

Studi Gempa Mikro untuk mendeteksi Rekahan di area Panas bumi Kamojang Kabupaten Garut

Anik Hilyah*

Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika,
FMIPA-Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Intisari

Lapangan geothermal Kamojang terletak pada jalur gunungapi yang pembentukannya dikontrol oleh proses-proses geologi yang diindikasikan oleh adanya sesar lokal atau rekahan yang merupakan salah satu penyebab timbulnya gempa. Dalam periode bulan Maret 2004 - Februari 2005 tercatat gempa mikro 275 kali dan gempa jauh 115 kali. Gempa mikro sebagian besar terjadi dalam area panasbumi Kamojang yang disebabkan karena pergerakan struktur dan perubahan fase air panas menjadi uap dari fluida injeksi. Sedangkan diluar area tersebut banyak terjadi gempa jauh karena aspek tektonik. Pola penyebaran episenter menunjukkan arah aliran fluida injeksi pada umumnya cenderung menuju ke daerah dengan sumur produksi yang masih aktif namun ada juga fluida injeksi yang bergerak kearah Baratlaut - Tenggara yang mengikuti rekahan-rekahan di daerah tersebut. Sedangkan dari distribusi hiposenter menunjukkan kedalaman mulai dari 0,02 km sampai dengan 17,01 km. Hiposenter sebagian besar berada di bawah zona reservoir dan sebagian lagi tepat di zona reservoir, yaitu pada elevasi 0 sampai - 3 km. Dari penampang proyeksi hiposenter yang membujur dari Barat ke Timur menunjukkan gejala dengan kemiringan ke arah Baratdaya - Timurlaut, hal ini sesuai dengan pola struktur zona sesar.

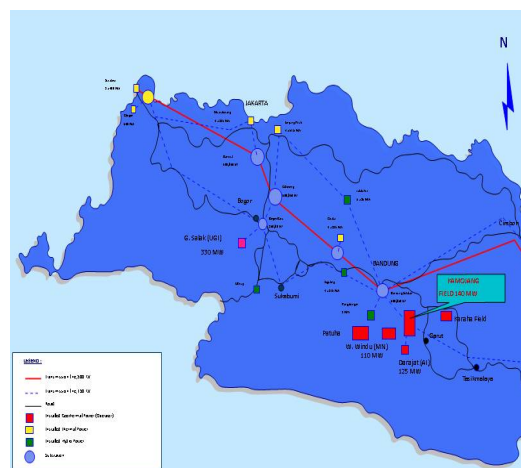
KATA KUNCI: gempa, panasbumi, rekahan

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Eksplorasi lapangan panasbumi Kamojang telah dimulai pada tahun 1918. Aktifitas penelitian dilanjutkan dengan pemoran berkedalaman 128 m di tahun 1926. Eksplorasi terpadu yang dilakukan sejak tahun 1964 menunjukkan lapangan Kamojang adalah lapangan sistem uap kering dengan potensi 300 MWe [1]. Pada tahun 1996 sampai sekarang lapangan Kamojang menghasilkan listrik 140 MWe. Dan pada masa yang akan datang direncanakan penambahan kapasitas sebesar 60 MWe. Lapangan panasbumi Kamojang merupakan sistem dominasi uap yang cenderung kehabisan air, oleh karena itu perlu dilakukan reinjeksi berdasarkan kondisi reservoir. Pada masa produksi terjadi perubahan tekanan, temperatur dan fasa fluida panasbumi. Hal ini merupakan salah satu penyebab gempa bumi mikro dalam reservoir [2]. Oleh karena itu dengan dilakukan monitoring gempa bumi mikro (*Micro Earthquake*) dapat diketahui perubahan fisik dan hidrologi reservoir dari pemetaan distribusi hiposenter dan episenter yang dihasilkan.

*E-MAIL: anik@physics.its.ac.id



Gambar 1: Lokasi daerah penelitian (Pertamina AG Kamojang)

B. Lokasi dan Potensi

Lapangan panasbumi Kamojang berada dalam wilayah Kabupaten Garut, Jawa Barat. Lapangan ini berjarak *pm* 17 km Baratlaut Garut atau *pm* 42 km Tenggara Bandung, dan berada pada ketinggian 1640 - 1750 m diatas permukaan laut. Secara geografis, lapangan Kamojang terletak pada posisi $107^{\circ}37,5' - 107^{\circ}48'$ BT dan $7^{\circ}5,5' - 7^{\circ}16,5'$ LS. Sebagai lapangan panasbumi pertama di Indonesia, lapangan Kamojang berpotensi 300 MWe. Melalui 24 sumur produksi, dewasa ini telah dihasilkan energi listrik 140 MWe dan akan dikembangkan hingga 200 MWe [3].

II. KONDISI LAPANGAN PANASBUMI KAMOJANG

A. Struktur Geologi

Ada tiga kelompok utama struktur geologi yang berpengaruh di lapangan panasbumi Kamojang (Robert, D, 1987). Pertama, dinding kaldera di bagian barat disebut sebagai struktur sesar yang paling produktif di daerah Kamojang. Kedua, sepasang struktur graben (terletak di bagian timur dan baratdaya), masing-masing dipisahkan oleh struktur horst. Sedangkan yang ketiga adalah dua sistem sesar geser berarah Timurlaut-Baratdaya. Sesar geser pertama (paling utara) menutup salah satu sumbu sumber panas di lapangan panasbumi ini. Sedangkan sesar geser yang terdapat di bagian selatan menggambarkan arah gerakan kekiri (*left lateral fault*) dan merupakan zona permeabilitas buruk (*poor permeability zone*).

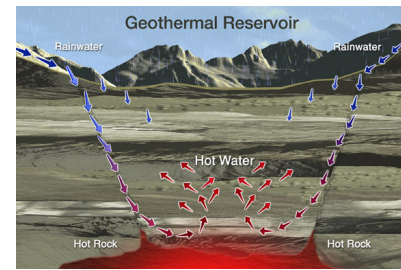
B. Stratigrafi Lapangan

Permana (1986) memperkirakan ada tiga satuan stratigrafi daerah Kamojang. Satuan stratigrafi Gunungapi Pangkalan Purba, sebagai satuan tertua, membentang dari barat Danau Pangkalan hingga Gunung Masigit. Satuan Gunungapi Generasi Kedua, terdiri dari Gunung Pogor, Gunung Cakra, Gunung Gandapura dan Gunung Gajah. Terakhir, satuan stratigrafi Gunungapi Kerucut Parasit, diantaranya Gunung Guntur dan Gunung Cibatuipis. Batuan vulkanik yang ada di daerah ini berasal dari berbagai sumber erupsi, dipengaruhi oleh struktur geologi (tektonik) dan ubahan hidrotermal yang kuat, sehingga sulit sekali mengenali asal batuan. Oleh sebab itu stratigrafi lapangan panasbumi di Kamojang disusun berdasarkan lapisan demi lapisan dari jenis batuan yang diperoleh selama operasi pemboran, sedangkan penamaannya dilengkapi dengan intensitas ubahan.

III. DASAR-DASAR FISIS

A. Pengertian Umum Sistem Panasbumi

Energi panas yang dimiliki oleh uap air atau air panas pada dasarnya berasal dari magma dalam perut bumi. Magma ini mengalirkan energi panasnya secara konduksi pada lapisan batuan yang impermeabel berupa *bedrock*. Diatas *bedrock* ini terdapat lapisan batuan permeabel yang berfungsi sebagai lapisan akuifer (pembawa air). Air dalam lapisan akuifer berasal dari air hujan dan mengambil energi panas dari *bedrock* sehingga suhunya meningkat dan bergerak naik ke permukaan bumi akibat adanya perbedaan berat jenis. Pada saat air panas ini bergerak ke atas maka tekanan hidrostatiknya turun, sampai pada suatu kedalaman tertentu dimana tekanan ini lebih rendah daripada tekanan uap pada temperatur air panas yang bersangkutan [4]. Kemudian air tersebut akan mengalami penguapan sehingga terbentuklah sistem reservoir. Sistem



Gambar 2: Model reservoir panasbumi (Geothermal Education Office - US)

reservoir ini dimungkinkan karena diatas lapisan akuifer terdapat batuan impermeabel yang dikenal dengan *caprock*[5].

B. Peranan Gempa Bumi Mikro dan Sistem Panasbumi

1. Dalam eksplorasi

Pengamatan gempa mikro pada eksplorasi panasbumi adalah untuk meneliti retakan berpotensi (sesar aktif) yang mempunyai permeabilitas dan porositas tinggi, melokalisir perkiraan daerah prospek panasbumi dan kalau memungkinkan dapat membantu menentukan posisi bor [6].

2. Dalam Produksi

Dari pola kejadian gempa mikro yang dipantau dan juga reinjeksi air, akan dapat ditarik kesimpulan mengenai karakteristik pengisian recharge retakan-retakan besar yang sangat mempengaruhi pengisian reservoir secara keseluruhan [7]. Karakteristik pengisian kembali reservoir ini penting diketahui untuk melakukan pemeliharaan agar tidak terjadi ketimpangan air dalam reservoir yang pada gilirannya nanti akan mengakibatkan penurunan produksi.

C. Gelombang Seismik

Gelombang gempa disebut juga gelombang seismik terjadi karena beberapa proses atau aktifitas geologi yang terjadi pada atau sekitar sumber panasbumi. Getaran gelombang seismik yang relatif kecil hanya dapat dideteksi dengan alat seismograf di suatu tempat di permukaan bumi yang dipasang dalam jaringan gempa mikro yang telah ditentukan.

Dua jenis gelombang utama adalah gelombang body dan gelombang permukaan. Gelombang body menjalar melewati lapisan dalam bumi, tapi gelombang permukaan hanya dapat bergerak di permukaan bumi. Gempa menyalurkan energi seismik sebagai gelombang body dan gelombang permukaan [8]. Namun pada gempa mikro yang digunakan hanya gelombang body saja.

Jenis pertama gelombang body adalah gelombang P atau gelombang primer atau gelombang longitudinal atau gelombang kompresi. Dengan kecepatan antara 1,5 dan 8 km perdetik dalam kerak bumi. Gelombang P bergerak melewati bat-

uan padat dan fluida. Gelombang P adalah gelombang seismik tercepat dan akan terbaca pertama pada seismograf. Kecepatan gelombang P, yaitu:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (1)$$

dengan V_p = kecepatan gelombang P, λ = konstanta Lamé, μ = modulus geser, ρ = densitas dan M = modulus gelombang P.

Jenis kedua gelombang body adalah gelombang S atau gelombang sekunder atau gelombang transversal, yaitu gelombang kedua pada gempa, juga dikenal sebagai gelombang geser, menjalar lebih lambat, biasanya pada 60% sampai 70% dari kecepatan gelombang P dan hanya dapat melintasi batuan padat [9]. Gelombang S menjalar lebih lambat daripada gelombang P, sehingga akan terekam seismograf setelah gelombang P. Kecepatan gelombang S, yaitu :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Pada daerah Kamojang diperkirakan jenis batuan yang dominan adalah basalt dan andesit dengan kecepatan gelombang P sekitar 6 km/detik dan kecepatan gelombang S 3,34 km/detik. Harga perbandingan kedua kecepatan gelombang ini atau V_p/V_s adalah kira-kira 1,8. Selanjutnya harga-harga tersebut digunakan dalam perhitungan parameter gempa mikro.

D. Parameter Gempa

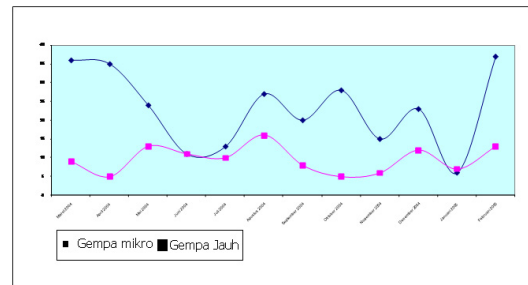
Magnitudo

Ukuran dari kekuatan gempa disebut magnitudo, yaitu parameter gempa yang mengukur besarnya energi gempa yang dilepaskan dari sumbernya. Jadi pengukuran magnitudo yang dilakukan di tempat yang berbeda harus menghasilkan harga yang sama walaupun gempa yang dirasakan di tempat-tempat tersebut tentu berbeda.

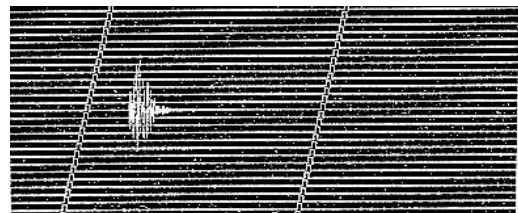
Estimasi Kedalaman Pusat Gempa Mikro

Kedalaman fokus Z_o dapat ditentukan dari beberapa persamaan, misalnya untuk n stasiun tertentu terdapat n persamaan pula. Jika kita uraikan persamaan diatas untuk setiap stasiun dan kemudian seluruh suku berorde 2 dalam X_o, Y_o, Z_o dan T_o dikeluarkan dengan jalan mengurangkan berturut-turut antara dua buah persamaan masing-masing stasiun. Maka persamaan di atas untuk dua buah stasiun dapat ditulis menjadi:

$$\begin{aligned} & (X_2 - X_1) X_o + (Y_2 - Y_1) y_o + \\ & (Z_2 - Z_1) Z_o - V^2 (T_2 - T_1) T_o \\ = & \frac{V^2 (T_1^2 - T_2^2) + X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - Z_1^2}{2} \quad (3) \end{aligned}$$



Gambar 3: Jumlah gempa selama satu tahun



Gambar 4: Bentuk getaran gempa mikro

Jadi untuk n buah stasiun terdapat n-1 persamaan dengan 4 buah bilangan tak diketahui yaitu X_o, Y_o, Z_o dan T_o .

$$Z_o = \sqrt{\frac{\sum V^2 (T_i - T_o)^2 + \sum (X_i - X_o)^2 + \sum (Y_i - Y_o)^2}{n}} \quad (4)$$

IV. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan Data

Pada lapangan panasbumi Kamojang terdapat empat stasiun pengamatan gempa. Dari keempat stasiun pengamatan gempa tersebut telah dikumpulkan data dari seismogram sebanyak 390 kali kejadian gempa dengan gempa lokal atau gempa mikro sebanyak 275 kali dan gempa jauh sebanyak 115 kali. Khusus untuk area panasbumi Kamojang tercatat 181 kali kejadian gempa dengan gempa mikro sebanyak 177 dan gempa jauh sebanyak 4 kali. Gempa banyak terjadi pada bulan Maret 2004 dan Februari 2005 dan paling sedikit pada bulan Januari 2005.

B. Pembahasan

Gempa mikro sebagian besar terjadi dalam area panasbumi Kamojang yang disebabkan karena injeksi fluida, sedangkan diluar area tersebut banyak terjadi gempa jauh. Gempa jauh tersebut umumnya dikarenakan air permukaan pada jaman dahulu masuk jauh ke dalam bumi yang kemudian mengumpul sehingga pada periode tertentu dan karena adanya struktur yang mengontrol akan bergerak dan menyebabkan gempa. Kelompok besar gempa jauh ini terletak di daerah

Danau Ciharus. Gempa jauh juga bisa disebabkan oleh aktifitas tektonik dan vulkanik yang cukup besar yang terjadi di tempat lain.

Pada gambar diatas magnitudo rata-rata gempa mikro yaitu sebesar 1,08 Skala Richter dan magnitudo rata-rata gempa jauh sebesar 5,22 Skala Richter. Pengelompokkan gempa mikro dan gempa jauh berdasarkan pada range magnitudonya seperti yang telah dijelaskan di bagian sebelumnya.

Distribusi episenter

Gambar 5 menunjukkan distribusi episenter tidak merata untuk seluruh daerah penyelidikan tetapi terjadi pengelompokan-pengelompokan. Pengelompokan-pengelompokan ini terutama terjadi di sekitar daerah aktif atau tidak stabil sumber panasbumi. Setiap titik posisi episenter tersebut menunjukkan indikasi atau merupakan fungsi dari keaktifan sesar. Oleh sebab itu dapat disimpulkan bahwa, pada daerah-daerah dengan pengelompokkan episenter yang disebutkan diatas, aktifitas geologinya sangat tinggi, seperti di sekitar danau Pangkalan dan daerah sebelah baratdaya G.Cibatuipis (Darajat) yang merupakan daerah prospek panasbumi juga. Untuk daerah sekitar danau Pangkalan sudah terbukti dari penelitian sebelumnya bahwa daerah tersebut memiliki prospek cukup baik untuk panasbumi, sehingga saat ini telah dilakukan pemboran-pemboran oleh Pertamina yang sampai sekarang telah berproduksi dari sekian sumur yang telah dibor untuk dimanfaatkan sebagai PLTP [3].

Pola distribusi episenter secara garis besar terletak disekitar sumur injeksi dengan arah aliran fluida injeksi kearah sumur produksi yang masih aktif, namun ada juga fluida injeksi yang bergerak kearah Baratlaut-Tenggara yaitu mengikuti rekahan-rekahan di daerah tersebut.

Distribusi hiposenter

Distribusi vertikal penyebaran pusat-pusat gempa berhubungan dengan kedalaman dan jalur sesar, sehingga dapat menunjukkan dugaan adanya sesar aktif pada zona-zona lemah tersebut. Pada area panasbumi Kamojang hiposenter terletak pada kedalaman mulai dari 0,02 km sampai kedalaman -17,01 km yang sebagian besar berada di bawah zona reservoir dan sebagian lagi tepat di zona reservoir, yaitu gempa dengan elevasi 0 sampai 3 km.

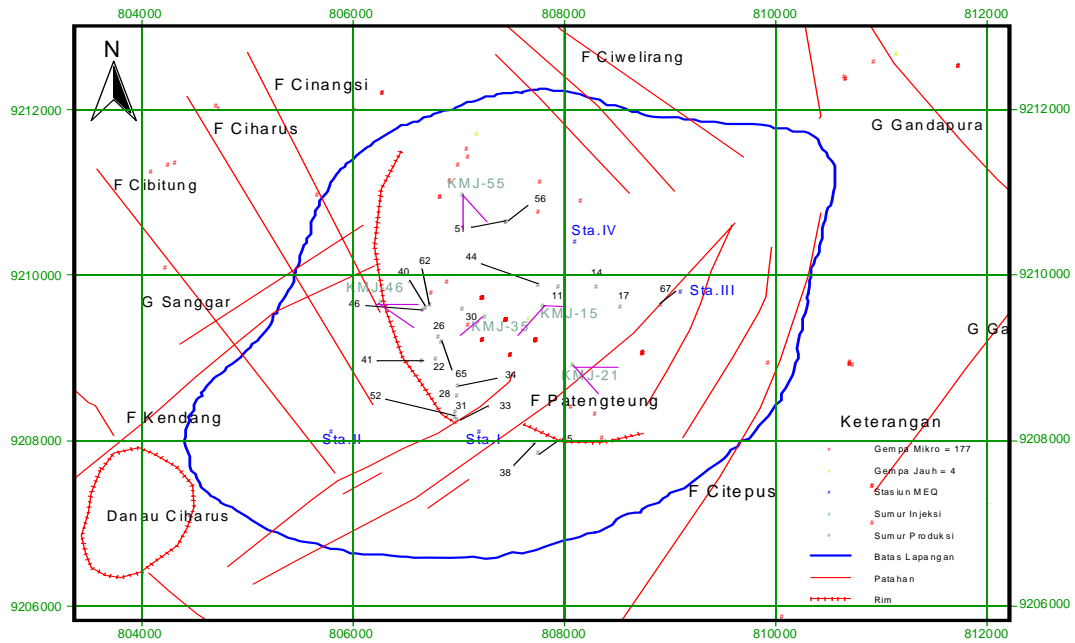
Jika diperhatikan penyebaran dari posisi gempa yang kedalaman fokusnya dangkal tersebut, ternyata posisi penyebarannya tidak jauh dari sumber panasbumi dan agak mengelompok. Jelas bahwa gempa mikro yang terjadi pada kedalaman tersebut, diperkirakan penyebabnya berupa aktifitas dan proses-proses yang terjadi di reservoir tersebut seperti transfer panas fluida yang berlangsung terus-menerus. Sedangkan pada bagian yang lebih dalam, penyebaran pusat gempa lebih merata dan tidak berpola dengan frekuensi yang lebih rendah. Umumnya gempa jauh berada pada kedalaman ini. Hal ini diperkirakan penyebabnya dari aktifitas sesar yang

lebih dalam atau pengangkatan oleh sumber panas seperti magma yang diselingi oleh aspek tektonik regional. Namun ada juga beberapa gempa jauh yang terletak dekat dengan permukaan hingga sampai -20 m yang letaknya diluar lapangan panasbumi Kamojang. Sedangkan gempa jauh pada daerah lapangan panasbumi Kamojang letaknya sangat dalam sekitar lebih dari -20 km, yang terekam pada bulan Mei dan Desember 2004. Distribusi gempa mikro pada kedalaman di bawah permukaan laut menunjukkan aktifitas pergerakan fluida berada dalam zona akuifer panas, sehingga disimpulkan bahwa fluida injeksi telah mencapai zona akuifer dalam yang kemudian mengalami pemanasan sampai mencapai boiling.

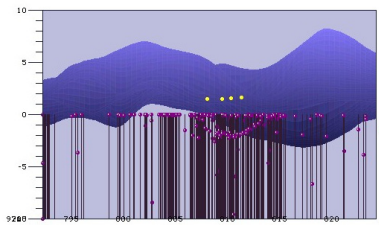
Proses pemanasan untuk mencapai perubahan dari fase air panas ke fase uap yang lebih kecil menimbulkan pelepasan energi yang kemudian terekam sebagai gempa mikro dengan magnitudo kecil. Penampang proyeksi melintang dari pusat gempa ini sesuai dengan pola struktur geologi yang ada di Kamojang, dimana zona yang membujur dari Barat ke Timur menunjukkan gejala dengan kemiringan ke arah Baratdaya - Timurlaut, hal ini sesuai dengan pola struktur zona sesar (lihat gambar berikut ini).

V. SIMPULAN

1. Hasil penyelidikan aktifitas gempa mikro selama 1 tahun, mulai Maret 2004 sampai Februari 2005, menunjukkan tingkat kegempaan di lapangan panasbumi Kamojang dan sekitarnya cukup tinggi, yaitu 390 gempa yang terdiri dari 115 gempa jauh dan 275 gempa mikro. Frekuensi gempa terbanyak terjadi pada Maret 2004 dan Februari 2005 dan paling sedikit pada Januari 2005.
2. Distribusi episenter mengindikasikan arah fluida injeksi yang cenderung menuju ke daerah dengan banyak sumur produksi yang masih aktif, namun ada juga fluida injeksi yang bergerak kearah Baratlaut - Tenggara yaitu di sekitar sumur injeksi Kmj-21 yang mengikuti rekahan di daerah tersebut.
3. Distribusi hiposenter menunjukkan kedalaman 0,02 sampai -17,01 km yang sebagian besar berada di reservoir dan di bawah zona reservoir yaitu pada elevasi 0 sampai -3 km. Penampang hiposenter menunjukkan akumulasi dengan kemiringan Baratdaya - Timurlaut yang sesuai dengan pola struktur zona sesar.
4. Gempa mikro yang terjadi di area Kamojang disebabkan karena perubahan fase air panas menjadi uap dari fluida injeksi yang terjadi di sepanjang rekahan-rekahan dalam reservoir. Perubahan fase ini kemudian menyebabkan tekanan pada rekahan-rekahan. Sedangkan diluar area tersebut banyak terjadi gempa jauh karena aspek tektonik.



Gambar 5: Distribusi episenter selama satu tahun



Gambar 6: Penampang hiposenter Barat - Timur area panasbumi Kamojang & sekitarnya hasil pengolahan dengan MEQ-Soft.

[1] APIA Silver Year of Indonesian Geothermal Development - A Lesson Learn, Proceeding of The 6th Indonesian Geothermal Association - Annual Meeting and Conference, Bandung, 2003.

[2] API, *Klasifikasi Potensi Energi Panasbumi*, Media API edisi September, Jakarta, 1999.

[3] Muh.Yustin Kamah, *Laporan Periodik Monitoring Gempa Mikro (MEQ) Desember 2003 - Juli 2004*, Geoscience Engineering, Pertamina Area Geothermal Kamojang, 2004.

[4] API, 1993, *Geothermal Reservoir Engineering* (PT Loka Data-mas Indah, Jakarta, 1993).

[5] Malcolm A. Grant, Ian G.Donaldson, Paul F.Bixley, *Geothermal Reservoir Engineering* (Academic Press, London, 1982).

[6] John M.Reynolds, *An Introduction to Applied and Enviromental Geophysics*(John Wiley & Sons, UK, 1997).

[7] Prof.Manfred P.Hochstein, *Geophysical Methods: Exploration of Mineral Deposit*, Geophysical Courses Series, HAGI, Bandung, 2000.

[8] R.E.Sherif, L.P.Geldart, *Exploration Seismology*, (Cambridge Press, University of Houston, Melbourne, 1995).

[9] David Gubbins, *Seismology and Plate Tectonics*,(Cambridge University Press, University of Leeds, Cambridge, 1990).

[10] L.Rybach, L.J.P.Muffler, *Geothermal System: Principles and Case Histories* (John Wiley & Sons, Great Britain, 1981).