



UNIVERSITAS INDONESIA

**DELINEASI ZONA REKAHAN PADA RESERVOIR GEOTHERMAL
MELALUI PENGAMATAN MIKROSEISMIK**

SKRIPSI

**ERWIN PRIBADI
0706196544**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**DELINEASI ZONA REKAHAN PADA RESERVOIR GEOTHERMAL
MELALUI PENGAMATAN MIKROSEISMIK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**ERWIN PRIBADI
0706196544**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI FISIKA
KEKHUSUSAN GEOFISIKA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Erwin Pribadi

NPM : 0706196544

Tanda Tangan : 

Tanggal : 24 Juni 2010

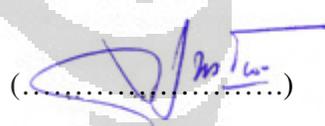
HALAMAN PENGESAHAN

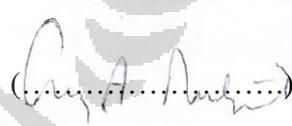
Skripsi ini diajukan oleh :

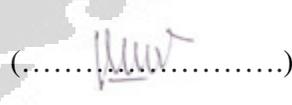
Nama : Erwin Pribadi
NPM : 0706196544
Program Studi : Ekstensi Geofisika
Judul Skripsi : Delineasi Zona Rekahan Pada Reservoir Geothermal
Melalui Pengamatan Mikroseismik

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika Peminatan Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc (.....)

Pembimbing II : Gregg Nordquist (.....)

Penguji I : Dr. Jatmiko P.A. (.....)

Penguji II : Dr. Syamsu Rosid (.....)

Ditetapkan di; Depok

Tanggal: 24 Juni 2010

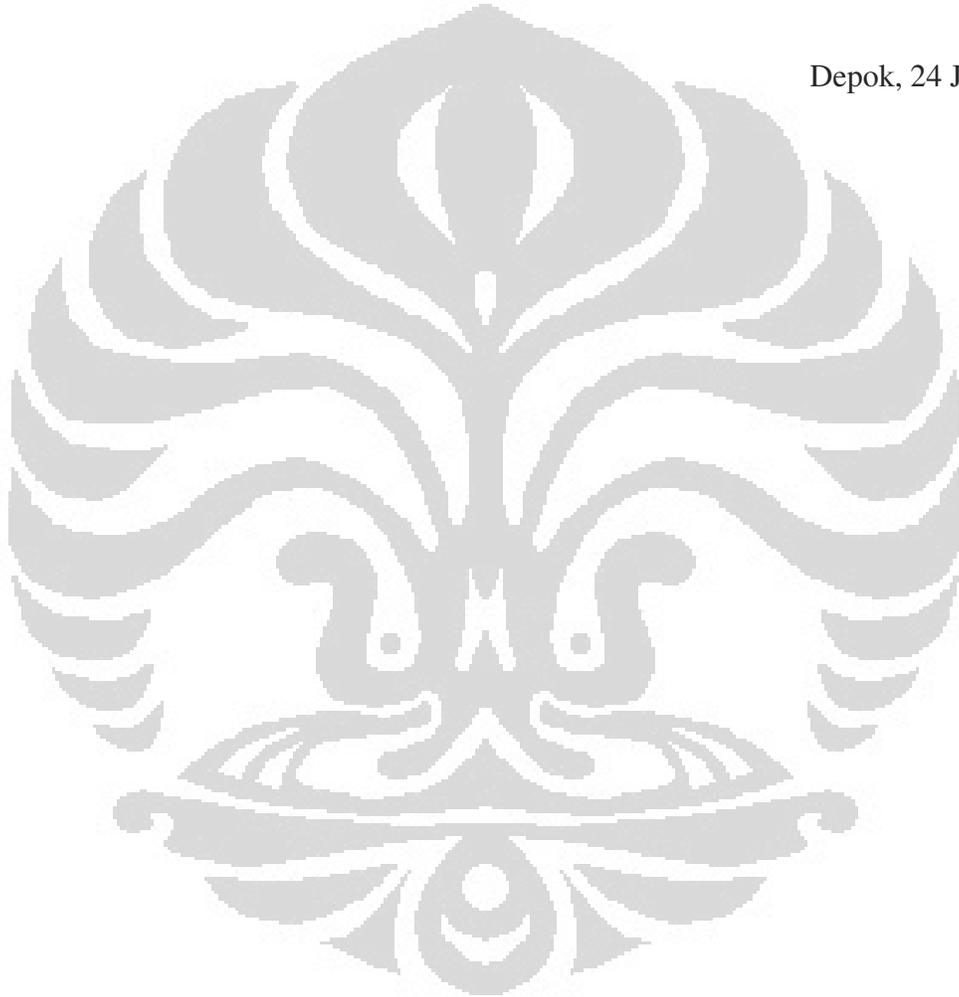
KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc, selaku dosen pembimbing I yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini. Selalu memberikan dukungan, saran dan masukan yang sangat bermanfaat dalam proses pembuatan skripsi ini maupun untuk kedepannya.
- (2) Gregg Nordquist, selaku pembimbing II yang telah memberikan saya kesempatan untuk dapat mengerjakan penelitian ini dengan menyediakan waktu, tenaga dan pikiran dalam penulisan skripsi ini.
- (3) Dr. Jatmiko P.A. dan Dr. Syamsu Rosid, selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran dan masukan yang sangat bermanfaat untuk kedepannya.
- (4) Mas Chris Nelson, Mas Djoko Anityo Wibowo, Pak Any Widodo, Pak Heddy, Pak Auardi Suminar, Jim Stimac, Mas Jeres, Mas Budi, Mas Riki, Mba Vita, Mba Rindu, Mba Gita dan semua pihak dari Chevron Geothermal Indonesia yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan.
- (5) Ayah, Mama, Selvi, Tigor, Nanda dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
- (6) Isnatami Nurul Azni yang telah mengisi hati ini dan memberikan warna yang ceria dalam hari-hari yang saya lalui.

- (7) Seluruh Keluarga Besar Madah Bahana Universitas Indonesia yang sudah menjadikan saya sebagai pribadi yang sinergis, produktif, solutif dan prestatif.
- (8) Alet Dananto, Desti Ika Suryanti, Bang Lendri, Surya, Nurina, Heni dan teman-teman ekstensi fisika angkatan 2007 yang telah banyak membantu serta memberikan masukan yang bermanfaat dalam menyelesaikan skripsi ini.

Depok, 24 Juni 2010



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Erwin Pribadi
NPM : 0706196544
Program Studi : Geofisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, meyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

DELINEASI ZONA REKAHAN PADA RESERVOIR GEOTHERMAL MELALUI PENGAMATAN MIKROSEISMIK

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/penciptaan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada Tanggal: 24 Juni 2010

Yang menyatakan



(Erwin Pribadi)

ABSTRAK

Nama : Erwin Pribadi
Program Studi : Geofisika
Judul : Delineasi Zona Rekahan Pada Reservoir Geothermal Melalui Pengamatan Mikroseismik

Lapangan geothermal Awibengkok, juga dikenal dengan nama Salak, berlokasi sekitar 60 km dari selatan Jakarta di pulau Jawa, Indonesia. Awibengkok merupakan lapangan dengan reservoir penghasil energi geothermal terbesar di Indonesia. Area reservoir terbukti yaitu 18 km² dengan sumber potensial sebesar 377 MWe. Untuk mengeksploitasi energi tersebut maka dibuat sumur-sumur produksi serta sumur injeksi guna meningkatkan kelangsungan reservoir dalam menghasilkan uap panas yang nantinya dikonversi menjadi tenaga listrik. Aktivitas dari sumur-sumur tersebut memicu terjadinya gempa mikro (mikroseismik). Pengamatan mikroseismik dilakukan menggunakan *SMART-24D*. Selanjutnya data mikroseismik hasil pengamatan ini diolah ke dalam *software Seisplus* sehingga diperoleh data berupa waktu, koordinat, elevasi, dan magnitudo gempa yang telah terjadi. Setelah data-data tersebut diperoleh maka dibuat peta episenter menggunakan *software WinGLink*, dimana posisi gempa diproyeksikan ke dalam bidang datar horisontal. Pada *software* tersebut juga dibuat persebaran gempa mikro dalam tampilan 2 dimensi yaitu berupa penampang melintang (*cross section*). Untuk hasil interpretasi dalam tampilan 3-dimensi digunakan *software Geoslicer-X*, sehingga diperoleh model persebaran mikroseismik di lapangan Awibengkok. Dari model persebaran mikroseismik tersebut terlihat adanya delineasi zona rekahan yang digambarkan dengan even mikroseismik yang berkumpul membentuk suatu kelompok (*cluster*) di sebelah barat lapangan Awibengkok. Sehingga dapat disimpulkan bahwa mekanisme gempa yang dominan terjadi di lapangan Awibengkok banyak dipengaruhi oleh adanya aktivitas injeksi dan produksi.

Kata kunci: Awibengkok, reservoir geothermal, rekahan, mikroseismik, injeksi, produksi.

ABSTRACT

Name : Erwin Pribadi
Study Program : Geophisic
Title : Fracture Zone Delineation in Geothermal Reservoir By
Microseismic Monitoring

The Awibengkok geothermal field which is also known as Salak, is located in Java island, 60 km southern Jakarta. This place is the largest producer of geothermal power in Indonesia. The proven reservoir in this place is about 18 km² with 377 MWe potential source. In order to exploring that area, people make many production and injection wells. They made it in order to enduring the reservoir performance in producing hot vapor, which will be converted into electric supply. The activity from those wells triggering the microseismic event to happen. The observation of the microseismic is carried out using SMART-24D. Then, the data result of the observation is processed in Seisplus software, so there will be new datas such as time, position, elevation, and magnitude of the microseismic event which had been occured. After those datas are collected, the epicenter map is ready to be made by using WinGLink. In WinGLink the microseismic position is projected in the horizontal flat surface and also the view of microseismic spreading in 2-dimensional view which have cross section shaped. For the interpretation result in 3-dimensional view, Geoslicer-X software is used here, so that the spreading model of microseismic in Awibengkok field is obtained. From the spreading model, the delineation fracture zone is seen in western Awibengkok which is described with microseismic event. In conclusion, the mechanism of the microseismic event which always happens in Awibengkok is caused by injection and production activities.

Keywords: Awibengkok, geothermal reservoir, fracture, microseismic, injection well, production well.

DAFTAR ISI

	halaman
Halaman Sampul	
Halaman Judul	i
Halaman Pernyataan Orisinalitas	ii
Halaman Pengesahan	iii
Kata Pengantar	iv
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah	vi
Abstrak	vii
Abstract	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	4
1.3. Batasan Penelitian	4
1.4. Metodologi Penelitian	5
1.5. Sistematika Penulisan	6
BAB II DASAR TEORI	8
2.1 Gelombang Seismik	8
2.1.1 Gelombang Bodi (<i>Body Waves</i>)	8
2.1.2 Gelombang Permukaan (<i>Surface Waves</i>)	12
2.2 Mekanisme Gempa	14
2.3 Macam-macam Gempa	14
2.3.1 Menurut proses terjadinya	14
2.3.2 Menurut bentuk episenter nya	15
2.3.3 Menurut kedalaman hiposentrumnya	15
2.3.4 Menurut jaraknya, ada tiga jenis gempa	15

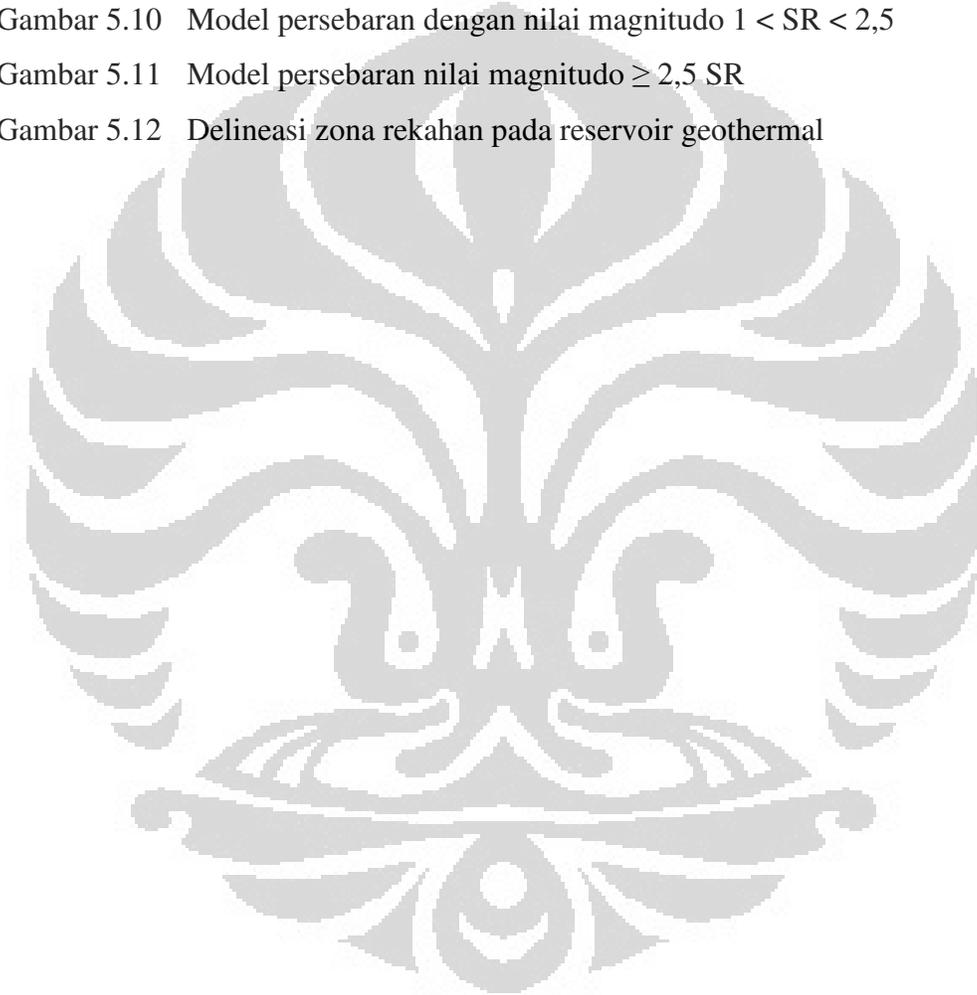
2.3.5 Menurut lokasinya, ada dua jenis gempa	15
2.4 Parameter Gempa Bumi	16
2.5 Metode Penentuan Gempa	17
BAB III TINJAUAN DAERAH PENELITIAN	21
3.1 Kondisi Geologi Daerah Penelitian	21
3.2 Manifestasi Permukaan Sistem Geothermal	22
3.3 Stratigrafi dan Petrofisik Reservoir	23
3.4 Kecenderungan Porositas dan Permeabilitas	27
3.5 Interpretasi Struktur Reservoir	28
3.6 Alterasi Hidrotermal	29
3.7 Temperatur Reservoir dan Geokimia Fluida	31
3.8 Model Konseptual	34
BAB IV AKUISISI DAN PENGOLAHAN DATA	36
4.1 Akuisisi data	36
4.1.1 Persebaran Stasiun Perekaman Mikroseismik	36
4.1.2 Pengambilan Data Mikroseismik	37
4.1.2.1 Prinsip Kerja Alat	37
4.1.2.2 Waktu Pengambilan Data	39
4.2 Pengolahan Data	39
4.2.1 Bentuk Data Sebelum Pengolahan	40
4.2.2 Trimming	41
4.2.3 Picking	41
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	43
5.1 Peta Episenter	43
5.1.1 Peta Episenter Dengan Nilai Magnitudo < 1 M	43
5.1.2 Peta Episenter Dengan Nilai Magnitudo $1 < M < 2,5$	44
5.1.3 Peta Episenter Dengan Nilai Magnitudo $\geq 2,5$ M	45
5.2 Penampang Melintang	46

5.2.1	Penampang Melintang Dengan Nilai Magnitudo $< 1 M$	47
5.2.2	Penampang Melintang Dengan Nilai Magnitudo $1 < M < 2,5$	47
5.2.3	Penampang Melintang Dengan Nilai Magnitudo $\geq 2,5 M$	48
5.3	Model Persebaran Mikroseismik	49
5.3.1	Model Persebaran dengan Nilai Magnitudo $< 1 M$	50
5.3.2	Model Persebaran dengan Nilai Magnitudo $1 < M < 2,5$	51
5.3.3	Model Persebaran Nilai Magnitudo $\geq 2,5 M$	52
5.3.4	Delineasi Zona Rekahan Pada Reservoir Geothermal	53
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		55
6.1	Kesimpulan	55
6.2	Saran	56
DAFTAR PUSTAKA		57
Lampiran		

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 1.1 Lokasi lapangan geothermal Awibengkok	1
Gambar 1.2 Peta kontrak area Gunung Salak. Kontrak area Salak	2
Gambar 1.3 Alur Penelitian	5
Gambar 2.1 Arah perambatan gelombang-P	9
Gambar 2.2 Arah perambatan gelombang-S	10
Gambar 2.3 Gelombang-P dan gelombang-S yang terekam	10
Gambar 2.4 Arah perambatan gelombang Rayleigh	13
Gambar 2.5 Arah perambatan gelombang Love	13
Gambar 2.6 Model bumi homogen isotropis	18
Gambar 2.7 Penentuan episenter dengan metode Lingkaran	20
Gambar 3.1 Peta geologi permukaan Awibengkok	21
Gambar 3.2 Penampang stratigrafi untuk reservoir Awibengkok	24
Gambar 3.3 Penampang melintang lithologi A-A'	26
Gambar 3.4 Lokasi dan orientasi struktur permukaan Awibengkok	28
Gambar 3.5 Penampang melintang A-A' distribusi batuan mineral	29
Gambar 3.6 Peta sektor reservoir geothermal Awibengkok	32
Gambar 3.7 Konseptual distribusi temperatur, alterasi dan resistivitas	34
Gambar 4.1 Persebaran stasiun perekaman mikroseismik	36
Gambar 4.2 Komponen yang digunakan dalam setiap stasiun MEQ	37
Gambar 4.3 Stasiun perekaman mikroseismik di lapangan	38
Gambar 4.4 Tata alir akuisisi data	39
Gambar 4.5 Bentuk data yang diperoleh dari lapangan	40
Gambar 4.6 Data sebelum dan sesudah dilakukan <i>trimming</i>	41
Gambar 4.7 Area mikroseismik meliputi gelombang-P dan gelombang-S	42
Gambar 5.1 Peta episenter dengan nilai magnitudo < 1 SR	43
Gambar 5.2 Peta episenter dengan nilai magnitudo $1 < SR < 2,5$	44
Gambar 5.3 Peta episenter dengan nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR	45

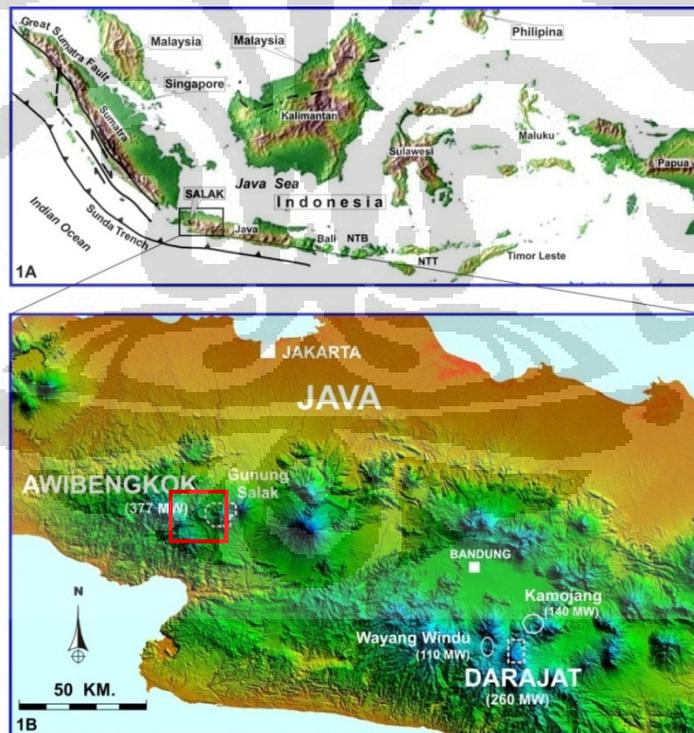
Gambar 5.4	Profil cross section dengan arah barat laut-tenggara	46
Gambar 5.5	Penampang melintang untuk nilai magnitudo < 1 SR	47
Gambar 5.6	Penampang melintang untuk nilai magnitudo $1 < SR < 2,5$	48
Gambar 5.7	Penampang cross section untuk nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR	49
Gambar 5.8	Tampilan 3-dimensi program Geoslicer-X	49
Gambar 5.9	Model persebaran nilai magnitudo < 1 SR	50
Gambar 5.10	Model persebaran dengan nilai magnitudo $1 < SR < 2,5$	51
Gambar 5.11	Model persebaran nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR	52
Gambar 5.12	Delineasi zona rekahan pada reservoir geothermal	53



BAB I PENDAHULUAN

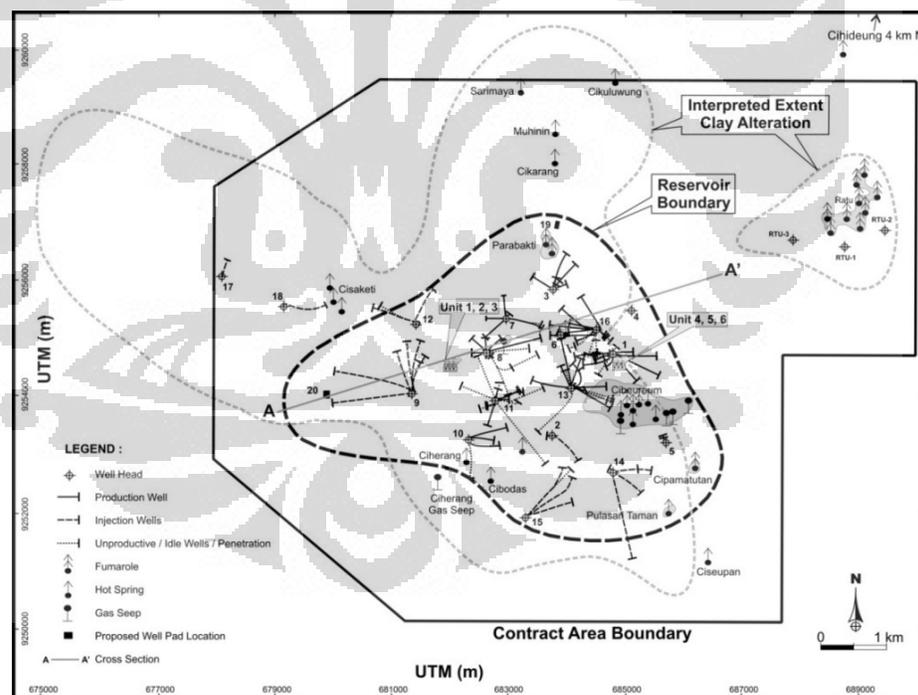
1.1. Latar Belakang

Indonesia dengan letak astronomi $94^{\circ} - 141^{\circ}$ BT dan 6° LU – 11° LS terletak di wilayah *Ring Of Fire* yaitu daerah pertemuan 3 lempeng tektonik dan 1 lempeng tektonik kecil. Ketiga lempeng tektonik itu adalah lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik serta lempeng kecil Filipina. Lempeng-lempeng tektonik ini saling bergerak satu sama lain dengan sangat lambat ($0 - 20$ cm per tahun (Gunawan, 2005)), yang nantinya bisa mengakibatkan tumbukan sehingga terbentuk gunung berapi. Keberadaan gunung berapi ini dapat menjadi sumber energi panas bumi. Pada prinsipnya, gunung berapi yang digunakan dalam eksplorasi panas bumi adalah gunung api *semi active*, yang sedang mengalami proses *cooling down*.



Gambar 1.1. Lokasi lapangan geothermal Awibengkok. (1a) Peta Indonesia dengan lokasi area penelitian. (1b) Peta Jawa Barat dengan pusat vulkanik. Kontrak area Awibengkok (kotak merah).

Berdasarkan kondisi geologi tersebut, menjadikan Indonesia sebagai negara yang memiliki cadangan potensi panas bumi terbesar yaitu sekitar 40% dari sumber potensial panas bumi di dunia dengan nilai 27.000 Mwe. Energi panas bumi ini dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik. Contoh eksplorasi panas bumi sebagai pembangkit tenaga listrik yang sudah dikembangkan di Indonesia yaitu di daerah Salak (Jawa Barat), Darajat (Jawa Barat), Ulubelu (Lampung), Sibayak (Sumatra Utara), Kamojang (Jawa Barat), Dieng (Jawa Tengah), Wayang Windu (Jawa Barat), dan Lahendong (Sulawesi Utara) (Daud, 2002). Sumber panas bumi selain untuk pembangkit tenaga listrik juga dapat digunakan secara langsung seperti objek wisata atau pemandian air panas seperti di daerah Ciater dan Ciseeng (Jawa Barat). Begitu banyak manfaat dari sistem panas bumi yang dapat diambil keuntungannya, sehingga menjadi hal yang sangat menarik untuk dikaji, dipelajari, dan dikembangkan lebih luas.



Gambar 1.2. Peta kontrak area Gunung Salak. Kontrak area Salak (garis hitam padat) ditunjukkan bersamaan dengan batas komersial reservoir (garis hitam putus-putus), dengan fitur termal dan perluasan alterasi clay yang terinterpretasi berdasarkan survei MT-TDEM (garis abu-abu putus-putus). Penomoran sumur

berdasarkan urutan pendirian situs pemboran. Sepanjang A-A' merupakan penampang melintang lithologi dan alterasi.

Lapangan geothermal Awibengkok (Salak) merupakan daerah kontrak kerja Unocal Geothermal Indonesia (UGI) dengan Pertamina, terletak di kaki baratdaya dari Gunung Salak yaitu sekitar 70 km dari selatan Jakarta. Lapangan ini berada disepanjang busur Sunda Vulkanik, yang meluas dari Sumatera hingga Flores, seperti terlihat pada Gambar 1.1. Sistem ini menandai batas pertemuan antara lempeng Eurasia ke utara dan lempeng Australia ke selatan. Orientasi pertemuan lempeng untuk pulau Jawa rata-rata pada Utara-Selatan, mengakibatkan subduksi hampir tegak lurus ke lengkung depan di Jawa Tengah, tetapi semakin miring menuju Sumatra. Kecepatan pertemuan untuk Jawa telah diestimasi yaitu 6-7 cm pertahun. Indikator stress regional (mekanisme fokus gempa, *borehole breakouts*, patahan dan lipatan permukaan yang dipetakan atau disimpulkan) memperlihatkan bahwa stress horisontal maksimum di Jawa barat adalah kurang-lebih langsung sejajar ke utara pertemuan lempeng. Usia lempeng Indo-Australia ke bawah akan berada pada 85 Ma lepas pantai Jawa Barat. Ini bagian dari busur sunda untuk menandai batas terjauh dari bahan klastik terrigenous yang berasal dari orogen Himalaya, sedangkan sedimen pelagik dengan ketebalan yang relatif konstan diyakini sebagai selimut lempeng palung samudera selatan. Margin tenggaradaratan Sunda, sebuah blok dari lempeng Eurasia dengan basemen pra-tercier, diperkirakan berada diantara selat Sunda dan Jawa Tengah. Menurut Hamilton, batas tenggara kerak benua *Cretaceous* terletak di dekat Patahan Pelabuhan Ratu-Salak (SPR), dan hanya terletak di sebelah tenggara daerah geothermal (Gambar 3.1) (Stimac et al., 2008).

Suksesnya lapangan geothermal Awibengkok dipengaruhi oleh besarnya cadangan energi panas dalam fluida dan dalam batuan reservoir serta didukung oleh gradien tekanan yang memadai dan permeabilitas yang baik sebagai media perpindahan fluida panas dari reservoir ke permukaan. Sistem geothermal Awibengkok merupakan sistem yang didominasi oleh liquid, reservoir *fracture-controlled* dengan kimia yang ramah dan mengandung gas *low-to-moderate non-*

condensable. Untuk memonitor reservoir tersebut salah satunya adalah dengan melakukan pengamatan mikroseismik.

Pengamatan mikroseismik pertama kali diterapkan di lapangan geothermal Salak pada tahun tahun 1982 dengan instalasi drum perekam. Stasiun perekam ini sudah berjalan hingga 1986 di berbagai lokasi pada lapangan dan kemudian kembali dijalankan pada periode September 1992 hingga Maret 1993. Pengamatan sepanjang tahun 1994 mulai dari produksi dan injeksi pertama di lapangan membenarkan instalasi 5 array stasiun permanen jarak jauh di tahun 1995. Untuk melengkapi array yang permanen, 2 array sementara disebar. Pertama disebar disekitar Unit 4, 5 dan 6 pada tahun 1997 dan terdiri dari 7 stasiun digital portable Orion 24-bit. Yang kedua disebar pada tahun 1998 untuk memonitor injektor baru dan terdiri dari 9 data *logger portable*. Sejak April 2005, stasiun mikroseismik yang diaktifkan hanya 10 buah stasiun. Hal ini dikarenakan pengamatan mikroseismik hanya difokuskan ke lapangan Awibengkok sebelah barat. Sehingga stasiun-stasiun yang diaktifkan juga lebih dominan yang berada di bagian tersebut (Wibowo et al., 2010).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Melakukan dan memahami tahapan-tahapan pengamatan mikroseismik mulai dari akuisisi data, pengolahan data hingga interpretasi data.
2. Membuat model persebaran gempa mikro dalam tampilan 3-dimensi.
3. Melakukan studi untuk deliniasi zona rekahan pada reservoir geothermal melalui pengamatan mikroseismik.

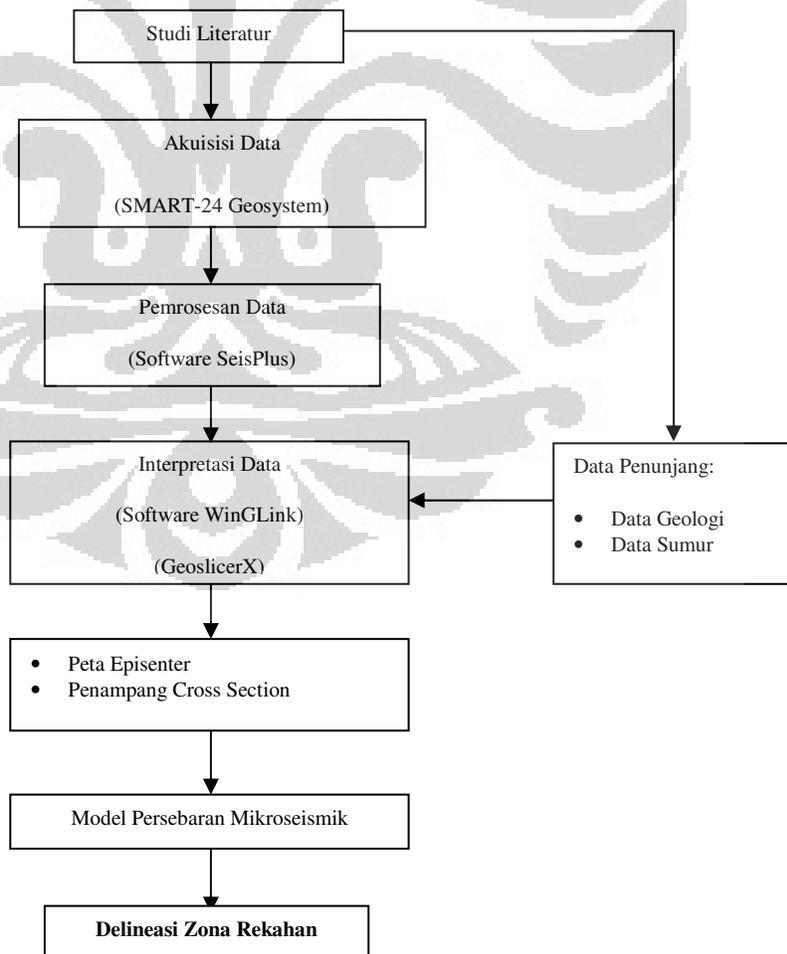
1.3. Batasan Penelitian

Di dalam penelitian ini, penulis memberikan batasan terhadap penelitian yang dikerjakan. Penelitian dilakukan pada daerah lapangan geothermal Awibengkok (Gunung Salak) menggunakan metode Mikroseismik. Penelitian ini menitikberatkan pada pemetaan deliniasi zona rekahan serta membuat dan memetakan model

persebaran gempa mikro di daerah penelitian. Dengan pembuatan peta episenter gempa mikro dan bantuan data-data penunjang seperti data geologi, data aktivitas sumur produksi dan reinjeksi dilakukan interpretasi terhadap penampang *cross section* dan selanjutnya dengan metode pengolahan data 3-dimensi dilakukan interpretasi terhadap model persebaran gempa mikro.

1.4. Metodologi Penelitian

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai yaitu melakukan tahapan-tahapan pengamatan mikroseismik hingga delineasi zona rekahan pada reservoir geothermal, maka dilakukan beberapa langkah penelitian. Alur penelitian yang dilakukan penulis adalah sebagai berikut:



Gambar 1.3. Alur Penelitian.

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur yang berhubungan dengan pengamatan mikroseismik pada reservoir geothermal. Selanjutnya melakukan pengambilan data dengan menggunakan alat *SMART-24 Geotech* yang sudah dipasang di lapangan. Alat ini didukung dengan beberapa komponen seperti GPS (*Global Positioning System*), Aki sebagai sumber listrik, media penyimpan (*hardisk*). Data gempa yang telah diperoleh diolah menggunakan perangkat lunak *SeisPlus*. Pada perangkat lunak tersebut data berupa tras seismik diolah untuk mendapatkan data waktu terjadinya gempa (*origin time*), koordinat gempa, elevasi gempa, dan magnitudo gempa. Kemudian melakukan interpretasi episenter dan 2-dimensi terhadap data hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *WinGLink*. Pada perangkat lunak tersebut akan dapat dilihat persebaran dari gempa-gempa mikro yang terjadi di lapangan Awibengkok. Untuk interpretasi 3-dimensi menggunakan perangkat lunak *Geoslicer-X*. Perangkat lunak tersebut dapat membantu dalam interpretasi model persebaran gempa mikro dalam tampilan 3-dimensi sehingga dengan jelas akan terlihat korelasi antara gempa-gempa mikro dengan aktivitas sumur-sumur reinjeksi maupun produksi. Kemudian diperoleh model persebaran gempa mikro berupa tampilan 3-dimensi. Dan yang terakhir adalah mendelineasi zona rekahan pada lapangan Awibengkok.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

BAB 1 : PENDAHULUAN. Pada bab ini dipaparkan gambaran tentang latar belakang penelitian, tujuan penelitian, gambaran umum daerah penelitian, batasan penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 : DASAR TEORI. Pada bab ini akan dipaparkan penjelasan mengenai metode mikroseismik. Dan akan dipaparkan pula mengenai mekanisme terjadinya gempa serta rekahan pada daerah geothermal.

BAB 3 : TINJAUAN DAERAH PENELITIAN. Pada bab ini dipaparkan mengenai keadaan geologi daerah penelitian, manifestasi permukaan, stratigrafi dan petrofisik reservoir, kecenderungan porositas dan permeabilitas, interpretasi struktur reservoir, alterasi hidrotermal, dan temperatur reservoir dan geokimia fluida serta model konseptual distribusi temperature, alterasi dan resistivitas listrik.

BAB 4 : AKUISISI DATA DAN PENGOLAHAN DATA. Pada bab ini dipaparkan mengenai persebaran stasiun perekaman mikroseismik. Kemudian memaparkan cara pengambilan data mikroseismik beserta prinsip kerja alat dan waktu pengambilan data. Dan juga membahas bentuk data sebelum dilakukannya pengolahan data dan juga tahapan pengolahannya seperti *trimming* dan *picking*.

BAB 5 : HASIL DAN PEMBAHASAN. Pada bab ini akan dijelaskan hasil yang sudah diperoleh dari pengolahan data yaitu peta episenter, penampang cross section dan interpretasi model persebaran mikroseismik 3-dimensi. Dari ketiga hasil tersebut akan dibuat analisa mengenai model yang diperoleh untuk menentukan delineasi zona rekahan.

BAB 6 : KESIMPULAN DAN SARAN. Pada bab ini akan dibuat suatu kesimpulan sebagai hasil dari penelitian yang telah dilakukan serta memberikan saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB II TEORI DASAR

2.1 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah rambatan energi yang disebabkan karena adanya gangguan di dalam kerak bumi, misalnya adanya patahan atau adanya ledakan. Energi ini akan merambat ke seluruh bagian bumi dan dapat terekam oleh seismometer.

Efek yang ditimbulkan oleh adanya gelombang seismik dari gangguan alami (seperti: pergerakan lempeng (tektonik), bergesernya patahan, aktivitas gunung api, dsb) adalah apa yang kita kenal sebagai fenomena gempa bumi. Gelombang seismik adalah bentuk gelombang elastis yang menjalar dalam medium bumi, beberapa medium yang dapat menyalurkan gelombang mempunyai komponen impedansi, seismik (atau akustik) impedansi Z didefinisikan dalam persamaan 2.1 (Haris, 2006):

$$Z = V \times \rho \quad (2.1)$$

dimana V adalah kecepatan gelombang seismik, dan ρ adalah densitas dari batuan. Saat gelombang seismik melewati dua medium yang memiliki perbedaan impedansi, maka energi dari gelombang akan dipantulkan (*reflected*) dan yang lainnya akan diteruskan (*transmitted*). Gelombang seismik digolongkan menjadi 2 jenis, yaitu

1. Gelombang Badan (*body wave*)
2. Gelombang Permukaan (*surface wave*)

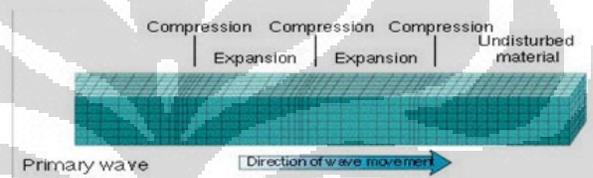
2.1.1 Gelombang Bodi (*Body Waves*)

Gelombang badan adalah gelombang yang merambat disela-sela bebatuan di bawah permukaan bumi. Gelombang badan mempunyai intensitas gelombang I_b , jika tidak mengalami kehilangan energi akibat gesekan energi (E_b) pada muka Berdasarkan

gelombang berjarak r dari sumber yang berbentuk luasan setengah bola yaitu $2\pi r^2$. Ada dua jenis gelombang badan, yaitu : Gelombang Primer dan gelombang Sekunder.

A. Gelombang Primer (*P-waves*)

Gelombang Primer adalah salah satu dari dua jenis gelombang seismik, sering juga disebut gelombang tanah (dinamakan demikian karena merambat di dalam tanah), adalah gelombang yang ditimbulkan oleh gempa bumi dan terekam oleh seismometer.



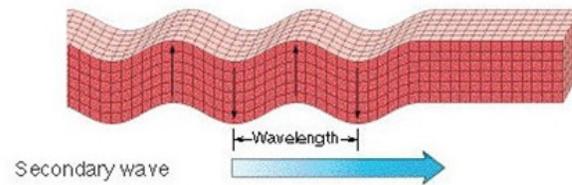
Gambar 2.1. Arah perambatan gelombang-P (Lay dan Wallace, 1995).

Merupakan gelombang seismik yang memiliki kecepatan paling tinggi (6-7 km/detik) dibandingkan gelombang-gelombang seismik lainnya dan pertama kali tiba pada setiap stasiun pengukuran seismik, dimana jenis gelombang berikutnya yang datang dinamakan *S-waves* atau gelombang sekunder. Hal ini berarti bahwa partikel-partikel yang berada di dalam tanah (tubuh dari bumi) memiliki vibrasi-vibrasi sepanjang atau sejajar dengan arah perambatan energi dari gelombang yang merambat tersebut.

B. Gelombang Sekunder (*S-waves*)

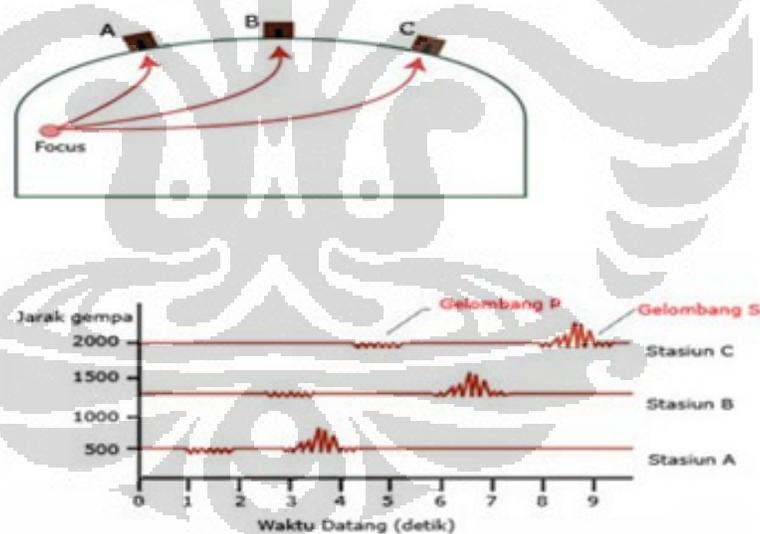
Gelombang Sekunder adalah gelombang transversal yang arah gerakannya tegak lurus dengan arah perambatan gelombang. Gelombang seismik ini merambat di sela-sela bebatuan dengan kecepatan 3,5 km/detik dan bergantung pada medium yang dilaluinya.

Hanya dapat menjalar pada batuan yang padat dan pergerakannya naik turun (*up and down*).



Gambar 2.2. Arah perambatan gelombang-S (Lay dan Wallace, 1995).

Baik gelombang-P atau gelombang-S dapat membantu ahli seismologi untuk mencari letak hiposenter (kedalaman) dan episenter (posisi) gempa. Kecepatan dari gelombang-P lebih besar daripada gelombang-S (jika merambat dalam medium yang sama).



Gambar 2.3. Gelombang-P dan gelombang-S yang terekam.

Secara pendekatan umum untuk bumi yang dianggap isotropis besarnya kecepatan masing-masing gelombang tersebut adalah (Rosid, 1988):

- Gelombang P

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

- Gelombang S

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

- Gelombang Rayleigh

$$V_R = 0,9194 V_s \quad (2.4)$$

- Gelombang Love

$$V_R < V_Q < V_s \quad (2.5)$$

Dimana λ dan μ adalah konstanta Lamé dan ρ adalah rapat massa batuan. Dari perumusan di atas dapat dipastikan bahwa gelombang P selalu lebih cepat daripada gelombang lainnya, sehingga pada seismogram gelombang P akan selalu tercatat paling awal.

Perbandingan antara cepat rambat gelombang P dan kecepatan gelombang S menghasilkan suatu konstanta yang disebut *Poisson ratio*. Konstanta ini merupakan sebuah besaran tak berdimensi yang menyatakan karakteristik dari suatu daerah (batuan) tersebut. Hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} \quad (2.6)$$

Dimana σ adalah Poisson ratio. Dalam kaitannya dengan daerah prospek geothermal ternyata gelombang bodi dapat dijadikan sebagai salah satu indikatornya. Faktor-faktor kandungan air, kandungan celah/retakan, porositas, temperatur, metamorfosa, tekanan dan tipe batuan dapat mempengaruhi cepat rambat gelombang. Saturasi air dapat memberikan efek yang lebih besar terhadap gelombang P daripada gelombang S. Cepat rambat gelombang P akan bertambah

sebesar 20% apabila suatu batuan kering tersaturasi oleh air, sedangkan gelombang S tidak mengalami perubahan kecepatan (Rosid, 1988).

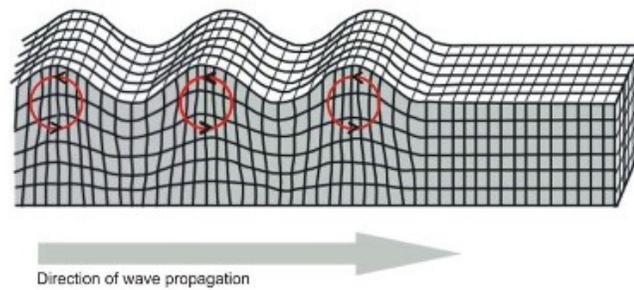
Dengan demikian, pada daerah yang berisi gas diharapkan gelombang P lebih lambat daripada daerah sekelilingnya. Dan hal ini berarti berkurangnya harga Poisson ratio. Faktor porositas dan kandungan retakanpun memberikan efek yang sama terhadap gelombang P. kedua faktor ini dapat mengurangi cepat rambat gelombang P dan sedikit pengaruhnya terhadap gelombang S. Ternyata cepat rambat gelombang bodi dapat memonitor zona lemah dalam suatu daerah dengan melihat harga Poisson ratio-nya (Rosid, 1988).

2.1.2 Gelombang Permukaan (*Surface Waves*)

Gelombang permukaan adalah gelombang yang merambat di permukaan bumi, tidak penetrasi ke dalam medium bumi. Mempunyai frekuensi lebih rendah dari gelombang badan, sehingga sifat gelombang tersebut merusak. Gelombang permukaan, jika muka gelombang mencapai jarak r , energi awal (E_s) terdistribusi pada permukaan silinder r dengan luas $2\pi rd$. Ada dua jenis gelombang permukaan, yaitu :

A. Gelombang *Rayleigh*

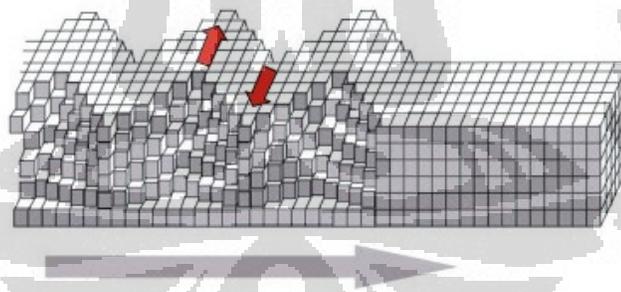
Diambil dari nama fisikawan Inggris Lord Rayleigh (1842- 1919). Gelombang Rayleigh adalah gelombang yang menjalar di permukaan bumi dengan pergerakan menyerupai ellip. Karena menjalar dipermukaan bumi, amplitudo gelombang Rayleigh akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Gelombang Rayleigh dicirikan dengan amplitudonya yang besar (hampir dua kali amplitudo refleksi) dan dicirikan dengan frekuensi rendah.



Gambar 2.4. Arah perambatan gelombang Rayleigh.

B. Gelombang *Love*

Gelombang *Love* adalah gelombang geser (*S wave*) yang terpolarisasi secara horizontal dan tidak menghasilkan perpindahan vertikal. Gelombang *Love* diambil dari nama seorang geofisika Inggris *Augustus Edward Hough Love* (1863-1940). Kecepatan merambat kedua gelombang permukaan ini selalu lebih kecil daripada kecepatan gelombang *P*, dan umumnya lebih lambat daripada gelombang *S*.



Gambar 2.5. Arah perambatan gelombang *Love*.

2.2 Mekanisme Gempa

Gempa bumi pada mulanya dikenal sebagai suatu bencana yang tiba-tiba saja datang dan merusak kehidupan manusia. Dengan berkembangnya tingkat pemikiran dan daya analisa manusia, maka timbul keyakinan bahwa segala

sesuatu ada penyebabnya. Sehingga mendorong manusia untuk mempelajari faktor-faktor yang ada di dalam bumi yang menyebabkan timbulnya gempa.

Dari berbagai pengamatan gempa bumi, maka diyakini adanya suatu tempat dimana gempa bumi bermula. Tempat tersebut disebut sebagai fokus, hiposenter atau sumber gempa. Tempat di muka bumi (permukaan) yang tepat di atas fokus disebut sebagai episenter.

Berdasarkan teori Reid mengenai *elastic rebound*, gempa bumi bermula dari gerakan slip yang terjadi secara spontan sesar aktif karena akumulasi *strain elastic* dalam periode panjang untuk mencari kestabilan baru.

2.3 Macam-macam Gempa

Gempa bumi merupakan fenomena alam yang sudah tidak asing lagi. Gempa dapat digolongkan menjadi beberapa kategori, yaitu menurut proses terjadinya, bentuk episentrumnya, jaraknya dan lokasinya.

2.3.1 Menurut proses terjadinya

Berdasarkan proses terjadinya, gempa bumi diklasifikasikan menjadi seperti berikut:

1. Gempa tektonik: terjadi akibat tumbukan lempeng-lempeng di litosfer kulit bumi oleh tenaga tektonik. Tumbukan ini akan menghasilkan getaran. Getaran ini yang merambat sampai ke permukaan bumi.
2. Gempa vulkanik: terjadi akibat aktivitas gunung api. Oleh karena itu, gempa ini hanya dapat dirasakan di sekitar gunung api menjelang letusan, pada saat letusan, dan beberapa saat setelah letusan.
3. Gempa runtuh atau longsor: terjadi akibat daerah kosong di bawah lahan mengalami runtuh. Getaran yang dihasilkan akibat runtuhnya lahan hanya dirasakan di sekitar daerah yang runtuh.

2.3.2 Menurut bentuk episentrumnya

Berdasarkan bentuk episentrumnya, dibagi menjadi dua jenis gempa, yaitu:

1. Gempa sentral: episentrumnya berbentuk titik.

2. Gempa linear: episentrumnya berbentuk garis.

2.3.3 Menurut kedalaman hiposentrumnya

Berdasarkan kedalaman hiposentrumnya, dibagi menjadi dua jenis gempa, yaitu:

1. Gempa bumi dalam: kedalaman hiposenter lebih dari 300 km di bawah permukaan bumi.
2. Gempa bumi menengah: kedalaman hiposenter berada antara 60-300 km di bawah permukaan bumi.
3. Gempa bumi dangkal: kedalaman hiposenter kurang dari 60 km.

2.3.4 Menurut jaraknya, ada tiga jenis gempa

Berdasarkan jaraknya, dibagi menjadi dua jenis gempa, yaitu:

1. Gempa sangat jauh: jarak episentrum lebih dari 10.000 km.
2. Gempa jauh: jarak episentrum sekitar 10.000 km.
3. Gempa lokal: jarak episentrum kurang 10.000 km.

2.3.5 Menurut lokasinya, ada dua jenis gempa

Berdasarkan lokasinya, dibagi menjadi dua jenis gempa, yaitu:

1. Gempa daratan: episentrumnya di daratan.
2. Gempa lautan: episentrumnya di dasar laut. Gempa jenis inilah yang menimbulkan tsunami.

2.4 Parameter Gempa Bumi

Setiap kejadian gempabumi akan menghasilkan informasi seismik berupa rekaman sinyal berbentuk gelombang yang setelah melalui proses manual atau non manual akan menjadi data bacaan fase (*phase reading data*). Informasi seismik selanjutnya mengalami proses pengumpulan, pengolahan dan analisis sehingga menjadi parameter gempabumi. Parameter gempabumi tersebut meliputi : Waktu kejadian gempabumi, Lokasi episenter, Kedalaman sumber gempabumi, Kekuatan gempabumi, dan Intensitas gempabumi.

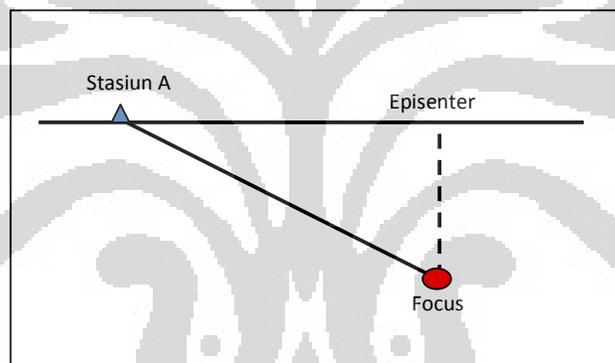
- A. Waktu kejadian gempabumi (*Origin Time*) adalah waktu terlepasnya akumulasi tegangan (*stress*) yang berbentuk penjalaran gelombang gempabumi dan dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).
- B. Episenter adalah titik di permukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dari Hiposenter atau Fokus gempabumi. Lokasi Episenter dibuat dalam sistem koordinat kartesian bola bumi atau sistem koordinat geografis dan dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur.
- C. Kedalaman sumber gempabumi adalah refleksi vertikal ke atas dari fokus gempa ke episenter.
- D. Hiposenter adalah jarak dari stasiun perekaman ke fokus gempa.
- E. Kekuatan gempabumi atau Magnitudo adalah ukuran kekuatan gempa bumi, menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempabumi terjadi dan merupakan hasil pengamatan Seismograf. Magnitude menggunakan Skala Richter (SR). Klasifikasinya dapat dilihat pada Lampiran 2.
- F. Intensitas gempa bumi adalah ukuran kerusakan akibat gempabumi berdasarkan hasil pengamatan efek gempa bumi terhadap manusia, struktur bangunan dan lingkungan pada tempat tertentu, dinyatakan dalam skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*). Klasifikasi gempa *Mercalli* dapat dilihat pada Lampiran 3.

2.5 Metode Penentuan Gempa

Banyak metode yang telah dilakukan oleh ahli seismologi untuk menentukan episenter maupun hiposenter dan *origin time* suatu gempa, antara lain adalah (Susilawati, 2008):

1. Metode Lingkaran. Metode ini merupakan metode yang paling sederhana. Dimana kita mencari titik perpotongan lingkaran-lingkaran yang dibuat dengan pusatnya di tiap-tiap stasiun dengan menggunakan data interval waktu tiba gelombang P dan S. Dalam metode ini bumi dianggap sebagai media homogen.
2. Metode Hiperbola. Metode ini menggunakan data waktu tiba gelombang P dan menganggap bumi sebagai media homogen horisontal. Dengan data interval waktu tiba gelombang P pada tiap dua stasiun dapat dibuat kurva hiperbola. Sehingga titik potong dari hiperbola-hiperbola tersebut yang diperkirakan sebagai episenter.
3. Metode Bola. Metode ini menggunakan data interval waktu tiba gelombang P dan S, yang dikonversikan ke jarak sebagai jari-jari bola dengan pusatnya di tiap-tiap stasiun. Titik potong dari bola-bola tersebut ditafsirkan sebagai hiposenter. Metode ini masih menganggap bahwa bumi masih homogen, sehingga menganggap semjua gelombang yang datang adalah gelombang langsung.
4. Metode Tripartit. Metode ini menggunakan tiga stasiun pencatat, dengan data interval waktu tiba gelombang P dan S. Metode ini akan mengalami kesulitan jika ternyata yang datang adalah gelombang refraksi dan disinipun medium bumi dianggap homogen.
5. Metode Geiger. Metode ini menggunakan data waktu tiba gelombang P dan S yang pertama, dan di sini media bumi tidak lagi diandaikan homogen, tetapi diandaikan terdiri dari perlapisan horisontal, sehingga metode ini memperhitungkan adanya gelombang langsung maupun gelombang refraksi.

Dalam penelitian yang dilakukan digunakan metode lingkaran dalam penentuan episenter gempa. Seperti yang dijelaskan dalam studi Rosid (1988) bahwa dalam metode ini diperlukan sedikitnya 3 buah stasiun dengan anggapan bahwa ketiganya berada pada ketinggian yang sama. Anggapan lain yang dipakai disini adalah bumi dianggap sebagai medium yang homogen isotropis sehingga gelombang gempa menjalar ke segala arah dengan kecepatan yang konstan. Jadi, apabila sebuah gempa terjadi pada sebuah titik di dalam bumi pada saat T_0 maka selang beberapa saat kemudian gelombang ini akan tercatat di stasiun A sebagai gelombang P dan gelombang S pada saat T_P dan T_S . Secara geometri digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.6. Model bumi homogen isotropis (Rosid, 1988).

Apabila gelombang P datang di stasiun pada saat T_{PA} dan gelombang S pada saat T_{SA} , sedangkan lintasan yang ditempuhnya berjarak D_A , maka dapat diperoleh waktu tempuh dari pusat gempa ke stasiun A untuk gelombang P sebesar:

$$T_{PA} - T_0 = \frac{D_A}{V_p} \quad (2.7)$$

Sedangkan untuk gelombang S:

$$T_{SA} - T_0 = \frac{D_A}{V_s} \quad (2.8)$$

Karena kecepatan gelombang P selalu lebih besar daripada gelombang S maka antara TP dan TS juga selalu ada selisih waktu. Dan dengan dua perumusan di atas dapat diturunkan perumusan jarak episenter dalam bentuk:

$$DA = \frac{V_p \cdot V_s}{V_p - V_s} (TSA - TPA) \quad (2.9)$$

Dengan cara yang sama untuk stasiun yang lain dapat dicari juga jarak episenternya D, sehingga secara umum perumusan di atas dapat dituliskan dalam bentuk:

$$D_i = \frac{V_p \cdot V_s}{V_p - V_s} (TS_i - TP_i) \quad (2.10)$$

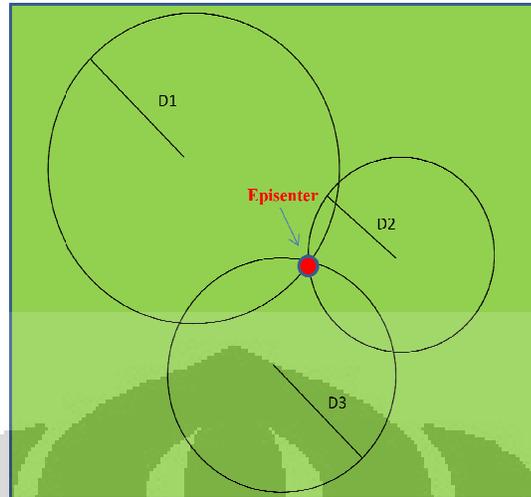
Dimana, i = indeks yang menyatakan stasiun ke i ($i=1, \dots, N$)

D_i = jarak fokus terhadap stasiun ke i

TP_i = waktu datang pertama gelombang P pada stasiun ke i

TS_i = waktu datang pertama gelombang S pada stasiun ke i

Dengan perumusan (2.10) maka jarak episenter untuk masing-masing stasiun dapat diketahui. Selanjutnya kita buat lingkaran dengan jari-jari sebesar D_i dan titik pusatnya pada stasiun i . Dengan demikian kita sekarang dapat menentukan kemungkinan adanya episenter pada lingkaran tersebut. Begitu pula dengan stasiun lainnya, kemungkinan episenter itu berada pada lingkarannya masing-masing. Apabila 3 stasiun maka kita dapat mengharapakan satu titik potong dari ketiga lingkaran tersebut sebagai titik episenter yang diharapkan. Secara teori, apabila fase gelombang P dan S-nya dapat terbaca dengan baik maka ketiga lingkaran tersebut akan berpotongan pada satu titik. Untuk lebih jelasnya secara geometri dapat digambarkan sebagai berikut:



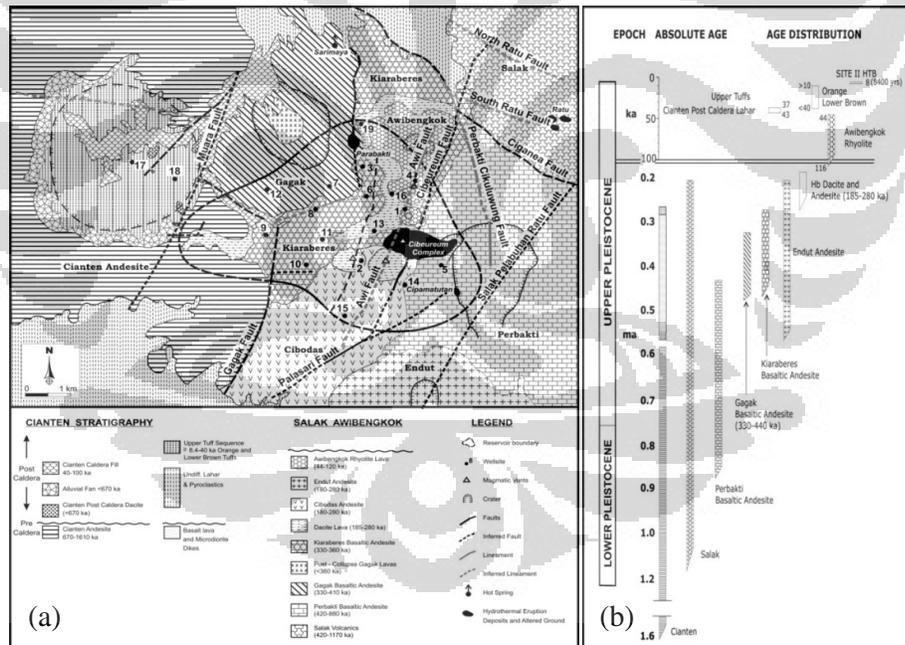
Gambar 2.7. Penentuan episenter dengan metode Lingkaran (Rosid, 1988).



BAB III TINJAUAN DAERAH PENELITIAN

1.1 Kondisi Geologi Daerah Penelitian

Sistem geothermal Awibengkok berlokasi di area pegunungan dengan kisaran elevasi dari 950 hingga 1500 meter di atas permukaan laut. Puncak tertinggi merupakan letusan andesitic yang tidak aktif dari Gunung Salak, Gagak, Perbakti dan Endut yang terletak sepanjang tren utama Busur Sunda Vulkanik. Perbatasan lokasi pengembangan ini berada di sebelah timur, barat laut, tenggara, dan sisi selatan dan masing-masing memberikan jalan ke pegunungan yang lebih rendah di bagian utara dan selatan (650-950 m di atas permukaan laut). Kaldera Cianten berada di sebelah barat Awibengkok dan dikeringkan oleh sungai-sungai yang mengalir ke utara melalui sebuah celah di bagian timur laut tepi kaldera.



Gambar 3.1. Peta geologi permukaan Awibengkok (Stimac et al., 2008). (a) Peta geologi dengan jenis-jenis batuan utama, patahan yang menonjol, dan tanah teralterasi. Batas reservoir dan lokasi sumur ditunjukkan untuk referensi. Tahun ditunjukkan dalam ribuan tahun (ka). (b) Dating endapan vulkanik berdasarkan K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dan ^{14}C .

Geologi permukaan dari area kontrak Awibengkok dipetakan dalam mode pengintaian oleh ahli geologi dan konsultan UGI, dengan ketergantungan yang tinggi pada foto udara karena hutan tropis yang lebat dan medan yang berat. Pemetaan area produksi lebih terperinci dan hal tersebut langsung dilakukan sebagai kegiatan pembangunan dengan akses yang lebih baik (Stimac dan Sugiaman, 2000). Berdasarkan dating K-Ar dan $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, puncak utama wilayah Awibengkok dibentuk dari 860 hingga 180 ka, sedangkan kerucut andesit leluhur yang membentuk tepi kaldera sebelah barat Cianten aktif dari sekitar 1.610 hingga 670 ka (Gambar 3.1 a dan b).

Di dalam area produksi Awibengkok, tufa dan lava andesit hingga rhyodasit dari 185-280 ka telah terisi sebagian di sisa-sisa Kiaraberes dan mengalir ke barat, barat daya, dan utara. Batu-batuan ini ditutupi oleh kubah rhyolitic, lava dan terhubung sekuen fragmen material letusan gunung api (*tephra*). Kedua sekuen yang meletus terutama di sepanjang patahan dengan tren utara-timur laut (NNE) yang melintasi bagian timur lapangan. Tren ventilasi ini mirip dengan stress maksimum yang disimpulkan horisontal dan tren dominan patahan utama yang terukur dalam gambar log pemboran seperti dibahas di bawah ini. Usia vulkanisme rhyolitic ini adalah 120-40 ka berdasarkan dating K-Ar dan $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Dating bahan organik Carbon-14 dalam endapan stratigrafi yang lebih tinggi dari unit ini menegaskan bahwa hal itu lebih tua dari 40.000 tahun SM.

Studi geokimia batuan vulkanik dari Gunung Salak dan ventilasi yang terkait menunjukkan bahwa tren yang berbeda terjadi karena variasi proses magmatik dalam level dangkal (Stimac., et al., 2008).

1.2 Manifestasi Permukaan Sistem Geothermal

Fosil dan sistem geothermal aktif terhubung dengan beberapa pusat vulkanik di kontrak area Gunung Salak (Gambar 1.2). Manifestasi termal yang paling menonjol adalah fumarol dan hot spring yang berhubungan langsung ke sistem geothermal Awibengkok dan fumarol prospek Ratu pada tertinggi sebelah barat letusan Gunung Salak (Gambar 1.2, 3.1a, dan Lampiran 1). Endapan emas terbentuk pada masa Tersier sekitar 2 Ma yang berada sebelah barat Awibengkok

yaitu Pongkor dan lebih jauh sekitar 40 km ke barat yaitu Cirotan dan Ciawitali (Stimac et al., 2008).

Fitur termal terhubung dengan distribusi klasik Awibengkoyang ditetapkan sebagai sumber geothermal yang didominasi oleh cairan (*liquid-dominated geothermal resources*) terlihat banyak dimanfaatkan secara komersial. Fumarol dan mata air sulfat asam (*acid sulfate spring*) terletak di atas sistem pada elevasi > 1050 m di atas permukaan laut, sedangkan bikarbonat dan bikarbonat bercampur klorida (*mixed bicarbonate-chloride*) dan mata air klorida (*chloride spring*) terletak di elevasi terendah secara progresif di sisi reservoir terbukti (*proven reservoir*) (Gambar 1.2). Fumarol Perbakti, terletak dekat Awi 3 (Gambar 3.1a), memiliki komposisi gas yang terindikasi secara dekat dengan sumber geothermal temperatur tinggi., sedangkan fumarol di timur dan tenggara memiliki komposisi gas yang konsisten dengan outflow geothermal temperatur rendah.

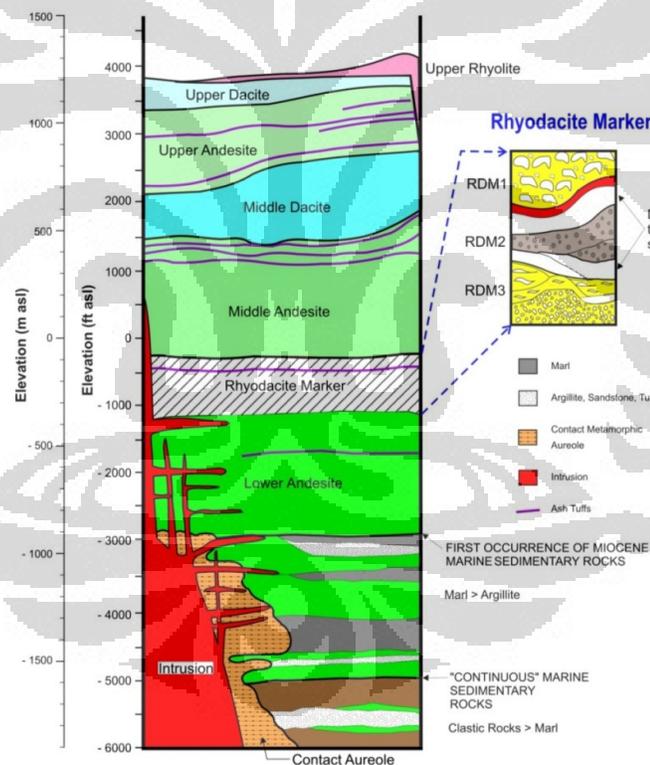
Mata air bikarbonat ditemukan dekat sisi lapangan terbukti (*proven field*) yaitu 850-730 meter di atas permukaan laut. Mata air panas Sarimaya memiliki konsentrasi klorida tertinggi dan terletak beberapa kilometer ke utara reservoir geothermal Awibengkok dengan elevasi sekitar 650 meter. Hal itu merupakan gagasan yang berasal dari salah satu aliran utama outflow dari sistem. Mata air klorida-bikarbonat Cikuluwung ditemukan sekitar 2 km timur Sarimaya pada elevasi 770 meter di atas permukaan laut dan mungkin merepresentasikan outflow yang dilarutkan secara kuat dari sistem geothermal Awibengkok atau Ratu. Mata air panas klorida-bikarbonat Cihideung, terletak sekitar 6 km timur laut Cikuluwung yang dipikir untuk pembebasan outflow yang dilarutkan secara kuat dari sistem hidrotermal Ratu, berdasarkan data variasi isotop dan lokasinya (Stimac et al., 2008).

1.3 Stratigrafi dan Petrofisik Reservoir

Lithologi bawah permukaan telah disimpulkan dari deskripsi potongan pemboran (*drill cutting*) dari kedalaman 81 sumur, dilengkapi oleh pita inti (*spot cores*) dari 13 sumur dan 1067 meter sambungan core dari sumur Awi 1-2 (Hulen dan Anderson, 1998). Resistivity borehole dan log gamma-ray juga memberikan pembatas pada jenis dan komposisi batuan utama, dan merupakan satu-satunya

cara untuk mendapatkan data lithologi di dalam penampang sumur yang dibor dengan hilang sirkulasi total (*total circulation losses*). Reservoir batuan pada Awibengkong secara umum dibentuk oleh andesitik dan sedikit lava basaltik, breksi, tufa dan lahar yang mencakup beberapa pusat vulkanik berumur tua di atas margin barat daya Gunung Salak (Stimac dan Sugiaman, 2000). Tebal aliran abu tufa rhyodasitic hingga dacitic terhubung kubah, breksi dan lahar yang diselingi dengan hasil lain sekuen andesitik hingga basaltik yang kembali ke masa Miocene (Gambar 3.2).

Penampang stratigrafi dapat dibagi kedalam 4 formasi utama untuk merepresentasikan episode diskrit di dalam evolusi segmen Jawa Barat pada Busur Sunda Vulkanik (Gambar 3.2).



Gambar 3.2. Penampang stratigrafi untuk reservoir Awibengkong. (Stimac et al., 2008).

Batuan tertua umumnya merupakan karbonat laut dangkal (*shallow-marine bicarbonate*) dan sedimen epilastik (batu lumpur dan batu pasir mengandung abu vulkanik dan puing lithic yang melimpah). Batuan sedimen laut

di sini sangat berbeda dari vulkanik di atasnya dan antar lapisan dari komposisinya, porositas dan permeabilitas rendah, dan alterasi hidrotermal yang kurang intensif. *Core* dan *cutting* dari Awi 17-1 menunjukkan bahwa batuan basemen di sini sudah dikonversi secara lokal menjadi batuan metamorf tingkat tinggi dan kumpulan batuan metamorf berwarna hijau atau merah dalam kontak metamorfik aureole intrusi subvulkanik didalam Kaldera Cianten dan reservoir sebelah barat Awibengkong pada kedalaman sekitar 1-3 km. Di tempat lain metamorfisme lemah berhubungan dengan intrusi dangkal batuan sedimen laut *Miocene* yang menghasilkan rekristalisasi neoblastik lokal didalam batuan karbonat dan meningkatnya pemisahan dan foliasi didalam batu lumpur.

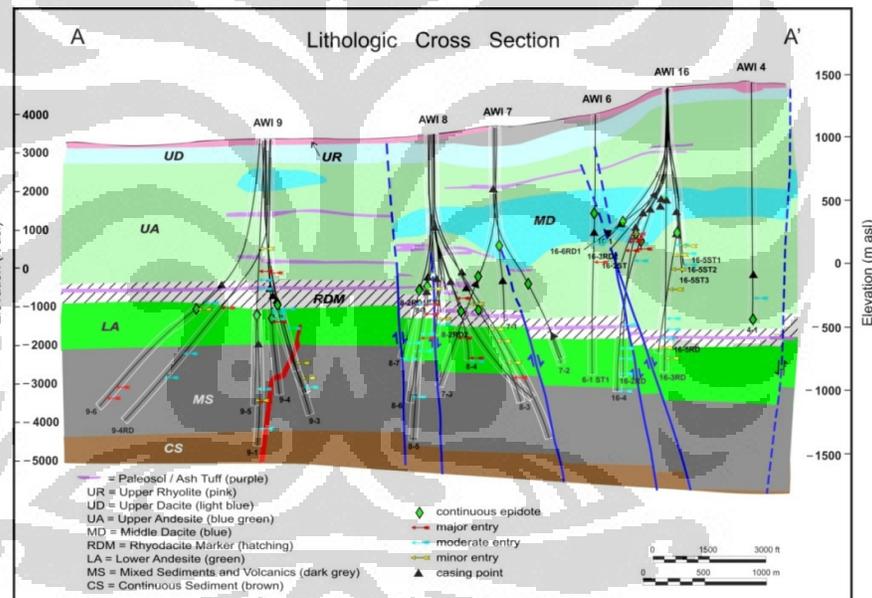
Setiap formasi utama vulkanik kemudian dibagi menjadi bagian andesitik rendah dan bagian atasnya *ryholitic* atau *dacitic* yang disimpulkan untuk merepresentasikan berbeda atau sebagian episode vulkanik menjadi silicic dengan waktu (Gambar 3.2). Ketipisan dasar hingga besar, abu yang kaya lempung dan tufa lapili hadir diseluruh sekuen. Kelompok sebagai penanda dasar ini sudah ditemukan di beberapa sumur dan beberapa sudah dikorelasikan dari sumur ke sumur.

Formasi vulkanik paling bawah, terdiri dari batuan vulkanik andesitik hingga basaltik, terletak diatas dan berlapisan dengan bagian sedimen *Miocene*. Batuan vulkanik di sini mungkin merupakan representasi episode utama magmatism *calc-alkaline* di daerah langsung, dan transisi dari marin ke kondisi subaerial. Bagian terbawah formasi ini utamanya terdiri dari lava dan breksi (umumnya hidroklastik) yang berbeda lapisan terhadap lithologi dengan karbonat marin yang mengandung fosil. Deposit hidroklastik terdiri dari fragmen lava kaca hingga kristal dengan vesikula bulat yang melimpah, sekarang sepenuhnya diisi oleh klorit dan fase kedua yang lain. Sekuen ini ditutupi oleh lava andesitik hingga *dacitic*, tufa dan breksi yang tampak sudah diendapkan didalam lingkungan subaerial.

Formasi utama kedua merupakan perluasan sekuen tufa silicic yang ditunjukkan sebagai penanda rhyodasit (*Rhyodacite Markers*). Unit ini diinterpretasi oleh mereka untuk merepresentasikan sebuah episode vulkanisme silicic dan formasi kaldera yang diikuti episode utama pertama pembentukan

stratovulkanik andesitik didalam daerah tersebut. Paling sedikit tiga unit ketebalan *rhyolitic* hingga *ryhodacitic* muncul di banyak sumur, dipisahkan oleh perlapisan tertipis dacitic dan tufa andesitic. Unit tersebut diakui sebagai *silicic* berdasarkan devitrifikasi tekstur yang terpelihara, *phenocrysts of chloritized biotite*, dan jebakan besar kuarsa “eyes”. Bersama-sama, paket batuan yang dijelaskan di atas terdiri dari sebagian besar sebelah barat reservoir Awibengkok.

Formasi vulkanik tengah merupakan sekuen yang lain dari lava andesitik hingga *dacitic*, tufa, dan aliran lahar dan puing yang merepresentasikan pembentukan, runtuh dan erosi pada stratovulkano, lava dan kompleks kubah. Sekuen subaerial ini mendominasi reservoir geothermal Awibengkok di bagian timur lapangan.



Gambar 3.3. Penampang melintang lithologi A-A'(Gambar 1.2) menunjukkan distribusi formasi dan patahan utama di daerah Awibengkok. (Stimac et al., 2008).

Pengetahuan lain terperinci mengenai stratigrafi dan sifat petrofisik reservoir dangkal barat yang diperoleh dari sambungan inti yang diambil di sumur Awi 1-2 (Hulen dan Anderson, 1998). Sekuen batuan di sumur ini dapat dibagi menjadi beberapa paket yang berbeda (Hulen et al., 2000). Yang paling penting komposisi dasite, terutama terdiri dari lava, kubah dan breksi terkait, tufa dan lahar. Paket mendasar adalah didalam komposisi andesite yang dominan terdiri dari lava dan

tufa di bagian terbawahnya, dan lahar di bagian teratasnya. Butir kasar sedimen epiklastik mendominasi bagian teratas kedua paket, menunjukkan penurunan dari vulkanisme dan erosi, atau mengangkat patahan dan memotong turun dari daerah sekitarnya. Formasi vulkanik teratas terdiri dari sekuen andesit lain yang ditutupi oleh batuan dasit hingga *rhyolite* yang mencakup endapan permukaan yang dijelaskan di atas.

Batuan intrusif sudah diidentifikasi di banyak sumur yang mencakup Awi 17, 18, 12, 9, 4, 2, dan 1 (Gambar 1.2). Segerombolan signifikan komposisi dike silitic hingga menengah dan sill yang mengandung plagioklas, alkali feldspar, pyroxene, titanite dan biotite atau terjadi serangkaian mineral pada level dangkal di Kaldera Cianten hingga sebelah barat reservoir terbukti dan sepanjang sebelah timur dinding kaldera.

1.4 Kecenderungan Porositas dan Permeabilitas

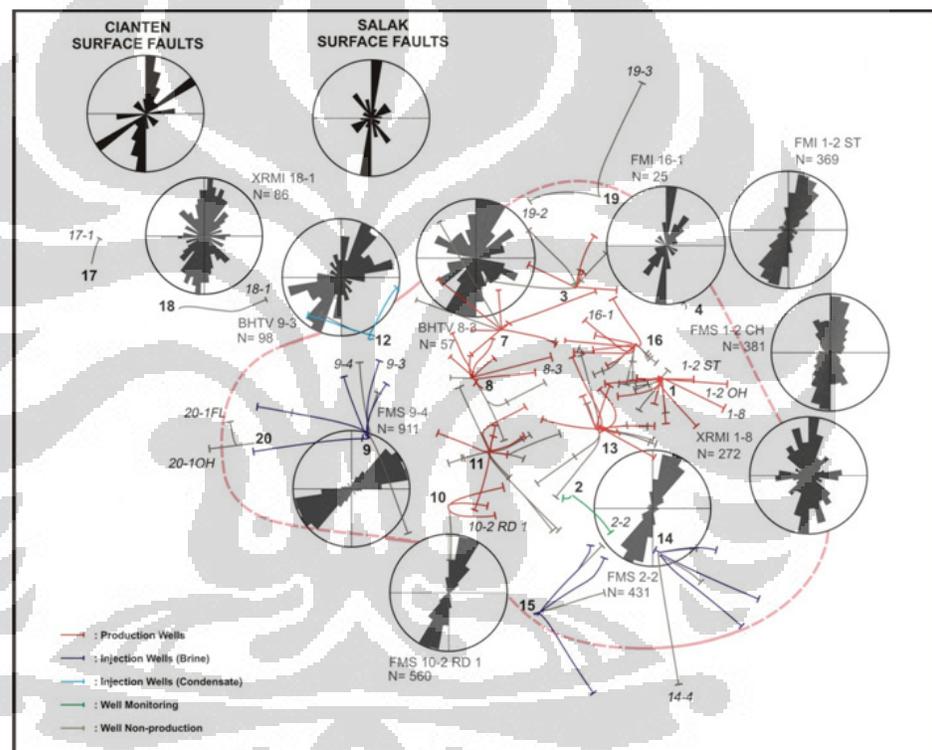
Seperti kebanyakan dapur vulkanik sistem geothermal, permeabilitas pada Awibengkok dikendalikan terutama oleh adanya jaringan interkoneksi terbuka untuk sebagian rekahan tertutup. Meskipun penting untuk permeabilitas sumur, banyaknya fluida yang tersimpan didalam rekahan mikro dan pori-pori adalah faktor yang signifikan di dalam performa keseluruhan reservoir dan seberapa banyak panas dapat diekstrak secara komersil dari bawah permukaan. Untuk karakteristik matriks porositas reservoir Awibengkok, pengukuran porositas helium sudah dilakukan pada 87 sampel inti dari sumur-sumur yang didistribusikan di seluruh lapangan, tetapi kebanyakan data telah diperoleh dari lanjutan inti Awi 1-2 (Hulen dan Anderson, 1998).

Estimasi tambahan porositas dengan kedalaman telah diperoleh dari log densitas dan kecepatan sonik di sumur dimana inti sudah tersedia untuk kalibrasi profil bawah permukaan. Porositas rata-rata sekitar 10,6 % telah diteliti disemua sampel inti. Tren porositas sebagai fungsi jenis batuan merupakan kemiripan pada dapur vulkanik sistem geothermal yang lain, dimana kerapatan batuan Kristal seperti aliran lava, interior dan intrusi kubah memiliki harga terendah (rata-rata 8,6 %), dan batuan fragmen seperti breksi, tufa dan lahar memiliki harga tertinggi (rata-rata 13,1 %) tetapi variabel porositas yang lain yang tergantung pada

perluasan mekanik dan perubahan kimia batuan telah dialami (Stimac et al., 2004). Tren penurunan porositas terhadap kedalaman didorong pertama kali oleh penurunan porositas di jenis fragmen batuan.

1.5 Interpretasi Struktur Reservoir

Pemetaan patahan dan rekahan telah terbukti sulit karena vegetasi tumbuhan tropis, tetapi beberapa orientasi dan indikator arah sesar telah didokumentasikan (Gambar 3.4).

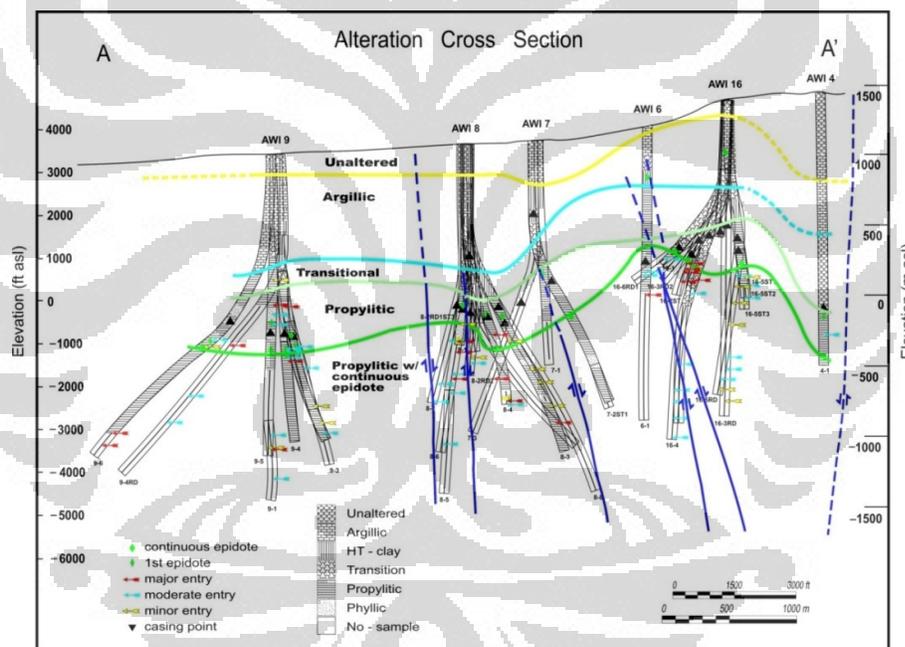


Gambar 3.4. Lokasi dan orientasi struktur permukaan di daerah Awibengkok. Diagram Rose yang menunjukkan orientasi rekahan (Stimac et al., 2008).

Baik orientasi patahan dan rekahan merupakan dominan kearah utara-timur laut, dengan tren barat laut dan timur-barat. Pendugaan slip pada patahan berdasarkan jarak variasi permukaan rekahan kecil yang semata-mata dari *dip-slip* (perpindahan normal) hingga pergerakan *strike-slip*.

1.6 Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal telah menghasilkan zona alterasi *argillic*, *propylitic*, dan *phyllic*; bukan zona alterasi argilik lanjutan yang telah diidentifikasi didalam reservoir temperature tinggi (Gambar 3.5). Sistem dilapisi oleh sebuah zona alterasi argilik yang didominasi oleh *smectite*, dengan pelengkap *pyrite*, *hematite*, *calcite*, *anhydrite* dan *zeolite* yang dibentuk pada temperatur kurang dari 180°C. Interval kedalaman secara khas mirip dengan alterasi yang memiliki resistivitas dibawah 10 Ω-m dan profil temperatur konduktif mengindikasikan bahwa permeabilitas sangat rendah. Hal tersebut telah sukses dipetakan melalui analisis cutting methylene blue dan difraksi sinar-X di sumur tertentu (Stimac et al., 2008).



Gambar 3.5. Penampang melintang A-A' (Gambar 1.2) menunjukkan distribusi batuan mineral. Patahan mungkin berperan dalam melokalisasi perubahan di elevasi top reservoir. (Stimac et al., 2008).

Alterasi hidrotermal menunjukkan transisi dari argillic hingga propylitic dengan peningkatan kedalaman. Zona transisi ini terdapat di rentang kedalaman hingga 300 meter, dan didominasi oleh campuran lapisan smectite-illite, chlorite, calcite, pyrite, titanite dan quartz. Didalam sumur Awi 1-2, peralihan batuan mineral bawah ini ditandai oleh tufa andesitic debu radioaktif setebal 20 meter

yang secara besar-besaran teralterasi hingga lapisan campuran illite-smectite dan *chlorite-smectite* seperti yang dijelaskan di atas. Hulen mengklasifikasikan batuan mineral sebagai *argillic-phyllic*. Karena kandungan smectite-nya tinggi, tampak tufa sudah teralterasi pada temperatur yang sangat rendah daripada yang diukur sekarang. Tufa lempung teralterasi ini bentuk sebuah *seal* yang menarik ke atas penampang reservoir yang teralterasi *propylitic*. Pada umumnya zona transisi memiliki konduktifitas hingga melemahnya gradien temperatur konvektif yang menandakan permeabilitas rendah ke sedang.

Zona alterasi propylitic didominasi oleh *epidote*, *illite*, kuarsa, dan klorit, tapi juga mengandung *albite*, *adularia*, *calcite*, *wairakite*, *pyrite*, *anhydrite* dan *titanite*. Alterasi batuan mineral ini bersesuaian dengan temperatur reservoir antara 240°C dan 270°C. Kejadian setengah matang garnet, *prehnite*, *biotite* dan *amphibole* terjadi pada level dalam yang menandakan pemisahan temperatur tertinggi di dekat intrusi batuan beku (>280°C untuk *amphibole*; 300°C untuk *biotite*). Alterasi *phyllic* terutama terdiri dari kuarsa, *sericite*, dan *pyrite* dengan sedikit *anhydrite*, klorit, dan *epidote* yang biasa di batuan silicic lainnya (*dacite* dan *rhyolite*). Alterasi batuan mineral ini bersesuaian dengan temperatur reservoir 260-290°C di lapangan lain.

Hubungan paragenetik di Awi 1-2 menandakan bahwa mineral sekunder terdahulu dibentuk *calcite* dan *anhydrite*, mungkin diendapkan dari formasi atau air uap panas dalam respon untuk memanaskan. Vein awal membedakan *calcite* yang kaya Fe \pm *hematite* yang kemudian memotong vein *calcite* dan *epidot* di Awi 18-1, tetapi secara umum batuan mineral ini tampak dibatasi ke sumur di dalam *steam cap* dangkal atau pada margin reservoir. Kebanyakan rekahan di sepanjang reservoir temperatur tinggi terdalam yang pada awalnya digaris dengan *epidote* \pm *pyrite*, diikuti oleh kombinasi variasi kuarsa, *calcite*, *adularia*, *pyrite*, dan *sericite* dengan sedikit *actinolite local*, *prehnite* dan kelompok garnet. Hulen mendokumentasikan munculnya vein *calcite-wairakite* di rekahan yang baru saja tercipta dan tanpa tersisa, diikuti oleh vein kuarsa-*epidot-sulfida* dan lapisan berupa lubang kecil di vein. Generasi yang lain *wairakite* yang kemudian diendapkan, diikuti oleh vein kuarsa-*epidot*, dan diakhiri *coarse, blocky, rhombic calcite*.

Paragenesis ini menyatakan siklus multipel rekahan dan menutupi reservoir dangkal sebelah timur, yang mungkin berhubungan dengan jarak dekatnya ke intrusi patahan menengah muda dan vulkanisme. Margin dekat sumur reservoir komersil (misalnya Awi 18) biasanya memiliki vein yang didominasi oleh *calcite*, *anhydrite*, atau *zeolite* yang menandakan pendinginan fluida, dan menutupi margin reservoir. Vein *calcite* tertutup juga merupakan basement sedimen Miocene yang melimpah secara lokal di semua sumur dalam. Dimana beberapa memotong *stylolite* dan karenanya mungkin mendahului aktivitas hidrotermal.

Bukti cakupan fluida dari sumur Awi 1-2 menandakan bahwa beberapa *calcite* awalnya sekitar 270°C dari fluida saline (sama dengan 16-18 wt.% NaCl), yang mungkin asalnya magmatik dan berasal dari sill kuarsa *diorite*. Breksi hidrotermal biasanya disemen oleh kombinasi variasi kuarsa, wairakite, epidot, klorit, *pyrite*, dan fase minor lainnya. Wairakite ini sangat berlimpah didalam semen breksi dan nampak berperan besar untuk mengikat permeabilitasnya.

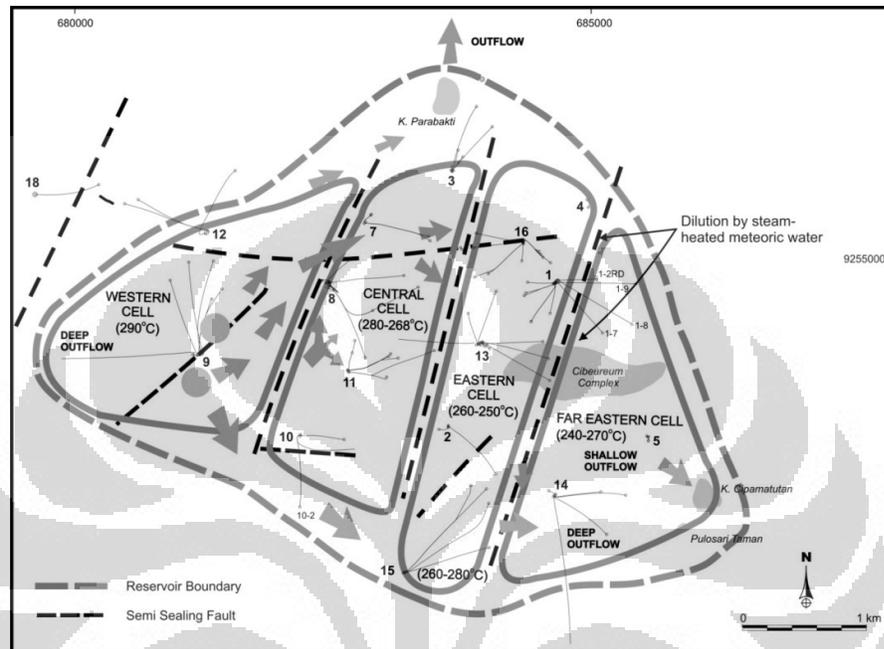
1.7 Temperatur Reservoir dan Geokimia Fluida

Awibengkok merupakan sistem geothermal yang didominasi liquid dengan fluida kimia yang ramah. Pada kondisi yang sama, salinitas fluida kurang lebih 1,3 wt.% dan mengandung gas tanpa penguapan (*non-condensable gas* (NCG)) < 0.4 wt.% kecuali untuk zona terdangkal (Stimac et al., 2008).

Lebih penting untuk eksploitasi, sistem geothermal pada gradient tekanan yang akan mendorong deretan liquid hingga pada elevasi sekitar 800 meter dpl, tetapi di bawah tekanan dengan dengan deretan liquid dari permukaan tanah sumur sebelah timur (Awi 1, 13, 16, dan 4) di 1300 meter dpl. Temperatur reservoir seluruhnya di dalam liquid fase tunggal namun mencapai kondisi dua fase pada 560 meter dpl di area Awi 1. Ini dihasilkan dalam pengembangan steam cap yang relatif kaya gas di bagian terdangkal reservoir yang mulai dieksploitasi.

Variasi halus di dalam kimia fluida memungkinkan lapangan untuk dibagi lebih kecil lagi menjadi empat sektor yang berbeda atau “cell” yang seperti dibatasi oleh patahan. Empat sektor tersebut diistilahkan dengan sel Barat (*Western Cell*), Tengah (*Central Cell*), Timur (*Eastern Cell*) dan Timur Jauh (*Far*

Eastern Cell) seperti terlihat pada Gambar 3.6. beberapa karakteristik kimiawi fluida yang diproduksi dari sektor ini dan margin lapangan telah diringkas di Stimac dan Sugiaman (2000).



Gambar 3.6. Peta sektor reservoir geothermal Awibengkok. Lapangan dapat dibagi menjadi empat sektor dengan temperatur yang berbeda, tanda kimiawi fluida, dan pola kembali tracer (Stimac et al., 2008). Patahan dan rekahan ditunjukkan pada Gambar 3.3 yang menjadi peran utama dalam menentukan batas-batas sektor. Arah panah menandakan arah umum aliran fluida dibawah kondisi alami (sebelum eksploitasi).

Sel Barat, yang mencakup sumur Awi 9, memiliki temperatur terukur tertinggi yang sama (290-312°C), dimana geotermometer NaKCa dan kuarsa secara berurutan ditemukan temperatur hingga 316 dan 280°C. Konsentrasi klorida yang sama adalah 6200 ppm, sedangkan komposisi gas dikurangi dalam H₂, CH₄, dan Ar serta diperkaya CO₂ dan H₂S yang dibandingkan untuk menandakan daerah ini adalah upflow fluida dalam.

Sel Pusat dicirikan oleh sumur di area blok pemboran Awi 7, 8, 10 dan 11, dimana konsentrasi klorida awal berkisar antara 6500 dan 6900 ppm. Temperatur terukur awal dari 270 dan 280°C., sedangkan geotermometer NaKCa dan kuarsa secara berurutan menemukan temperature 260 dan 280°C. Dibandingkan dengan Sel Barat, sel ini memiliki kandungan klorida dan gas yang

rendah. Lebih-lebih pemodelan kimiawi menyatakan bahwa gas Sel Pusat yang sama diperkaya H_2S dan NH_3 dan relatif dikurangi H_2 ke sel yang lain. Semua ciri khas ini menyatakan bahwa Sel Pusat telah mengalami kehilangan gas akibat emisi fumarol dalam jangka panjang dan berhubungan dengan pendidihan. Outflow dalam ke utara blok Awi 3 didukung oleh perluasan anomali resistivitas rendah dan distribusi termal permukaan (Gambar 3.1a).

Sel Timur, membandingkan bagian terdangkal reservoir Awibengkok mencakup banyak sumur pada blok Awi 1, 2, 13 dan 16 (Gambar 3.5). Bagian lapangan ini dikemukakannya dengan temperatur awal 250 hingga 260°C, kecuali di selatan jauh (sumur Awi 15) dimana top reservoir terdalam dengan temperatur awal dari 260 hingga 270°C. Sel Timur diawali dengan ciri pencairan (Cl dari 5100 ke 6400 ppm) dan konsentrasi NCG tertinggi relatif bersumber pada Sel Pusat dan Barat.

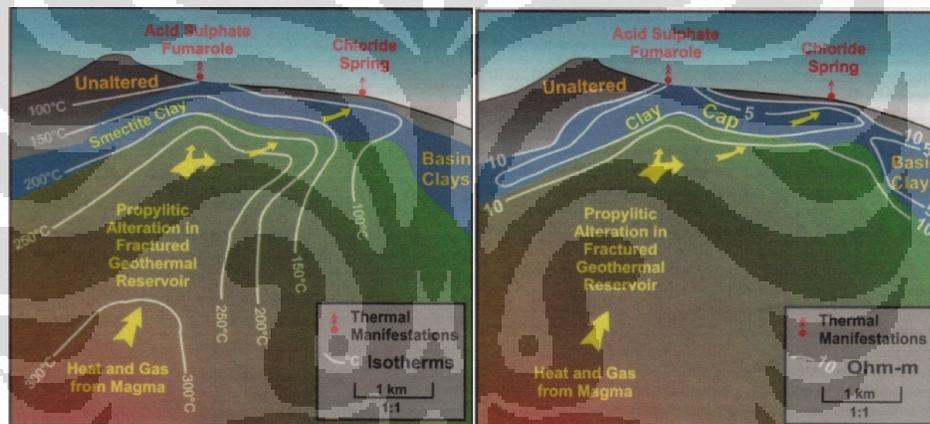
Pola pencairan berjalan dari utara-timur laut lokasi Awi 16 hingga Awi 13, menyatakan di meteorik Sel Timur atau air uap panas merupakan zona struktur sama yang melandai di lokasi aktivitas vulkanik dan hidrotermal cenderung ke utara-timur laut. Kalkulasi keseimbangan massa memperlihatkan bahwa kandungan fluida temperatur rendah ini relatif memiliki konsentrasi Mg yang tinggi dan berarti banyak mengandung SO_4^{2-} , HCO_3^- dan NH_3 . NCG tertinggi didalam sel ini merupakan fitur yang berhubungan dengan top reservoir terdangkal. Selama evolusi reservoir, didalam bagian sistem terdangkal ini diakumulasi gas akibat pendidihan dan pengembunan. Produktif steam cap dibentuk di dalam area ini dalam respon untuk meningkatkan penarikan massa yang dimulai pada tahun 1997. Konsentrasi NCG jelas tertinggi dan variabel lain di *steam cap* daripada didalam reservoir liquid, bervariasi dari 0,5 hingga 10 wt.% di sumur terpisah. Sumur-sumur didominasi oleh masuknya fluida dangkal didekat lokasi aliran pendingin yang mengandung NCG tertinggi berkat peningkatan kondensasi dan akumulasi gas.

Sel Timur Jauh ditegaskan dengan pengeboran sumur di timur blok Awi 1, yang jelas melintang utara-timur laut patahan Awi dan Cibereum. Sumur-sumur di sini (Awi 14, 5, 1-2RD, 1-7, 1-8 dan 1-9) memiliki temperatur sangat tinggi di bagian terdalamnya daripada Sel Timur yaitu sampai 270°C.

Bagaimanapun, seperti margin lapangan lain sel ini menunjukkan beberapa pengaruh pada margin sedalam air tersaturasi air bawah tanah. Sumur Awi 5 dan Awi 14 relatif memiliki konsentrasi klorida yang tinggi dan temperatur geotermometer terendah menandakan bahwa aliran fluida keluar sistem geothermal dididihkan ke arah tenggara.

3.8 Model Konseptual

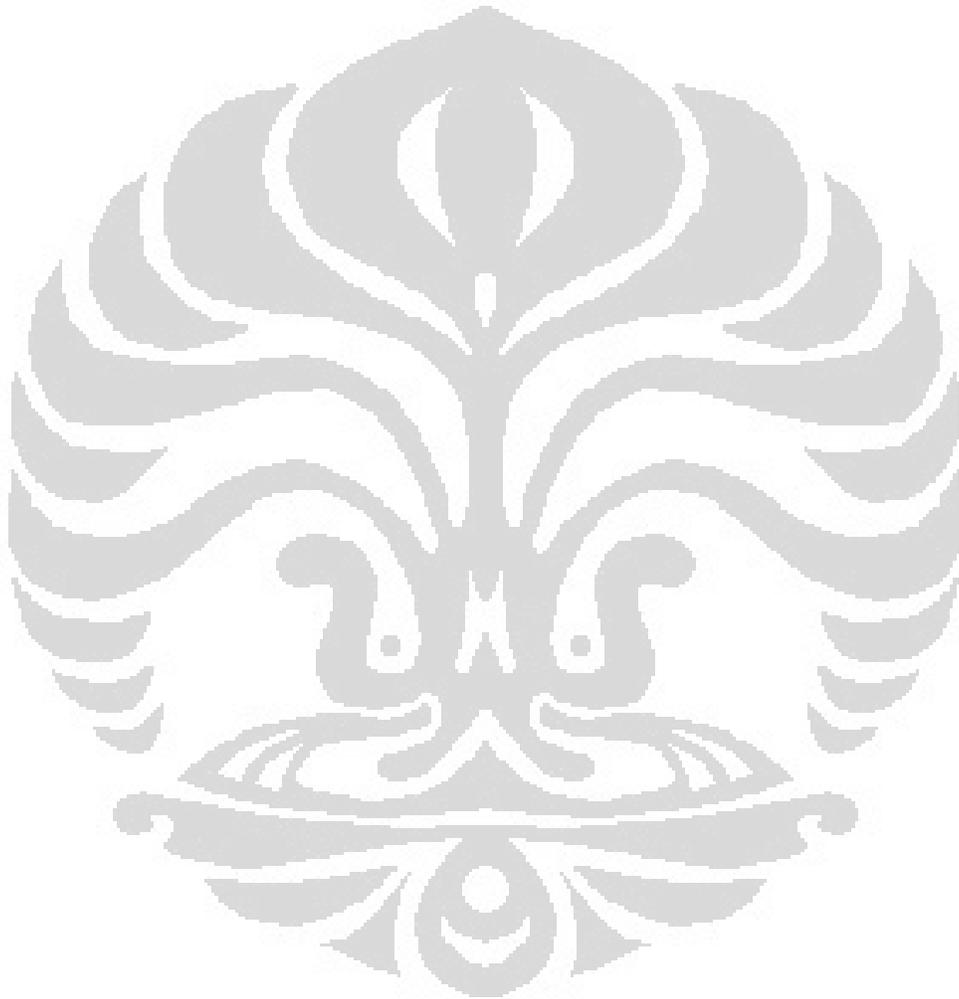
Pola aliran fluida di dalam sistem geothermal Awibengkok sudah disimpulkan melalui analisis regional dan geologi lokal dan data geofisika, tren temperature awal dan tekanan sumur, resistivitas dan pola alterasi batuan, orientasi patahan dan rekahan dan densitas, tekanan sumur, entalpi dan riwayat kimia fluida selama produksi, distribusi mikroseismik.



Gambar 3.7. Konseptual distribusi temperatur, alterasi smectite dan resistivitas listrik untuk jenis sistem geothermal vulkanik. Geometri lapisan dasar dan atas low-resistivity dapat mengestimasi lokasi reservoir geothermal secara baik. Tanda panah menunjukkan aliran fluida panas seluruh sistem (Stimac et al, 2008).

Upflow fluida panas di Awibengkok terlihat dikendalikan oleh intrusi dalam sepanjang timur-barat tren Busur Sunda Vulkanik. Pada level dangkal sistem geothermal, upflow fluida panas berada di sepanjang utara hingga timur laut mengikuti patahan. Data keadaan awal temperatur dan tekanan sumur, menunjukkan puncak reservoir dalam berada di Sel Barat dan Tengah dan puncak reservoir dangkal di Sel Timur (Gambar 3.6). Berdasarkan temperatur sumur dan geokimia fluida, disimpulkan bahwa upflow dalam terjadi di Sel Barat dan di

sepanjang margin barat Sel Pusat. Fluida naik ke bagian terdangkal reservoir berada di Sel Timur dan mendidih di bawah kompleks fumarol Cibeureum. Bagian aliran fluida terdidihkan di kedalaman dangkal menuju Awi 5, sebagian pindah ke dalam area Awi 14.



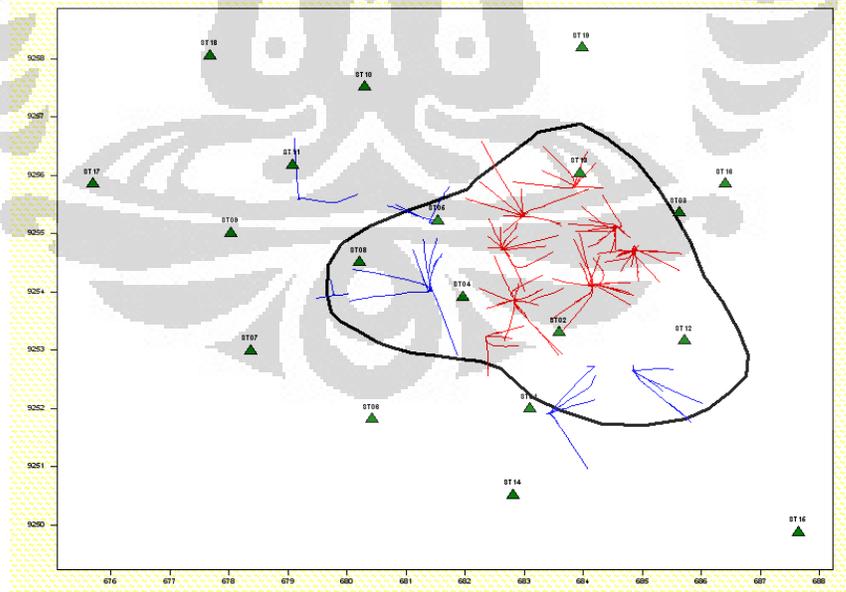
BAB IV AKUISISI DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Akuisisi Data

Pada bab ini akan dibahas mengenai akuisisi untuk pengamatan mikroseismik di lapangan yang dilakukan oleh alat mikroseismik dan disebar disekitar daerah yang akan diamati. Bab ini juga menjelaskan bagaimana persebaran dari stasiun-stasiun perekaman mikroseismik, prinsip kerja alatnya serta waktu pengambilan data.

4.1.1 Persebaran Stasiun Perekaman Mikroseismik

Perekaman gempa mikro di lapangan geothermal Salak dilakukan dengan memasang beberapa stasiun mikroseismik pada titik pengamatan yang telah ditentukan. Stasiun mikroseismik yang dipasang berjumlah 19 buah. Dalam penggunaannya, hanya akan mengaktifkan stasiun-stasiun yang berada dekat dengan daerah yang menjadi objek pengamatan. Pada Gambar 3.1, dapat dilihat persebaran dari stasiun-stasiun perekaman mikroseismik.



Gambar 4.1. Persebaran stasiun perekaman mikroseismik (segitiga hijau). Juga dapat dilihat batas reservoir (garis hitam tebal) dan sumur-sumur injeksi (garis biru) dan produksi (garis merah).

Sejak April 2005, stasiun mikroseismik yang diaktifkan hanya 10 buah stasiun. Hal ini dikarenakan pengamatan mikroseismik hanya difokuskan ke lapangan Awibengkok sebelah barat. Sehingga stasiun yang diaktifkan juga lebih dominan yang berada di bagian tersebut (Wibowo et al., 2010).

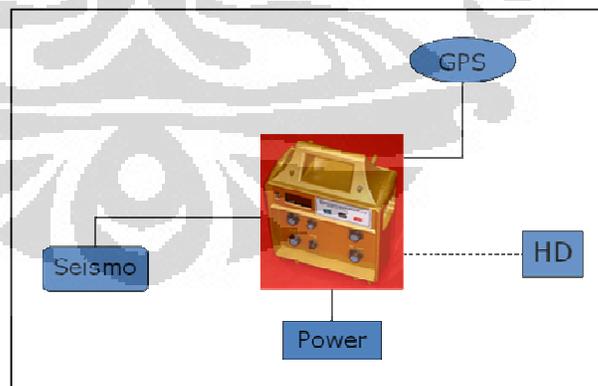
4.1.2 Pengambilan Data Mikroseismik

Setelah dilakukannya penempatan stasiun-stasiun perekaman mikroseismik, maka dilakukan pengambilan data berdasarkan prinsip kerja alat dan waktu pengambilan datanya. Pada prinsip kerja alat akan dijelaskan komponen-komponen yang mendukung kinerja dari setiap stasiun perekaman. Selain itu juga menjelaskan waktu pengambilan data.

4.1.2.1 Prinsip Kerja Alat

Proses pengambilan data dilakukan dengan menggunakan alat MEQ yaitu *SMART-24D* yang diproduksi oleh *Geotech*. Adapun beberapa komponen yang digunakan di setiap stasiun yang diinstal di lapangan (Gambar 4.2), yaitu:

1. Seismometer
2. GPS
3. Hardisk
4. Power



Gambar 4.2. Komponen yang digunakan dalam setiap stasiun MEQ.

Masing-masing dari setiap komponen tersebut memiliki fungsi yang berbeda-beda. Seismometer berfungsi untuk mendeteksi dan merekam setiap gempa mikro yang terjadi di sekitar daerah pengamatan. *Global Positioning System* (GPS) berfungsi untuk posisi gempa mikro yang terekam oleh seismometer. *Hardisk* berfungsi untuk menyimpan semua data yang sudah terekam oleh Seismometer dan GPS. *Power* berfungsi untuk menyalakan serta menjaga alat agar tetap dalam keadaan aktif selama melakukan pengamatan di lapangan.

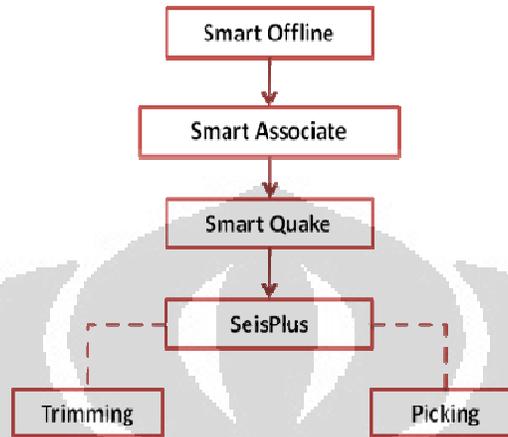


Gambar 4.3. Salah satu stasiun perekaman mikroseismik yang telah dipasang di lapangan. Dapat dilihat adanya seismometer, sumber listrik dari aki, kabel penghubung, dan GPS.

Di dalam akuisisi data terdapat tahapan-tahapan yang dilakukan setelah diperolehnya data pengamatan dari lapangan. Beberapa tahapan-tahapan yang dilakukan dapat dilihat pada tata alir akuisisi pada Gambar 4.4.

Adapun maksud dari dilakukannya tahapan-tahapan tersebut. Tahapan *SMARTOffline* bertujuan untuk mengambil data *trace file* dari perangkat hardisk atau men-download data ke komputer. Tahapan *SMARTAssociate* bertujuan untuk menggabungkan *wave-form* berdasarkan waktunya menggunakan informasi waktu

kejadian gempa dan mempersiapkannya untuk dianalisa oleh *SMARTQuake*. Tahapan *SMARTQuake* bertujuan untuk menganalisa *wave-form* untuk kejadian gempa.



Gambar 4.4. Tata alir akuisisi data.

Pada tahapan *SeisPlus* dilakukan 2 hal yaitu *trimming* dan *picking*. *Trimming* dilakukan dengan tujuan untuk memisahkan gempa regional dan gempa lokal dari *wave form* yang sudah diperoleh. *Picking* dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh data yang lebih akurat mengenai posisi titik gempa dengan melakukan *picking* gelombang P dan gelombang S.

4.1.2.2 Waktu Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data mikroseismik yang telah terekam dari tahun 2005 hingga 2009. Pengamatan mikroseismik dilakukan dengan merekam aktivitas gempa secara kontinu yaitu selama 24 jam penuh. Pengambilan datanya dilakukan secara otomatis oleh seismometer yang terpasang di setiap stasiun yang diinstal di daerah pengamatan. Waktu pengambilan data dilakukan setiap 30 detik.

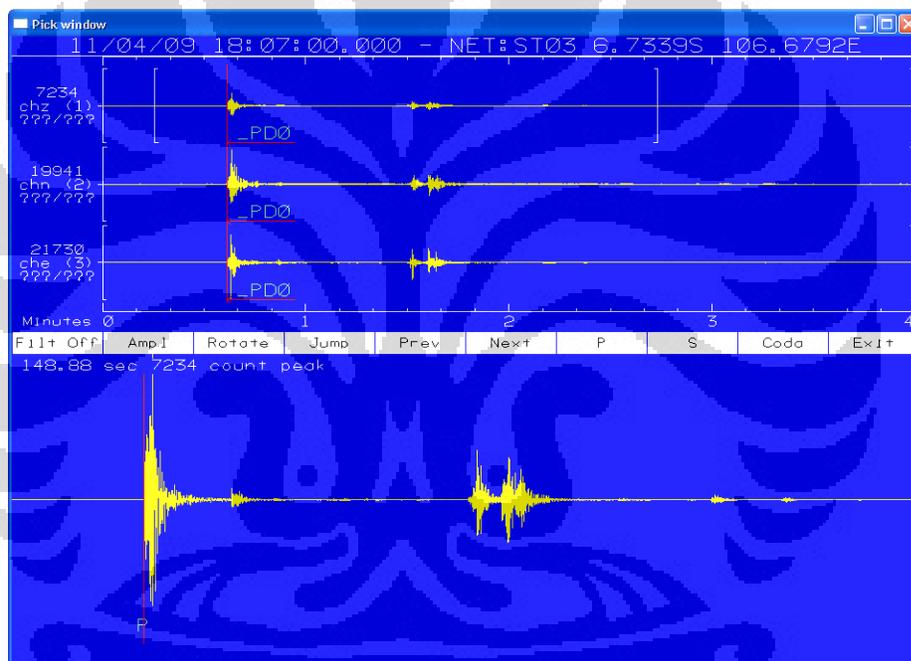
4.2 Pengolahan Data

Pada bagian pengolahan data akan dapat diketahui bentuk data sebelum diprolehnya hasil yang dapat menginterpretasikan delineasi zona rekahan. Dalam

tahapan pengolahan data terdapat dua hal yang penting untuk dilakukan yaitu *trimming* dan *picking*.

4.2.1 Bentuk Data Sebelum Pengolahan

Setelah dilakukan pengukuran atau pengamatan di lapangan maka akan diperoleh data yang terekam oleh seismometer dan tersimpan di dalam sebuah *hardisk* yang dipasang di setiap stasiun pengukuran. Adapun data yang diperoleh tersebut berupa *wave form (trace files)*. Sebagai contoh pada Gambar 4.5, ini merupakan data pengukuran yang telah diperoleh dari lapangan.



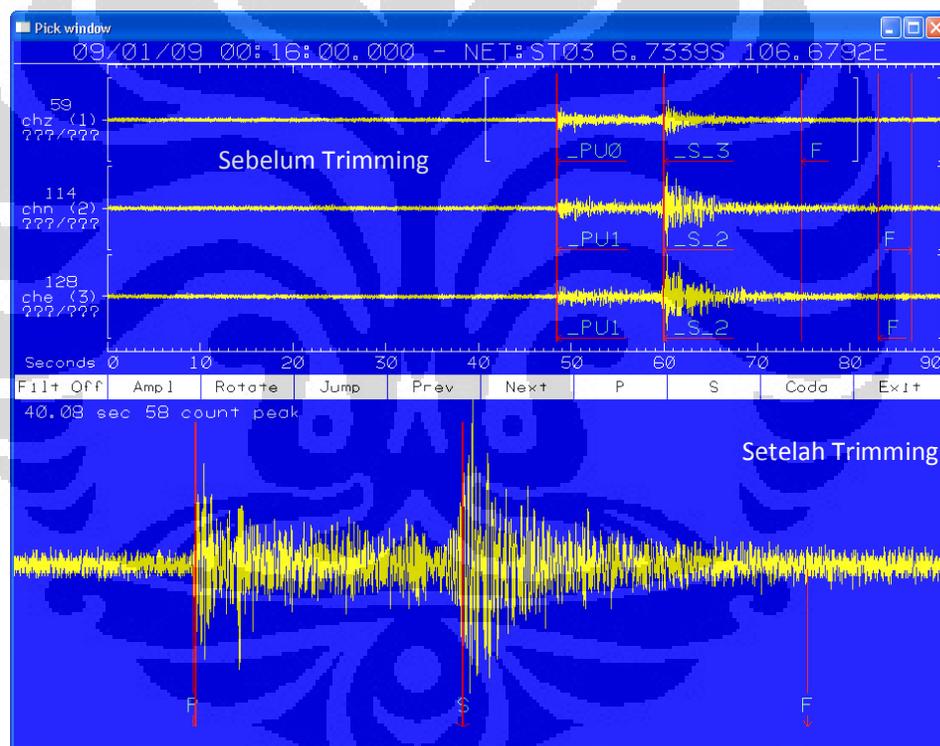
Gambar 4.5. Bentuk data yang diperoleh dari lapangan (amplitudo vs waktu).

Berdasarkan Gambar 4.5 dapat dilihat telah terekam beberapa even gempa dengan frekuensi yang berbeda-beda. Maka pada saat nanti dilakukan pengolahan data maka data inilah yang diproses untuk memperoleh posisi dari episenter gempa secara akurat.

4.2.2 Trimming

Proses selanjutnya setelah kita memperoleh data lapangan adalah melakukan trimming. *Trimming* dilakukan untuk memperkecil besarnya data lapangan yang telah diperoleh. Atau tujuan lain dari trimming adalah untuk memisahkan antara noise, gempa regional, dan gempa lokal.

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat data sebelum dan sesudah dilakukan trimming. Terlihat bahwa sebelum dilakukan trimming datanya masih mengandung banyak noise atau data yang tidak diperlukan. Sedangkan setelah dilakukan *trimming* datanya terlihat menjadi lebih kecil dan terfokus pada data yang diinginkan atau diperlukan untuk tahapan pemrosesan berikutnya.



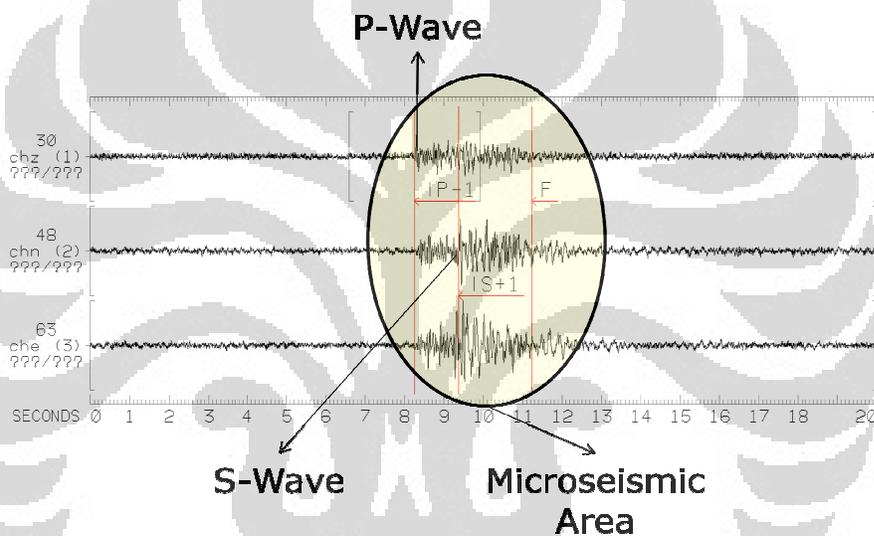
Gambar 4.6. Data sebelum dan sesudah dilakukan *trimming* (amplitudo vs waktu). Proses sebelum dilakukan trimming dapat dilihat pada gambar yang di atas dan setelah trimming pada gambar yang di bawah.

4.2.3 Picking

Selanjutnya dilakukan tahapan picking. Pada tahapan ini dilakukan picking gelombang yaitu terhadap gelombang P dan gelombang S. Picking gelombang P dilakukan untuk mengetahui waktu pertama kali terjadinya gempa.

Sedangkan picking gelombang S dilakukan untuk mengetahui posisi dan jarak gempa.

Pada dasarnya picking gelombang-P dilakukan pada gelombang yang mengalami perubahan frekuensi lebih dulu dan memiliki waktu perambatan yang relatif singkat. Sehingga gelombang P merupakan gelombang seismik yang pertama kali terekam oleh seismometer. Dan untuk picking gelombang S dilakukan pada gelombang yang mengalami perubahan frekuensi setelah gelombang P mengalami pelemahan frekuensi. Karena hal tersebut, maka gelombang-S merupakan gelombang kedua yang terekam setelah gelombang P.



Gambar 4.7. Area mikroseismik (lingkaran hitam) yang meliputi gelombang-P dan gelombang-S.

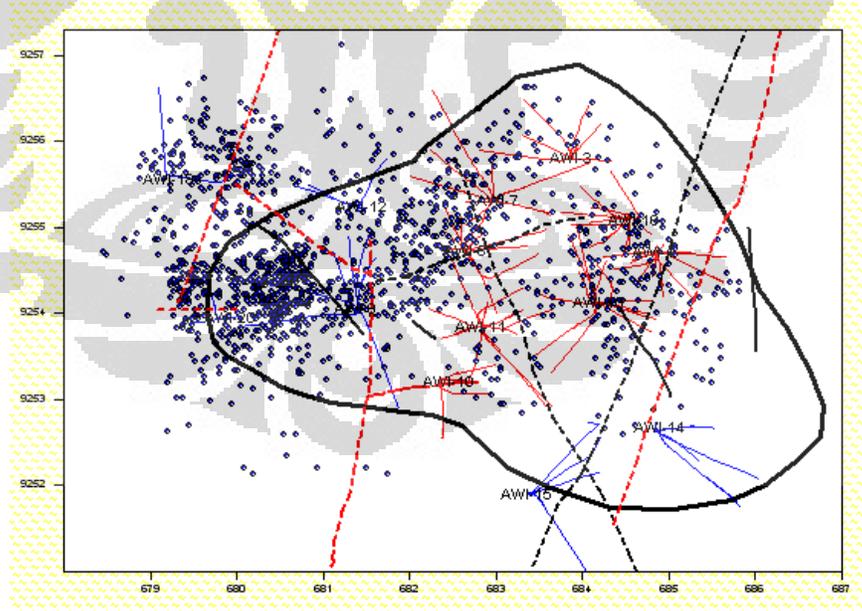
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Peta Episenter

Pada bab ini dilakukan interpretasi terhadap peta episenter yang telah diperoleh dari pengolahan data. Interpretasi dilakukan terhadap beberapa hasil, yaitu peta episenter dengan nilai magnitudo kurang dari 1 M, nilai magnitudo dengan kisaran antara 1 hingga 2,4 M, nilai magnitudo lebih dari dan sama dengan 2,5 M serta episenter secara keseluruhan gempa mikro yang terjadi. Peta episenter ini diperoleh dengan menggunakan program *WinGLink* yang sudah disediakan oleh *Chevron* untuk penelitian ini.

5.1.1 Peta Episenter Dengan Nilai Magnitudo < 1 SR

Pembuatan peta episenter gempa mikro ini bertujuan untuk mengetahui persebaran dari semua even gempa yang terjadi di daerah penelitian selama dilakukannya pengamatan. Persebaran gempa mikro ini terlihat sebagai peta gempa. Dimana posisi gempa diproyeksikan ke bidang datar horisontal.

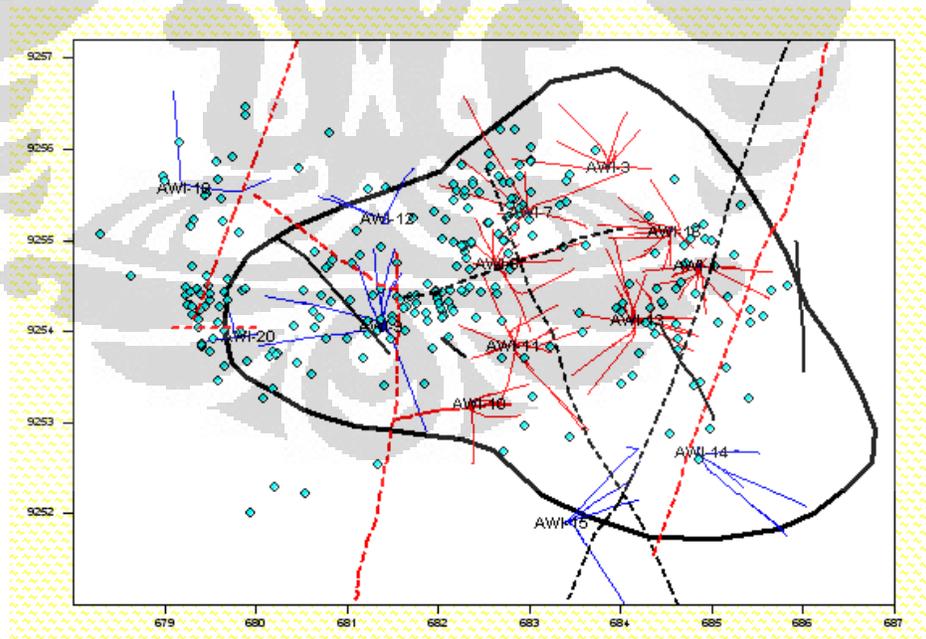


Gambar 5.1. Peta episenter dengan nilai magnitudo < 1 SR. Dapat dilihat struktur-struktur utama yang berada di daerah Awibengkok (garis putus-putus hitam dan merah), sumur produksi (garis padat merah) dan sumur produksi (garis padat biru) serta batas reservoir (garis hitam tebal).

Dari peta episenter seperti yang terlihat pada gambar 5.1, even gempa terkecil yang telah terekam memiliki nilai magnitudo sebesar -0,7 SR dan terbesar memiliki nilai magnitudo sebesar 0,9 SR. Nilai magnitudo tersebut tidak ada yang memberikan pengaruh besar pada permukaan. Peta distribusi (Gambar 5.1) tersebut menandakan bahwa untuk gempa secara dominan berada di sebelah barat Awibengkok. Dan berada di sekitar sumur-sumur injeksi seperti Awi 9, 18, dan 20. Sehingga diduga penyebab dari munculnya gempa-gempa tersebut adalah akibat dari aktivitas injeksi yang terjadi pada sumur-sumur tersebut.

5.1.2 Peta Episenter Dengan Nilai Magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR

Dari peta episenter seperti yang terlihat pada Gambar 5.2, even gempa terkecil yang telah terekam memiliki nilai magnitudo sebesar 1 SR dan terbesar memiliki nilai magnitudo sebesar 2,5 SR. Nilai magnitudo tersebut relatif tidak ada yang memberikan pengaruh besar pada permukaan, namun dapat terdeteksi oleh seismometer yang terpasang pada stasiun perekaman. Dimana posisi gempa diproyeksikan ke bidang datar horisontal.

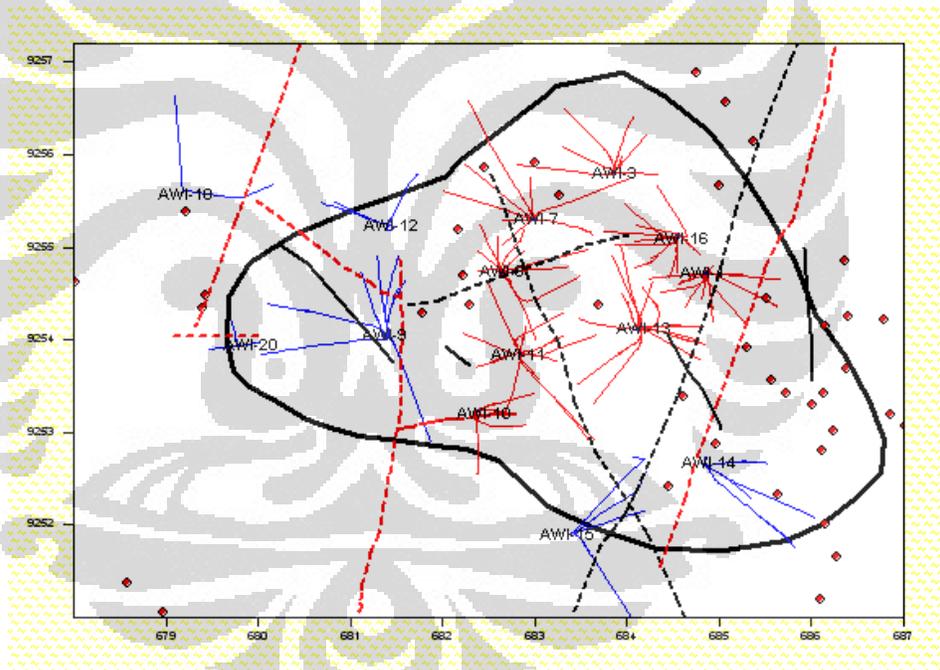


Gambar 5.2. Peta episenter dengan nilai magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR. Dapat dilihat struktur-struktur utama yang berada di daerah Awibengkok (garis putus-putus hitam dan merah), sumur produksi (garis padat merah) dan sumur produksi (garis padat biru) serta batas reservoir (garis hitam tebal).

Peta distribusi (Gambar 5.2) tersebut menunjukkan bahwa gempa secara dominan berada di sebelah barat Awibengkok dan berada di dekat sumur injeksi 9, 18 dan 20. Mekanisme gempa yang diduga terjadi adalah akibat aktivitas sumur injeksi ketika menginjeksikan fluida dalam jumlah besar sehingga memicu terjadinya gempa-gempa mikro di bawah permukaan.

5.1.3 Peta Episenter Dengan Nilai Magnitudo $\geq 2,5$ SR

Dari peta episenter seperti yang terlihat pada gambar 5.3, even gempa terkecil yang telah terekam memiliki nilai magnitudo sebesar 2,5 SR dan terbesar memiliki nilai magnitudo sebesar 3,6 SR. Dimana posisi gempa tersebut diproyeksikan ke bidang datar horisontal.



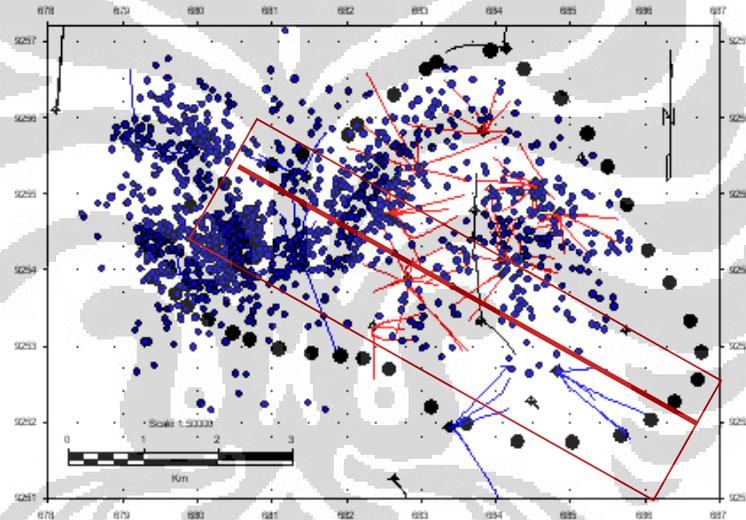
Gambar 5.3. Peta episenter dengan nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR. Dapat dilihat struktur-struktur utama yang berada di daerah Awibengkok (garis putus-putus hitam dan merah), sumur produksi (garis putus-putus merah) dan sumur injeksi (garis putus-putus biru) serta batas reservoir (garis hitam tebal).

Persebaran even gempa mikro dengan nilai magnitudo besar di lapangan ini terlihat lebih banyak terjadi disebelah timur. Dimana even-even tersebut terjadi di sekitar manifestasi permukaan yang masih sangat aktif dan selalu terdeteksi

adanya aktivitas seismik yaitu pada kompleks Cibereum (lihat gambar 1.3). Dimana pada kompleks tersebut banyak terdapat manifestasi berupa fumarol, mata air panas (*hot spring*) dan rembesan gas (*gas seep*). Khususnya dengan keberadaan fumarol di kompleks tersebut dapat diketahui bahwa daerah itu memiliki tekanan yang besar dari dalam reservoir.

5.2 Penampang Melintang

Pada bab ini dilakukan interpretasi terhadap penampang cross section. Dimana penarikan garis cross section tersebut ditentukan berdasarkan daerah yang akan diteliti. Cross section ditarik dari arah barat-laut (NW) hingga tenggara (SE). Seperti yang terlihat pada gambar 5.4.

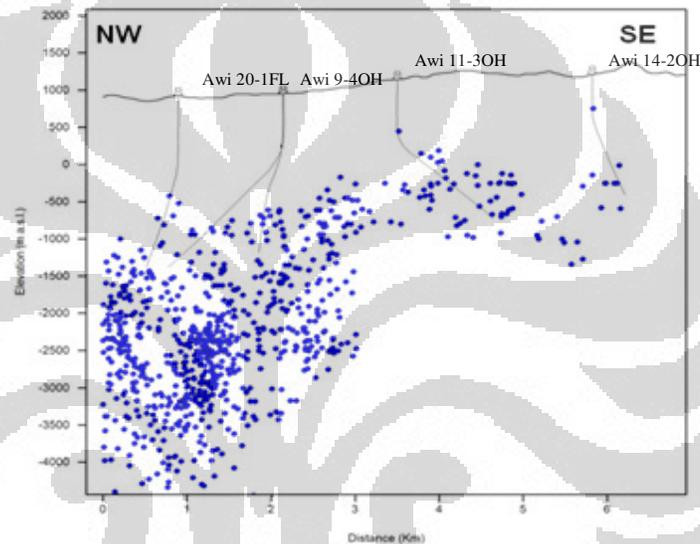


Gambar 5.4. Peta episenter dengan garis profil cross section yang mengarah ke barat laut-tenggara (kotak berwarna merah). Juga dapat dilihat even mikroseismik (bulatan padat berwarna biru), posisi sumur produksi (garis padat merah) dan sumur produksi (garis padat biru), batas reservoir (bulatan padat berwarna hitam).

Penentuan *cross section* kearah tersebut adalah untuk melihat pengaruh atau penyebab terjadinya gempa mikro di lapangan Awibengkok. Dimana garisnya melintang melewati sumur-sumur injeksi seperti Awi 18, 12, 20, 9, 15 dan 14. Penarikan garis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari aktivitas sumur-sumur tersebut terhadap kemunculan gempa-gempa mikro di dalam reservoir geothermal Awibengkok.

5.2.1 Penampang Melintang Dengan Nilai Magnitudo < 1 SR

Dari penampang seperti yang terlihat pada gambar 5.6, dapat dilihat bahwa even-even gempa dengan nilai magnitudo kurang dari 1 SR banyak terjadi tepat di bawah sumur injeksi Awi 20 dan Awi 9. Berdasarkan keberadaannya tersebut dapat dikatakan bahwa banyaknya even gempa yang terjadi lebih banyak dipengaruhi oleh aktivitas sumur injeksi tersebut. Even-even gempa mikro yang membentuk suatu *cluster* dimulai pada kedalaman -1000 hingga -4000 m dpl.



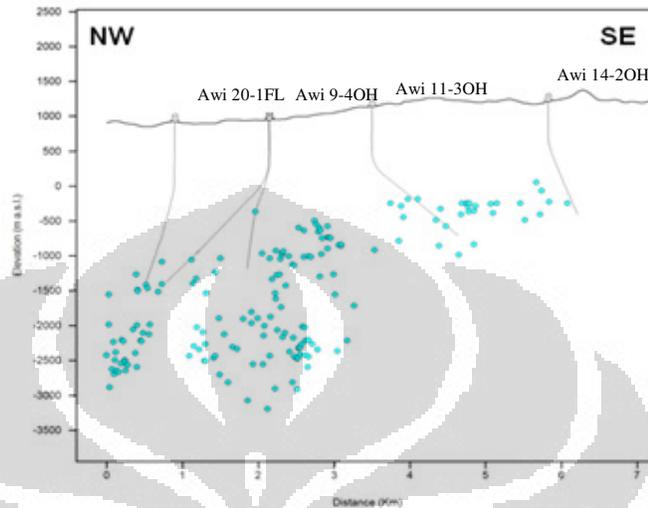
Gambar 5.5. Penampang melintang untuk nilai magnitudo < 1 SR (bulatan biru). Terlihat penetrasi sumur-sumur yang dilalui oleh profil cross section. Dari barat laut tenggara Awi 20-1FL (sumur injeksi), 9-4RD1ST1 dan 9-4OH (sumur injeksi), 11-7ST1 (sumur produksi) dan 14-2OH (sumur injeksi).

Pengaruh dari aktivitas injeksi fluida dalam jumlah yang besar dan memiliki tekanan yang besar pula. Hal ini memicu suatu lapisan pada reservoir geothermal untuk bergerak akibat dorongan dari fluida yang diinjeksikan dari pipa ke dalam reservoir geothermal.

5.2.2 Penampang Melintang Dengan Nilai Magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR

Dari penampang seperti yang terlihat pada gambar 5.6, dapat dilihat bahwa even-even gempa dengan nilai magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR juga banyak terjadi di bawah sumur injeksi Awi 20 dan Awi 9. Berdasarkan

keberadaannya tersebut dapat dikatakan bahwa banyaknya even gempa yang terjadi lebih banyak dipengaruhi oleh aktivitas sumur injeksi tersebut.



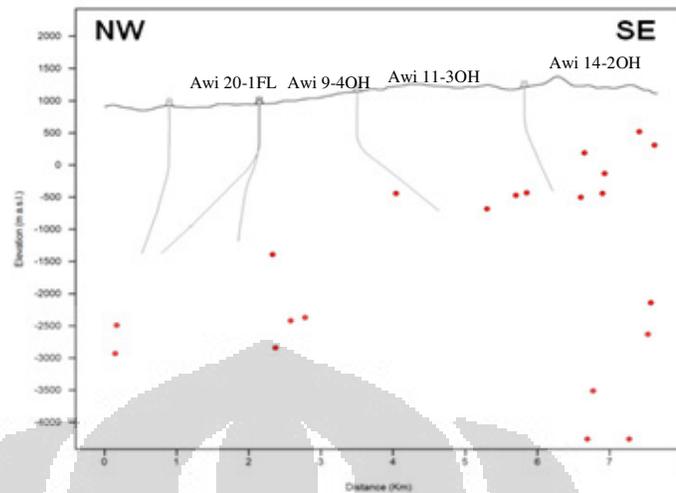
Gambar 5.6. Penampang melintang untuk nilai magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR (bulatan biru muda). Terlihat penetrasi sumur-sumur yang dilalui oleh profil cross section. Dari barat laut tenggara Awi 20-1FL (sumur injeksi), 9-4RD1ST1 dan 9-4OH (sumur injeksi), 11-7ST1 (sumur produksi) dan 14-2OH (sumur injeksi).

Pengaruh dari aktivitas injeksi fluida dalam jumlah yang besar dan memiliki tekanan yang besar pula. Sehingga memicu terjadi gempa mikro akibat aktivitas injeksi tersebut. Nilai magnitudo yang terjadi relatif kecil.

5.2.3 Penampang Melintang Dengan Nilai Magnitudo $\geq 2,5$ SR

Dari penampang seperti yang terlihat pada gambar 5.7, dapat dilihat bahwa jarang terjadi gempa. Hal ini mungkin pengaruh dari lithologi batuan yang terdapat di sebelah timur yaitu terdiri dari batuan andesit (batuan beku) yang merupakan batuan yang kompak dan kokoh sehingga tidak mudah terpengaruh oleh aktivitas sumur.

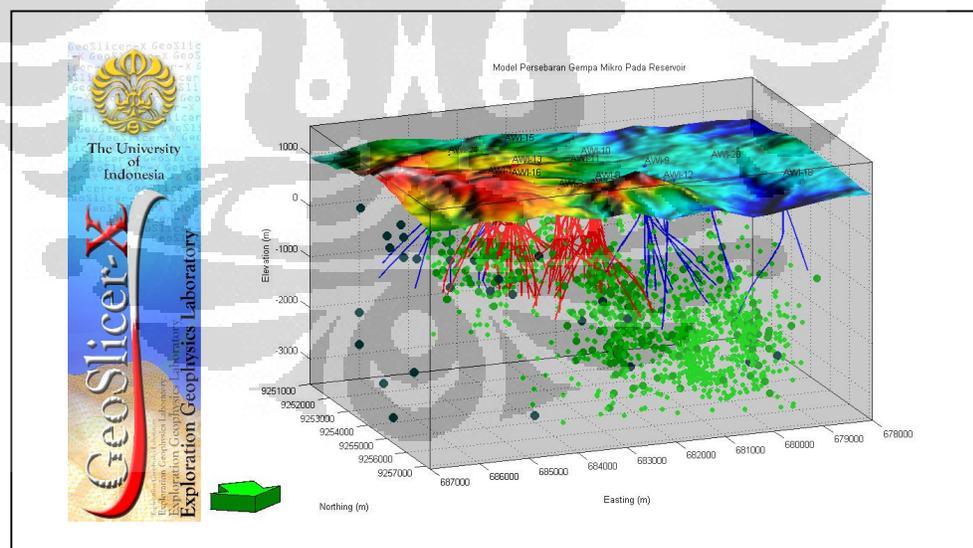
Keberadaan manifestasi-manifestasi tersebut juga berada di dekat struktur utama lapangan Awibengkok yaitu *Cibeureum Fault*. Hal inilah yang dapat memperkuat pendugaan bahwa even gempa terjadi karena adanya aktivitas pada manifestasi-manifestasi dan struktur tersebut.



Gambar 5.7. Penampang cross section untuk nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR (bulatan merah). Terlihat penetrasi sumur-sumur yang dilalui oleh profil cross section. Dari barat laut tenggara Awi 20-1FL (sumur injeksi), 9-4RD1ST1 dan 9-4OH (sumur injeksi), 11-7ST1 (sumur produksi) dan 14-2OH (sumur injeksi).

5.3 Model Persebaran Mikroseismik

Pembuatan model persebaran gempa mikro dilakukan menggunakan *software Geoslicer-X* (Gambar 5.8).



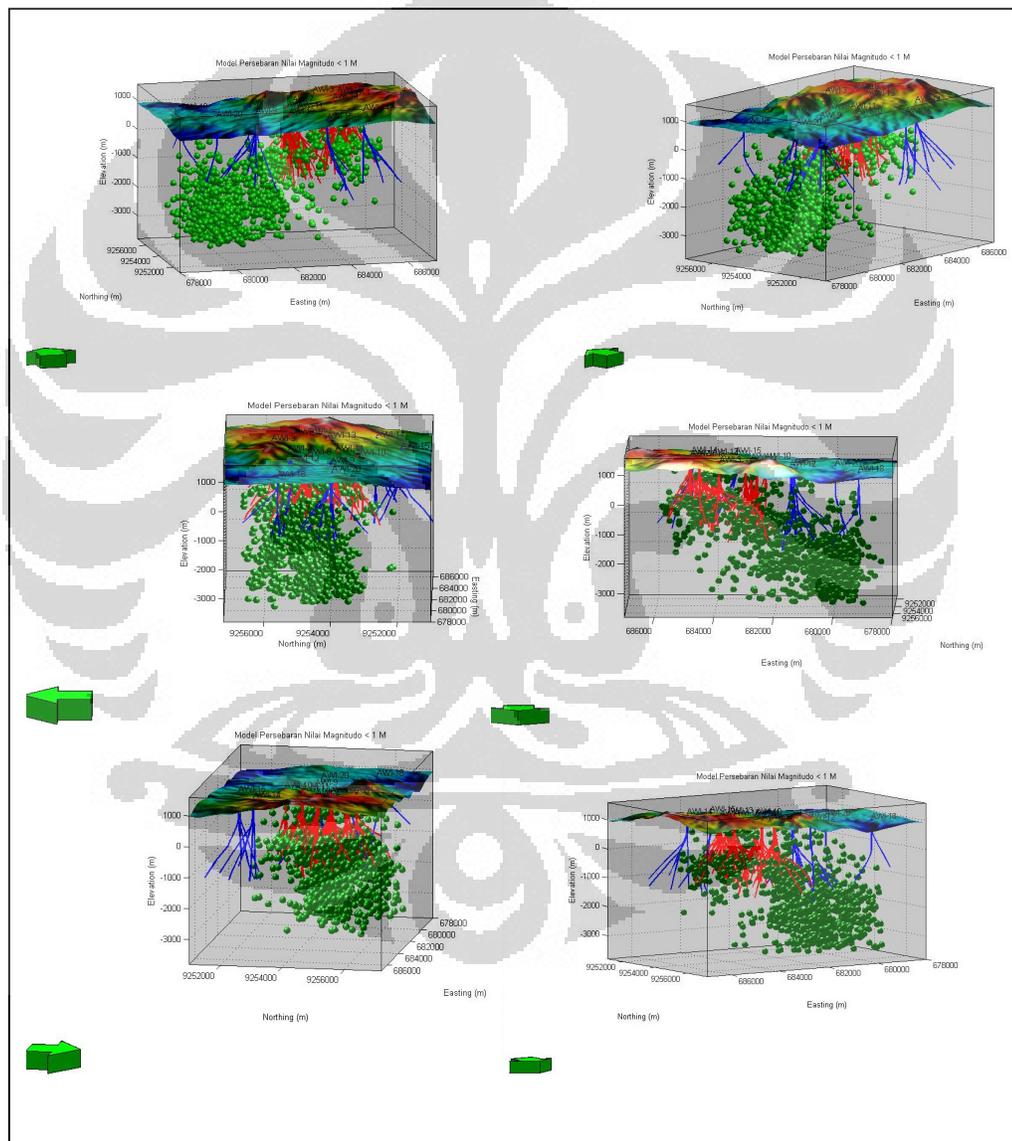
Gambar 5.8. Tampilan 3-dimensi *software Geoslicer-X*.

Software ini dibuat oleh Laboratorium Geothermal di Departemen Fisika Universitas Indonesia. Dan dikembangkan untuk membantu insinyur dan

geosaintis untuk menganalisa data geothermal dalam tampilan 3-dimensi (Daud dan Rahman, 2010).

5.3.1 Model Persebaran Mikroseismik Dengan Nilai Magnitudo < 1 SR

Gambar 5.9 memperlihatkan bahwa even-even gempa dengan nilai magnitudo kurang dari 1 SR relatif banyak terjadi dibawah sumur-sumur injeksi antara lain: Awi 9, 12, 18, dan 20.

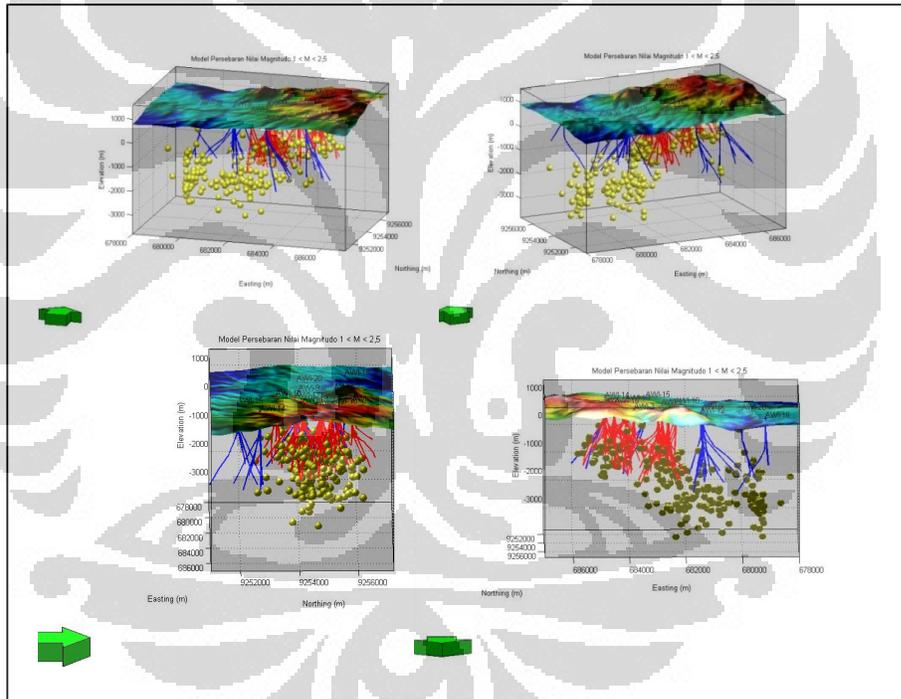


Gambar 5.9. Model persebaran nilai magnitudo < 1 SR. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagian Lampiran.

Pada sisi tersebut terlihat adanya even-even gempa yang membentuk suatu *cluster* disekeliling sumur-sumur injeksi. Berdasarkan hal tersebut diduga penyebab dari banyak even gempa yang terjadi pada sebelah barat laut lapangan Awibengkok ini adalah pengaruh dari aktivitas injeksi fluida dalam jumlah yang besar dan memiliki tekanan yang besar pula.

5.3.2 Model Persebaran Mikroseismik Dengan Nilai Magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR

Gambar 5.10 memperlihatkan bahwa even-even gempa dengan nilai magnitudo antara 1 hingga 2,45 SR relatif banyak terjadi di bawah sumur-sumur injeksi antara lain: Awi 9 dan Awi 20.



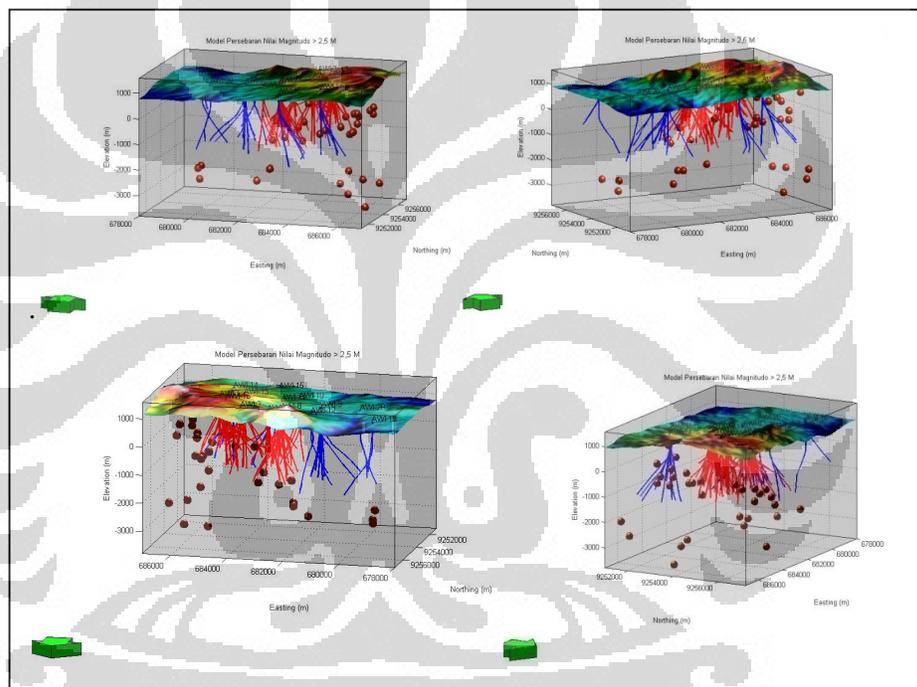
Gambar 5.10. Model persebaran mikroseismik dengan nilai magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagian Lampiran.

Pada sisi tersebut terlihat adanya even-even gempa yang membentuk suatu klaster di sekeliling sumur-sumur injeksi . Berdasarkan hal tersebut diduga penyebab dari banyak even gempa yang terjadi pada sebelah barat-laut lapangan Awibengkok ini adalah pengaruh dari aktivitas injeksi fluida dalam jumlah yang

besar dan memiliki tekanan yang besar pula. Hal ini memicu suatu lapisan pada reservoir geothermal untuk bergerak akibat dorongan dari fluida yang diinjeksikan dari sumur tersebut ke dalam reservoir geothermal.

5.3.3 Model Persebaran Mikroseismik Dengan Nilai Magnitudo $\geq 2,5$ SR

Gambar 5.11 memperlihatkan bahwa even-even gempa dengan nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR relatif tidak banyak terjadi di bawah sumur-sumur injeksi. Berdasarkan kuantitasnya, even yang terjadi sangat sedikit dibandingkan dengan nilai magnitudo yang relatif lebih kecil.



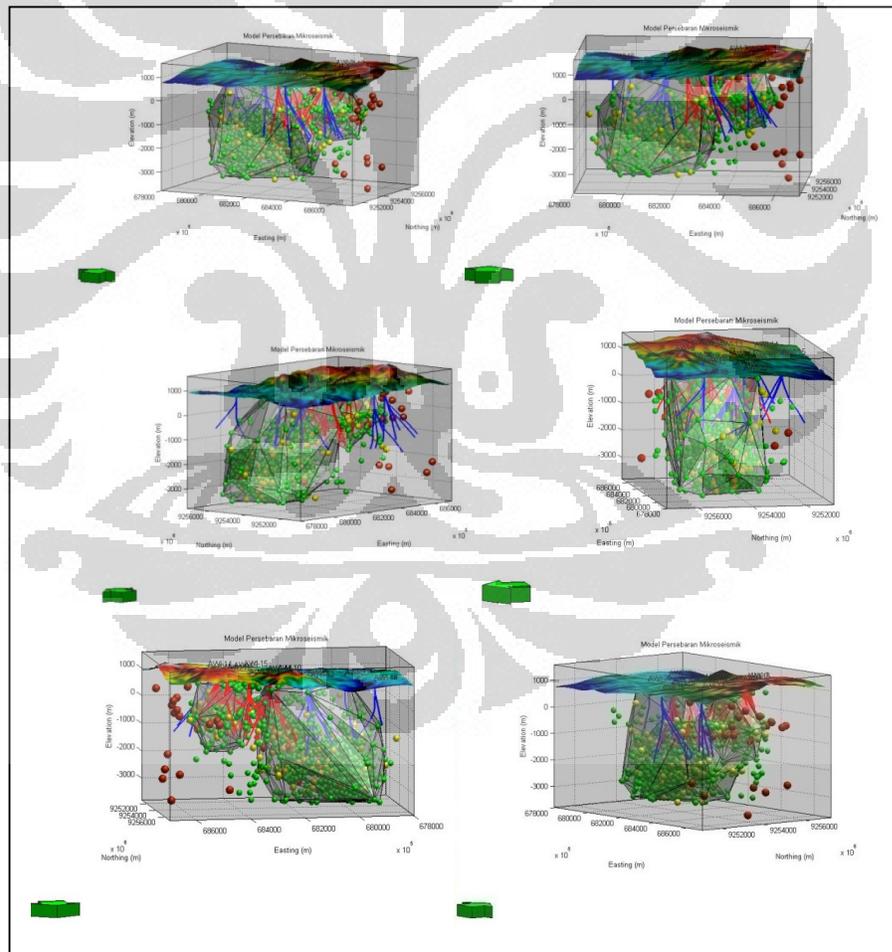
Gambar 5.11. Model persebaran nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagian Lampiran.

Even-even lebih banyak terjadi di sekitar manifestasi permukaan yaitu kompleks Cibeureum yang berupa fumarol, mata air panas dan rembesan gas. Berdasarkan hal tersebut diduga penyebab dari banyak even gempa yang terjadi pada sebelah barat-laut lapangan Awibengkok ini adalah adanya pengaruh dari aktivitas struktur di bawah permukaan.

Berdasarkan letak posisi dari even-even tersebut yang berada di sebelah timur lapangan Awibengkok. Dapat diduga bahwa penyebab dari keberadaan even-even tersebut memang dipicu oleh aktivitas struktur. Dimana pada bagian timur lapangan Awibengkok terdapat 2 struktur utama yaitu Patahan Awibengkok dan Patahan Cibeureum.

5.3.4 Delineasi Zona Rekahan Pada Reservoir Geothermal

Lapangan Awibengkok memiliki struktur utama yaitu Patahan Muara, Patahan Garok, Patahan Gagak, Patahan Cisaketi Barat dan Patahan Cisaketi Timur. Struktur-struktur tersebut berada di bagian sebelah barat dari lapangan Awibengkok.



Gambar 5.12. Delineasi zona rekahan pada reservoir geothermal. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagian Lampiran.

Seperti terlihat pada Gambar 5.12, bahwa even gempa lebih dominan terjadi di bagian sebelah barat lapangan Awibengkok yang merupakan daerah reinjeksi fluida. Pada gambar tersebut nampak terlihat dua delineasi zona yang ditandai dengan adanya sekumpulan gempa mikro di daerah yang membentuk *clustering*. *Clustering* gempa tersebut menandakan bahwa daerah tersebut diduga zona rekahan yang terjadi akibat adanya aktivitas reinjeksi yang dilakukan oleh sumur-sumur injeksi yaitu sumur Awi 9, 12, 18, dan 20. Pada interpretasi 3-dimensi terlihat bahwa gempa yang terjadi di dekat sumur-sumur injeksi (Awi 9, 12, 18, dan 20) didominasi oleh gempa dengan magnitudo kurang dari 1 SR dan magnitudo antara 1 hingga kurang dari 2,5 SR. Ini berarti gempa yang terjadi berkorelasi dengan lithologi batuan di sebelah barat yaitu batuan sedimen yang bersifat tidak menyimpan stress sehingga gempa yang terjadi relatif kecil. Sedangkan gempa yang terjadi di sebelah timur didominasi oleh gempa dengan magnitudo lebih dari 2,5 SR. Ini berarti gempa yang terjadi berkorelasi dengan lithologi batuan di sebelah timur yaitu batuan keras berupa batuan andesit yang bersifat menahan stress sehingga mengakibatkan terjadinya akumulasi energi, yang mana ketika energi tersebut terlepas maka menimbulkan gempa dengan magnitudo yang relatif lebih besar. Mekanisme utama yang memicu terjadinya gempa mikro di lapangan geothermal Awibengkok adalah disebabkan aktivitas reinjeksi fluida dalam jumlah besar yaitu 1420 kilogram per jam.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

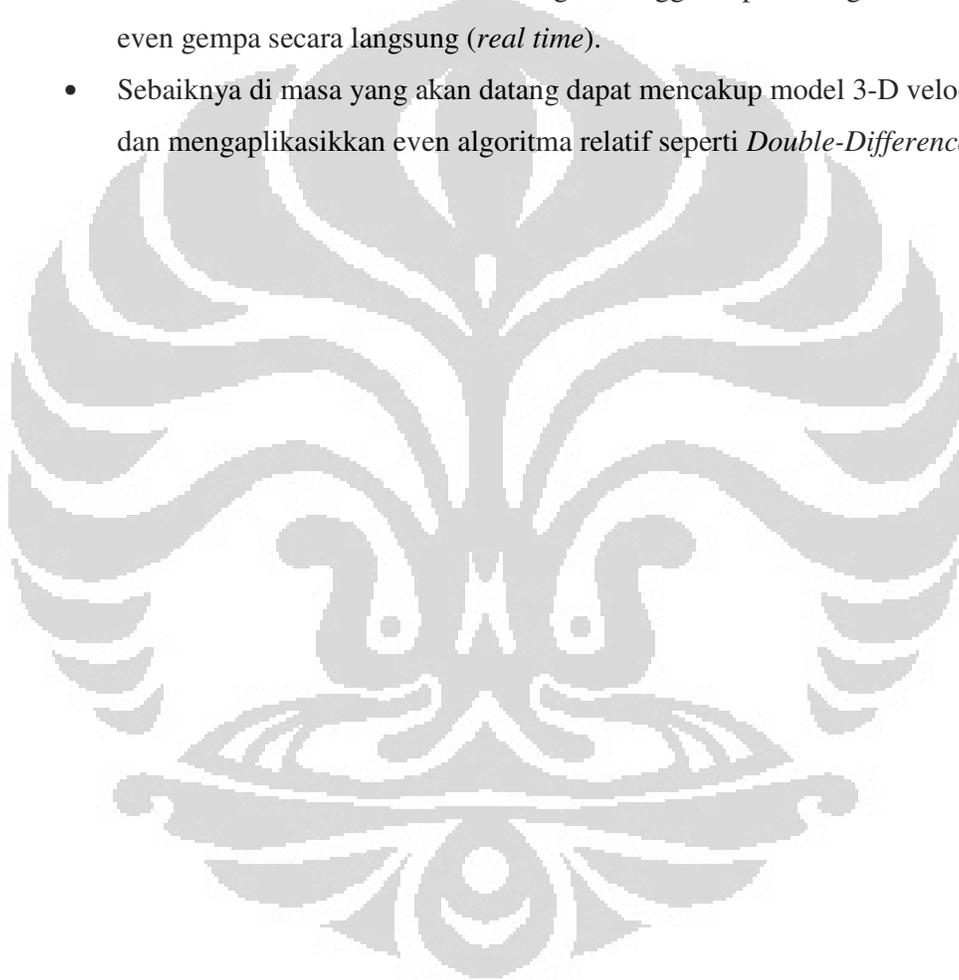
Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan guna menentukan delineasi zona rekahan pada reservoir geothermal yang didukung dengan data geologi dan data sumur, maka dapat disimpulkan bahwa :

- Pengamatan mikroseismik yang dilakukan pada lapangan geothermal Salak diklasifikasikan menjadi 3 bagian berdasarkan nilai magnitudonya. Adapun klasifikasinya yaitu gempa mikro yang memiliki nilai magnitudo < 1 SR, gempa mikro yang memiliki nilai magnitudo antara 1 hingga 2,5 SR dan gempa mikro yang memiliki nilai magnitudo $\geq 2,5$ SR.
- Pengamatan mikroseismik yang mencakup akuisisi, prosesing, dan interpretasi data dilakukan untuk memperoleh peta episenter sehingga dapat diketahui persebaran gempa mikro.
- Teramati adanya suatu cluster gempa di sebelah barat lapangan Awibengkok. Cluster tersebut diduga sebagai delineasi zona rekahan.
- Pada interpretasi 3-dimensi terlihat bahwa gempa yang terjadi di dekat sumur-sumur injeksi (Awi 9, 12, 18, dan 20) didominasi oleh gempa dengan magnitudo kurang dari 1 SR dan magnitudo antara 1 hingga kurang dari 2,5 SR. Ini berarti gempa yang terjadi berkorelasi dengan lithologi batuan di sebelah barat yaitu batuan sedimen. Sedangkan gempa yang terjadi di sebelah timur didominasi oleh gempa dengan magnitudo lebih dari 2,5 SR. Ini berarti gempa yang terjadi berkorelasi dengan lithologi batuan di sebelah timur yaitu batuan andesit.
- Mekanisme utama yang memicu terjadinya gempa mikro diakibatkan aktivitas injeksi sebesar 1420 kilogram per jam.

6.2 Saran

Dari hasil keseluruhan penelitian yang dilakukan, penulis memiliki beberapa saran yang mungkin berguna untuk simulasi kedepannya, diantaranya adalah :

- Lebih baik jika pengamatan mikroseismik di lapangan Awibengkok dilakukan secara online networking, sehingga dapat mengamati terjadi even gempa secara langsung (*real time*).
- Sebaiknya di masa yang akan datang dapat mencakup model 3-D velocity dan mengaplikasikan even algoritma relatif seperti *Double-Difference*.



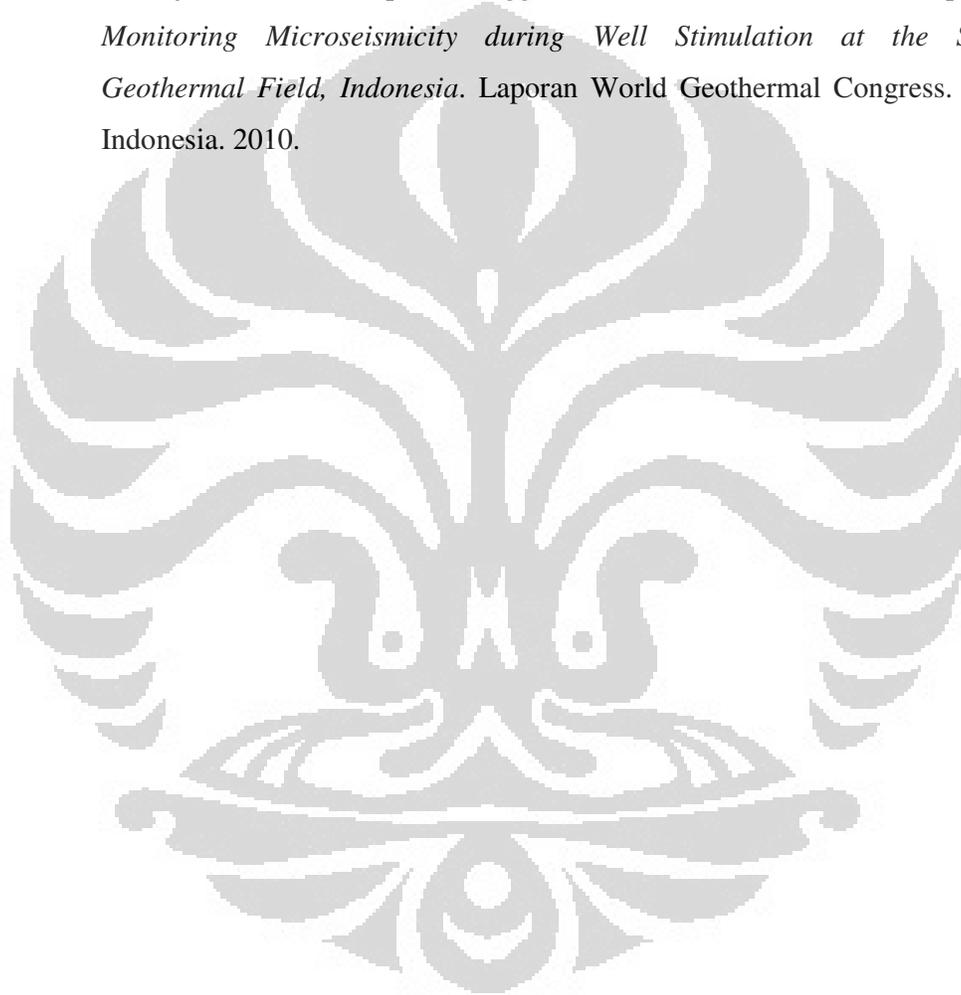
DAFTAR PUSTAKA

- Colombo, Daniele. *Microseismicity as a Deep Seismic Source for Reservoir Fluid Characterization*. Houston 2005 Annual Meeting, SEG. 2005.
- Daud, Yunus., Saputra, Rahman. *Geoslicer-X: A 3-D Interactive Software for Geothermal Data Analysis*. Laporan World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 2010.
- H Scholz, Christopher. *The Mechanism of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press. 1990.
- Haris, Abdul. *Seismik Eksplorasi*. Buku panduan mahasiswa. Universitas Indonesia. 2006.
- Hochstein, M.P. *Introduction to Geothermal Prospecting*, Geothermal Institute, University of Auckland. 1982.
- Hulen, J.B. dan Anderson, T.D. *The Awibengkok, Indonesia, Geothermal Research Project*. Laporan workshop pada Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, p. 256-263. 1998.
- Lay, Thorne dan Wallace, Terry C. *Modern Global Seismology*. 2005.
- Means, Winthrop Dickinson. *Stress and Strain*. Springer-Verlag, New York. 1976.
- Rosid, Syamsu. *Penentuan Episenter dan Parameter Gempa Mikro Dalam Kaitannya Dengan Daerah Prospek Geothermal Banten, Jawa Barat*. Skripsi, Universitas Indonesia. Jakarta. 1988
- Stimac, J.A., Nordquist, Gregg., Suminar, Auardi., Sirad-Azwar, Lutfhie. *An Overview of the Awibengkok geothermal system, Indonesia*. Geothermics. pp 300-331. 2008.

Stimac, J.A., Sugiaman, F. *The AWII-2 Core Research Project. Part I. Geologic overview of the Awibengkok Geothermal Field, Indonesia*. Laporan World Geothermal Congress, pp. 2221-2226. 2000.

Susilawati. *Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa Pada Penelaahan Struktur Bagian Dalam Bumi*. Universitas Sumatra Utara, Medan. 2008.

Wibowo, Djoko A.S., Nordquist, Gregg., Stimac, Jim., dan Suminar, Auardi. *Monitoring Microseismicity during Well Stimulation at the Salak Geothermal Field, Indonesia*. Laporan World Geothermal Congress. Bali, Indonesia. 2010.





LAMPIRAN

Lampiran 1. Ringkasan fitur termal permukaan di sistem geothermal Awibengkok, Indonesia (Stimac et al., 2008).

Nama	X UTM (m)	Y UTM (m)	Elevasi (m asl)	Jenis	T (°C)	pH	Cl	SO4	HCO3	R/Ra	NCG (wt.% dlm uap)	T Geotherm. (°C)
Ratu	629924	9257300	1400	F	130					7,6-7,7	12,6	273*
Perbakti	683583	9256604	1050	F	126-130					7,6-8,0	5,0-7,0	265*
Cibeureum	685000	9253795	1230	F	94-98					7,22-7,68	2,91	250*
Cipatumatutan	686142	9252674	1230	F	89-96					7,59	2,38	235*
Awi Barat**	683373	9255042	1060	F/HS-B	73	7,96	2,34	5,26	666	7,3-7,4		
Sarimaya	683077	9259270	660	HS-Cl	51-64	6,4	3120-3684	0-5,0	510-516	7,2-7,4		166 (Qtz)
Ciherang	681000	9252135	1230	HS-B	53	6,5	1,0-2,0	0,5	690-735	6,72		197 (NKC)
Cikarang	683750	9258050	820	HS-B	72-78	6,5-6,8	1,0-4,0	2,0-83	360-1520	6,8		
Muhinin	683750	9258550	730	HS-B	41-54	6,1	3,0-8,0	1,0-11	604-852	ND		
Cikuluwung	684350	9260100	770	HS-B		6,7	320	3,0	1130	8,0		
Cisaketi	679050	9255250	780	HS-B	40-42	6,1-6,7	19,4	< 1,0-6,0	254-298	6,8-7,0		
Cihideung	690453	9264000		HS-B	43-46	6,7	580	7,0	550	7,43		
Ciseupan	686280	9251100	970	HS-B	49	6,5	< 1,0	7,5	544			
Cibodas	682750	9252500	1030	HS-B	60	6,6	4,0	1,0	290			

Catatan: T: temperature; NCG: non-condensable gas; T Geotherm.: geothermometric temperature; HS: hot spring; F: fumaroles; B: bicarbonate; Cl: chloride; AS: acis-sulfate pools; Qtz: quartz geothermometer; NKC: Na-K-Ca geothermometer.

Tanda * adalah variasi geothermometer gas yang telah digunakan untuk mengestimasi sumber temperature fumarol.

Tanda ** adalah Awi barat memiliki kandungan kimia berupa uap cair fumarol didekat permukaan air.

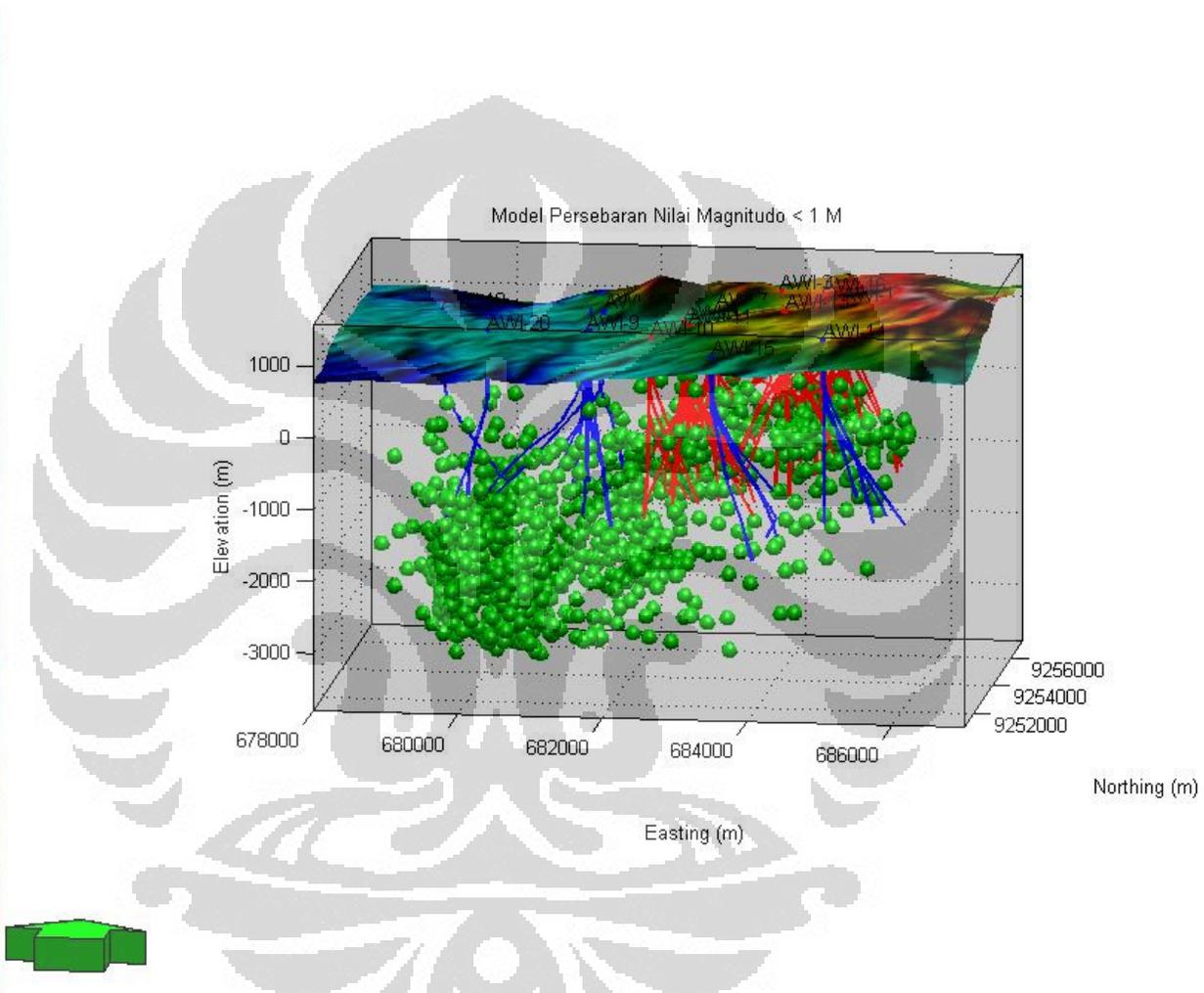
Lampiran 2. Skala kekuatan gempa bumi menurut *C.F. Richter*.

No.	Magnitudo	Klasifikasi secara umum
1	8	Bencana nasional (<i>national disaster</i>)
2	>7 - 8	Gempa besar (<i>major earthquake</i>)
3	>6 - 7	Gempa destruktif (<i>destructive earthquake</i>)
4	6	Gempa merusak (<i>damaging earthquake</i>)
5	>4 - 5	Gempa keras (<i>strongly earthquake</i>)
6	>3 - 4	Gempa kecil (<i>small quake</i>)
7	0 - 3	Goncangan kecil (<i>small shock quake</i>)

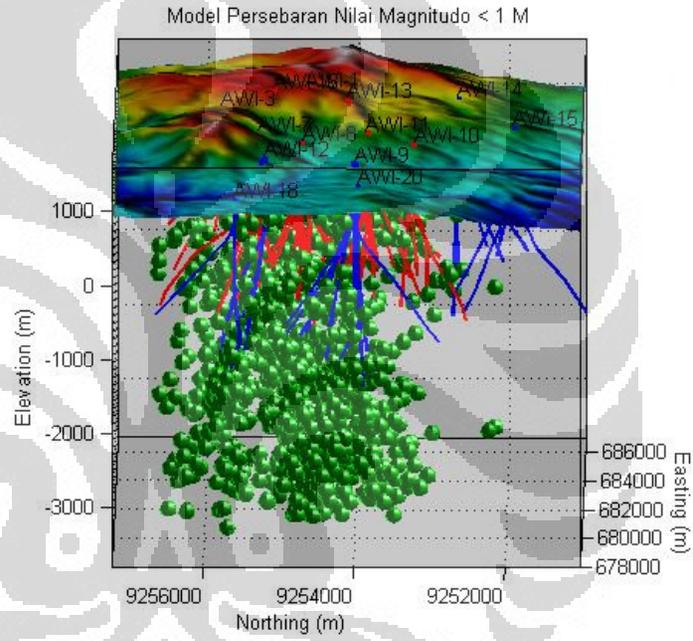
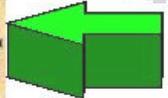
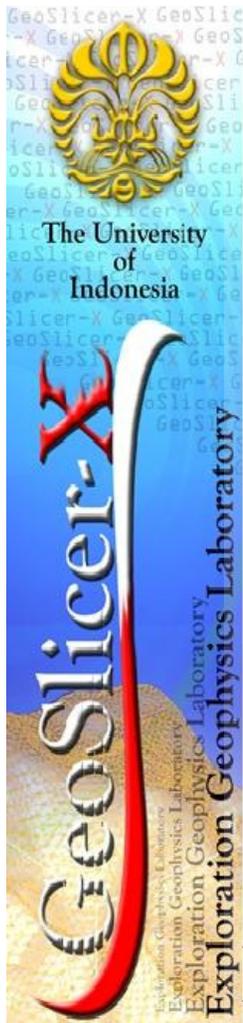
Skala Richter adalah skala logaritmis, dan setiap selisih satu skala perbedaan energi adalah 31,5 kali lebih besar. C.F. Richter menyusun skala gempa bumi berdasarkan skala magnitudo (ukuran besarnya gempa) dengan menggunakan klasifikasi angka 0 sampai 8. Semakin besar angkanya, maka semakin besar magnitudonya. Cara menentukan intensitas gempa menurut Richter adalah menggunakan jarak dan besaran amplitudo. Berikut ini adalah tabel skala kekuatan gempa bumi menurut C.F. Richter.

Lampiran 3. Skala kekuatan gempa bumi menurut *Mercalli*.

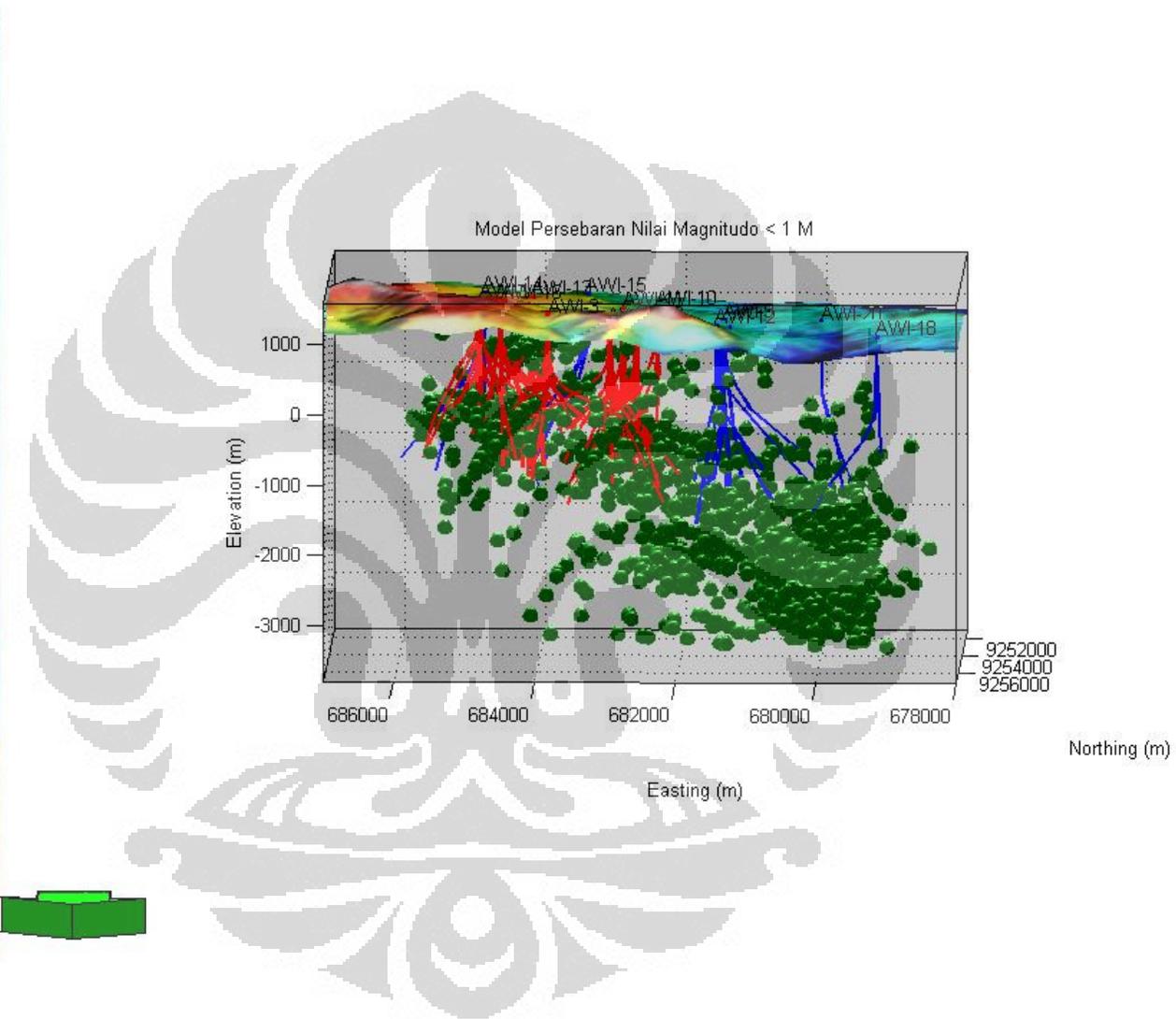
No.	Magnitudo	Klasifikasi secara umum
1	I	Getaran tidak dapat dirasakan oleh semua orang, kecuali orang yang sangat peka terhadap getaran
2	II	Getaran dirasakan oleh beberapa orang, benda ringan yang bergantung bergoyang
3	III	Getaran dirasakan nyata di dalam rumah, terutama lebih satu lantai dan kendaraan yang sedang berhenti agak bergerak
4	IV	Getaran dirasakan oleh banyak orang, pecah belah, daun jendela bergetar, dinding berbunyi karena pecah
5	V	Getaran dirasakan oleh setiap penduduk. Barang-barang banyak yang berjatuhan, tiang tampak bergoyang, dan bandul jam dinding berhenti
6	VI	Getaran dirasakan oleh setiap penduduk dan pada umumnya penduduk terkejut. Meja dan kursi bergerak, cerobong asap pabrik rusak
7	VII	Getaran terasa agak kuat dan setiap orang keluar rumah. Bangunan banyak yang rusak, cerobong asap pabrik pecah dan getaran dirasakan oleh orang yang sedang naik kendaraan
8	VIII	Getaran terasa kuat. Dinding bangunan dapat lepas dari rangka rumah dan meja kursi terlempar, orang yang sedang naik kendaraan terganggu keseimbangannya
9	IX	Getaran terasa sangat kuat. Kerangka rumah banyak yang terlepas, rumah tampak bergeser, instalasi air minum banyak yang putus
10	X	Getaran agak dahsyat. Dinding rumah tergeser dari pondasinya, tanah terbelah, rel kereta api tampak melengkung dan banyak tanah longsor
11	XI	Getaran terasa dahsyat. Bangunan roboh, jembatan putus, rel kereta api semuanya melengkung, pipa dalam tanah bengkok
12	XII	Getaran terasa dahsyat. Bangunan hancur berkeping-keping, permukaan tanah bergelombang, banyak benda-benda yang terlempar ke udara



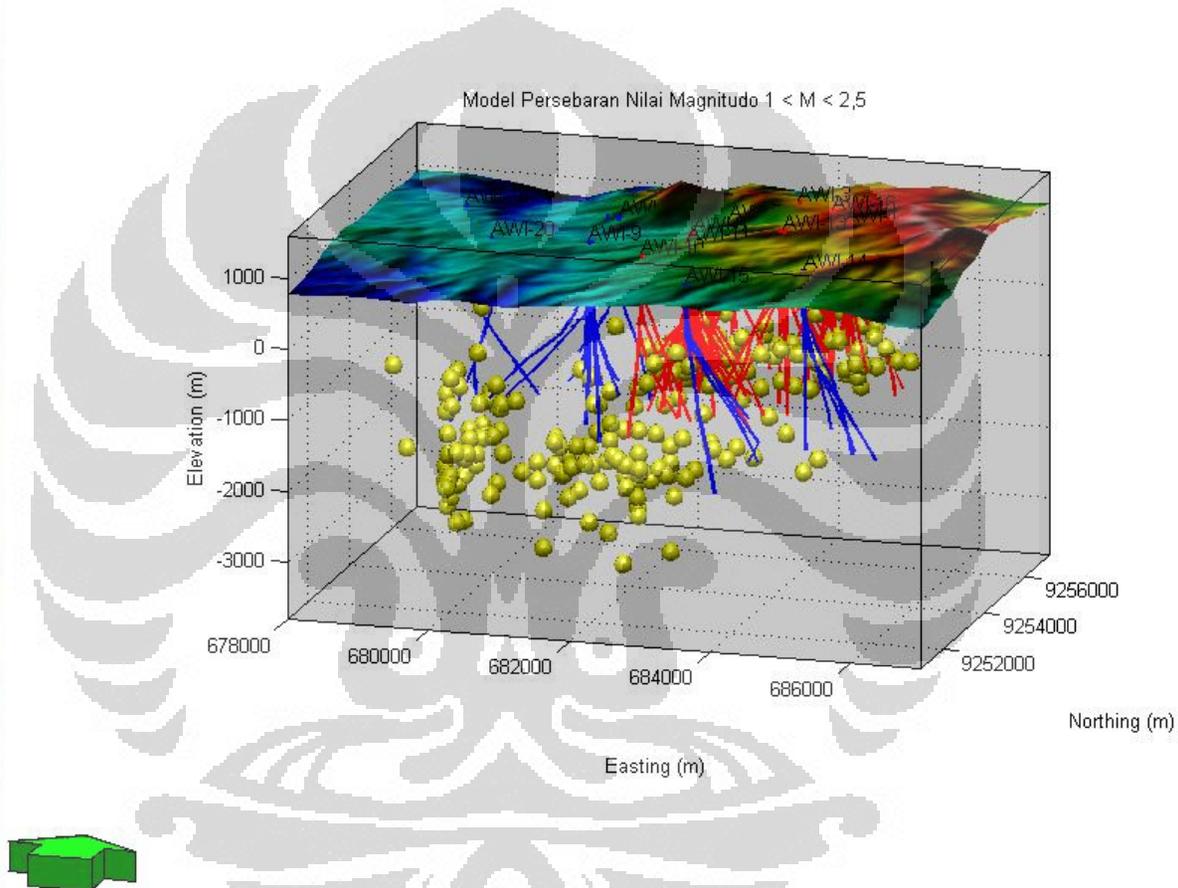
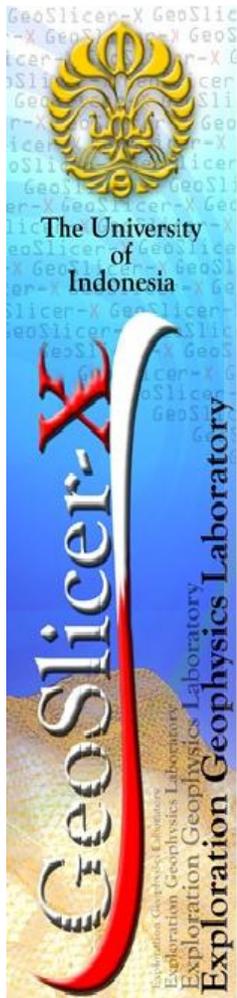
Lampiran 4. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo < 1 SR (utara).



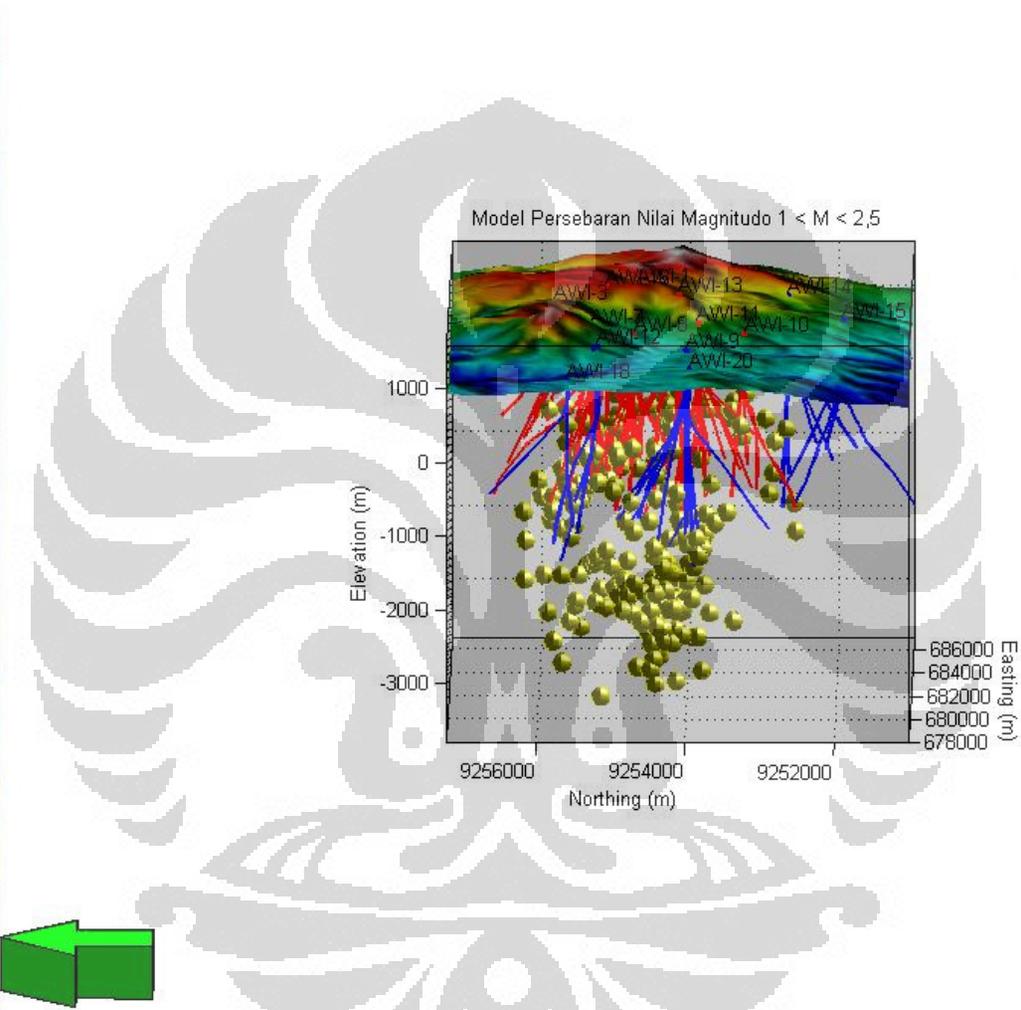
Lampiran 4a. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo < 1 SR (barat).



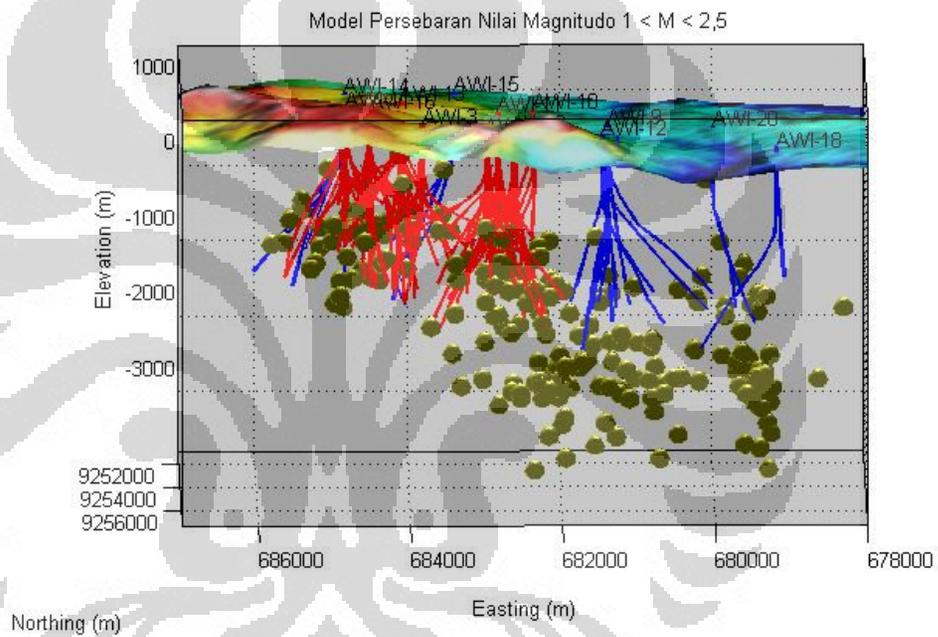
Lampiran 4b. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo < 1 SR (selatan).



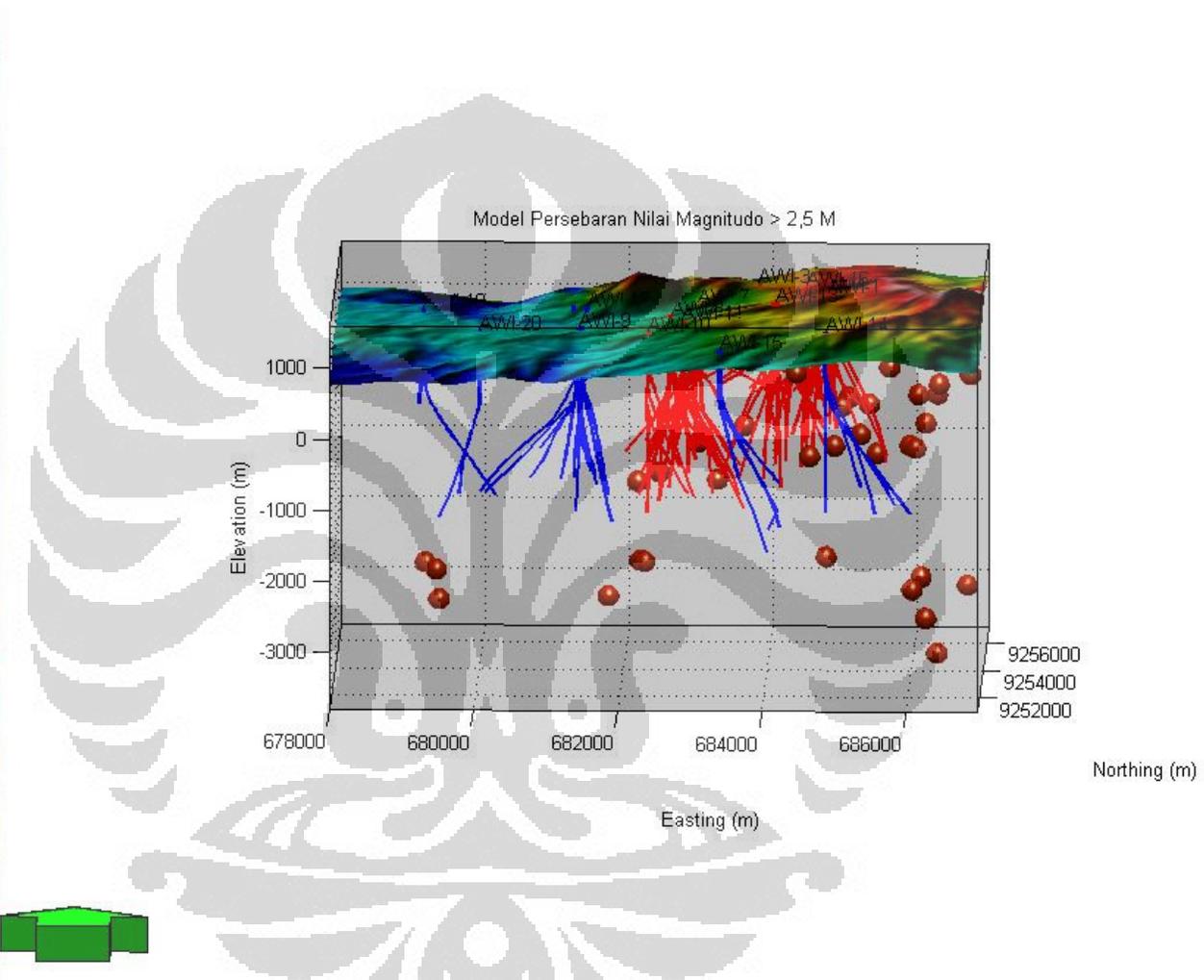
Lampiran 5. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo $1 < SR < 2,5$ (utara).



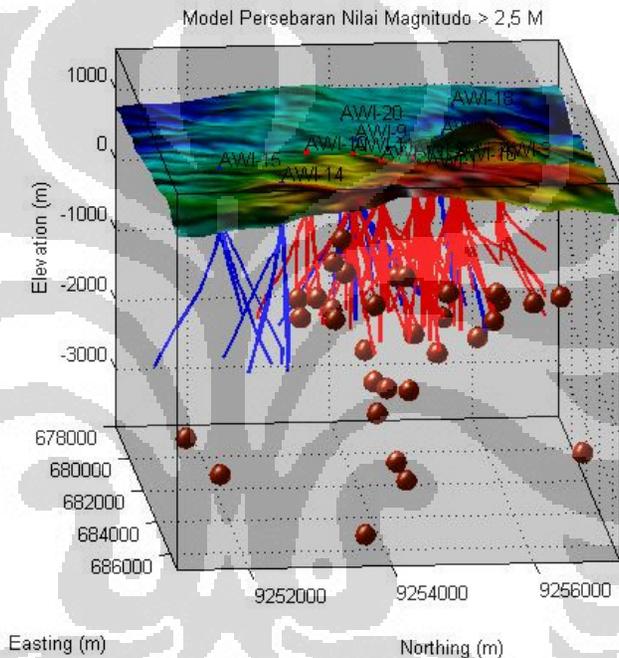
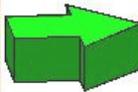
Lampiran 5a. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo $1 < SR < 2,5$ (barat).



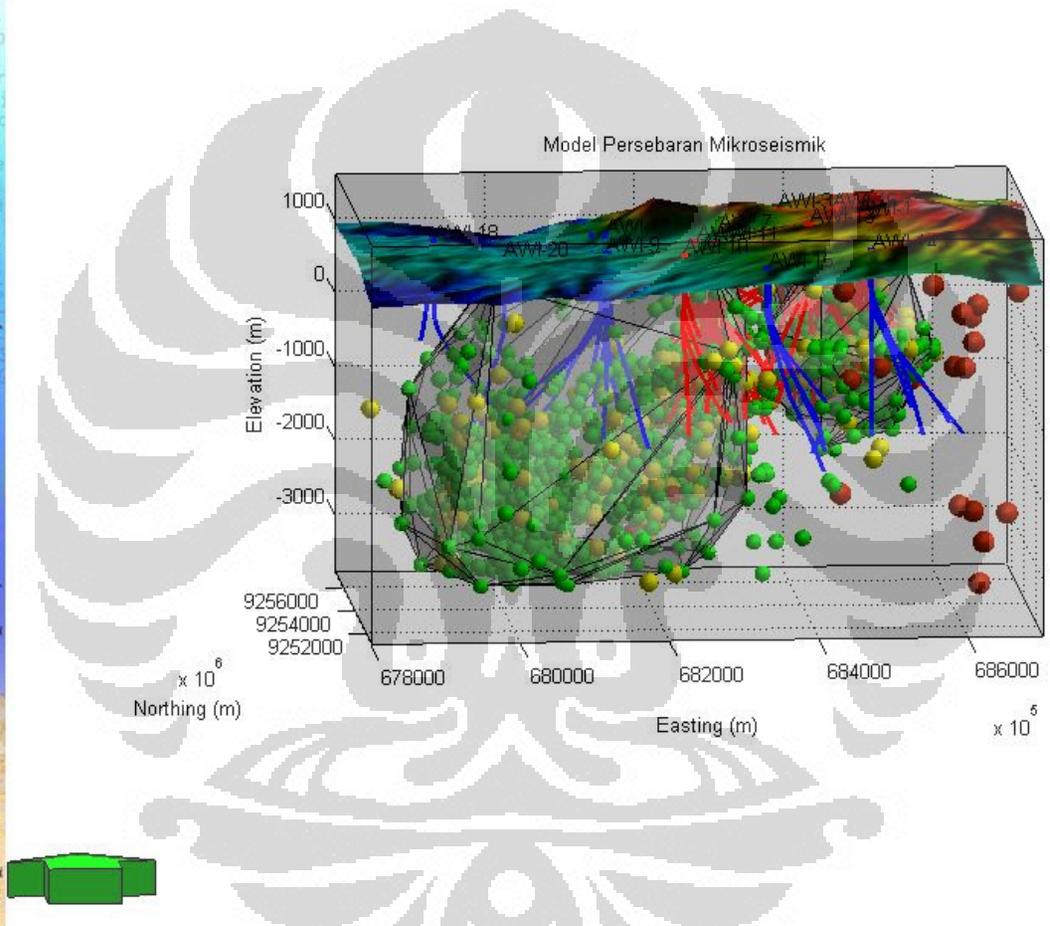
Lampiran 5b. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo $1 < SR < 2,5$ (selatan).



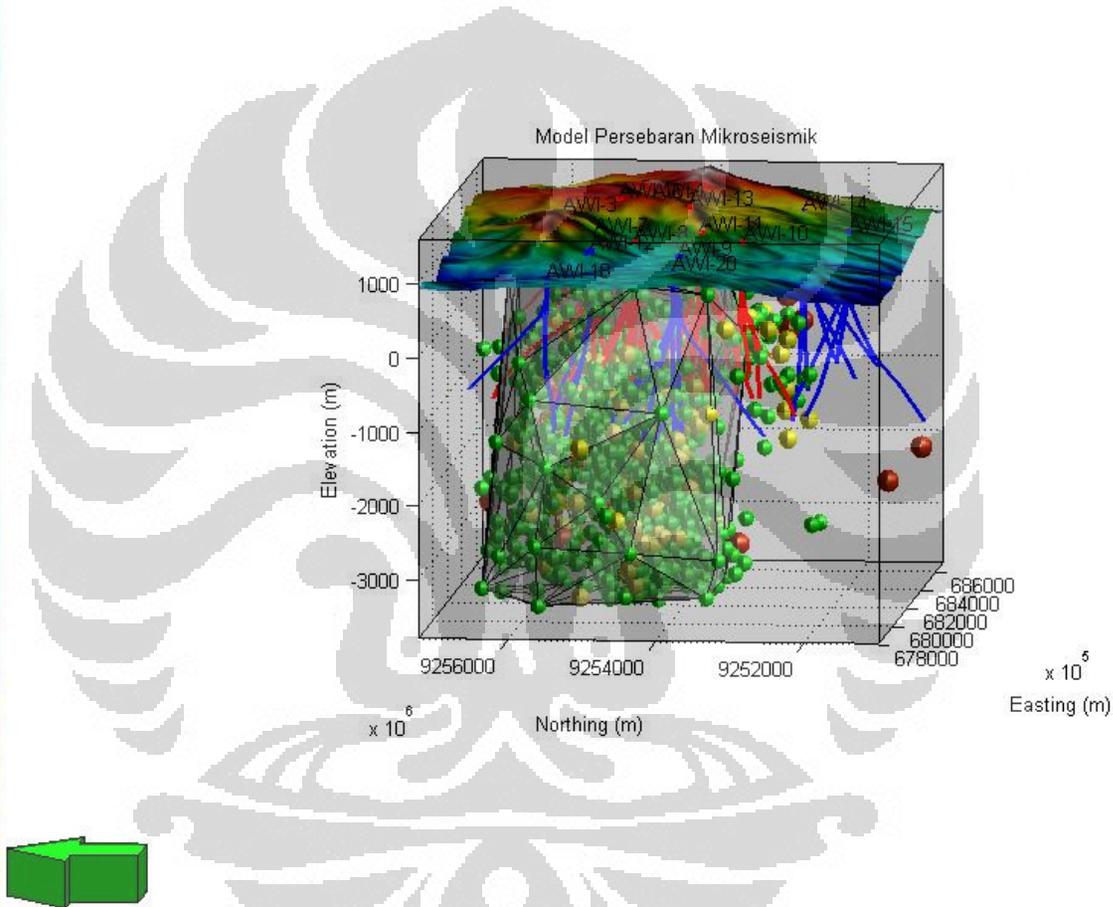
Lampiran 6a. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo > 2,5 SR (utara).



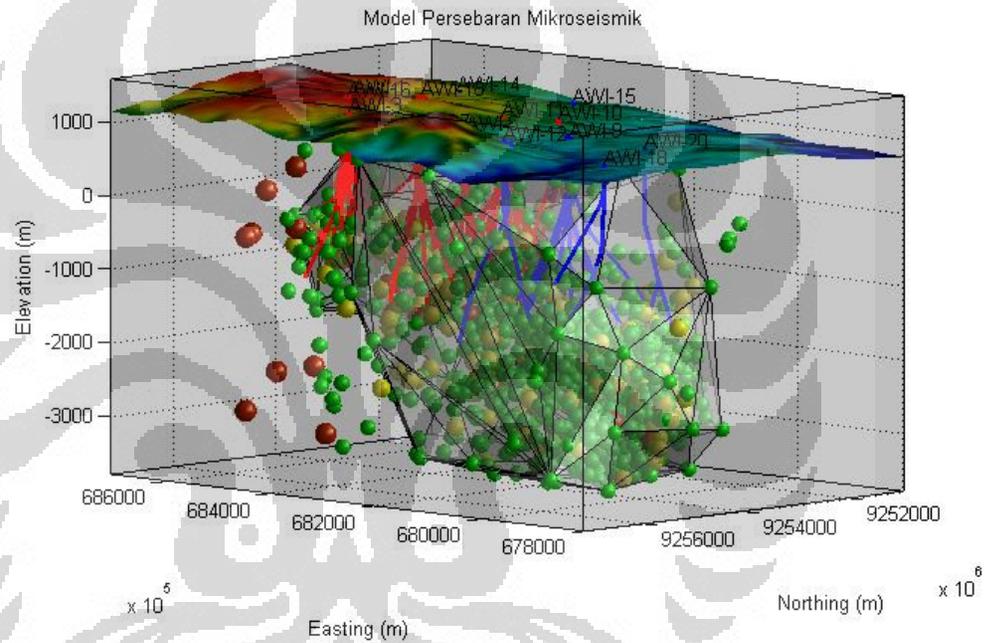
Lampiran 6b. Model persebaran gempa mikro dengan nilai magnitudo > 2,5 SR (timur).



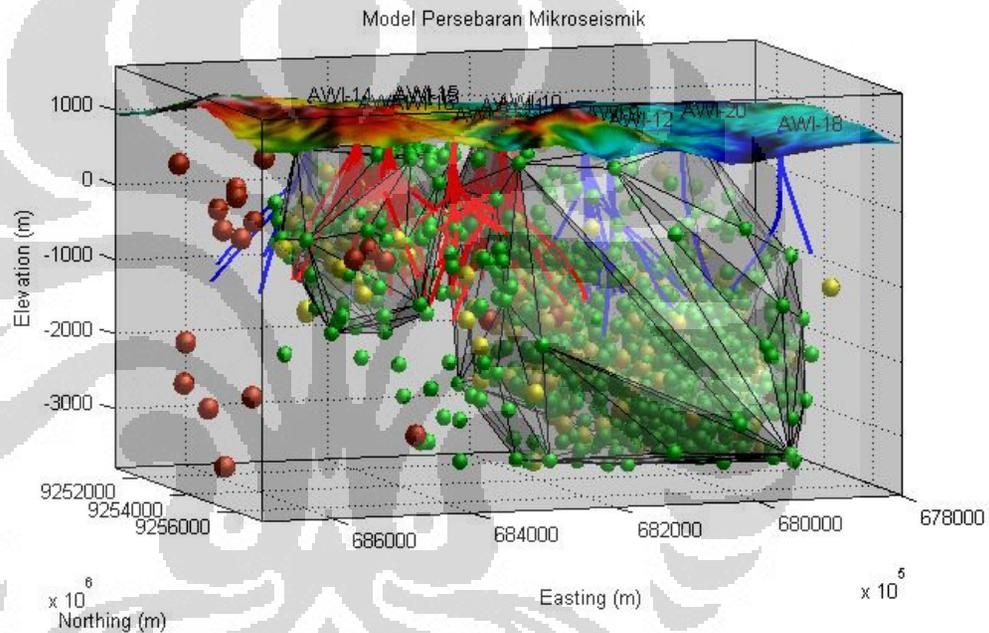
Lampiran 7a. Delineasi zona rekahan (utara).



Lampiran 7b. Delineasi zona rekahan (barat).



Lampiran 7c. Delineasi zona rekahan (timur laut).



Lampiran 7d. Delineasi zona rekahan (timur laut).