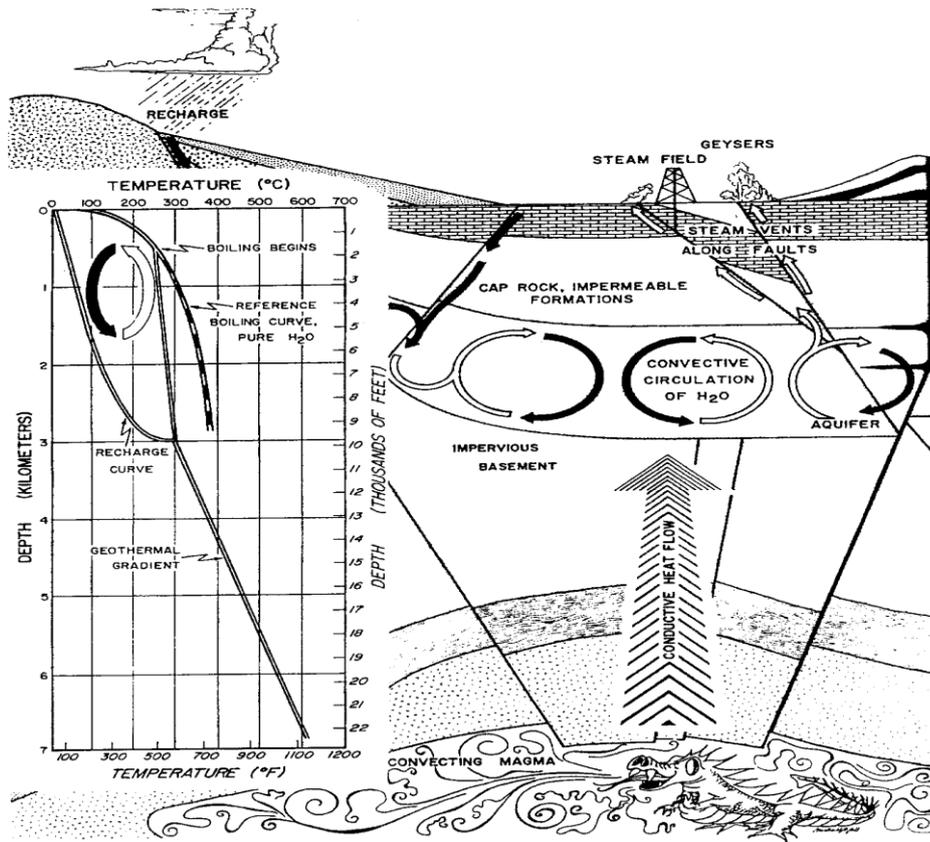
2.5.2 Sistem Panas Bumi

Energi panas bumi diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis reservoir, yaitu (*hydrothermal reservoir*), reservoir bertekanan tinggi (*geopressed reservoir*), reservoir batuan panas kering (*hot dry rock reservoir*) dan *magma reservoir*. Energi dari sistem *hydrothermal* yang paling di manfaatkan saat ini karena pada sistem *hydrothermal* pori-pori batuan mengandung air atau uap, atau keduanya, dan reservoir umumnya letaknya tidak terlalu dalam sehingga masih ekonomis untuk diusahakan[8].

Berdasarkan pada jenis fluida produksi dan jenis kandungan fluida utamanya sistem *hydrothermal* dibedakan menjadi dua, yaitu sistem satu fasa atau sistem dua fasa. Pada sistem satu fasa, sistem umumnya berisi air yang mempunyai temperatur 90 - 180°C dan tidak terjadi pendidihan bahkan selama eksploitasi. Contoh dari sistem ini adalah lapangan panas bumi di Tianjin (Cina) dan Waiwera (Selandia Baru). Sistem dua fasa terbagi menjadi dua yaitu:

- a. Sistem dominasi uap atau *vapour dominated system*, yaitu sistem panas bumi di mana sumur-sumurnya memproduksi uap kering atau uap basah karena rongga-rongga batuan reservoirnya sebagian besar berisi uap panas. Dalam sistem dominasi uap, diperkirakan uap mengisi rongga-rongga, saluran terbuka atau rekahan-rekahan, sedangkan air mengisi pori-pori batuan. Karena jumlah air yang terkandung di dalam pori-pori relatif sedikit, maka saturasi air mungkin sama atau hanya sedikit lebih besar dari saturasi air konat (S_{wc}) sehingga air terperangkap dalam pori-pori batuan dan tidak bergerak.
- b. Sistem dominasi air atau *water dominated system* yaitu sistem panas bumi dimana sumur-sumurnya menghasilkan fluida dua fasa berupa campuran uap air. Dalam sistem dominasi air, diperkirakan air mengisi rongga-rongga, saluran terbuka atau rekahan-rekahan. Lapangan Awibengkok termasuk kedalam jenis ini, karena sumur-sumur umumnya menghasilkan uap dan air.

Sistem *hydrothermal* yang telah ditemukan dan dimanfaatkan saat ini umumnya terletak diperbatasan lempeng tektonik. antara lain sistem *hydrothermal* di Italy, New Zealand, Indonesia, Phillipina, Jepang, Amerika, Mexico, El Savador dan beberapa negara lain. Menurut [11], persyaratan utama pembentukan sistem panas bumi *hydrothermal* adalah terdapat sumber panas bumi yang besar (*heat soure*), batuan reservoir untuk mengakumulasi panas, lapisan penundung untuk mengakumulasi panas (*caprock*). dalam sistem panas bumi *hydrothermal* ini panas dapat berpindah secara konduksi dan konveksi [11]. Fluida panas bumi yang terkandung dalam reservoir *hydrothermal* berasal dari air permukaan, antara lain air hujan (air meteorik) yang meresap masuk ke bawah permukaan dan terpanaskan oleh suatu sumber panas. Air tersebut akan masuk melalui rekahan-rekahan kedalam batuan permeabel. Apabila disekitar batuan tersebut terdapat sumber panas, maka panas akan dirambatkan melalui batuan secara konduksi dan melalui aliran fluida secara konveksi [12].



Gambar 2. 6 Model konseptual sistem panas bumi [7]

Perpindahan panas secara konveksi terjadi melalui proses ketika air yang mengalami gaya gravitasi selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke bawah, akan tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksi [13]. Batuan pada sistem *hidrothermal* umumnya merupakan batuan rekah alam. Apabila struktur geologi memungkinkan maka air tersebut akan mengalir melalui rekahan-rekahan dan atau batuan permeabel, dan kemudian muncul di permukaan. Perubahan fasa mungkin saja terjadi dalam perjalanannya ke permukaan, yaitu pada saat temperatur air telah mencapai temperatur saturasinya atau temperatur titik didihnya. Bila hal itu terjadi maka fluida akan berupa campuran uap-air atau mungkin berupa uap satu fasa saja. Hal ini menyebabkan jenis-jenis manifestasi panas bumi permukaan (*geothermal surface manifestation*) menjadi sangat beragam, ada mata air panas, *geyser* atau mata air panas yang

menyembur ke permukaan hingga ketinggian mulai dari satu meter hingga beberapa puluh meter setiap selang waktu mulai dari beberapa menit hingga beberapa jam atau beberapa hari, kolam lumpur panas (*mud pools*), kolam air panas, serta manifestasi panas bumi lainnya yang masing-masing mempunyai karakteristik yang berbeda walaupun letaknya berdekatan [13]. Berdasarkan pada besarnya temperatur, [14] membedakan sistem panas bumi menjadi tiga yaitu:

1. Sistem panas bumi bertemperatur rendah, yaitu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperature lebih kecil dari 125⁰C.
2. Sistem panas bumi bertemperatur sedang, yaitu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperatur antara 125⁰C dan 225⁰C.
3. Sistem panas bumi bertemperatur tinggi, yaitu sistem yang reservoirnya mengandung fluida dengan temperatur lebih dari 225⁰C.

2.5.3 Manifestasi Panas Bumi

Berbeda dengan sistem minyak dan gas, adanya suatu sumber daya panas bumi di permukaan (*Geothermal surface manifestation*), seperti mata air panas, kubangan lumpur panas (*mud pools*), *geyser* dan manifestasi panas bumi lainnya, dimana beberapa diantaranya yaitu mata air panas, kolam air panas sering dimanfaatkan oleh masyarakat umum untuk mandi, berendam, mencuci, masak dan lain-lain. Manifestasi panas bumi dipermukaan diperkirakan terjadi karena adanya perambatan panas dari bawah permukaan atau adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan fluida panas bumi mengalir ke permukaan [8]. Daerah yang terdapat manifestasi panas bumi dipermukaan merupakan daerah yang pertama kali dicari dan dikunjungi pada tahap eksplorasi, [8] mengemukakan bahwa panas bumi di permukaan bisa berbentuk seperti *warm ground*, *streaming ground*, kolam lumpur panas, kolam air panas, *fumarol*, sumber air panas, rembesan, *geyser*, dan daerah alterasi *hidrothermal* selalu dikaitkan dengan proses geologi dan model sistem panas bumi.

2.5.3.1 Tanah Hangat (*Warm Ground*)

Adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan dapat ditunjukkan antara lain dari adanya tanah yang mempunyai temperatur lebih tinggi dari temperatur tanah sekitarnya. Hal ini terjadi karena adanya perpindahan panas secara konduksi dari bawah permukaan ke batuan permukaan. Berdasarkan pada besarnya gradien temperatur, area di bumi dapat di klasifikasikan sebagai berikut:

1. Area tidak panas

Suatu area diklasifikasikan sebagai area tidak panas apabila gradien temperatur di area tersebut 10-40°C/km.

2. Area panas (*thermal area*)

Area panas dibedakan menjadi dua, yaitu area *semi thermal* dan area *hyperthermal*, area *semi thermal* merupakan area yang mempunyai gradien temperatur 70-80°C/km dan area *hyperthermal* merupakan area yang mempunyai gradien temperatur sangat tinggi. Contohnya adalah Lanzatore (Canada island) besarnya gradien temperatur sangat tinggi hingga tidak lagi dinyatakan dalam °C/km tetapi dalam °C/cm.

Besarnya laju aliran panas Q dapat ditentukan dari konduktivitas panas batuan pada lapisan paling atas k dan dari gradien temperatur di dekat permukaan $\frac{dT}{dz}$. Secara matematis besarnya laju aliran panas secara konduksi tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = -k \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (2.1)$$

Tanah hangat umumnya terjadi diatas tempat sumber daya panas bumi atau di daerah sekitarnya dimana terdapat manifestasi panas bumi lainnya yang menghantarkan panas lebih kuat.

2.5.3.2 Permukaan Tanah Beruap (*Streaming Ground*)

Pada daerah yang terdapat tempat-tempat keluar uap panas dari permukaan tanah. Jenis manifestasi panas bumi ini disebut *streaming ground*. Diperkirakan uap panas ini berasal dari suatu lapisan tipis dekat permukaan yang mengandung air panas [8].

Besarnya temperatur dipermukaan sangat tergantung dari laju aliran uap (*stream flux*). *Streaming ground* berdasarkan pada besarnya laju aliran panas dapat di kelompokkan seperti Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Laju aliran panas pada manifestasi *streaming ground*

Tingkat kekuatan	Laju aliran panas (J/s.m ²)
Sangat kuat	500-5000
Kuat	50-500
Lemah	<50

Umumnya intensitas panas pada *streaming ground* diperkirakan berasal dari besarnya gradien temperatur. *Streaming ground* sangat berbahaya bagi makhluk hidup karena temperatur umumnya sangat tinggi >30°C.

2.5.3.3 Mata Air Panas (*Hot Spring*)

Mata air panas merupakan salah satu petunjuk keberadaan sumber daya panas bumi di bawah permukaan. Mata air panas terbentuk karena adanya aliran air panas/hangat dari bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan, istilah panas apabila temperatur >50°C dan istilah hangat apabila temperatur <50°C. Sifat air permukaan seringkali digunakan untuk memperkirakan jenis reservoir di bawah permukaan diantaranya:

1. Mata air panas yang bersifat asam biasanya merupakan manifestasi permukaan dari suatu sistem panas bumi yang didominasi oleh uap.

2. Mata air panas yang bersifat netral merupakan manifestasi permukaan yang didominasi air dan jenuh dengan silika.

2.5.3.4 Kolam Air Panas (*Hot Pools*)

Adanya kolam air panas di alam merupakan petunjuk keberadaan sumber daya panas bumi di bawah permukaan. Kolam air panas terbentuk karena adanya aliran air panas bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan. Pada manifestasi kolam air panas dibedakan menjadi tiga, yaitu

1. Kolam air panas yang tenang (*calm pools*)
kolam air panas dengan temperatur di bawah titik didih (*boiling pools*). Disini laju aliran umumnya sangat kecil.
2. Kolam air panas mendidih (*boiling pools*)
Pada *boiling pools* temperaturnya sama dengan temperatur titik didihnya, seringkali disertai dengan semburan air panas.
3. Kolam air panas bergolak (*ebullient pools*)
Pada *ebullient pools* terdapat letupan-letupan kuat yang muncul secara tidak beraturan disebabkan karena terlepasnya uap panas pada suatu kedalaman dibawah permukaan air.

Air panas dapat berasal dari suatu reservoir air panas yang terdapat jauh di bawah permukaan atau mungkin juga berasal dari air tanah yang menjadi panas karena pemanasan oleh uap panas.



Gambar 2.7 Kolam air panas[9]

2.5.3.5 Telaga Air Panas (*Hot Lakes*)

Telaga air panas pada dasarnya juga kolam air panas, tetapi lebih tepat dikatakan telaga karena luas daerah permukaan air. Telaga air panas sangat jarang terdapat di alam karena telaga air panas terjadi karena *hidrothermal eruption* yang sangat besar, contohnya adalah danau waimangu di New Zealand. Bila didalam telaga terjadi konveksi, temperatur pada umumnya tidak berubah terhadap kedalaman, telaga air panas dapat terjadi di daerah dimana terdapat reservoir yang didominasi oleh air atau uap. Semua telaga air panas yang mempunyai temperatur didasar danau mendekati titik didih sangat berbahaya dan merupakan tempat yang memungkinkan untuk terjadinya *hidrothermal eruption*.

2.5.3.6 Fumarol

Fumarol adalah lubang kecil yang memancarkan uap panas kering (*dry steam*) atau uap panas yang mengandung butiran-butiran air (*wet steam*). Apabila uap tersebut mengandung gas H_2S maka manifestasi permukaan tersebut disebut *sofatar*. Pada *Fumarol* yang memancarkan uap dengan kecepatan tinggi terkadang juga dijumpai

di daerah tempat terjadinya sistem dominasi uap, sedangkan *fumarol* yang memancarkan uap dengan kandungan asam boric tinggi umumnya disebut *soffioni*. Hampir semua *fumarol* yang merupakan manifestasi permukaan dari system dominasi air memancarkan uap panas basah. Temperatur uap umumnya tidak lebih dari 100°C. *Fumarol* jenis ini sering disebut *fumarol* basah (*wet fumarol*).

2.5.3.7 Geysir

Geysir didefinisikan sebagai mata air panas yang menyembur ke udara secara *intermittent* dengan ketinggian sangat beraneka ragam, yaitu kurang dari satu meter hingga ratusan meter. Selang waktu penyemburan air juga beraneka ragam, yaitu dari beberapa detik hingga beberapa hari. Lamanya air menyembur ke permukaan juga beraneka ragam dari beberapa detik hingga beberapa hari. *Geysir* merupakan manifestasi permukaan dari sistem dominasi air, contoh dari *geyser* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Geysir [8]

2.5.3.8 Kubangan Lumpur Panas (*mud pool*)

Kubangan lumpur panas merupakan manifestasi panas bumi dipermukaan. Kubangan lumpur panas umumnya mengandung *non-condensable* gas. Dengan

sejumlah kecil uap panas. Lumpur terdapat dalam keadaan cair karena kondensasi uap panas, sedangkan letupan-letupan yang terjadi karena pancaran CO₂.



Gambar 2. 9 Kubangan lumpur panas [8]

2.5.3.9 Silika Sinter

Silika sinter adalah endapan silika di permukaan yang berwarna keperakan. Umumnya dijumpai disekitar mata air panas dan lubang *geyser* yang menyemburkan air bersifat netral. Apabila laju aliran panas tidak terlalu besar umumnya disekitar mata air panas terbentuk teras-teras silika yang berwarna keperakan. *Silika sinter* merupakan manifestasi sistem panas bumi yang di dominasi air, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Manifestasi panas bumi *silika* [9]

2.5.3.10 Batuan Yang Mengalami Alterasi

Alterasi *hidrothermal* merupakan proses yang terjadi akibat adanya reaksi antara batuan asal dengan fluida panas bumi. Batuan hasil alterasi *hidrothermal* tergantung pada beberapa faktor, tetapi yang utama adalah temperatur, tekanan, jenis batuan asal, komposisi fluida (ph) dan lamanya reaksi. Proses alterasi *hidrothermal* yang terjadi akibat reaksi antara batuan dengan air jenis klorida yang berasal dari reservoir panas bumi yang terdapat jauh di bawah permukaan dapat menyebabkan terjadinya pengendapan dan pertukaran elemen elemen batuan dengan fluida yang menghasilkan mineral seperti klorit, aduaria dan epidote. Air yang bersifat asam yang terdapat pada kedalaman relatif dangkal dan elevasi relatif tinggi dapat merubah batuan asal menjadi mineral *clay* dan mineral lainnya.

2.6 Metode Potensial Diri / *Self Potential*

Metode potensial diri merupakan salah satu metode geofisika pasif yang pertama kali ditemukan oleh Robert Fox pada tahun 1830 untuk mencari daerah yang mengandung sulfida di Corn Wall, Amerika Serikat. Potensial diri atau yang biasa disebut *self potential* diakibatkan oleh adanya proses mekanik dan proses elektrokimia yang dikontrol oleh air tanah. Pertama proses mekanik yang akan menghasilkan potensial elektrokinetik atau disebut dengan *streaming potential*, sedangkan yang lainnya adalah proses elektrokimia proses ini akan menghasilkan potensial difusi, potensial serpih dan potensial mineralisasi [12].

Dalam melakukan penelitian dengan metode *self potential* terdapat beberapa anomali dan penyebabnya. Aliran fluida melalui media berpori menghasilkan suatu variasi potensial listrik (*streaming potential*) karena interaksi listrik antara fluida dan fluida lapisan ganda listrik pada antarmuka pori-mineral. Sirkulasi cairan di dalam reservoir panas bumi dapat menghasilkan permukaan potensial diri (SP) dengan anomali beberapa mV yang berkorelasi dalam ruang dan pada waktunya untuk menampung aliran fluida. Selain itu, tanda anomali ini tergantung pada arah

aliran, negatif ketika cairan mengalir dan positif ketika cairan diproduksi. Sinyal SP biasanya dikaitkan dengan proses elektrokinetik saat air bersirkulasi melalui fraktur di dalam reservoir. Namun, efek elektrokimia juga dapat berkontribusi pada anomali SP yang diamati, karena perbedaan komposisi kimia dan suhu antara cairan. Akibatnya, interpretasi pengukuran tersebut dalam hal aliran fluida bawah tanah tidak mudah dan oleh karena itu kontribusi elektrokimia harus diperhitungkan [15].

A. Model Elektrokimia

Karena Na^+ dan Cl^- memiliki mobilitas ionik yang berbeda, gradien konsentrasi $NaCl$ dalam saturasi ΔC yang sedang menghasilkan perbedaan potensial listrik ΔV_{EC} disebut difusi [15]:

$$\Delta V_{EC} = \frac{RT}{Ne\tau} \cdot \frac{u_{Na^+} - u_{Cl^-}}{u_{Na^+} + u_{Cl^-}} \cdot \frac{\Delta C}{C} \quad (2.2)$$

di mana C adalah salinitas elektrolit (mol L^{-1}), bilangan R adalah konstanta molar gas ($0,082 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), e muatan unit (C), N adalah bilangan Avogadro ($6,022^{23} \text{ mol}^{-1}$), τ adalah torsi media berpori $\sqrt{\frac{5}{3}}$, u_{Na^+} dan u_{Cl^-} adalah mobilitas ionik ion Na^+ dan Cl^- dengan memperkirakan profil salinitas selama stimulasi dengan mengasumsikan bahwa alirannya radial dan terjadi pada media berpori homogen. Sehingga, perpindahan masa dapat ditulis persamaan:

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \left(\frac{D_L}{r} - v_r \right) \frac{\partial C}{\partial r} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.3)$$

di mana D_L adalah koefisien dispersi longitudinal hidrodinamik ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$), v_r adalah kecepatan fluida linier rata-rata (m s^{-1}), r adalah jarak radial dari kedalaman lubang (m) dan t adalah waktu (s). Koefisien dispersi D_L didefinisikan sebagai:

$$D_L = \alpha_L v_r + D^* \quad (2.4)$$

di mana D_L adalah koefisien difusi molekuler ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) dan α_L adalah dispersi longitudinal (m). Untuk stimulasi Soutz-sous Fore^{ts} dengan dispersi longitudinal α_L 0,45 m menurut percobaan transport zat terlarut Mazureket al. dengan memperkirakan kecepatan fluida linier rata-rata menggunakan konservasi massa persamaan air yang disuntikkan:

$$Qt = \pi r_0^2 h \varphi \quad (2.5)$$

di mana Q adalah laju injeksi ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), h adalah panjang dari bagian lubang terbuka (m), r_0 adalah posisi depan rata-rata air yang disuntikkan (m) dan φ adalah porositas efektif. Asumsi bahwa kecepatan fluida sama dengan kecepatan bagian depan air yang disuntikkan v_0 :

$$v_r \approx v_0 = \frac{dr_0}{dt} = \frac{Q}{2\pi h \varphi} \left(\frac{Qt}{\pi h \varphi} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Untuk injeksi selama satu minggu pada 50 kg s^{-1} seperti di Soutz stimulasi akan memperoleh kecepatan fluida rata rata $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Nilai tipikal D^* untuk material bumi adalah $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ yang merupakan nilai yang sangat kecil dibandingkan dengan $\alpha_L v_r 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Karena itu, difusi molekuler dan diasumsikan koefisien dispersi longitudinal D_L dari $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Untuk yang berkelanjutan injeksi, solusi persamaan (2.3) dapat didekati dengan persamaan:

$$C(r, t) = C_0 + \left(\frac{C_1 - C_0}{2} \right) \text{erfc} \left[\frac{r - r_0}{2\sqrt{D_L t}} \right] \quad (2.7)$$

di mana C_0 adalah konsentrasi awal (mol L^{-1}), C_1 adalah konsentrasi cairan yang disuntikkan (mol^{-1}) dan erfc adalah fungsi error komplementer. Menggunakan

persamaan (2.7), kita dapat memodelkan profil konsentrasi *NaCl* selama injeksi air ke *in-situ brine* dan kemudian gunakan persamaan (2.2) untuk menghitung potensi elektrokimia terkait [15].

B. Model Elektrokinetik

Untuk aliran laminar satu dimensi melalui media berpori, gradien potensial listrik melintasi medium ΔV_{EK} terkait dengan gradien tekanan pori ΔP oleh persamaan Helmholtz-Smoluchowski [15]:

$$\Delta V_{EK} = \frac{\zeta \varepsilon f}{\eta_f \sigma_f} \Delta P = C_{HS} \Delta P \quad (2.8)$$

di mana η_f adalah viskositas dinamis fluida (Pa s), εf adalah fluida dielektrik (F m⁻¹), σ_f adalah konduktivitas listrik fluida (S m⁻¹), ζ adalah potensial zeta (V) di antarmuka cairan / mineral yang dihasilkan oleh interaksi kimia batuan dan fluida, dan C_{HS} adalah elektrokinetik koefisien kopling (V Pa⁻¹).

Pada skala reservoir, hingga isotropik homogen tak hingga media berpori. Diasumsikan bahwa aliran dalam bawah permukaan adalah laminar dan bisa dijelaskan dengan Hukum Darcy. Di bawah asumsi ini, bidang tekanan pori selama stimulasi diberikan oleh rumus Theis:

$$p(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \left[-E_1 \left(-\frac{r^2 S}{4Tt} \right) \right] \quad (2.9)$$

di mana Q adalah laju aliran injeksi (m³ s⁻¹), T adalah transmisivitas reservoir (m³ s⁻¹ Pa⁻¹), S adalah koefisien penyimpanan reservoir (m Pa⁻¹), E_1 adalah fungsi integral eksponensial orde pertama. Dengan menggunakan profil konsentrasi *NaCl*

yang dihitung di bagian elektrokimia untuk memodelkan C_{HS} . Kemudian, anggap nol potensi listrik pada tak terbatas dan mengetahui medan tekanan dari persamaan (2.9), kita dapat mengintegrasikan persamaan (2.8) dan menghitung anomali potensial listrik yang disebabkan oleh elektrokinetik.