



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN DATA MAGNETOTELLURIK
MULTIDIMENSI UNTUK MENDELINEASI SISTEM
GEOTERMAL DAERAH TAWAU, MALAYSIA**

SKRIPSI

QONITA AMRIYAH

0806326286

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN DATA MAGNETOTELLURIK
MULTIDIMENSI UNTUK MENDELINEASI SISTEM
GEOTERMAL DAERAH TAWAU, MALAYSIA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains

QONITA AMRIYAH

0806326286

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : QONITA AMRIYAH

NPM : 0806326286

Tanda Tangan :



Tanggal : 18 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Qonita Amriyah
NPM : 0806326286
Program Studi : Fisika
Judul Skripsi : Pemodelan Data Magnetotellurik Multidimensi
Untuk Mendelineasi Sistem Geotermal Daerah
Tawau, Malaysia

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc.



Penguji I : Dr. Djatmiko P. Atmojo



Penguji II : Dr. Dede Djuhana



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 18 Juni 2012

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, MSc., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing penulis selama penelitian serta dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Dr. Djatmiko P. Atmojo dan Dr. Dede Djuhana, selaku penguji 1 dan 2 yang telah memberikan kritik dan saran terkait penulisan skripsi.
- (3) Seluruh dosen Departemen Fisika UI yang telah memberikan pengajaran selama 4 tahun masa kuliah.
- (4) Ibu, Bapak, dan seluruh anggota keluarga saya (Nada, Ka Iyoh, Ka Ipah, Ka Samsul, Uyat, Lidia) yang telah memberikan bantuan dukungan materiil dan moral.
- (5) Lendriadi Agung, yang telah memberikan bantuan yang sangat besar kepada penulis dalam hal pengerjaan pengolahan data dan telah menjadi tempat untuk diskusi.
- (6) Dzil Mulki dan Ka Rahman yang telah secara langsung membantu penulis dalam hal pembuatan *software*.
- (7) Surya Aji Pratama dan Wambra Aswo yang telah sangat membantu penulis ketika *processing* dan pemahaman teori.
- (8) Dewi, Cut, Sari (fis08), dan Delin (S2) teman satu bimbingan dan seperjuangan mengerjakan skripsi di tahun ini. Hayoo, semangat semuanya!
- (9) Zulimatul Safaah P. dan Indah Permata Sari (fis08), sahabat yang sudah

menjadi tempat bercerita penulis.

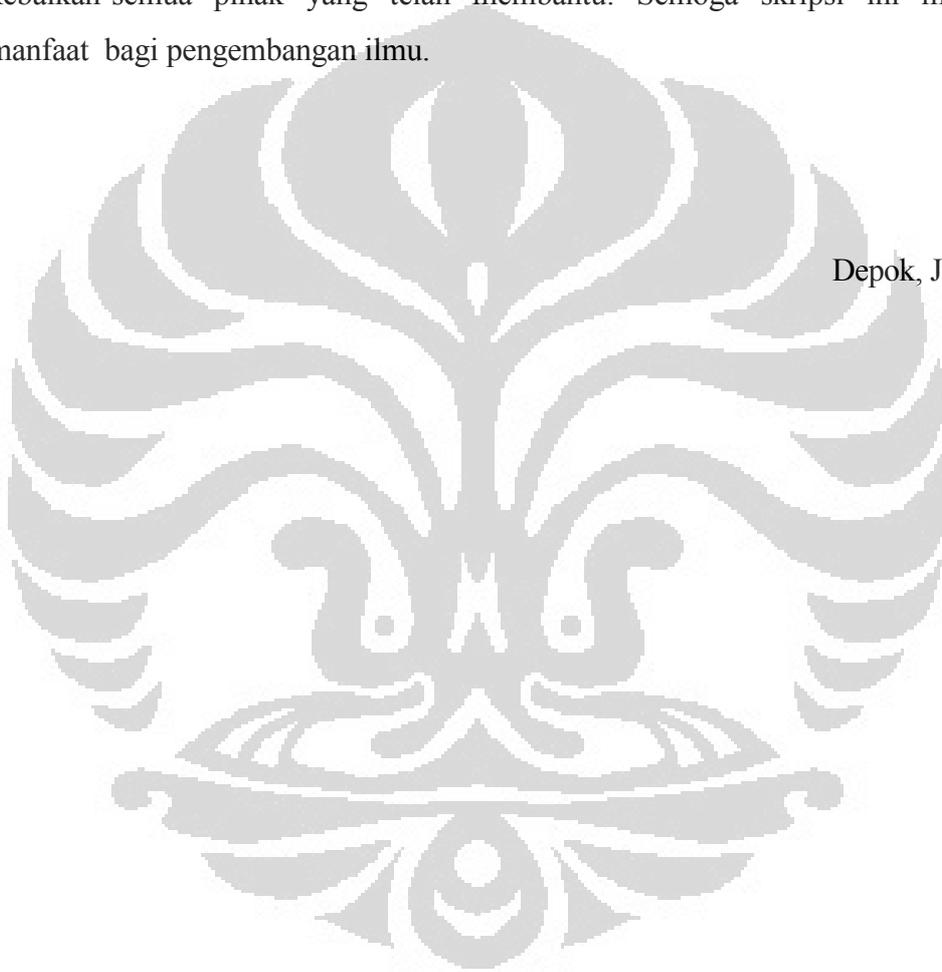
(10) Seluruh teman-teman fisika 08, khususnya anak-anak geofisika 08 yang sudah memberikan semangat dan dukungannya.

(11) Melda Silvia Sari Silalahi (farmasi08) yang sudah berbaik hati memberikan tumpangan mengeprint.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Qonita Amriyah
NPM : 0806326286
Program Studi : Geofisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

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

Pemodelan Data Magnetotellurik Multidimensi Untuk Mendelineasi Sistem Geotermal Daerah Tawau, Malaysia

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 18 Juni 2012
Yang menyatakan



(Qonita Amriyah)

ABSTRAK

Nama : Qonita Amriyah
Program Studi : Geofisika
Judul : Pemodelan Data Magnetotellurik Multidimensi Untuk
Mendelineasi Sistem Geotermal Daerah Tawau, Malaysia

Lokasi prospek geotermal Tawau berada sekitar 20 km arah timur laut kota Tawau, Sabah, Malaysia. Daerah ini didominasi oleh batuan vulkanik *Pliocene-Quaternary* berupa batuan basalt, *dacite*, *tuff* dan andesit yang menyebar di sekitar area Gunung Maria dan Gunung Andrassy. Mata air panas pada lokasi ini ditemukan di area Apas Kiri (A1-A4, A5, A8), area Balung (B1, B2), area Tawau (T1, T2) dan area Sungai Jepun (J1, J2). Berdasarkan data geokimia, pusat reservoir geotermal diperkirakan berada di sebelah tenggara Gunung Maria yang meluas ke area Balung. Untuk memverifikasi hal tersebut, dilakukanlah survey Magnetotellurik (MT). Data MT yang diperoleh dari lapangan kemudian diinversi secara multidimensi (2D dan 3D). Inversi 2D dan 3D secara berturut-turut dilakukan dengan menggunakan *software* WinGlink dan MT3DInv-X. Selanjutnya, hasil inversi MT tersebut diintegrasikan dengan data geologi dan geokimia yang ada sehingga diperoleh sebuah konseptual model sistem geotermal daerah Tawau yang terintegrasi. Pemodelan visualisasi dilakukan dengan menggunakan *software* Geoslicer-X. Adapun hasil penelitian memperlihatkan bahwa secara umum hasil inversi 2D telah dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan. Akan tetapi, hasil inversi 3D ternyata lebih baik dibandingkan dengan hasil inversi 2D dalam hal kesesuaian dengan struktur. Oleh karenanya, integrasi antar keduanya diperlukan untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan yang lebih akurat.

Kata Kunci : Metode Magnetotellurik, Inversi 2D, Inversi 3D, Daerah
Prospek Geotermal Tawau, Malaysia
xiii+97 halaman : 74 gambar; 8 tabel; 2 lampiran
Daftar Acuan : 25 (1984-2012)

ABSTRACT

Name : Qonita Amriyah
Program Study : Geophysics
Title : Multidimensional Modelling of Magnetotelluric Data to
Delineating Geothermal System of Tawau Geothermal Prospect,
Malaysia

Tawau geothermal prospect is located about 20 km northeast of Tawau City, Sabah, Malaysia. This area is dominated by Pliocene-Quaternary volcanic rocks such as basalt, dacite, tuff and andesitic rock which are spread around the Mt. Maria and Mt. Andrassy. Hot spring in this area appears in Apas Kiri area (A1-4, A5, A8), Balung area (B1, B2), Tawau area (T1, T2) and Jepun River area (J1, J2). Based on geochemistry data, center of geothermal reservoir is assessed beneath the southeastern part of Mt. Maria and may extends to the Balung Area. Survey Magnetotelluric (MT) was carried out to verify that point. The MT data was processed using multidimensional inversion (2D and 3D). The 2D Inversion was done by using WinGlink software, while the 3D Inversion has been carried out using MT3DInv-X software. The result of MT inversion was then integrated with geological and geochemical data to get an integrated conceptual model of geothermal system Tawau. Visualization modelling was performed by using Geoslicer-X software. The result of this study show, that in general, 2D inversion's result indicates the subsurface condition with good result. But, 3D inversion is actually more better than 2D inversion in describing geological structure. Accordingly, integration of both results is necessary to describe the subsurface condition more accurately.

Key Words : Magnetotelluric Method, 2D Inversion, 3D Inversion, Tawau
geothermal prospect, Malaysia
xiii+97 pages : 74 pictures; 8 tables; 2 appendix
Bibliography : 25 (1984-2012)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sistem Panas Bumi	7
2.2 Jenis Sistem Geotermal	8
2.3 Prinsip Magnetotellurik	12
2.4 Sumber Gelombang Elektromagnetik dalam MT	13
2.5 Penetrasi	14
2.6 Akuisisi Survey Magnetotellurik (MT)	16
2.7 Efek <i>Static Shift</i> dalam Metode Magnetotellurik	18
2.8 Impedansi	20
2.8.1 Asumsi 2D	21
2.8.2 Asumsi 3D	23
2.9 Inversi	23
2.9.1 Algoritma Inversi MT	25
2.9.2 Jenis Inversi	27
2.9.2.1 Inversi OCCAM	27
2.9.2.2 Metode <i>Model Space</i>	27
2.9.2.3 Metode <i>Data Space</i>	28
2.9.2.4 Nonlinear Conjugate Gradient (NLCG)	29
2.9.3 Model Covariance	30
BAB 3 DESAIN SURVEY DAN DATA	32
3.1 Desain Survey MT	32
3.2 Data Geologi Daerah Tawau, Malaysia	33
3.2.1 Kondisi Geologi dan Tektonik	33
3.2.2 Manifestasi Permukaan	38
3.3 Data Geokimia Daerah Tawau, Malaysia	42

BAB 4 PENGOLAHAN DATA	47
4.1 Alur Pengolahan Data.....	47
4.2 Pengolahan Inversi 2D	48
4.2.1 Pemilihan Good Time Series.....	48
4.2.2 Pengubahan <i>Time Series</i> ke Frekuensi Domain	49
4.2.3 Kurva MT	50
4.2.4 Koreksi Statik.....	51
4.2.5 Inversi 2D.....	52
4.3 Pengolahan Inversi 3D	57
4.3.1 Pengenalan <i>Software</i>	58
4.3.2 Data	59
4.3.3 <i>Initial Model</i>	63
4.3.4 Konversi <i>Output</i>	67
BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN	70
5.1 Waktu Inversi (CPU <i>time</i>).....	70
5.2 Hasil Inversi	73
5.2.1 Hasil Inversi 2D	74
5.2.2 Hasil Inversi 3D	76
5.3 Interpretasi Terpadu	79
BAB 6 PENUTUP	87
6.1 Kesimpulan.....	87
6.2 Saran	88
DAFTAR ACUAN	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	<i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian	5
Gambar 2.1.	Model Sistem Geotermal	7
Gambar 2.2.	Model Sistem Geotermal : <i>Young Igneous System</i>	9
Gambar 2.3.	Model Sistem Geotermal : <i>Tectonic System</i>	9
Gambar 2.4.	Model Sistem Geotermal : <i>Vapour Dominated System</i>	11
Gambar 2.5.	Model Sistem Geotermal : <i>Water Dominated System</i>	11
Gambar 2.6.	Konsep Gelombang Elektromagnetik	13
Gambar 2.7.	Sumber Gelombang EM dalam MT	14
Gambar 2.8.	<i>MT Field Layout</i>	16
Gambar 2.9.	<i>Noise</i> dalam MT	17
Gambar 2.10.	Efek <i>Static Shift</i> pada Data MT	18
Gambar 2.11.	Penyebab Efek <i>Static Shift</i> dalam MT	19
Gambar 3.1.	Titik Stasiun Pengukuran Survey MT Tawau, Malaysia	33
Gambar 3.2.	Lokasi Prospek Geotermal Tawau	34
Gambar 3.3.	Kondisi Tektonik Daerah Tawau, Malaysia	34
Gambar 3.4.	Peta Geologi Daerah Prospek Geotermal Tawau	35
Gambar 3.5.	Lokasi Titik Sampel Metode Thermoluminesence	36
Gambar 3.6.	Lokasi Penyebaran <i>Hot Spring</i> di Daerah Tawau, Malaysia	39
Gambar 3.7.	Tampilan Satelit Daerah Tawau, Malaysia	40
Gambar 3.8.	Struktur linear di Area Apas Kiri	41
Gambar 3.9.	Peta Struktur Daerah Tawau, Malaysia	41
Gambar 3.10.	Rosette Diagram Daerah Prospek Geotermal Tawau	42
Gambar 3.11.	Plot Segitiga Anion <i>Hot Spring</i> Tawau, Malaysia	44
Gambar 3.12.	Grafik Boron vs Klorida <i>Hot Spring</i> Tawau, Malaysia	44
Gambar 3.13.	Estimasi Temperatur Reservoir Menggunakan Geothermometer Na-K-Mg	46
Gambar 4.1.	Alur Pengolahan Data	47
Gambar 4.2.	Tampilan <i>Software</i> Synchro Time Series Viewer	48
Gambar 4.3.	Tampilan <i>Software</i> SSMT 2000	49
Gambar 4.4.	Langkah Pemasukan Data <i>Good Time Series</i> di dalam SSMT 2000	50
Gambar 4.5.	Proses Pengubahan <i>Time Series</i> ke dalam Frekuensi Domain pada SSMT 2000	50
Gambar 4.6.	Kurva XPR (<i>crosspower</i>) terhadap Kurva MT	51
Gambar 4.7.	Kurva MT Sebelum dan Sesudah Pemilihan Data	51
Gambar 4.8.	Koreksi Statik	52
Gambar 4.9.	Langkah Pembuatan dan Pendefinisian Lintasan dalam WinGlink	53
Gambar 4.10.	Langkah Memilih Lintasan Inversi 2D dalam WinGlink	54
Gambar 4.11.	Langkah Inversi 2D dalam WinGlink	54
Gambar 4.12.	Langkah Pengubahan Warna dalam WinGlink	55
Gambar 4.13.	Langkah Penentuan Batas Tampilan Hasil Inversi 2D	55
Gambar 4.14.	Langkah Menghilangkan Grid dalam WinGlink	55
Gambar 4.15.	Langkah Penyimpanan <i>File</i> Inversi 2D	56
Gambar 4.16.	Contoh Tampilan Hasil Inversi 2D dalam Geoslicer-X	56

Gambar 4.17. Tampilan <i>Software</i> MT3DInv-X	58
Gambar 4.18. Definisi Bagian pada <i>Software</i> MT3DInv-X.....	58
Gambar 4.19. Format Penulisan Lokasi Stasiun dalam <i>File Data</i>	61
Gambar 4.20. Langkah <i>Input Data</i> dalam MT3DInv-X	61
Gambar 4.21. Langkah <i>Input Data</i> (2) dalam MT3DInv-X.....	62
Gambar 4.22. Visualisasi Ukuran Grid dalam <i>Initial Model</i>	65
Gambar 4.23. Mesh Grid Parameter dalam MT3DInv-X.....	65
Gambar 4.24. Langkah Pembuatan <i>Initial Model</i> dalam MT3DInv-X	66
Gambar 4.25. Langkah <i>Eksport Data</i> dalam MT3DInv-X	69
Gambar 5.1. Grafik Perbandingan Jumlah Periode Terhadap Waktu Inversi .	72
Gambar 5.2. Grafik Kurva MT dengan Beberapa Periode	73
Gambar 5.3. Hasil Inversi 2D MT Tawau, Malaysia Arah Utara-Selatan	74
Gambar 5.4. Hasil Inversi 2D MT Tawau, Malaysia Arah Barat-Timur	74
Gambar 5.5. Penampang Isovalue Resistivitas 100 ohm.m.....	75
Gambar 5.6. Penampang Isovalue Resistivitas 150 ohm.m.....	75
Gambar 5.7. Penampang Isovalue Resistivitas 200 ohm.m.....	76
Gambar 5.8. Penampang Isovalue Resistivitas 300 ohm.m.....	76
Gambar 5.9. Hasil Inversi 3D Arah Utara-Selatan.....	77
Gambar 5.10. Hasil Inversi 3D Arah Barat-Timur	77
Gambar 5.11. Penampang Isovalue Resistivitas 100 ohm.m.....	78
Gambar 5.12. Penampang Isovalue Resistivitas 150 ohm.m.....	78
Gambar 5.13. Penampang Isovalue Resistivitas 200 ohm.m.....	78
Gambar 5.14. Penyebaran Lokasi <i>Hot Spring</i> di Area Survey	79
Gambar 5.15. Dugaan Posisi Reservoir Geotermal Berdasarkan Inversi 2D ...	80
Gambar 5.16. Peta Struktur Daerah Tawau, Malaysia	81
Gambar 5.17. Peta Struktur di dalam Peta Lokasi Survey MT	81
Gambar 5.18. Perbedaan Hasil Penampang Inversi 2D dan 3D	82
Gambar 5.19. Lokasi Slicing Lintasan 4 (kiri), Penampang Resistivitas Hasil Inversi 3D MT (kanan).....	84
Gambar 5.20. Konseptual Model untuk Slicing Lintasan 4.....	84
Gambar 5.21. Lokasi Slicing Lintasan A (kiri), Penampang Resistivitas Hasil Inversi 3D MT (kanan).....	85
Gambar 5.22. Konseptual Model untuk Slicing Lintasan A.....	85
Gambar 5.23. Konseptual Model Terintegrasi Geotermal Prospek Tawau, Malaysia dalam 3 dimensi	86
Gambar 5.23. Luasan Daerah Reservoir	86

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Data Umur Batuan Vulkanik Area Tawau Menggunakan Metode TL.....	37
Tabel 3.2.	Data Umur Batuan Alterasi Area Tawau Menggunakan Metode TL.....	37
Tabel 3.3.	Rangkuman Data Stratigrafi dan Data Umur Area Tawau	38
Tabel 3.4.	Analisa Kimia dari Hot Spring Area Apas Kiri.....	43
Tabel 3.5.	Estimasi Temperatur Reservoir Menggunakan $\delta^{18}\text{-O}(\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O})$ Model untuk <i>Hot Spring</i> di Area Tawau	45
Tabel 5.1.	Spesifikasi Komputer.....	70
Tabel 5.2.	Hasil Pengamatan Jenis Komputer Terhadap Waktu Inversi	70
Tabel 5.3.	Hasil Pengamatan Jumlah Periode Terhadap Waktu Inversi.....	71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Hasil Inversi 2D Tiap Lintasan (WinGlink).....	92
Lampiran 2.	Tampilan Slicing Kedalaman untuk Hasil Inversi 2D dan 3D.....	97

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi geotermal merupakan energi terbarukan (*renewable*) dan bersih. Energi ini memanfaatkan uap panas yang terbentuk alami di dalam bumi, yang berasal dari fluida yang terpanasi oleh batuan panas bawah permukaan. Oleh karena sistem energi ini membutuhkan adanya batuan panas magmatik bawah permukaan tanah, maka sistem energi ini dapat ditemukan di sepanjang jalur tumbukan lempeng. Adapun komponen dari sistem geotermal itu sendiri adalah terdiri dari komponen *clay cap*, reservoir, *heat source* dan fluida.

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi panas bumi yang cukup besar karena berada dalam jalur tumbukan lempeng (zona subduksi). Menurut Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral (DIM), saat ini diperkirakan total potensi energi panas bumi Indonesia adalah sebesar 27000 MW. Potensi ini setara dengan 40% dari cadangan panas bumi dunia (Citrosiswoyo, 2008). Akan tetapi, hingga saat ini energi geotermal yang telah dikembangkan hanya sekitar 1196 MW atau setara dengan 4% dari total potensi yang ada (Sukhyar, 2011). Hal ini tentu sangat disayangkan. Oleh karenanya, pemahaman eksplorasi yang lebih mendalam mengenai sistem geotermal sangat diperlukan untuk meningkatkan eksploitasi potensi panas bumi yang ada di Indonesia.

Salah satu metode geofisika yang efektif untuk eksplorasi geotermal ini adalah metode Magnetotellurik. Pada prinsipnya, metode ini adalah salah satu metode geofisika pasif yang memanfaatkan arus telurik yang ada di dalam bumi. Penetrasi yang dihasilkan dalam metode ini dapat mencapai kedalaman hingga >3000m, sehingga mampu memetakan sistem geotermal yang biasanya terletak pada kedalaman yang dalam. Parameter yang dianalisis dari metode ini adalah parameter resistivitas batuan dan *phase* (Daud, 2010). Dengan adanya data pemetaan resistivitas bawah permukaan tersebut, maka kita selanjutnya akan dapat mengetahui perkiraan secara lebih akurat mengenai di mana lokasi reservoir

geotermal, lokasi *clay cap* dan lokasi komponen sistem geotermal lainnya bawah permukaan bumi.

Pemetaan sistem geotermal berdasarkan nilai resistivitas batuan bawah permukaan dapat diperoleh dengan melakukan pengolahan data Magnetotellurik. Dalam pengolahan data lebih lanjut, pemetaan nilai resistivitas bawah permukaan yang telah diperoleh tersebut, kemudian dapat dimodelkan, baik itu dalam bentuk 1 dimensi, 2 dimensi ataupun 3 dimensi. Pemodelan tersebut dimaksudkan untuk mengekstraksi informasi yang terkandung dalam data untuk memperkirakan distribusi resistivitas bawah permukaan (Grandis, 2010).

Pemodelan inversi 1D, 2D dan 3D Magnetotellurik dapat terlihat dalam kasus *Glass Mountain* (Cumming and Mackie, 2010). Untuk penyelidikan geotermal di wilayah tersebut dilakukan pemodelan 1D, 2D, dan 3D serta analisa *clay* dari pemodelan 1D dan 3D. Dalam paper tersebut dijelaskan bahwa pemodelan inversi 1D dapat memberikan gambaran kasar mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan, tetapi dengan batasan tepi yang masih belum akurat dan sempurna. Sementara itu, pemetaan resistivitas bawah permukaan yang lebih baik dapat dihasilkan dari pemodelan inversi 2D. Akan tetapi untuk mendapatkan pemetaan resistivitas bawah permukaan yang akurat, pemodelan dengan hasil inversi ini memerlukan ketelitian yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan, pengolahan inversi 2D berpeluang besar terhadap efek statik di dalam data dan sangat memerlukan kejelasan arah *strike*.

Dalam paper tersebut dijelaskan pula bahwa pemodelan inversi 3D akan dapat membantu interpretasi sistem geotermal menjadi lebih baik dalam hal menampilkan penyebaran resistivitas batuan bawah permukaan. Hal ini dikarenakan, dengan inversi 3D kita akan memperoleh informasi mengenai ketebalan *clay cap* yang ada di wilayah tersebut. Dari kesemua penjelasan diatas terlihat bahwa pengintegrasian hasil inversi 1D, 2D dan 3D merupakan langkah yang dapat dilakukan guna memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan.

Meskipun integrasi hasil inversi 1D, 2D dan 3D merupakan langkah baik untuk menghasilkan penentuan target pengeboran yang lebih sesuai dan akurat, pemodelan magnetotellurik biasanya hanya dilakukan dalam inversi 1D dan

inversi 2D. Pengembangan lebih lanjut hingga inversi 3D biasanya jarang untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan, pengolahan inversi 3D membutuhkan komputasi yang lebih kompleks (Wannamaker et al., 1984). Pengolahan inversi 3D memerlukan spesifikasi tersendiri yang lebih *complicated* dibandingkan dengan inversi 1D dan 2D, baik itu dalam hal waktu pengerjaan ataupun perangkat elektronik yang dibutuhkan.

Oleh karena pentingnya pemahaman lebih lanjut mengenai proses pengolahan data inversi 3D dalam metode Magnetotellurik, maka dalam penelitian tugas akhir ini akan dikaji lebih dalam mengenai hal tersebut. Adapun hasil yang diperoleh dari pengolahan inversi Magnetotellurik 3D selanjutnya akan dianalisis dengan membandingkannya terhadap hasil pengolahan inversi 2D. Hasil pengintegrasian dari kedua inversi tersebut diharapkan dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan yang lebih sesuai dan akurat.

1.2 Permasalahan

Dalam penelitian ini akan digunakan data MT di daerah prospek geotermal Tawau Malaysia (Daud, et al., 2008). Permasalahan yang mendasari penelitian ini melingkupi beberapa hal yang di antaranya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil penampang resistivitas bawah permukaan yang diperoleh dari pengolahan inversi 2D dan 3D MT Data Tawau, Malaysia?
2. Perbedaan apa sajakah yang dapat diperoleh dari kedua hasil inversi tersebut?
3. Bagaimana pula pemodelan sistem geotermal daerah Tawau, Malaysia berdasarkan hasil interpretasi terintegrasi antara inversi 2D dan 3D MT?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini didasari oleh beberapa tujuan yang di antaranya adalah:

1. Memahami cara dan langkah-langkah pengolahan data Magnetotellurik (MT) dari inversi 2D hingga inversi 3D
2. Memahami analisa perbedaan penampang resistivitas hasil inversi antara 2D dan 3D MT

3. Memahami cara interpretasi hasil gabungan antara inversi 2D dan 3D hingga terbentuk konseptual model sistem geotermal yang terintegrasi
4. Sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana S1 FMIPA Jurusan Fisika, Peminatan Geofisika

1.4 Metodologi Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur, memahami dan mempelajari tentang teori metode Magnetotellurik, baik itu dari prinsip munculnya gelombang elektromagnetik, akuisisi survey MT hingga langkah pengolahan data (*processing*) inversi Magnetotellurik 2D dan 3D.

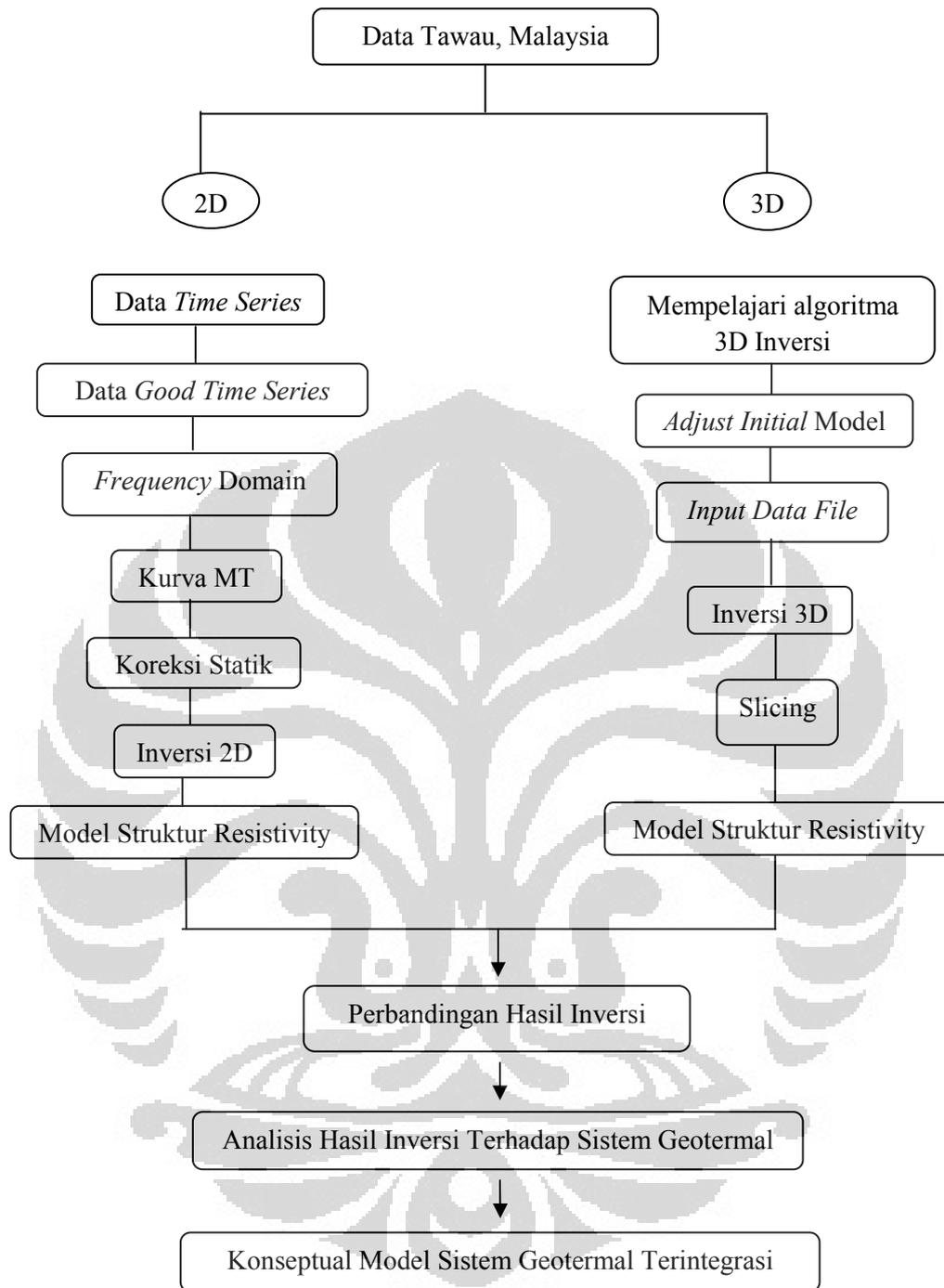
Penelitian ini lebih difokuskan dalam hal pengolahan data (*processing*) Magnetotellurik, khususnya dalam hal inversi 2D dan 3D. Pengolahan data Magnetotellurik itu sendiri dilakukan dengan mempergunakan beberapa *software-software* yang terkait. Secara garis besar, kegiatan inversi 2D meliputi proses:

1. Pemilihan data *time series* yang berasal dari data lapangan (*selecting data*) menggunakan *software* Synchro Time Series Viewer
2. Pengubahan data *time series* ke dalam frekuensi domain menggunakan prinsip *fourier transform* dalam *software* SSMT 2000
3. Menghilangkan efek *static shift* di dalam data MT menggunakan data TDEM
4. Menampilkan hasil inversi 2D menggunakan *software* WinGlink

Sementara itu untuk kegiatan inversi 3D, kesemua proses dilakukan dengan menggunakan *software* MT3DInv-X yang dikembangkan oleh PT. NewQuest Geotechnology dan Geoslicer-X yang dikembangkan oleh Lab Geofisika UI. Adapun kegiatan inversi 3D meliputi beberapa hal yang diantaranya:

1. Pembuatan initial model untuk inversi 3D menggunakan *software* MT3DInv-X
2. Memasukkan data input untuk inversi 3D dalam *software* MT3DInv-X
3. Menampilkan hasil inversi 3D
4. Slicing hasil inversi 3D untuk interpretasi dalam *software* Geoslicer-X

Keseluruhan langkah yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. *Flowchart* Metodologi Penelitian

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam laporan kali ini, secara singkat dapat dijelaskan sebagai berikut:

Dalam **BAB I** yang berisi pendahuluan, didalamnya dijelaskan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi dan sistematika penulisan. Sedang pada **BAB II** dibahas tentang teori-teori dasar yang mendukung dalam penulisan laporan ini. Dalam bab ini dijelaskan mengenai sistem panas bumi, konsep metode magnetotellurik hingga konsep impedansi dan inversi. **BAB III** berisi informasi mengenai *design* pengukuran metode MT yang dilakukan dan data penunjang lain berupa kondisi geologi daerah penelitian dan data geokimia. Sedang dalam **BAB IV** penulis mulai membahas mengenai segala proses pengolahan (*processing*) MT dimulai dari pengolahan inversi 2D dan 3D. Dalam bab ini dijelaskan pula mengenai langkah-langkah secara umum yang harus dilakukan selama *processing* untuk tiap-tiap *software* yang digunakan. Inversi Magnetotellurik 2D dimulai dengan melakukan pemilihan *time series* mempergunakan *software* Synchro Time Series Viewer, perubahan *time series* ke dalam frekuensi domain mempergunakan *software* SSMT 2000, dan penghilangan efek *static shift* serta proses inversi mempergunakan *software* WinGlink. Sementara itu, untuk kegiatan inversi 3D Magnetotellurik dipergunakan *software* MT3DInv-X dan Geoslicer-X.

Selanjutnya, dalam **BAB V** penulis membahas mengenai analisa dari hasil kurva yang diperoleh selama pengolahan data (*processing*). Di dalam bab ini juga dilakukan pembahasan mengenai interpretasi terhadap hasil kurva yang telah diperoleh hingga terbentuk konseptual model terintegrasi. Di akhir, dilakukan kesimpulan dari analisa-analisa yang ada dan saran-saran yang mungkin dilakukan dalam rangka perbaikan untuk studi lebih lanjut. Kesemua hal tersebut dijelaskan di dalam penutup, yakni **BAB VI**.

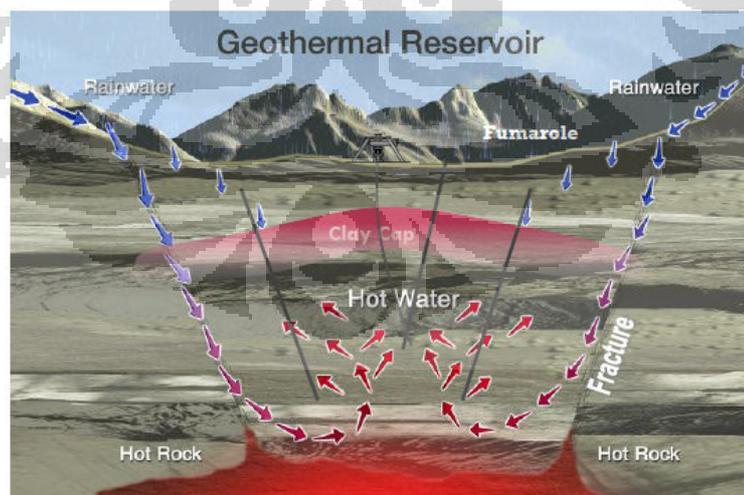
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Panas Bumi

Pada dasarnya, suhu akan menjadi semakin tinggi ketika pengukuran suhu dilakukan pada lapisan tanah yang semakin dalam. Hal ini dinamakan dengan *temperature gradient*. *Temperature gradient* terjadi di semua tempat. Akan tetapi, hal tersebut tidak berlaku pada sistem panas bumi. Sistem panas bumi tidak dapat ditemukan di sembarang tempat. Untuk membentuk sebuah sistem panas bumi diperlukan adanya beberapa spesifikasi komponen-komponen tertentu yang harus terpenuhi.

Di dalam sistem geotermal, tidak hanya panas yang dibutuhkan, tetapi komponen lainnya juga harus ada di dalam sistem tersebut. Secara keseluruhan, komponen-komponen dari sistem geotermal adalah *clay cap*, batuan reservoir, *heat source*, dan fluida. Kesemua komponen tersebut harus ada untuk membentuk sebuah sistem geotermal. Ketika salah satu komponen tidak ada di dalam sistem, maka sistem tersebut tidak bisa dikatakan sebagai sistem geotermal.



[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Introduction to Geothermal System and Technology*]

Gambar 2.1. Model Sistem Geotermal

Indikasi adanya sistem geotermal di suatu lokasi tertentu dapat dilihat dari ada atau tidaknya manifestasi sistem geotermal yang muncul di permukaan. Beberapa jenis manifestasi permukaan dari suatu sistem geotermal diantaranya adalah *hot spring*, *mud pool*, *fumarole*, *silica sinter*, *sofatara*, dan batuan alterasi. Ketika salah satu dari manifestasi tersebut muncul di permukaan pada suatu lokasi tertentu, maka kemungkinan besar di lokasi tersebut telah terdapat sistem geotermal.

Adapun tahap akhir dari eksplorasi sistem geotermal di suatu daerah adalah penentuan titik pengeboran. Beberapa kriteria dari daerah target pengeboran geotermal adalah:

1. Daerah yang memiliki temperatur yang tinggi, dan
2. Daerah yang memiliki permeabilitas yang tinggi biasanya berasosiasi dengan daerah reservoir.

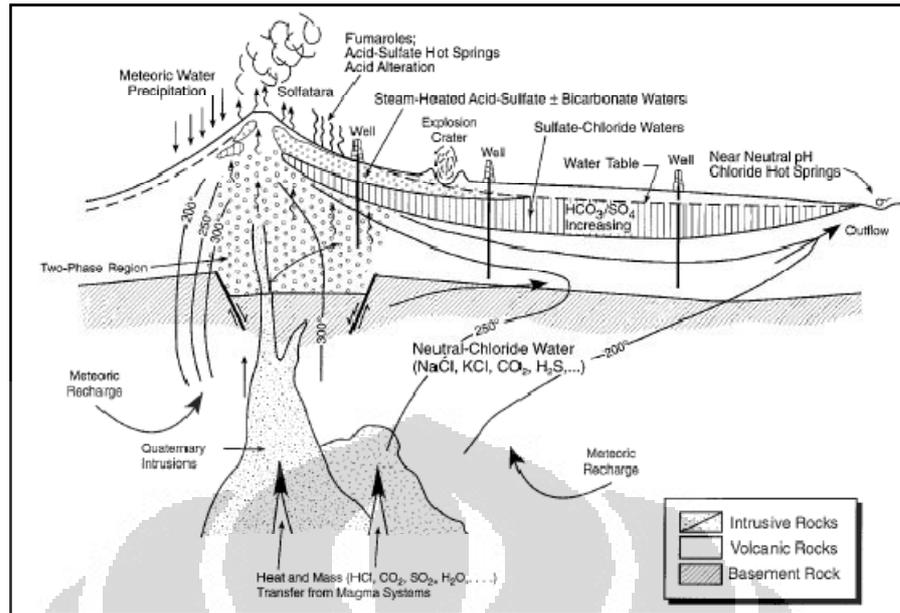
Lokasi titik pengeboran terbaik terletak di pusat sistem geotermal itu sendiri (pusat reservoir). Oleh karenanya, untuk mendapatkan lokasi pusat reservoir suatu sistem geotermal, dilakukanlah survey geofisika.

2.2 Jenis Sistem Geotermal

Komponen-komponen yang harus ada untuk membentuk sistem geotermal adalah sumber panas (*heat source*), fluida, reservoir sebagai tempat untuk mengakumulasi panas, dan batuan penutup (*clay cap*) untuk menghadang panas yang terakumulasi (Gupta and Roy, 2007). Sistem geotermal ini terbentuk pada kondisi geologi tertentu. Goff and Janik (2000) mengklasifikasikan tipe sistem geotermal berdasarkan kondisi geologi, yang diantaranya adalah sebagai berikut.

1. *Young Igneous System*

Sistem geotermal tipe ini berasosiasi dengan batuan vulkanik dan sering ditemukan di daerah zona subduksi. Suhu reservoir yang terukur untuk sistem geotermal ini adalah sekitar 370⁰C. Selain itu, kedalaman reservoir pada sistem ini biasanya ditemukan pada kedalaman 1.5 km atau lebih.

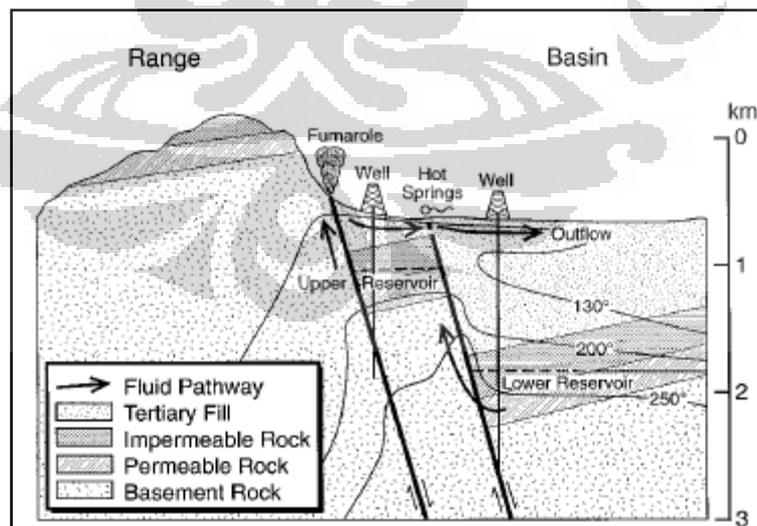


[Sumber : Goff and Janik, 2000, *Encyclopedia of Volcanoes : Geothermal System*]

Gambar 2.2. Model Sistem Geotermal : *Young Igneous Sistem*

2. *Tectonic System*

Sistem geotermal tipe ini berada di sekitar lingkungan *back arc*. Suhu reservoir dapat mencapai sekitar 250°C . Reservoir sistem geotermal tipe ini dapat ditemukan pada kedalaman sekitar 1.5 km.



[Sumber : Goff and Janik, 2000, *Encyclopedia of Volcanoes : Geothermal System*]

Gambar 2.3. Model Sistem Geotermal : *Tectonic System*

3. *Geopressured System*

Sistem geotermal tipe ini ditemukan di daerah basin sedimen. Reservoir geotermal pada tipe ini biasanya berada pada kedalaman 1.5–3km dengan suhu berkisar antara 50° – 190° C.

4. *Hot Dry Rock System*

Prinsip dasar dari sistem geotermal tipe ini adalah mengeksploitasi panas yang ada di dalam batuan *impermeable*. Metodenya adalah dengan membuat *fracture* pada batuan tersebut kemudian diinjeksi air. Panas yang terdapat dalam batuan *impermeable* tersebut diharapkan dapat memanasi fluida yang diberikan, hingga fluida berubah wujud menjadi uap. Reservoir geotermal pada tipe ini biasanya berada pada kedalaman 2-4 km dengan suhu berkisar antara 120° - 225° C.

5. *Magma Tap System*

Suhu reservoir geotermal pada tipe ini dapat mencapai sekitar 1200° C. Prinsip sistem geotermalnya mirip dengan tipe sistem *Hot Dry Rock*. Hal yang membedakan adalah pengeboran geotermal pada tipe ini dilakukan di tubuh magma dangkal.

Berdasarkan tipe fluidanya, sistem geotermal terbagi menjadi beberapa macam (Daud, 2010), yaitu :

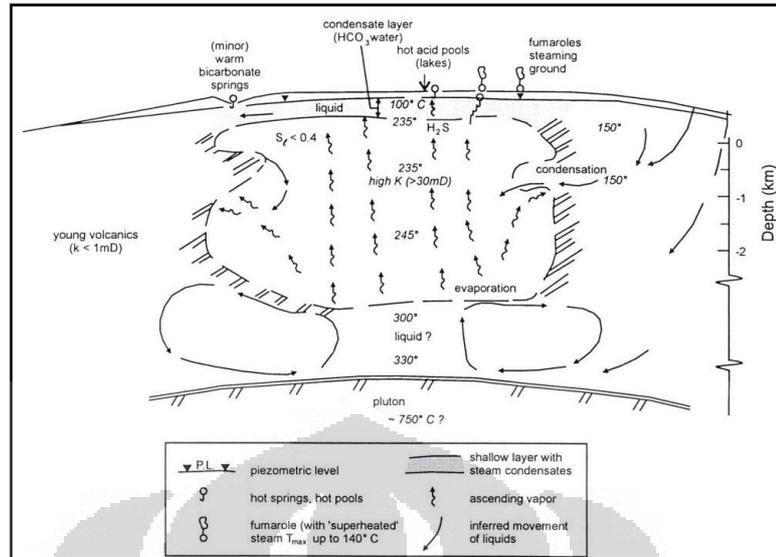
1. Sistem 1 fasa

Sistem geotermal tipe ini umumnya berisi air dengan suhu sekitar 90° - 180° C. Dalam reservoir sistem ini, tidak terjadi pendidihan sehingga fluida dalam reservoir tidak berubah wujud.

2. Sistem 2 fasa :

a. *Vapour Dominated System*

Dalam sistem ini, rongga dari batuan reservoir dominan mengandung uap. Hal ini dikarenakan, bentuk dari sistem geotermalnya adalah *close system*. Tidak terjadi *recharge* (aliran fluida masuk) ke dalam sistem, sehingga fluida yang ada di dalam reservoir terus menerus mengalami konveksi dan menyebabkan kehomogenan fluida (berbentuk uap).

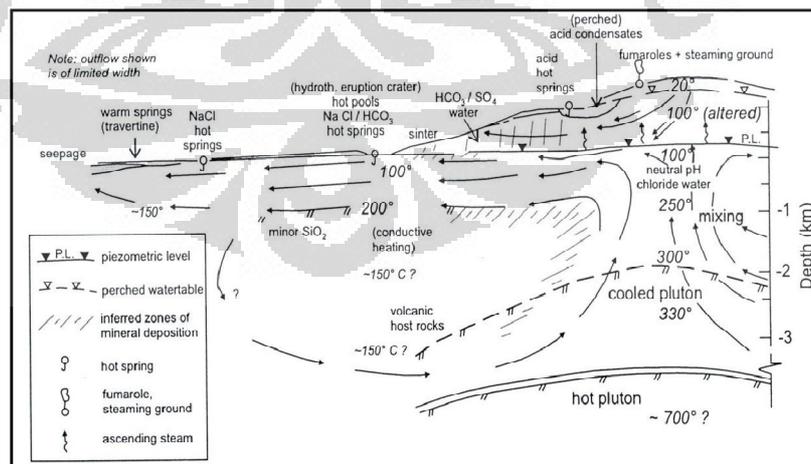


[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Introduction to Geothermal System and Technology*]

Gambar 2.4. Model Sistem Geotermal : *Vapour Dominated System*

b. Liquid Dominated System

Di dalam sistem ini, rongga batuan reservoir dominan berisi air. Bentuk dari reservoir sistem ini bukanlah *close system*, melainkan fluida yang berasal dari reservoir dapat keluar ke permukaan melalui *up flow* ataupun *outflow*.



[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Introduction to Geothermal System and Technology*]

Gambar 2.5. Model Sistem Geotermal : *Water Dominated System*

Sementara itu, sistem geotermal juga dapat terbagi berdasarkan temperatur. Pembagiannya menurut Daud (2010) adalah sebagai berikut.

1. Sistem geotermal temperatur rendah : $T < 100^{\circ}\text{C}$
2. Sistem geotermal temperatur sedang : T antara $100^{\circ}\text{-}200^{\circ}\text{C}$
3. Sistem geotermal temperatur tinggi : $T > 200^{\circ}\text{C}$

2.3 Prinsip Magnetotellurik

Metode Magnetotellurik (MT) merupakan suatu metode eksplorasi geofisika pasif yang bertujuan untuk merekam besarnya medan elektromagnetik bumi alami, guna mengetahui kondisi bawah permukaan. Metode ini merupakan metode yang sering digunakan untuk eksplorasi geotermal. Penggambaran komponen sistem geotermal bawah permukaan yang biasa terletak pada kedalaman yang dalam dapat tergambar dengan sangat baik melalui metode ini. Konsep gelombang elektromagnetik yang mendasari metode MT ini adalah konsep persamaan Maxwell, khususnya dalam persamaan Hukum Ampere dan persamaan Hukum Faraday (Simpson, 2005).

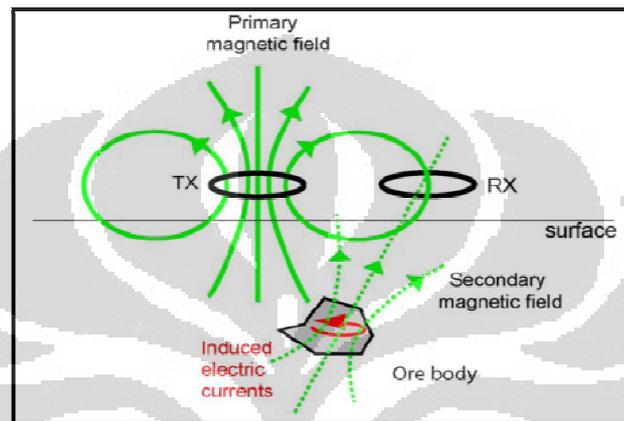
$$\nabla \times \vec{B} = \mu\sigma E \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Persamaan 2.1 merupakan persamaan Hukum Ampere sedangkan persamaan 2.2 merupakan persamaan Hukum Faraday. Persamaan Hukum Ampere bermakna bahwa arus elektrik pada loop tertutup akan berasosiasi dengan medan magnet dimana besarnya medan magnet tersebut tegak lurus terhadap total aliran arus. Sementara itu, persamaan Hukum Faraday bermakna bahwa variasi medan magnetik akan menginduksi munculnya arus listrik (Simpson, 2005).

Adapun proses terbentuknya medan magnet dan medan listrik dalam metode Magnetotellurik dapat dijelaskan sebagai berikut. Ketika *transmitter* (TX) yang berupa loop diberi arus listrik, maka di sekitar loop akan muncul medan magnet. Hal ini sesuai dengan prinsip Hukum Ampere. Selanjutnya, arus yang diberikan pada loop tersebut dibuat mati-hidup secara terus menerus sehingga

muncullah fluks magnetik di sekitar loop. Fluks magnetik yang berada di sekitar kawat loop *transmitter* kemudian *generate* arus induksi ke batuan yang ada di dalam bumi. Arus induksi tersebut dinamakan dengan arus Eddy. Hal ini sesuai dengan prinsip Hukum Faraday. Di dalam batuan, arus listrik induksi tersebut kemudian menghasilkan medan magnet yang selanjutnya diterima oleh *receiver* di atas permukaan (Daud, 2010).



[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Metode Magnetotelluric (MT)*]

Gambar 2.6. Konsep Gelombang Elektromagnetik

2.4 Sumber Gelombang Elektromagnetik dalam MT

Pada dasarnya, bumi memiliki medan elektromagnetik yang relatif konstan. Akan tetapi, medan elektromagnetik yang dipergunakan dalam metode magnetotellurik ini bukanlah medan elektromagnetik tersebut, melainkan medan elektromagnetik yang berubah-ubah terhadap waktu. Adapun sumber medan elektromagnetik bumi alami yang berubah-ubah terhadap waktu dapat berasal dari petir dan *solar wind*. Besar medan elektromagnetik dengan frekuensi diatas 1 Hz berasal dari petir sedangkan *solar wind* *generate* medan elektromagnetik dengan frekuensi dibawah 1 Hz (Simpson, 2005).

Ionosphere yang berada 50-1500 km di atas permukaan bumi merupakan tempat dimana terdapat plasma yang memiliki konduktivitas elektrik yang cukup tinggi. Sementara itu, di permukaan matahari selalu terjadi letupan-letupan plasma

yang sebagian besar mengeluarkan partikel hidrogen. Oleh karena adanya ionisasi di permukaan matahari, maka partikel hidrogen tersebut berubah menjadi plasma yang mengandung proton dan elektron. Plasma ini berkecepatan rendah, memiliki sifat acak terhadap waktu dan dikenal dengan sebutan *Solar Wind* (Darmawan, 2007).

Apabila *solar wind* tersebut bertemu dengan medan magnet bumi, maka proton dan elektron akan berpisah dengan arah yang berlawanan dan menimbulkan medan EM di dalam *solar wind* itu sendiri. *Solar wind* yang membawa medan EM akan terus menjalar sampai lapisan ionosfer hingga permukaan bumi (Darmawan, 2007). Medan EM yang sampai ke permukaan bumi tersebut selanjutnya akan berinteraksi dengan material yang ada dibawah permukaan dan selanjutnya konsep elektromagnetik MT akan terjadi.



(a)

(b)

[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Metode Magnetotelluric (MT)*]

Keterangan : (a) *solar wind* dan (b) petir

Gambar 2.7. Sumber Gelombang EM dalam MT

2.5 Penetrasi

Metode MT bergantung pada penetrasi medan EM yang masuk kedalam bumi (Green, 2003). Gelombang elektromagnetik dan konduktivitas batuan bumi itu sendiri yang nantinya akan berpengaruh terhadap penetrasi (Simpson, 2005). Oleh karena frekuensi bumi yang ingin direkam sangat kecil, maka alat yang digunakanpun dibuat agar memiliki spesifikasi yang sama, yakni frekuensi yang kecil. Oleh karenanya, metode Magnetotellurik (MT) memiliki penetrasi yang

sangat dalam (dapat mencapai >3km). Semakin kecil frekuensi dari alat yang kita gunakan, maka akan semakin dalam penetrasi yang diperoleh (Simpson, 2005). Akan tetapi, konsekuensinya adalah proses perekaman data menjadi semakin lama.

Besaran *skin depth* digunakan untuk memperkirakan kedalaman penetrasi atau kedalaman investigasi gelombang elektromagnetik. Adapun *skin depth* (penetrasi) dalam metode Magnetotellurik memenuhi persamaan berikut ini :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = (\pi f\mu\sigma)^{-1/2} \cong 0.503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (km)} \quad (2.3)$$

Dari persamaan 2.3, terlihat bahwa *skin depth* tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya frekuensi alat yang kita gunakan, tetapi faktor resistivitas formasi batuan juga turut mempengaruhi. Semakin besar frekuensi alat yang kita gunakan, maka penetrasi yang diperoleh akan semakin dangkal. Namun, ketika frekuensi alat yang digunakan semakin kecil, maka penetrasi yang dihasilkan akan semakin dalam. Sementara itu, dengan frekuensi alat yang sama, semakin besar nilai resistivitas formasi batuan yang ada dibawah lapisan bumi maka hasil penetrasi yang diperoleh akan semakin dalam. Begitu pula sebaliknya. Jika lapisan dibawah permukaan memiliki resistivitas formasi yang kecil, maka hasil penetrasi yang diperoleh juga akan semakin dangkal.

Besar kecilnya nilai penetrasi bergantung oleh nilai resistivitas batuan dikarenakan lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah (lapisan konduktif), akan cenderung lebih mudah mengalirkan arus dibandingkan dengan lapisan yang lebih resistif. Ketika lapisan konduktif tersebut mendapat injeksi arus dari luar, maka arus luar akan lebih cenderung mengalir hanya di lapisan konduktif saja, tidak mengalir ke lapisan dibawahnya yang lebih resistif. Oleh karenanya, faktor resistivitas formasi batuan akan sangat mempengaruhi besar kedalaman penetrasi yang diperoleh.

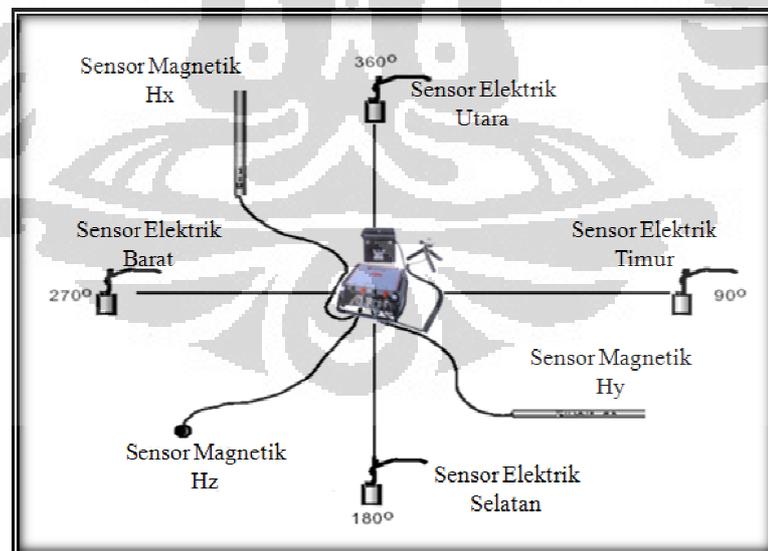
Parameter yang diukur dalam survey Magnetotellurik (MT) adalah medan listrik dan medan magnet di wilayah tersebut (Daud, 2010). Sementara itu, parameter yang dianalisa dalam metode Magnetotellurik adalah *apparent resistivity* dan *phase*. Di dalam teori elektromagnetik, medan listrik selalu tegak

lurus terhadap medan magnet. Perbandingan antara medan magnet dan medan listrik dinamakan dengan impedansi. Impedansi inilah yang mengandung informasi mengenai nilai resistivitas medium terhadap kedalaman.

2.6 Akuisisi Survey Magnetotellurik (MT)

Pada dasarnya, pengambilan data di daerah survey MT dilakukan untuk mengetahui variasi medan EM terhadap waktu, yaitu dengan mengukur secara simultan komponen horisontal medan listrik (E_x , E_y) dan komponen vertikal medan magnet (H_x , H_y , dan H_z). Oleh karenanya, di dalam survey Magnetotelluric (MT), diperlukan adanya 4 buah porospot/sensor elektrik yang dipasang arah utara-selatan dan barat-timur serta 3 buah koil magnetik yang dipasang pada arah utara-selatan, barat-timur dan arah vertikal (Cumming and Mackie, 2010). Adapun jarak antara alat MT dengan elektroda biasa dipasang dengan jarak sekitar 100m (Unsworth, 2008).

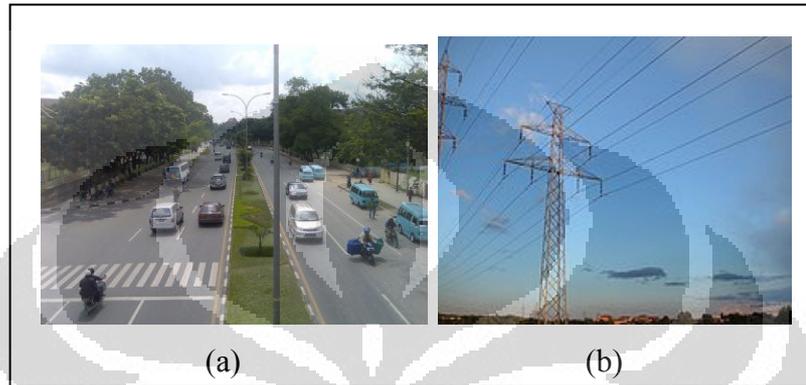
Konfigurasi alat dalam survey Magnetotellurik dapat digambarkan sebagai berikut:



[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Metode Magnetotelluric (MT)*]

Gambar 2.8. MT Field Layout

Sebelum masuk kedalam proses pengolahan data, proses akuisisi juga turut berpengaruh ke dalam hasil data yang diterima. Biasanya, data yang diperoleh dari lapangan merupakan data yang masih banyak mengandung *noise*. *Noise* dalam MT dapat ditimbulkan oleh banyak faktor seperti gelombang elektromagnetik yang dihasilkan oleh sutet, pengaruh angin kencang, *ground motion* (lalu lintas, kereta), dan lain sebagainya.



[Sumber : www.google.com]

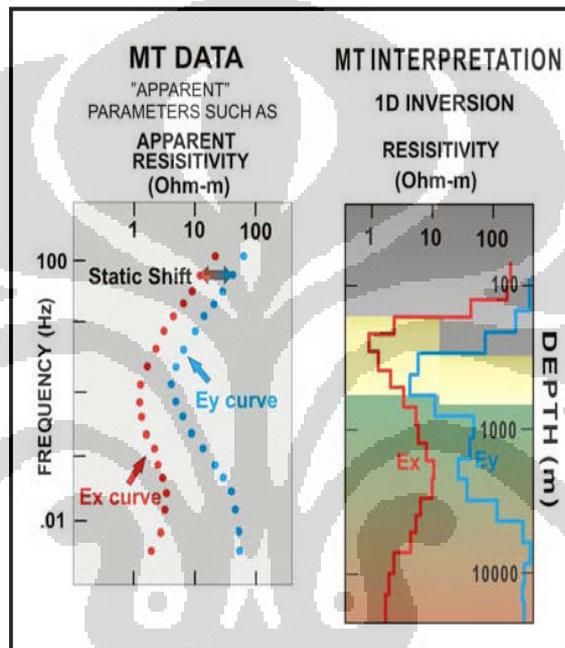
Keterangan : (a) *noise* dari lalu lintas dan (b) *noise* dari sutet

Gambar 2.9. *Noise* dalam MT

Untuk mengkombinasi data pengukuran dan mengurangi *noise* yang ada, biasanya dilakukan pengukuran MT *Remote Reference*. Pengukuran *Remote Reference* dilakukan di daerah yang “noise free” dan biasanya dilakukan pada jarak sekitar ± 50 km dari titik pengukuran. Ketika data yang diperoleh dari *site* pengukuran sudah baik, maka pengukuran *Remote Reference* tidak perlu untuk dilakukan. Sebaliknya, jika data yang diperoleh pada *site* pengukuran banyak mengandung *noise*, maka pengkombinasian data MT dengan data *Remote Reference* sangat dianjurkan untuk dilakukan. *Remote Reference* mampu meningkatkan kualitas data MT yang ada. Hal yang perlu untuk diperhatikan adalah data yang dijadikan sebagai data *Remote Reference* haruslah merupakan data yang baik dan minim dari pengaruh *noise* (Daud, 2010).

2.7 Efek *Static Shift* dalam Metode Magnetotellurik

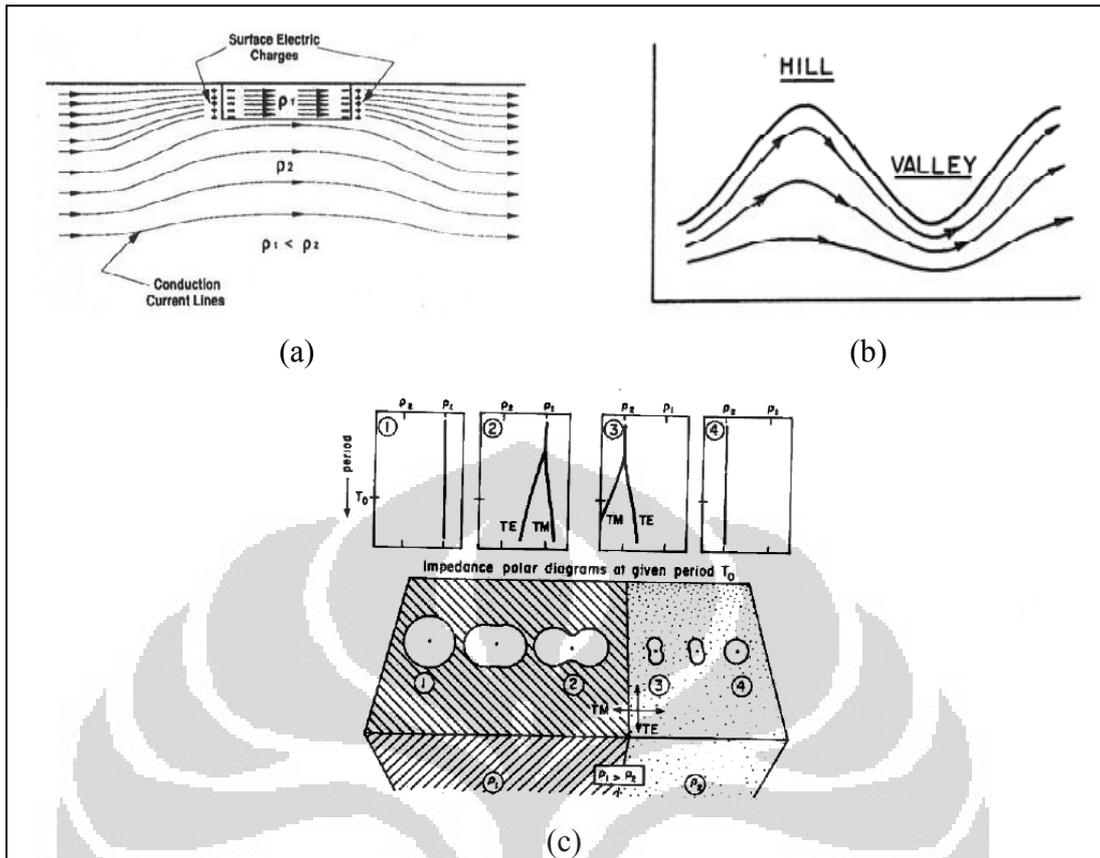
Kurva MT yang baik adalah kurva dimana grafik TE dan TM saling menempel satu sama lain. Akan tetapi, tidak semua kurva yang diperoleh setelah pengolahan (*processing*) memiliki kondisi ideal yang seperti itu. Banyak kurva berada dalam kondisi grafik dimana kurva TE dan TM terpisah pada jarak tertentu. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh suatu efek yang dinamakan dengan efek *static shift*.



[Sumber : Cumming, William and Mackie, Randal, 2010, *Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D, and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History*]

Gambar 2.10. Efek *Static Shift* pada Data MT

Static shift merupakan distorsi sumber potensial yang terjadi pada kebanyakan metode resistivity yang mempergunakan elektroda (Cumming and Mackie, 2010). Hal ini menyebabkan timbulnya perubahan/perbedaan nilai resistivitas yang tercatat pada modus TE dan TM. Perbedaan nilai resistivitas pada kurva TE dan TM tersebut nantinya akan dapat menyebabkan terjadinya kekeliruan terhadap nilai resistivitas yang sebenarnya dibawah permukaan.



[Sumber : Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah Static Shift Dalam Metode Magnetotelluric*]

Keterangan : a. *near-surface inhomogeneity*, b. *topographic effect*, c. *vertical contact*

Gambar 2.11. Penyebab Efek *Static Shift* dalam MT

Static shift ini dapat muncul akibat beberapa faktor, diantaranya adalah akibat *near-surface inhomogeneity*, *vertical contact* dan *topographic effect*. *Near-surface inhomogeneity* terjadi ketika ada keadaan bawah permukaan yang tidak homogen. Ketidakhomogenan tersebut akan mengganggu penjalaran arus sehingga dapat terjadi penumpukan arus di lokasi tertentu.

Perbedaan topografi juga dapat menyebabkan efek *static shift* muncul. Ketika dilakukan pengukuran di tempat yang berbeda ketinggian yang sangat mencolok, maka bisa dipastikan kurva TE akan terpisah dengan kurva TM. Hal ini disebabkan karena penjalaran arus di daerah berbukit dengan di daerah rendah akan mengalami perbedaan. Oleh karenanya, efek *static shift* menjadi muncul.

Selain itu, ketika terdapat dua buah formasi batuan yang memiliki perbedaan resistivitas dimana formasi tersebut saling kontak dan berada pada jalur

tempat kita melakukan pengukuran MT, maka hal itu juga dapat menimbulkan munculnya efek *static shift*.

2.8 Impedansi

Sebuah stasiun MT digunakan untuk mengukur medan magnet dan medan listrik yang ada di wilayah tersebut dalam rentang waktu tertentu. Oleh karena metode MT adalah metode frekuensi domain, maka kita akan mengekstrak data frekuensi dari data *time series* yang ada dengan menggunakan transformasi Fourier (Green, 2003).

Dalam domain frekuensi, hubungan antara komponen horisontal medan listrik dan medan magnet dinyatakan oleh persamaan matriks berikut.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$E = Z \cdot H$$

Dimana Z adalah tensor impedansi

Selanjutnya, nilai *apparent resistivity* dan phase diperoleh dari persamaan sebagai berikut :

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} \quad (2.5)$$

Jika $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$, maka impedansi menjadi :

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{\sqrt{i\omega\mu\sigma}} = \frac{\sqrt{\omega\mu}}{\sqrt{\sigma}}$$

$$|Z(\omega)|^2 = \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 = \frac{\omega\mu_0}{\sigma}$$

$$\sigma = \frac{\omega\mu_0}{|Z|^2}$$

Sehingga :

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (2.6)$$

$$\phi_a = \tan^{-1} |Z|^2 \quad (2.7)$$

2.8.1 Asumsi 2D

Untuk medium 2D, dimana sistem dibuat dalam koordinat Cartesian dengan sumbu x dan y, terdapat 2 impedansi yang dianalisa. Dalam medium 2D, berlaku $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ dan $Z_{xy} \neq -Z_{yx}$.

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dimana :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}$$

Z_{xy} dinamakan mode TE dan Z_{yx} dinamakan mode TM. Data TE merupakan data yang terekam dimana komponen medan listrik sejajar dengan *strike* sedangkan data TM merupakan data yang terekam dimana komponen medan magnet sejajar dengan *strike*.

Persamaan mode TE dan TM pada dasarnya diturunkan dari persamaan Maxwell. Adapun penjabarannya adalah sebagai berikut (Simpson, 2005) :

$$\nabla \times B = \mu\sigma E \quad (2.9)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -i\omega B \quad (2.10)$$

Persamaan 2.9 dan 2.10 dijabarkan, menjadi :

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x ; \quad \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \mu\sigma E_y ; \quad \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu\sigma E_z \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega B_x ; \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -i\omega B_y ; \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega B_z \quad (2.12)$$

Dalam kasus 2D, tidak ada variasi dalam arah x. Oleh karenanya, diambil asumsi $\frac{\partial}{\partial x} = 0$. Dengan demikian, persamaan 2.11 dan 2.12 menjadi :

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x ; \quad \frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu\sigma E_y ; \quad -\frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu\sigma E_z \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega B_x ; \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega B_y ; \quad -\frac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega B_z \quad (2.14)$$

Kedua persamaan diatas (persamaan 2.13 dan 2.14) dibagi kedalam dua mode pengukuran. TE merupakan kondisi dimana medan elektrik sejajar dengan *strike* dan medan magnet tegak lurus dengan *strike*. Jika arah *strike* diasumsikan berada pada arah x, maka medan listrik berada pada arah x dan medan magnet berada pada arah y dan z. Persamaan yang memenuhi adalah :

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x ; \quad \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega B_y ; \quad -\frac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega B_z \quad (2.15)$$

TM merupakan kondisi dimana medan magnet sejajar dengan *strike* dan medan listrik tegak lurus terhadap *strike*. Jika diasumsikan arah *strike* berada pada arah x, maka medan magnet berada pada arah x dan medan listrik berada pada arah y dan z. Persamaan yang memenuhi adalah :

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega B_x ; \quad \frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu\sigma E_y ; \quad -\frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu\sigma E_z \quad (2.16)$$

Dalam kasus 2D, kepastian arah *strike* sangat diperlukan. Ketika arah *strike* diketahui, maka data MT selanjutnya dapat dirotasikan terhadap arah *strike* tersebut. Proses perotasian ini dapat dinyatakan kedalam matriks berikut ini.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Sehingga $E = RE'$ dan $H = RH'$

Tensor impedansi terotasi dirumuskan dengan :

$$Z^* = R \cdot Z \cdot R^T \quad (2.18)$$

Dimana R^T adalah matriks transpose dari R

Dengan demikian, dalam medium 2D, nilai *apparent resistivity* dapat dirumuskan dalam persamaan berikut.

$$\rho_{xy} = \rho_{TE} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad (2.19)$$

$$\rho_{yx} = \rho_{TM} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2 \quad (2.20)$$

Dimana :

ω = frekuensi angular

μ = permeabilitas

2.8.2 Asumsi 3D

Untuk medium 3D, tensor impedansi berlaku $Z_{xx} \neq Z_{yy}$ dan $Z_{xy} \neq Z_{yx}$. Dengan demikian, persamaan matriks tensor impedansi 3D dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

$$E = Z \cdot H$$

2.9 Inversi

Inversi adalah pendekatan matematis untuk memfitkan respon fisika dari model yang ada terhadap data observasi/lapangan (Baranwal, 2010). Menurut Siripunvaraporn (2012), inversi adalah alat matematika yang digunakan untuk mengkonversi data observasi menjadi model struktur bawah permukaan yang lebih memiliki makna.

Dalam pengembangannya, terdapat 3 jenis inversi, yakni inversi 1 dimensi, 2 dimensi dan 3 dimensi. Inversi 1D dilakukan dengan mengambil asumsi bahwa bumi bersifat homogen, sehingga nilai resistivitas bawah permukaan dibuat hanya bervariasi terhadap kedalaman. Inversi 1D bisa dikatakan terlalu *simple* untuk dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan bumi yang

kompleks. Akan tetapi, kenyataannya inversi 3D juga terlalu membutuhkan waktu inversi yang lama dan memori CPU yang besar didalam prosesnya. Terkadang, untuk kasus tertentu, ketika asumsi struktur 2D bawah permukaan bersifat valid, pendekatan inversi 2D dapat dijadikan alternatif untuk mendapatkan model yang sesuai (Baranwal, 2010).

Akan tetapi, tetap saja inversi 2D masih memiliki kelemahan jika dibandingkan dengan inversi 3D. Menurut Siripunvaraporn (2012), Beberapa kelemahan inversi 2D dibandingkan dengan inversi 3D adalah sebagai berikut :

- a. Karena bumi adalah dalam 3 dimensi, maka model 2D terkadang tidak bisa digunakan untuk menjelaskan kondisi bumi yang kompleks secara 3 dimensi. Seluruh penelitian mengindikasikan bahwa jika data yang dimiliki mengandung struktur 3D, maka inversi 2D berkemungkinan besar dapat menghasilkan interpretasi yang salah. Kenyataannya, memang masih memungkinkan jika interpretasi dilakukan berdasarkan hasil inversi 2D. Hal ini dikarenakan didalam inversi 2D terdapat 2 mode (TE dan TM) yang saling melengkapi. Ini semua secara signifikan bergantung pada posisi struktur 3D terhadap arah *strike* 2D. Akan tetapi, dalam praktiknya meskipun terdapat dua mode didalam inversi 2D, tetap saja inversi ini hanya mampu mengetahui sedikit struktur 3D yang sebenarnya.
- b. Di dalam inversi 2D dibutuhkan kejelasan mengenai arah *strike*. Akan tetapi, hal tersebut tidak berlaku dalam inversi 3D. Inversi 3D tidak memerlukan kejelasan arah *strike*.
- c. Inversi 3D dapat menginversi kesemua arah. Hal ini dikarenakan derajat kebebasan 3D adalah tinggi. Hal ini berbeda dengan inversi 2D yang memiliki derajat kebebasan yang kecil, sehingga untuk mengakomodasi efek 3D yang dibutuhkan didalam data, inversi 2D hanya dapat memasukkan informasi struktur di dalam *profile* untuk menghindari terjadinya kesalahan interpretasi.
- d. Inversi 2D hanya mungkin dilakukan jika data stasiun berada dalam 1 *line*/lintasan. Hal ini berbeda dengan 3D dimana dapat melakukan inversi untuk data stasiun yang menyebar.

2.9.1 Algoritma Inversi MT

Kebanyakan proses geofisika dapat diformulasikan dalam bentuk :

$$d_i = \int_0^z K_i(z) p(z) dz \quad (2.22)$$

dengan d_i adalah respon atau data yang terukur, $p(z)$ adalah parameter model, yaitu suatu fungsi yang berkaitan dengan parameter fisis yang hendak dicari, dan K_i adalah data Kernel. Data Kernel adalah data yang menjelaskan hubungan antara d_i dan parameter model $p(z)$ (Rosid, 2011).

Untuk pendekatan komputasi, persamaan di atas disederhanakan dengan $p(z) dz = m$ dan $K_i(z) = G_i$, sehingga persamaan di atas berubah menjadi :

$$d_i = \sum G_{ij} m_j \quad (2.23)$$

Matrix Kernel merupakan solusi untuk menyelesaikan permasalahan inversi. Akan tetapi, karena permasalahan MT tidak bisa didekati dengan solusi di atas, maka penyelesaiannya tidak dapat dilakukan dengan cara yang sama. Penyelesaian yang dapat dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan inversi MT adalah dengan meminimalisir persamaan fungsi *unconstraint* yang ada melalui pendekatan iterasi.

Di dalam data magnetotellurik, terdapat 2 jenis fungsi utama *unconstraint* yang harus diminimalisir melalui pendekatan iterasi untuk menghasilkan model yang fit dengan data yang ada. Salah satunya adalah fungsi berikut :

$$U(m, \lambda) = \lambda^{-1} \{ (d - F[m])^T C_d^{-1} (d - F[m]) - \chi^2 \} + (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0) \quad (2.24)$$

Dimana :

m : model resistivity dalam dimensi M

m_0 : prior model

C_m : model matrix Covariance

d : data observasi dengan dimensi N

$F(m)$: Forward model response

C_d : data matrix Covariance
 χ^2 : level misfit yang diinginkan
 λ^{-1} : Lagrange multiplier

Fungsi yang lain adalah $W(m)$, biasa disebut dengan *objective functional* atau *penalty functional*. Persamaan fungsinya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$W(m) = \lambda^{-1}(d - F[m])^T C_d^{-1}(d - F[m]) + (m - m_0)^T C_m^{-1}(m - m_0) \quad (2.25)$$

dimana

λ : parameter yang mengontrol data misfit atau normalisasi model (model norm)

Untuk λ yang besar, akan dihasilkan model yang *smooth*. Sementara itu, model yang kasar (*rougher*) akan dihasilkan untuk λ yang kecil. Terkadang, di beberapa algoritma, nilai λ telah ditetapkan. Akan tetapi, tidak jarang pula algoritma inversi yang tidak menetapkan nilai λ tetapi justru memulai inversi dengan λ yang besar hingga kemudian nilainya berkurang menjadi kecil. Hal ini dilakukan sebagai langkah untuk mengurangi lamanya waktu komputasi.

Inti dari penyelesaian masalah inversi adalah mencari model yang *smooth* yang memiliki kriteria : *norm* yang kecil dan misfit yang dapat diterima (dalam artian tidak melebihi toleransi yang ditentukan). Hal ini berarti menunjukkan kemiripan dengan data yang ada. Secara matematis, dapat dikatakan seperti berikut : untuk data yang ada d_j , kita harus menemukan model m_i yang membuat *roughness* R_1 atau R_2 bernilai sekecil mungkin, sementara misfit X^2 mencapai nilai yang dapat diterima (Constable, 1987).

Secara teknis, pencarian model dilakukan dengan menjalankan nilai λ yang berbeda yang telah ditetapkan di tiap inversi. Kemudian, tiap *running* yang sedang berjalan harus diakhiri ketika misfit telah mencapai level yang diinginkan. Selanjutnya *norm* akan dihitung dan dibandingkan untuk mencari model mana yang memiliki *norm* terkecil.

Seluruh skema inversi yang memiliki dasar meminimalisasi *objective function*, membutuhkan komputasi Jacobian atau matrix sensitivitas dimana

mengandung turunan parsial dari data observasi terhadap parameter model inversi (Baranwal, 2010). Besar kecilnya komputasi Jacobian atau matrix sensitivitas yang harus dilakukan selama waktu inversi bergantung pada algoritma inversi yang digunakan. Oleh karena itulah, bisa dikatakan *CPU time* dan memori yang dibutuhkan untuk menjalankan inversi tidak hanya bergantung pada besarnya data dan model, tetapi bergantung pula pada algoritma inversi yang digunakan.

2.9.2 Jenis Inversi

2.9.2.1 Inversi OCCAM

Proses inversi yang terjadi dalam metode ini terbagi menjadi dua fase. Fase I adalah fase dimana proses inversi akan membawa RMS ke level yang diinginkan dengan mengubah λ . Sementara itu, fase II adalah fase dimana inversi akan meminimalisasi model *norm*. Hal ini dilakukan juga dengan mengubah λ untuk menemukan model dengan normalisasi terkecil sementara RMS tetap dijaga berada pada level yang diinginkan. Dalam inversi ini, λ tidak ditetapkan di awal inversi, melainkan akan berubah dari iterasi 1 ke iterasi lainnya.

Inversi Occam itu sendiri terbagi menjadi dua jenis yang diantaranya adalah *model space (original) method* dan *data space method*. Jika keduanya menggunakan parameter yang sama, seperti λ dan C_m , maka hasil yang diperoleh akan identik.

2.9.2.2 Metode *Model Space*

Prinsip dasar metode ini dimulai dari melakukan proses linearisasi $F(m)$ menggunakan ekspansi Taylor seperti berikut :

$$F(m_{k+1}) = F(m_k) + J_k(m_{k+1} - m_k) \quad (2.26)$$

dimana $J_k = \partial F / \partial m_k$ yang merupakan matrix sensitivitas $N \times M$

Dengan menggunakan $\partial W / \partial m = 0$, maka akan diperoleh persamaan *iterative linear* sebagai berikut :

$$m_{k+1} - m_0 = [\lambda C_m^{-1} + J_k^T C_d^{-1} J_k]^{-1} J_k^T C_d^{-1} d_k \quad (2.27)$$

dengan :

$$d_k = d - F[m_k] + J_k (m_k - m_0)$$

Ditiap iterasi, persamaan 2.27 diselesaikan dengan beberapa nilai λ untuk mendapatkan beberapa *updated model*. Kemudian, model dengan misfit terkecil dipilih didalam fase I dan model dengan *norm* terkecil dimana misfit berada pada level yang diinginkan dipilih dalam fase II. Model yang baru inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung sensitivitas untuk iterasi berikutnya.

Kelebihan dari metode ini adalah kemampuan untuk mencapai konvergensi dalam iterasi yang sedikit. Akan tetapi, metode ini membutuhkan sumberdaya komputasi yang besar. Hal ini dikarenakan, persamaan 2.27 membutuhkan perhitungan inversi matrix $M \times M$ [$\lambda C_m^{-1} + J_k^T C_d^{-1} J_k$] dan juga perhitungan matrix sensitivitas $N \times M$ [J_k]. Kedua proses tersebut membutuhkan waktu CPU dalam jumlah yang cukup besar ditiap iterasi dan juga membutuhkan memori yang besar.

Kelemahan metode ini dibuktikan dengan dilakukannya sebuah eksperimen oleh Siripunvaraporn (2012). Untuk melakukan inversi dengan kriteria data 131 station, 16 frekuensi, dan 12 respon ($N = 25.152$) dan model parameter $M = 56 \times 56 \times 33 = 103.488$; inversi Occam membutuhkan minimum 84 GB untuk melakukan perhitungan inversi matrix dan membutuhkan sekitar 20 GB untuk menyimpan matrix sensitivitas.

2.9.2.3 Metode *Data Space*

Untuk menjaga kelebihan yang terdapat dalam algoritma Occam, *space* komputasi kemudian diubah dari *model space* menjadi *data space*. Dengan demikian, persamaan (2.27) berubah menjadi :

$$m - m_0 = C_m J^T \beta \quad (2.28)$$

dimana β adalah sebuah $N \times 1$ *unknown coefficient vector*.

Persamaan 2.28 dan $F(m)$ yang telah terlinearisasi kemudian dimasukkan kedalam persamaan 2.25 untuk mendapatkan *penalty functional* di dalam *data*

space. Selanjutnya, dilakukan proses penurunan *penalty function data space* terhadap β , maka akan didapatkan persamaan *iterative* sebagai berikut :

$$m_{k+1} - m_0 = C_m J_k^T C_d^{-1/2} [\lambda I + C_d^{-1/2} J_k C_m J_k^T C_d^{-1/2}]^{-1} C_d^{-1/2} d_k \quad (2.29)$$

Dari persamaan 2.29 diatas, terlihat bahwa metode *data space* ini membutuhkan perhitungan inversi matrix $N \times N$ $[\lambda I + C_d^{-1/2} J_k C_m J_k^T C_d^{-1/2}]$ dan perhitungan matrix $N \times M$ (matrix sensitivitas J_k). Dengan pendekatan *data space*, sistem matrix $M \times M$ digantikan dengan matrix $N \times N$. Hal ini menyebabkan seluruh komputasi yang dilakukan bergantung terhadap jumlah data (N) (Siripunvaraporn, 2005). Dengan menurunkan dimensi matrix seperti ini, *CPU time* yang dibutuhkan berkurang sangat signifikan, dan begitu pula dengan *memory*.

Jika dibandingkan dengan metode *model space* ;dengan data dan model yang sama, metode *data space* hanya memerlukan sekitar 5GB untuk melakukan inversi. Hal ini tentu sangat berbeda dengan metode *model space* dimana untuk perhitungan inversi dibutuhkan memori sebesar 84 GB. Akan tetapi dalam hal penyimpanan matrix sensitivitas, metode *data space* tetap membutuhkan kapasitas yang sama dengan metode *model space*, yakni sekitar 20GB.

2.9.2.4 Nonlinear Conjugate Gradient (NLCG)

Untuk kasus *nonquadratic*, metode NLCG dapat digunakan untuk meminimalisasi *objective functional* (persamaan 2.25). Dalam metode ini, persamaan model berubah menjadi :

$$m_{k+1} = m_k + \alpha_k u_k \quad (2.30)$$

dengan $u_k = M_k^{-1}(-\nabla W(m_k))$; M_k adalah sistem pre-conditioner

Proses *update model* dilakukan dengan mempergunakan persamaan 2.30 dimana terlebih dahulu mencari nilai α yang meminimalisasi fungsi $W(m_k + \alpha_k u_k)$. Algoritma ini tidak membutuhkan pembentukan matrix yang besar, yang dibutuhkan hanyalah hasil dari J atau J^T . Efisiensi komputasi algoritma ini

dikontrol oleh jumlah iterasi (N_{cg}). Penelitian Siripunvaraporn (2007) menunjukkan bahwa N_{cg} adalah fungsi dari λ . Nilai λ yang besar akan membutuhkan N_{cg} yang kecil. Akan tetapi, nilai λ yang kecil akan membutuhkan N_{cg} yang besar.

Untuk meningkatkan efisiensi, sebuah *pre-conditioner* dapat dibuat dari pendekatan Hessian yang berkorelasi dengan Laplacian operator. Dengan *pre-conditioner*, jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi ke level yang diinginkan menjadi sangat berkurang (yang berarti bahwa konvergensi dapat dicapai dengan iterasi yang sedikit). Keunggulan *pre-conditioner* dalam algoritma NLCG dibuktikan oleh Rodi Mackie (2001). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan olehnya, diperoleh kesimpulan bahwa ketika digunakan *pre-conditioner*, ternyata algoritma yang ada di dalam NLCG akan makin mempercepat jalannya proses inversi.

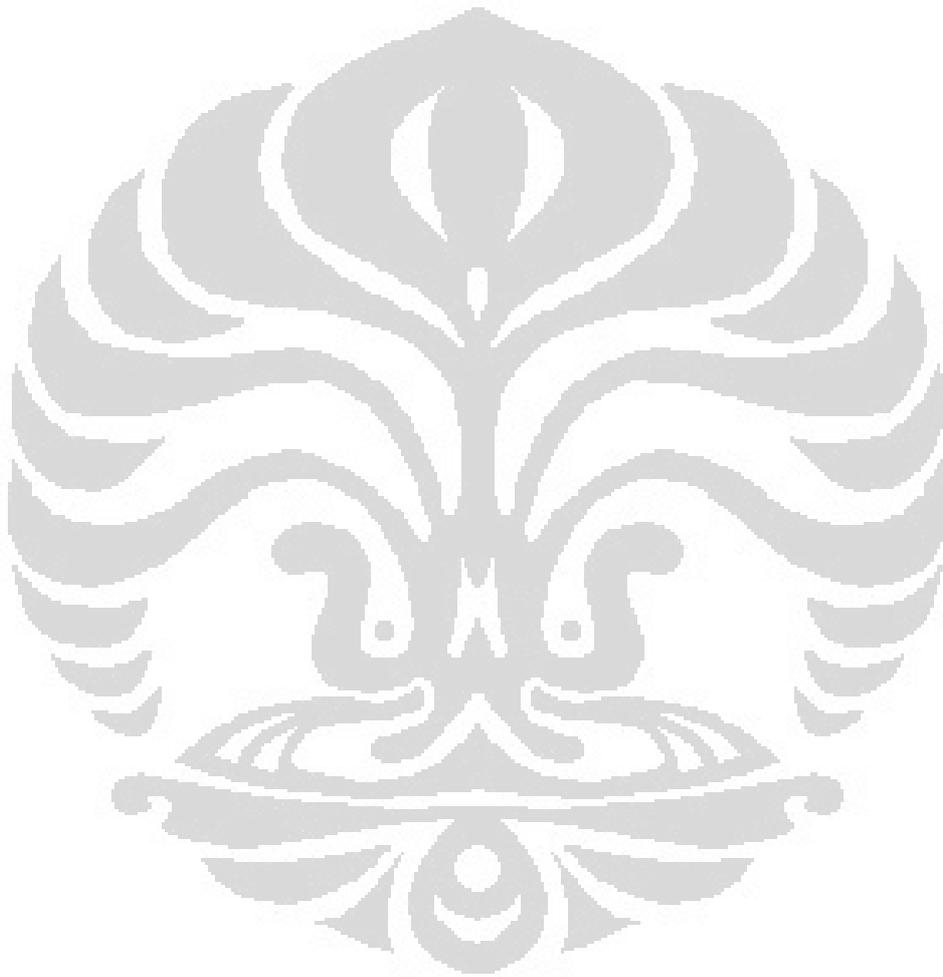
Selain itu, Rodi Mackie pun melakukan penelitian terhadap perbandingan waktu komputasi yang dibutuhkan antar 3 algoritma yang berbeda, yakni algoritma Mackie Madden, NLCG dan Gauss Newton. Dari penelitian yang dilakukan tersebut diperoleh hasil bahwa ternyata algoritma Mackie Madden dan NLCG lebih unggul dibandingkan algoritma Gauss Newton dalam hal waktu komputasi. Hal ini dikarenakan, metode Gauss Newton men-*generate* matriks Full-Jacobian didalam prosesnya dan melengkapi solusi linier masalah inversi ditiap iterasi.

2.9.3 Model Covariance

Di dalam algoritma inversi *model space method* dan *data space method*, terdapat istilah *Model Covariance* (C_m). *Model covariance* adalah matrix yang mengandung nilai variasi resistivity yang telah diperkirakan (*expected*) sebelum inversi. *Model Covariance* ini dapat juga digunakan sebagai operator *smoothness*.

Yang membedakan antara *model space method* dengan *data space method* adalah perhitungan *model covariance* didalam algoritma inversi masing-masing. Dalam *model space method*, persamaan 2.27 membutuhkan inversi dari model covariance C_m^{-1} bukan C_m . Akan tetapi, didalam *data space method*, yang dibutuhkan adalah *model covariance* (C_m). Nilai eksak dari inversi model

covariance (C_m^{-1}) tidak dapat ditentukan secara teknis. Hal ini dikarenakan ukuran dari matrix akan menjadi sangat besar (Siripunvaraporn, 2005). Dengan demikian, perhitungan algoritma didalam *model space method* akan memerlukan komputasi yang besar. Adapun keuntungan langsung dari memiliki C_m dalam algoritma *data space method* adalah adanya kemampuan langsung untuk memasukkan informasi prior seperti *fault* atau *ocean*.



BAB 3

DESAIN SURVEY DAN DATA

3.1 Desain Survey MT

Pengukuran MT di lokasi Tawau, Malaysia dilakukan dengan menggunakan alat MTU-5 Units yang merupakan produk dari Phoenix Geophysics Inc., Canada. Alat ini menggunakan *range* frekuensi antara 0.001 Hz hingga 385 Hz. Dipol elektrik berada pada jarak 100m pada arah Utara-Selatan (Ex) dan arah Barat-Timur (Ey). Sementara itu, komponen medan magnetiknya menggunakan koil magnetik dengan arah Utara-Selatan (Hx), Barat-Timur (Hy) dan arah vertikal (Hz).

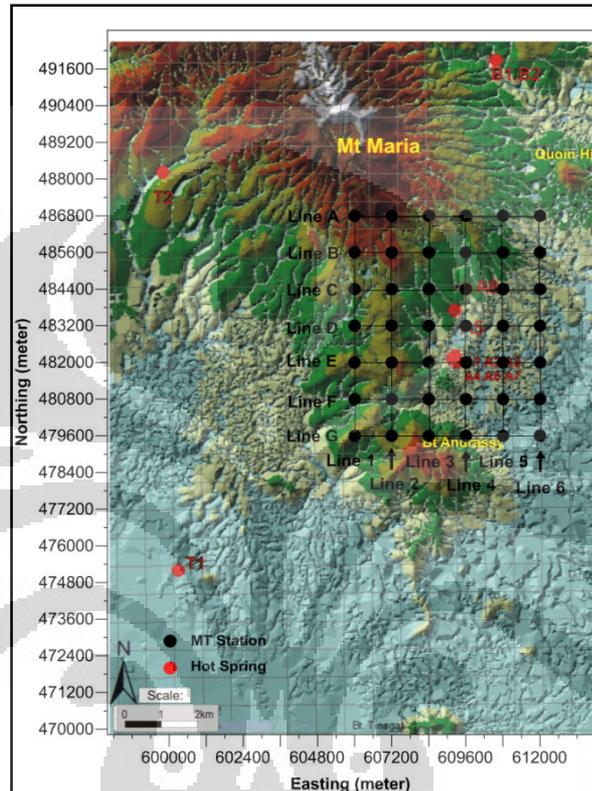
Pengukuran survey MT dilakukan sebanyak 42 titik stasiun yang meliputi daerah selatan Gunung Maria dan daerah utara Gunung Andrassy. Jarak antara stasiun satu dengan stasiun yang lain dibuat dalam jarak sekitar 1200 m. Survey MT ini di desain dalam pola paralel dan tegak lurus untuk mengetahui kondisi struktural bawah tanah yang lebih akurat. Pola paralel (sejajar dengan arah Barat-Timur) diambil pada data dari lintasan A hingga lintasan G sedangkan pola tegak lurus diambil pada data dari lintasan 1 hingga lintasan 6.

Kondisi area survey MT di lokasi ini didominasi oleh hutan yang menutupi hampir 2/3 bagian dari area survey disertai dengan topografi yang tinggi. Kemungkinan adanya *noise* berasal dari aktivitas manusia yang berada di daerah timur dan selatan dari lokasi survey. Untuk menghilangkan *noise* yang muncul tersebut, dilakukanlah pengukuran MT *Remote Reference* yang dilakukan di lokasi yang “free noise” yang berada sekitar 56 km arah barat dari lokasi survey pengukuran MT.

Pengukuran yang dilakukan di lokasi ini tidak hanya pengukuran MT saja, tetapi pengukuran TDEM juga dilakukan. Survey TDEM dilakukan di lokasi yang sama dengan survey MT. Data TDEM yang diperoleh dari pengukuran di lapangan tersebut selanjutnya dipergunakan untuk menghilangkan efek *static shift* yang ada didalam data MT. Adapun pengukuran TDEM itu sendiri

mempergunakan peralatan yang sama dengan pengukuran MT yakni peralatan dari Phoenix.

Lokasi titik pengukuran MT yang dilakukan sebanyak 42 stasiun di lokasi survey Tawau, Malaysia digambarkan dalam Gambar 3.1.



[Sumber : Daud, Yunus, et al., 2010, *The First Magnetotelluric Investigation of the Tawau Geothermal Prospect, Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.1. Titik Stasiun Pengukuran Survey MT Tawau, Malaysia

3.2 Data Geologi Daerah Tawau, Malaysia

3.2.1 Kondisi Geologi dan Tektonik

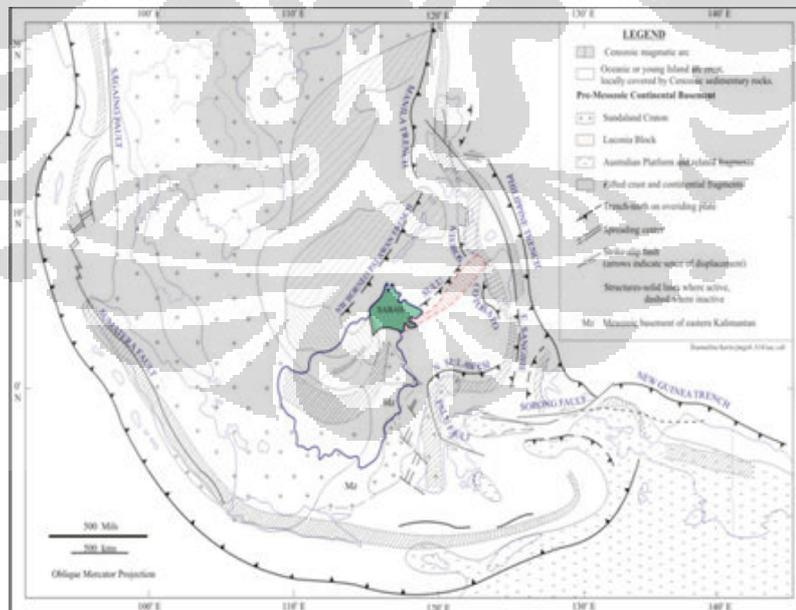
Lokasi prospek geotermal Tawau berada sekitar 20 km arah timur laut kota Tawau, Sabah, Malaysia. Kota Tawau itu sendiri berada tidak jauh dari Indonesia, tepatnya di sebelah utara pulau Kalimantan.



[Sumber : Daud, Yunus, et al., 2010, *The First Magnetotelluric Investigation of the Tawau Geothermal Prospect, Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.2. Lokasi Prospek Geotermal Tawau

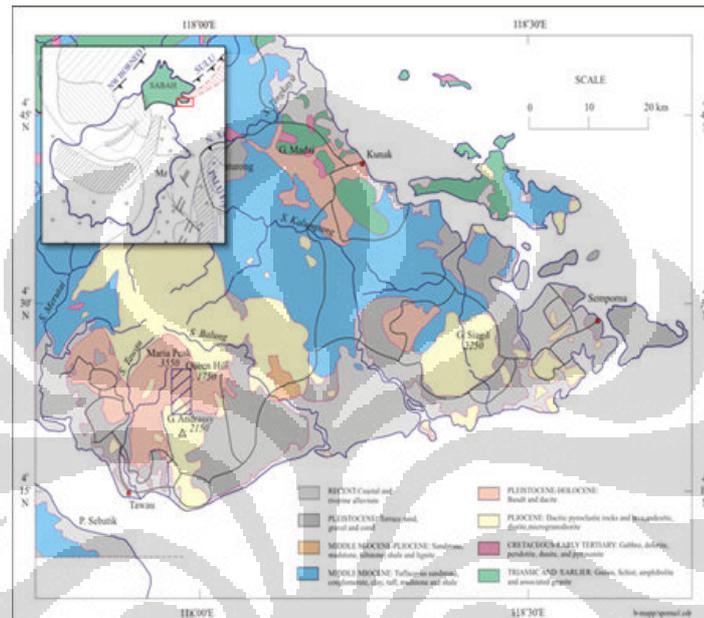
Kondisi regional daerah prospek geotermal Tawau ini berasosiasi dengan aktifitas vulkanik yang dipicu oleh tumbukan Sistem Sulu Archipelago Arc-Trench dengan Semporna Peninsula pada zaman Pleistocene (Daud et al., 2010).



[Sumber : Daud, Yunus, et al., 2010, *The First Magnetotelluric Investigation of the Tawau Geothermal Prospect, Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.3. Kondisi Tektonik Daerah Tawau, Malaysia

Daerah ini didominasi oleh batuan vulkanik Pliocene-Quartener yang berasal dari Gunung Maria dan Gunung Andrassy, berupa batuan basalt, *dacite*, *tuff* dan andesit. Gunung Maria berada di wilayah utara sedangkan Gunung Andrassy berada di wilayah selatan. Kemunculan daerah vulkanik ini diduga berasal akibat adanya zona subduksi yang ada di wilayah tersebut.



[Sumber : Daud, Yunus, et al., 2010, *The First Magnetotelluric Investigation of the Tawau Geothermal Prospect, Sabah, Malaysia*]

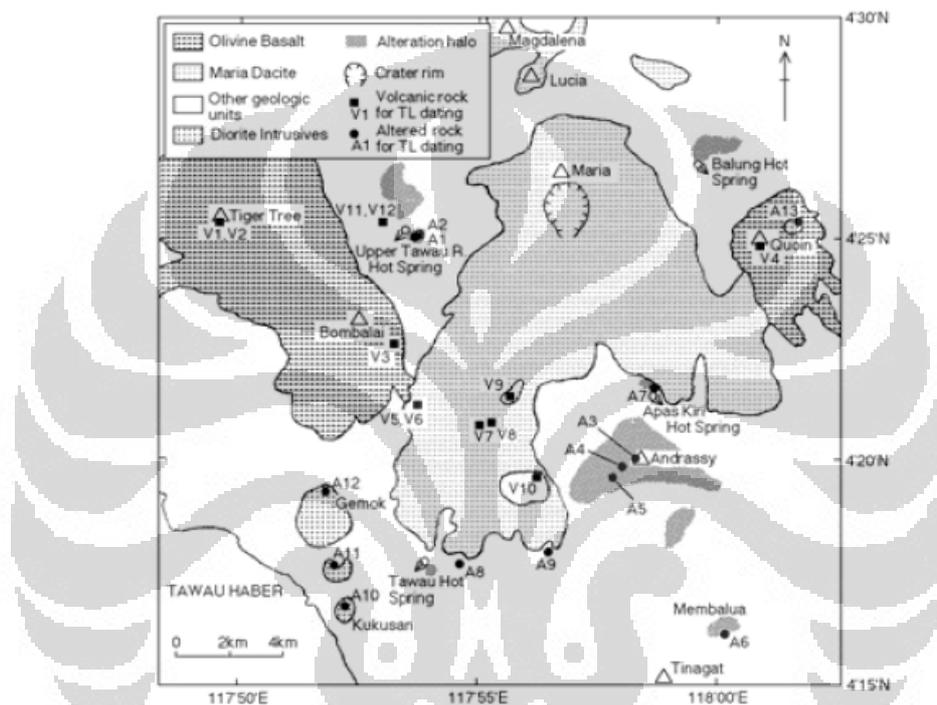
Gambar 3.4. Peta Geologi Daerah Prospek Geotermal Tawau

Menurut Takashima, et al. (2005), secara umum batuan vulkanik di area Tawau terbagi menjadi 4 bagian, yang diantaranya adalah:

- Andrassy volcano → breksi dan lava dacite (akhir Miocene)
- Konabutan Kechil Volcano → lava dacite (akhir Miocene)
- Maria Volcano → lava dacite pyroclastic (akhir Pliocene – awal Pleistocene)
- Olivine Basalt

Penentuan umur batuan vulkanik di area Tawau semula hanya mengacu pada dua data yang diperoleh dengan menggunakan metode K-Ar dan *radiocarbon dating* ^{14}C . Erupsi Quartener yang terdapat di area Tawau

diperkirakan berusia sekitar 27000yBP dengan menggunakan metode *radiocarbon dating* ^{14}C dan diperkirakan berusia 1.62 Ma dengan metode K-Ar. Penelitian mengenai perkiraan umur batuan vulkanik kemudian dikembangkan oleh Takashima et al. melalui metode Thermoluminescence (TL). Adapun lokasi titik-titik sampel pengambilan batuan vulkanik dan batuan alterasi untuk metode Thermoluminescence digambarkan dalam peta berikut.



[Sumber : Takashima, Isao, et al., 2005, *Precise Thermoluminescence Dating for Heat Source Volcanic Rocks and Alteration Products at Tawau Geothermal Area, Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.5. Lokasi Titik Sampel Metode Thermoluminescence

Dari Gambar 3.5, terlihat bahwa jumlah lokasi pengambilan sampel metode Thermoluminescence di area Tawau dilakukan sebanyak 25 titik, dengan rincian 12 titik dilakukan untuk batuan vulkanik dan 13 titik dilakukan untuk batuan alterasi. Adapun data yang diperoleh untuk 12 sampel batuan vulkanik dan 13 sampel batuan alterasi di area Tawau berturut-turut terlihat dalam Tabel 3.1. dan Tabel 3.2.

Tabel 3.1. Data Umur Batuan Vulkanik Area Tawau Menggunakan Metode TL (Takashima, et al., 2005)

Locality No	Sample No	U (ppm)	Th (ppm)	K2O (%)	Annual Dose (mGy/a)	Paleodose (Gy)	TL age (Ma)	Remarks
(Olivine Basalt)								
V1	MS0406A	0.69	2.91	1.13	1.09	113	0.10±0.02	
V2	MS0406B	0.83	2.76	1.12	1.01	109	0.11±0.02	
V3	MS0407	1.31	4.88	1.58	1.35	121	0.09±0.014	
V4	MS0704	1.44	5.53	1.86	2.13	300	0.14±0.03	
(Maria Dacite)								
V5	MS0501A	1.21	5.37	1.52	1.53	682	0.45±0.11	
V6	MS0501B	2.25	9.15	1.82	2.16	728	0.34±0.06	
V7	MS0502	2.75	10.37	2.15	2.53	985	0.39±0.07	
V8	MS0503	2.23	9.72	1.90	2.05	700	0.34±0.07	
(Upper Tawau Andesite)								
V9	MS0504A	1.97	7.01	1.88	2.15	1253	(0.52)*	Weakly weathered
V10	MS0505	2.04	7.13	2.73	2.91	962	(0.33)*	Do.
V11	MS0604A	1.91	7.63	2.59	3.1	1100	(0.36)*	Do
V12	MS0604B	2.02	7.5	2.7	2.9	777	(0.27)*	Do.

*Age data for weathering correction (see text)

Tabel 3.2. Data Umur Batuan Alterasi Area Tawau Menggunakan Metode TL (Takashima, et al., 2005)

Locality No	Sample No	U (ppm)	Th (ppm)	K2O (%)	Water (%)	Annual Dose (mGy/a)	Paleodose (Gy)	TL age (Ma)	Alteration Type
(Upper Tawau Hot Spring Area)									
A1	MS03	7.00	13.09	0.05	7.7	4.53	702	0.15±0.05	Silicified
A2	MS0602	3.46	12.09	0.01	6.2	3.43	666	0.19±0.06	Silicified
(Andrassy Alteration Area)									
A3	MS0508	0.76	3.14	2.53	0	3.16	1862	0.59±0.18	Silicified
A4	MS0509	1.94	8.32	2.93	12.1	4.21	1652	0.39±0.12	Acidic (White)
A5	MS0510	2.34	7.53	0.8	10.1	2.73	1808	0.66±0.20	Acidic (White)
(Membalua Alteration Area)									
A6	MS0512	1.26	7.32	1.47	16.9	2.47	1279	0.52±0.16	Acidic (White)
(Apas Kiri Hot Spring Area)									
A7	MS01	1.72	6.92	1.50	5.0	2.18	1623	0.32±0.10	Alkaline (Green)
(Regional Green Colored Alteration – Altered Andesite)									
A8	MS0405	1.59	6.20	1.96	0	2.48	941	0.38±0.11	Alkaline (Green)
A9	MS0507	2.24	7.63	2.78	0	3.43	914	0.27±0.08	Alkaline (Green)
(Diorite Intrusives)									
A10	MS0401A	1.96	7.45	2.45	0	2.89	1182	0.41±0.08	Alkaline (Green)
A11	MS0402	1.76	6.42	2.40	0	2.67	1662	0.62±0.12	Alkaline (Green)
A12	MS0403	1.76	6.88	2.42	0	2.83	1345	0.48±0.10	Alkaline (Green)
A13	MS0705	1.75	6.15	2.33	0	2.74	1200	0.44±0.09	Alkaline (Green)

Dari Tabel 3.1, terlihat bahwa umur termuda batuan vulkanik berada dalam *range* usia 0.09–0.14 Ma diperoleh untuk batuan Olivine Basalt. Sementara itu, umur batuan vulkanik dacite yang tersebar di kaki gunung Maria sebelah

selatan berada dalam *range* usia antara 0.34 Ma hingga 0.45 Ma (4 sampel). Selain itu, umur dari lapisan lava andesit berada dalam *range* 0.27 Ma hingga 0.52 Ma (4 sampel).

Dari Tabel 3.2, terlihat bahwa umur termuda untuk batuan alterasi diperoleh pada *range* usia 0.15 Ma dan 0.19 Ma untuk area Upper Tawau Hot Spring. Sedangkan umur batuan alterasi lainnya menyebar dari 0.27 Ma hingga 0.66 Ma. Keseluruhan data diatas dapat dirangkum di dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Rangkuman Data Stratigrafi dan Data Umur Area Tawau (Takashima, et al., 2005)

Stratigraphy (modified from Ueno et al., 1994)	Formation name in this paper	Reported age	IL age (this paper)
VOLCANIC ROCKS			
PLEISTOCENE			
Olivine Basalt	Olivine Basalt	27000 yBP (C-14)*	0.09-0.14Ma
Maria Volcano and Their Equivalents	Maria Dacite	1.62 Ma (K-Ar)**	0.34-0.45Ma
MIDDLE MIOCENE - PLOocene			
Andrassy and Kinabutan Kechil Volcanoes	Andrassy Dacite	6.4 Ma (K-Ar)**	
Magdalena-Lucia Volcano	Upper Tawau Andesite		(0.7-1.2Ma)***
Tinagat Volcano	Tinagat Andesite	13.3-70.7Ma(FT)**	
Altered Andesite	Altered Andesite		(1.27,0.38Ma)****
INTRUSIVE ROCKS			
Diorite Porphyrite	Diorite Intrusives		(0.41-0.62Ma)****

*Kirz (1968) **Ueno et al (1994) ***Corrected age of weathering ****Alteration age

Dari keseluruhan data yang ada tersebut, area Tawau diestimasi berada pada zaman Pleistocene Tengah menggunakan data umur Thermoluminescence (Takashima, et al., 2005).

3.2.2 Manifestasi Permukaan

Sumberdaya geotermal di daerah Tawau, Malaysia memiliki potensial yang tinggi. Di daerah ini ditemukan beberapa *hot spring* dan kawah vulkanik di sekitar Gunung Maria yang mengindikasikan adanya zona *up-flow* yang diduga berhubungan langsung dengan reservoir.

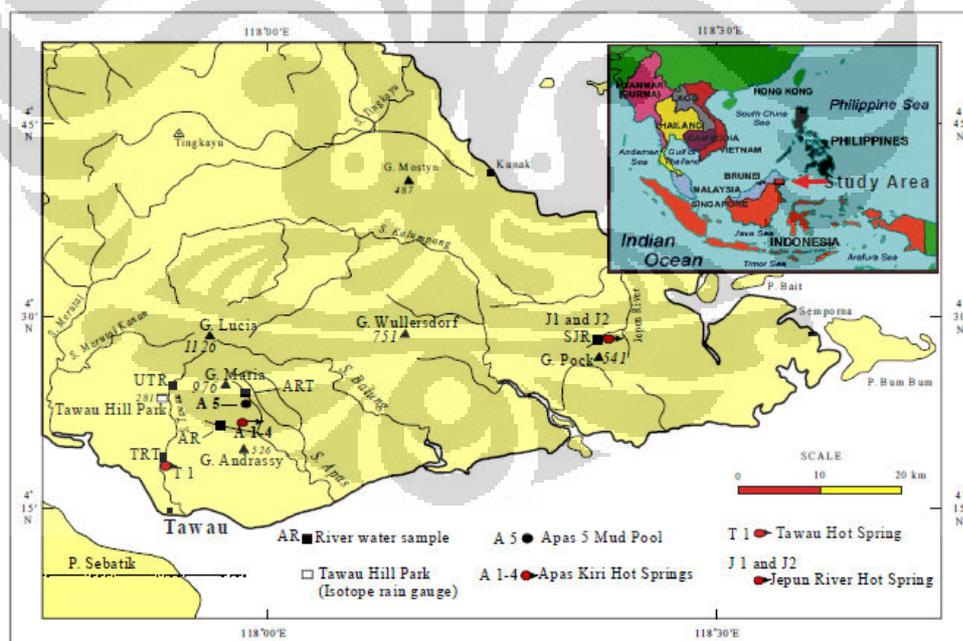
Berdasarkan data investigasi yang diperoleh dari Departemen Mineral dan Geoscience Malaysia, indikasi geotermal di daerah Tawau ditandai oleh adanya

manifestasi berupa *hot spring*, *mud pools* dan *steaming ground*. Mineral geotermal sekunder seperti *chloride*, *pyrite* dan *actinolite* juga tersebar di wilayah ini (Javino, et al., 2010). Beberapa manifestasi yang ditemukan di daerah Tawau dapat dijelaskan lebih rinci sebagai berikut :

- Di puncak Gunung Maria ditemukan adanya kawah vulkanik
- Di sekitar Gunung Maria ditemukan adanya *steam heated acid sulfate hot spring*
- Di lereng selatan gunung Maria ditemukan *neutral chloride spring*
- Di sepanjang Gunung Maria dan Gunung Andrassy terdistribusi/tersebar batuan teralterasi

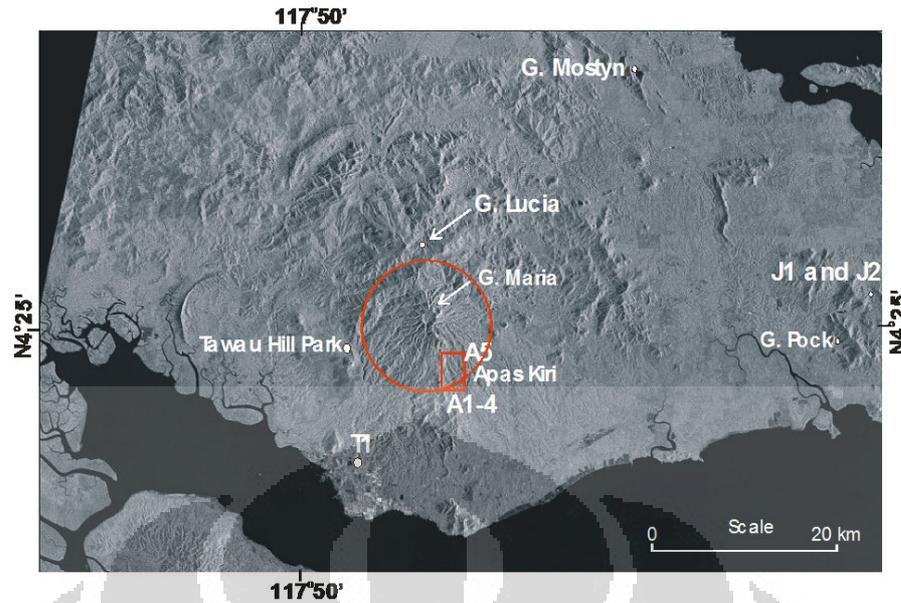
Penemuan beberapa manifestasi permukaan tersebut mengindikasikan bahwa di wilayah ini diperkirakan terdapat sistem geotermal berlevel sedang ke tinggi (Daud, 2010).

Secara garis besar, terdapat dua lokasi utama munculnya manifestasi geotermal di daerah Tawau, Malaysia, yakni Apas Kiri dan Sungai Jepun.



[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.6. Lokasi Penyebaran *Hot Spring* di daerah Tawau, Malaysia

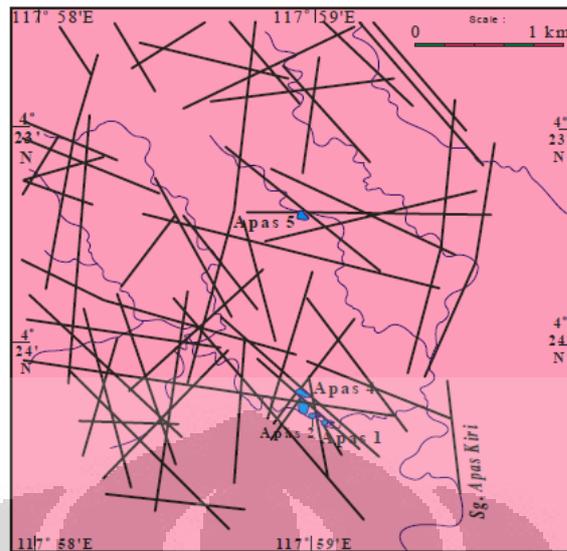


[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.7. Tampilan Satelit Daerah Tawau, Malaysia

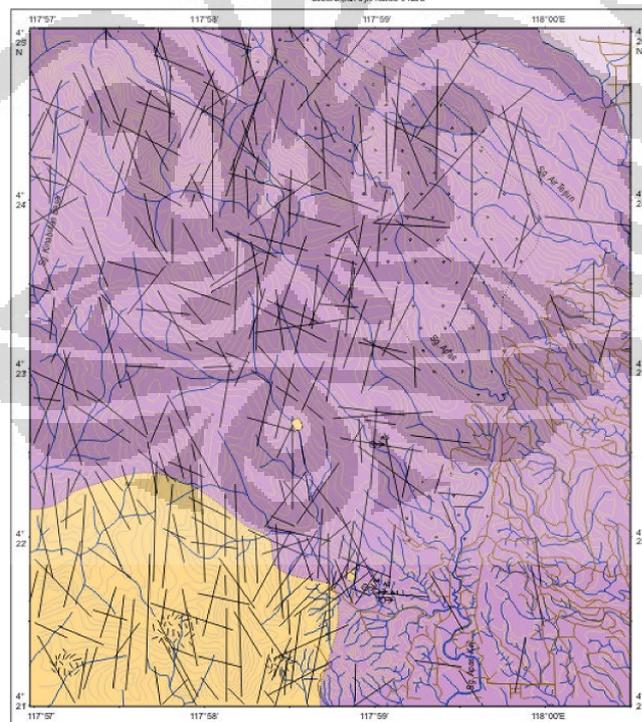
Apas Kiri berada di lokasi 3 km arah utara dari Puncak Gunung Andrassy, daerah Tawau-Semporna, Malaysia. Jenis-jenis manifestasi yang terdapat di area Apas Kiri ini meliputi *hot spring*, *old streaming ground*, dan *mud pool*. Manifestasi *hot spring* di area ini ditemukan di titik A1, A2, A3 dan A4. Sedangkan, manifestasi berupa *mud pools* ditemukan pada titik A5. Area Apas Kiri didominasi oleh lava *dacite*, *tuff* dan *agglomerate* berusia Pliocene-Quaterner. *Agglomerate dacite* ditemukan di area sebelah barat, *dacite* lava ditemukan disebelah barat laut dan timur laut, sedangkan *tuff* ditemukan di area tengah, selatan dan timur (Javino, et al. 2010).

Manifestasi geotermal Apas Kiri berlokasi di sekitar struktur linear (Gambar 3.8). Struktur menunjukkan zona *fracture* yang disebabkan oleh tekanan magmatic. Zona *fracture* ini merupakan bagian penting dalam sistem geotermal yang berguna untuk membuat adanya *fracture permeability* untuk outflow *geothermal fluid*.



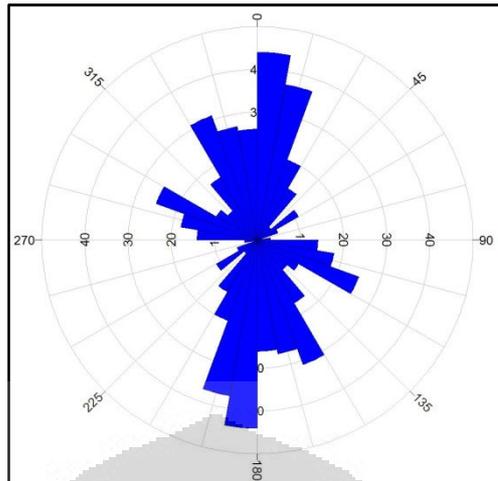
[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.8. Struktur linear di Area Apas Kiri



[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.9. Peta Struktur Daerah Tawau, Malaysia



Gambar 3.10. Rosette Diagram Daerah Prospek Geotermal Tawau

Sementara itu, berdasarkan Gambar 3.6, dua *hot spring* ditemukan (J1 dan J2) di sebelah kanan dari Sungai Jepun, arah timur laut dari Gunung Pock. Di lokasi ini ditemukan pula batuan hidrotermal teralterasi, *travertine* dan bau H_2S yang menyengat (Javino, et al. 2010).

Manifestasi *hot spring* lain ditemukan pula di daerah Tawau. *Hot spring* Tawau ditemukan di dua titik, yakni titik T1 dan T2. Seperti yang terlihat pada gambar satelit (Gambar 3.7), kebanyakan manifestasi geotermal berada disekitar Gunung Maria, terutama Apas Kiri (A1, A2, A4 dan A5), dan Tawau (T1 dan T2) *hot spring*. Hal ini mengindikasikan bahwa pusat reservoir diperkirakan berada di sekitar Gunung Maria atau lebih tepatnya disebelah tenggara Puncak Maria (Javino, et al. 2010).

3.3 Data Geokimia Daerah Tawau, Malaysia

Berdasarkan hasil analisa geokimia (Javino, et al) yang dilakukan pada area Apas Kiri (titik A1 dan A5), diperoleh hasil bahwa *thermal water* di area Apas Kiri memiliki konsentrasi yang tinggi akan klorida, sodium dan ion bicarbonat dengan pH yang netral.

Selain itu, menurut Javino, et al. (2010), asal *thermal water* dari *hot spring* Tawau adalah air *meteoric* dan *oceanic modern*. Konten tritium yang bernilai 0 di

air *hot spring* menunjukkan bahwa tidak terjadi *mixing* antara *thermal water* dengan air bawah tanah.

Tabel 3.4. Analisa Kimia Dari *Hot Spring* Area Apas Kiri

Catatan :

1. Semua cation dan anion dituliskan dalam ppm
2. Total solid dituliskan dengan mg/l, konduktivitas dengan μohm dan turbidity dengan N.T.U

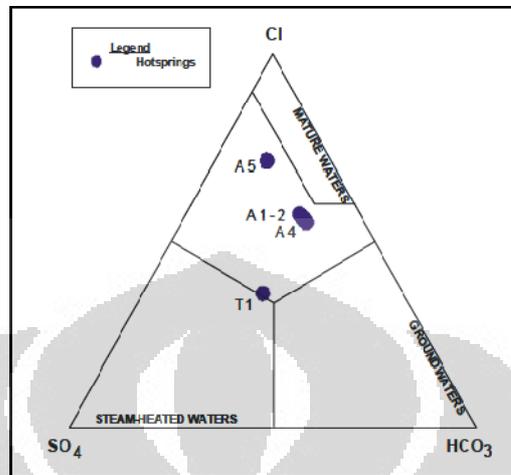
Lokasi : Apas 1 : Outflow spring

Apas 5 : Hot Mud Pool

Samples	Apas 1	Apas 5
Site Temp. °C	60	60
pH at 25°C	7.4	6.7
Dissolved SiO ₂	6.0	na
Total SiO ₂	86	75
Ca	150.9	142.37
Mg	34.1	12.9
K	77.5	93.5
Na	760	925
Li	5.4	5
HCO ₃	705.16	544.12
SO ₄	312.5	476
Cl	1250	1410
F	0.65	0.63
B	21	60
As	150	250
Fe	0.3	0.2
Mn	0.3	0.8
Total Solids	3158	3446
Turbidity	2.55	*
Conductivity	4910	5320
Na/K	16.7	16.9
Na/Ca	8.78	11.14
Na/Li	42.4	56.1
Cl/B	10.25	7.17
Cl/SO ₄	6.12	8.03
Cl/F	581.6	1205

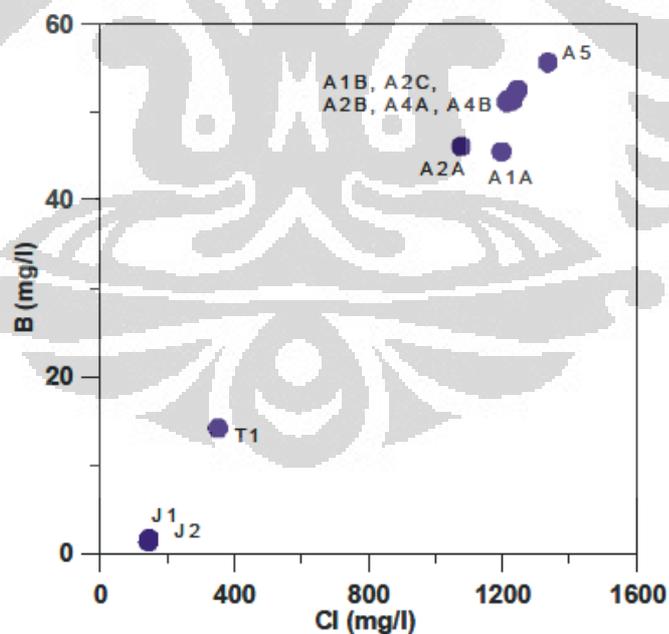
Selain itu, Javino, et al. (2010), juga melakukan analisa kandungan anion untuk tiap *hot spring* dalam plot segitiga. Hasil analisa plot segitiga menunjukkan bahwa titik *hot spring* A5 adalah titik *hot spring* yang terdekat dengan batuan *heat source*. Hal ini diindikasikan oleh banyaknya kandungan klorida yang terdapat

dalam *hot spring* A5. Hasil tersebut semakin dikuatkan oleh adanya analisa grafik kandungan boron terhadap klorida untuk tiap *hot spring*.



[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.11. Plot Segitiga Anion *Hot Spring* Tawau, Malaysia



[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.12. Grafik Boron vs Klorida *Hot Spring* Tawau, Malaysia

Dari Grafik 3.12, terlihat bahwa titik A5 memiliki kandungan klorida dan boron yang tinggi dibandingkan dengan titik *hot spring* yang lain. Tingginya kandungan boron dan klorida tersebut mengindikasikan bahwa *hot spring* A5 bersumber dari reservoir.

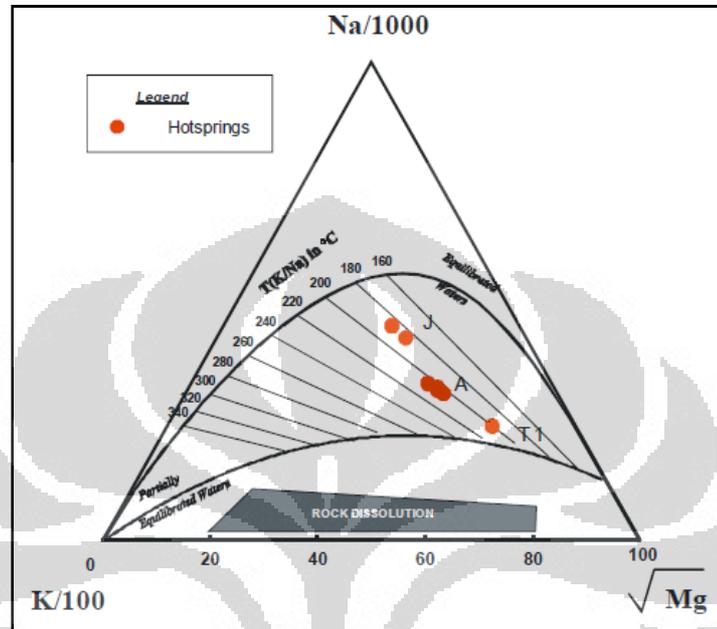
Kemudian, analisa geokimia dilanjutkan dengan melakukan analisa umur dari *hot spring*. Umur *hot spring* dapat diperkirakan dengan mempergunakan perhitungan *radiocarbon dating*. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan oleh Javino, umur dari *hot spring* yang ada di daerah Tawau Malaysia berkisar dari 15,200 tahun hingga 38,700 tahun. Secara terperinci, beberapa perkiraan umur dari *hot spring* yang diperoleh berdasarkan perhitungan *radiocarbon dating* adalah sebagai berikut : A1A = 15,200 tahun, A1B = 16,400 tahun, A2B = 15,300 tahun dan T1 = 38,700 tahun.

Tabel 3.5. Estimasi Temperatur Reservoir Menggunakan $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O})$ Model Untuk Hot Spring di Area Tawau

Spring Code	Date of sampling	O-18 (water)	O-18 (Sulphate)	Alpha ¹⁸ O	T°C
A1A	7/17/2003	-5.06	6.3	1.0114581	158.0004689
A1B	7/16/2003	-5.13	6.7	1.0118798	152.3146179
A2A	7/17/2003	-4.91	6.4	1.0113306	159.7659507
A2B	7/16/2003	-4.97	5.4	1.0104294	172.8970722
A2C	7/17/2003	-4.83	4.2	1.0090337	195.8514595
A4A	9/26/2002	-5.08			
A5	7/19/2003	-4.69	5.6	1.0103334	174.3684578
J1	7/15/2003	-6.05	8.1	1.0142318	124.3021019
J2	7/19/2003	-6.11	5.4	1.0115839	156.281101
T1	7/20/2003	-6.41	8.9	1.0154059	112.2614528

Estimasi temperatur reservoir dilakukan dengan menggunakan geothermometer Na-K-Mg dan memperoleh hasil suhu yang berkisar antara 180-236°C. Sementara itu, perhitungan estimasi temperatur reservoir juga dilakukan dengan menggunakan model $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O})$ untuk semua *hot spring* di daerah Tawau, Malaysia (Tabel 3.5). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa estimasi

temperatur reservoir untuk Apas Kiri adalah berkisar dari suhu 152-196⁰C, Sungai Jepun berada dalam *range* suhu sebesar 124-156⁰C, dan Tawau diestimasikan memiliki temperatur sebesar 112⁰C (Javino, et al. 2010).



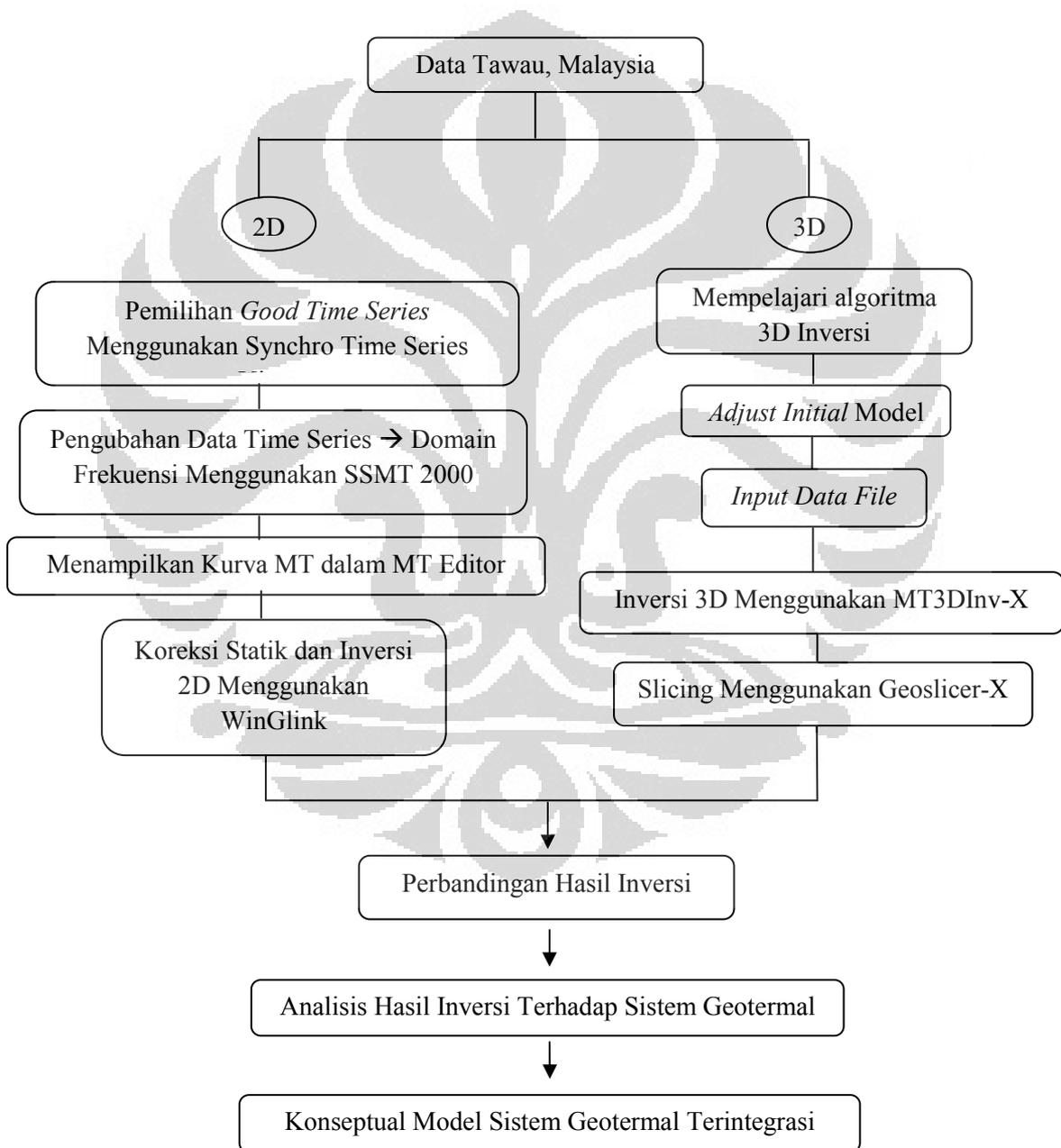
[Sumber : Javino, Fredolin, et al., 2010, *Isotope dan Geochemical Investigation on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*]

Gambar 3.13. Estimasi Temperatur Reservoir Menggunakan Geothermometer Na-K-Mg

BAB 4 PENGOLAHAN DATA

4.1 Alur Pengolahan Data

Secara umum, diagram alur proses pengolahan data yang dilakukan selama penelitian ini dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 4.1. Alur Pengolahan Data

4.2 Pengolahan Inversi 2D

Setelah diperoleh data dari pengukuran lapangan, selanjutnya dilakukan pengolahan data. Data yang berasal dari lapangan merupakan data medan elektromagnetik (medan elektrik dan medan magnet) terhadap waktu. Data tersebut kemudian diolah menggunakan beberapa *software* tertentu agar diperoleh kurva *apparent resistivity* terhadap frekuensi (kurva MT). Setelah kurva MT tiap stasiun diperoleh, proses inversi baru dapat dilakukan.

4.2.1 Pemilihan *Good Time Series*

Data mentah hasil pengukuran di lapangan merupakan data medan elektromagnetik yang terekam terhadap waktu. Pengukuran MT yang dilakukan selama 1 hari penuh menyebabkan data yang diperoleh untuk satu stasiun cukup panjang. Dari sepanjang data yang diperoleh tersebut, tidak semua data merupakan data yang baik. Kemungkinan adanya *noise* dalam data masih sangat besar terjadi. Oleh karena, proses filtrasi *noise* di awal pengolahan data harus dilakukan.

Proses filtrasi *noise* dilakukan dengan menggunakan *software* Synchro Time Series Viewer. Synchro Time Series Viewer merupakan program yang berfungsi untuk melihat bagaimana hasil kurva *time series* yang diperoleh dari lapangan. Disini, kita dapat melihat dan memperkirakan *time series* mana saja yang mengandung *noise* dan yang tidak mengandung *noise*.



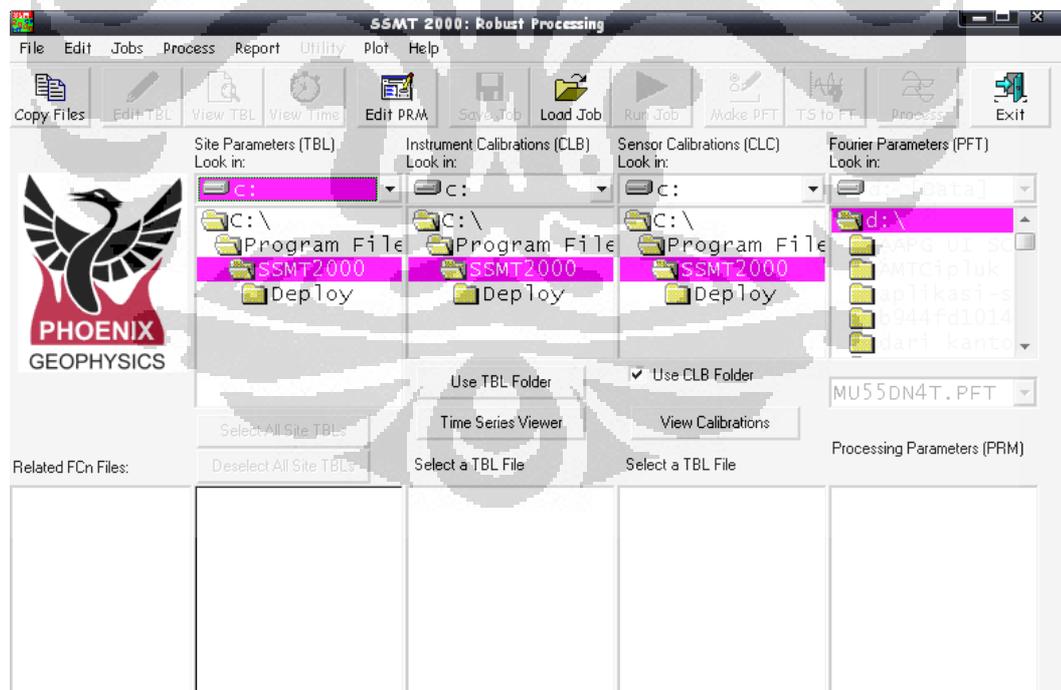
Gambar 4.2. Tampilan *Software* Synchro Time Series Viewer

Pemilihan data *time series* ini penting untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan, ketika data yang dipilih untuk diolah adalah data yang tidak bagus, maka hasil kurva MT yang dihasilkan pun berkemungkinan besar menjadi tidak memiliki trend yang *smooth*. Hasil kurva MT yang berantakan menandakan bahwa data yang diambil untuk diolah merupakan data yang mengandung *noise*.

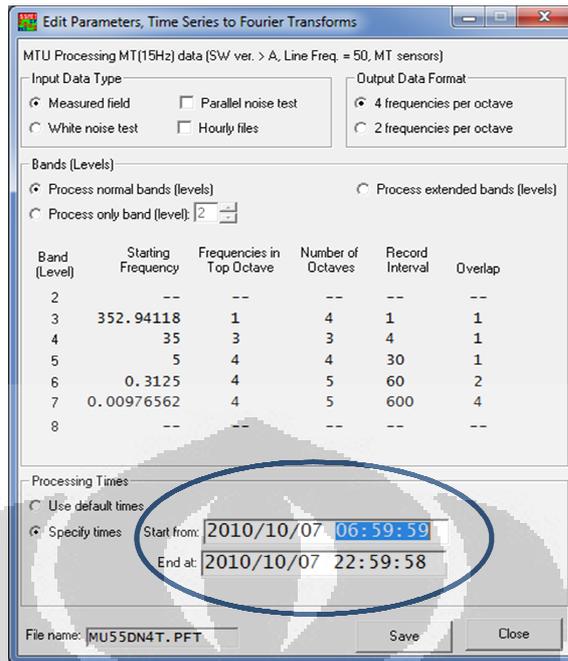
4.2.2 Pengubahan *Time Series* ke Frekuensi Domain

Setelah diketahui perkiraan waktu mana saja yang tidak mengandung *noise*, langkah selanjutnya adalah mempergunakan data rentang waktu tersebut untuk diubah ke dalam domain frekuensi.

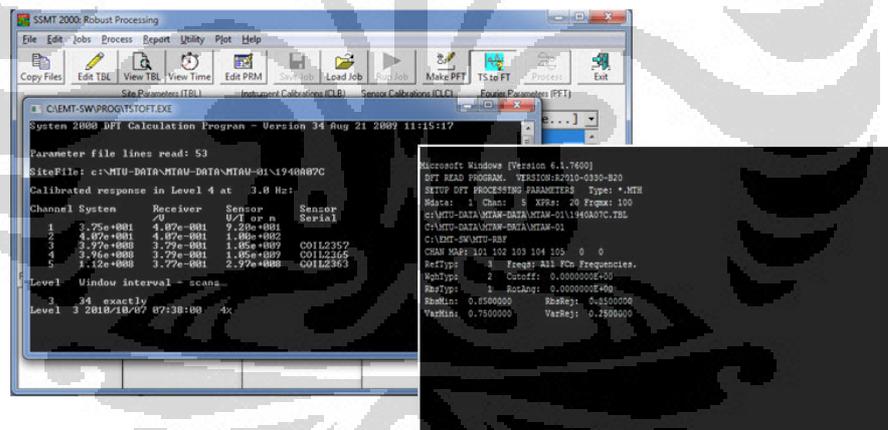
Adapun selang waktu yang diubah ke dalam domain frekuensi disesuaikan dengan hasil *selecting* data yang dilakukan di awal pengolahan data dengan Synchro Time Series Viewer. Proses pengubahan *time series* ke dalam frekuensi domain dilakukan dengan mempergunakan *software* SSMT 2000. Adapun prinsip yang mendasari *software* tersebut adalah konsep transformasi Fourier.



Gambar 4.3. Tampilan *Software* SSMT 2000



Gambar 4.4. Langkah Pemasukan Data *Good Time Series* di dalam SSMT 2000

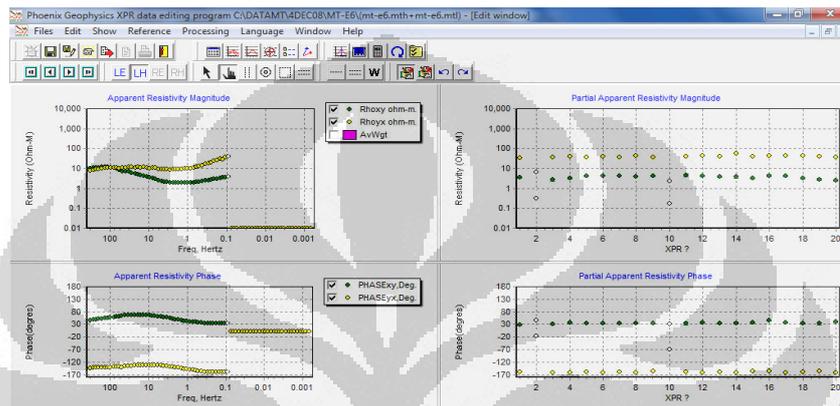


Gambar 4.5. Proses Pengubahan *Time Series* ke dalam Frekuensi Domain pada SSMT 2000

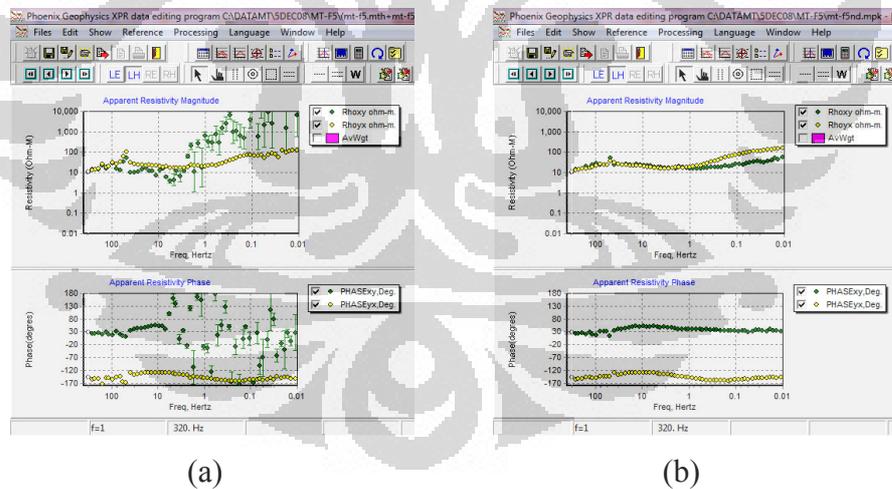
4.2.3 Kurva MT

Setelah proses pengubahan *time series* ke dalam frekuensi domain selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah menampilkannya ke dalam bentuk kurva. Proses tersebut dilakukan dengan mempergunakan *software* MT Editor. Kurva yang ditampilkan didalam *software* ini sudah dalam bentuk kurva *apparent resistivity* terhadap frekuensi (kurva MT).

Ketika kurva telah ditampilkan didalam *software*, langkah selanjutnya adalah melakukan pemilihan data. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, tiap data *apparent resistivity* yang diplot di dalam kurva MT terbagi menjadi beberapa titik *crosspower* yang berhubungan dengan kurva *apparent resistivity* dan *phase*. Untuk mendapatkan kurva MT yang benar-benar baik, maka diperlukan adanya proses pemilihan data *crosspower* di dalam kurva.



Gambar 4.6. Kurva XPR (*crosspower*) terhadap Kurva MT

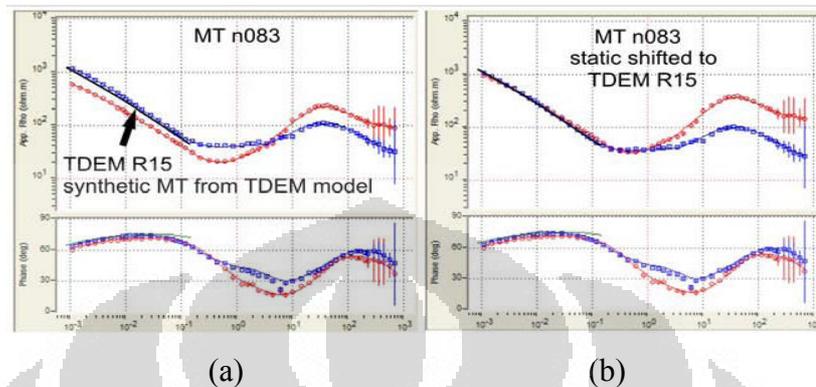


Gambar 4.7. Kurva MT Sebelum (a) dan Sesudah Pemilihan Data (b)

4.2.4 Koreksi Statik

Penghilangan efek *static shift* yang ada di dalam data MT dilakukan dengan mempergunakan data TDEM. Berdasarkan tinjauan pustaka, pengukuran TDEM mempergunakan frekuensi yang tinggi. Hal ini menyebabkan penetrasi yang diperoleh untuk pengukuran TDEM adalah penetrasi yang dangkal, tidak

seperti penetrasi MT yang sangat dalam. Meskipun demikian, karena kurva TDEM tidak mengalami efek *static shift*, maka kurva TDEM dijadikan sebagai acuan awal kurva MT.



Gambar 4.8. Koreksi Statik

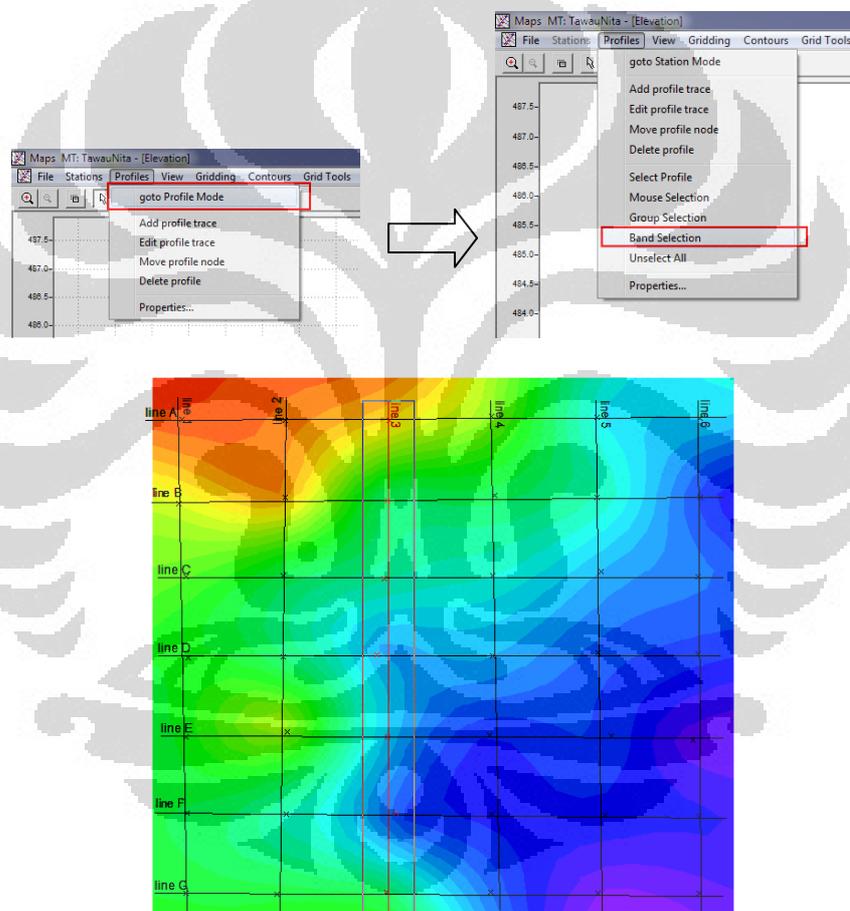
Keterangan : (a) kurva MT *tershifting*, (b) kurva MT tidak *tershifting*
(Cumming and Mackie, 2010)

4.2.5 Inversi 2D

Inversi merupakan kegiatan untuk mendapatkan model kondisi bawah tanah berdasarkan proses fitting dengan data yang ada. Proses inversi 2D dilakukan dengan menggunakan *software* WinGlink. Setelah diperoleh kurva MT tiap stasiun melalui serangkaian proses yang telah dijelaskan diatas, kurva MT tersebut kemudian disimpan dalam bentuk *file* EDI. *File* EDI inilah yang nantinya akan dipergunakan sebagai *file* input untuk melakukan inversi 2D. Adapun algoritma yang dipergunakan dalam *software* WinGlink adalah prinsip NLCCG (Rodi and Mackie, 2001).

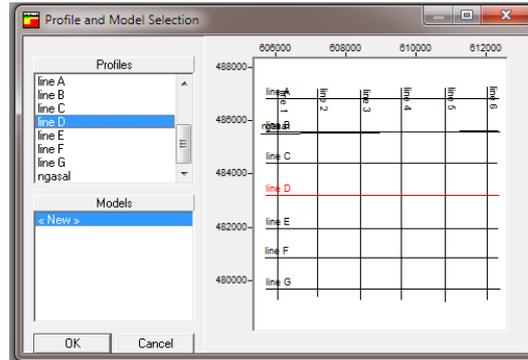
Proses inversi 2D merupakan proses pemodelan distribusi resistivitas bawah permukaan dalam bentuk 2 dimensi (*profile*). Oleh karenanya, untuk memulai inversi 2D diperlukan adanya pendefinisian lintasan terlebih dahulu. Yang dimaksudkan dengan pendefinisian lintasan adalah menentukan jumlah lintasan untuk inversi dan mendefinisikan stasiun mana saja yang masuk kedalam lintasan tersebut.

Di dalam *software* WinGlink, serangkaian proses pendefinisian lintasan dilakukan pada menu **Maps** di menu utama. Untuk membuat lintasan, kita dapat memilih menu **profile** → **add profile trace**. Kemudian, untuk mendefinisikan stasiun mana saja yang masuk kedalam lintasan, kita dapat memilih menu **band selection** pada menu **profile** dan menarik garis lintasan tersebut hingga melingkupi stasiun MT yang diinginkan. Ketika proses pendefinisian semua stasiun ini telah selesai dilakukan, maka proses inversi dapat dijalankan.



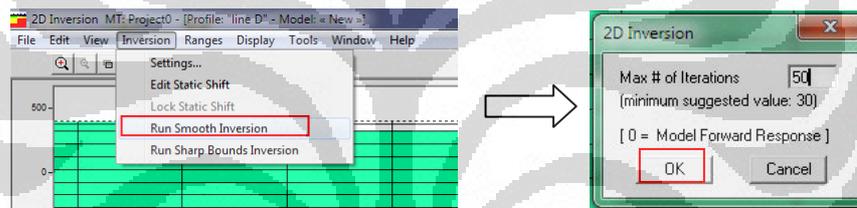
Gambar 4.9. Langkah Pembuatan dan Pendefinisian Lintasan dalam WinGlink

Di dalam *software* WinGlink, proses inversi 2D dilakukan dengan memilih menu **2D Inversion** pada menu utama. Kemudian, *software* akan meminta konfirmasi lintasan mana yang akan di inversi.



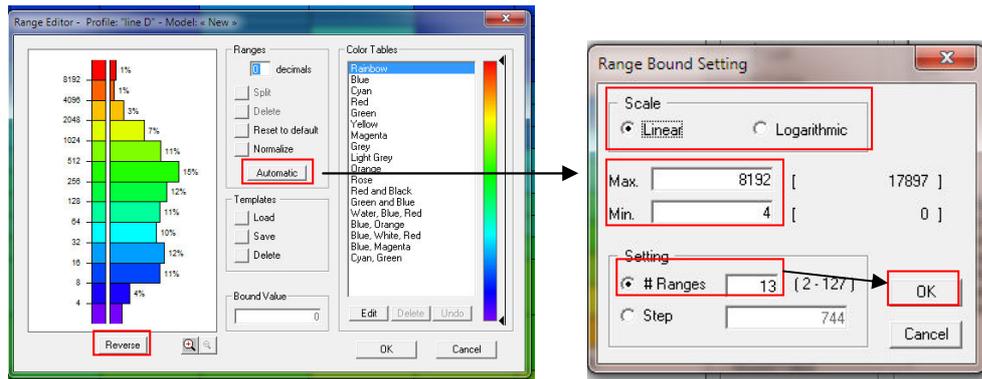
Gambar 4.10. Langkah Memilih Lintasan Inversi 2D dalam WinGlink

Selanjutnya, untuk menjalankan proses inversi (*running inversion*), kita dapat memilih menu **Inversion** → **Run Smooth Inversion**. Sebelum *running*, *software* akan meminta konfirmasi jumlah iterasi yang diinginkan.



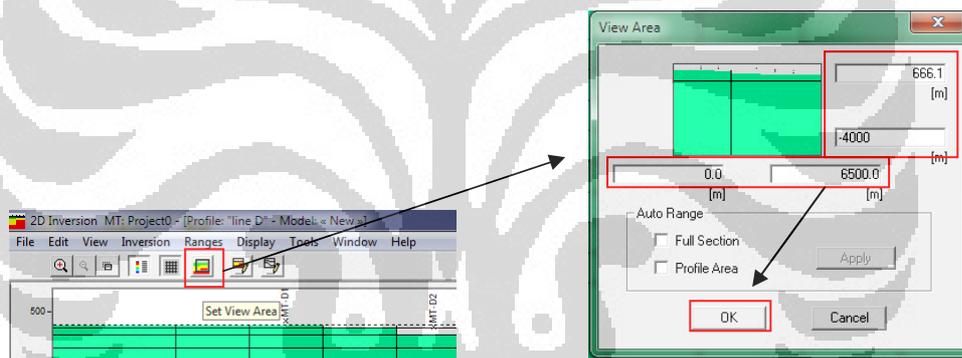
Gambar 4.11. Langkah Inversi 2D dalam WinGlink

Setelah proses inversi selesai dilakukan, kita dapat mengubah beberapa parameter tampilan hasil inversi 2D. Untuk mengubah tampilan warna, kita dapat memilih menu **Range** → **Ok**. Pada proses ini *software* akan mengeluarkan kotak dialog yang berisi beberapa parameter. Untuk mengubah skala warna yang semula linear menjadi logaritmik, dapat dilakukan dengan cara mengklik **Automatic** → pilih pilihan skala linear atau logaritmik → atur nilai maksimum dan minimum untuk skala warna.



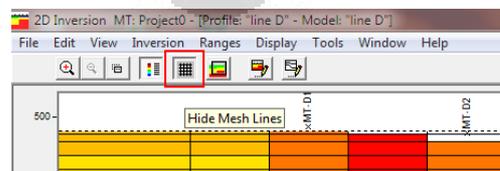
Gambar 4.12. Langkah Pengubahan Warna dalam WinGlink

Sementara itu, untuk mengatur batas atas, bawah, kanan dan kiri (batas margin) dari tampilan hasil inversi 2D, kita dapat memilih menu **Set View Area** dan menentukan batas tampilan pada kolom yang tersedia.



Gambar 4.13. Langkah Penentuan Batas Tampilan Hasil Inversi 2D

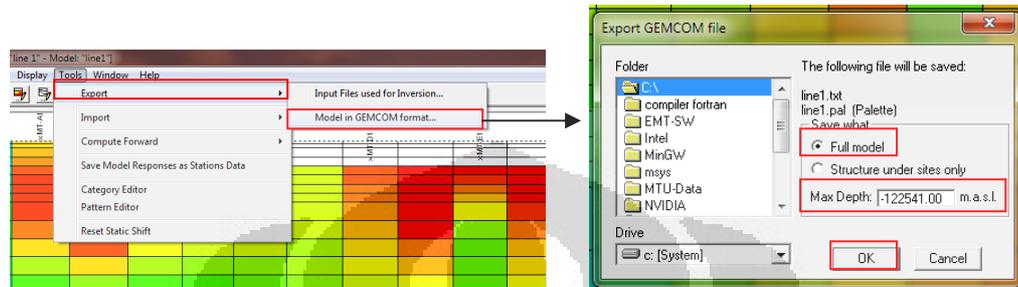
Selanjutnya, untuk menghilangkan garis grid yang ada didalam tampilan hasil inversi, kita dapat mengklik *icon* **Hide Mesh Line** pada menu yang ada.



Gambar 4.14. Langkah Menghilangkan Grid dalam WinGlink

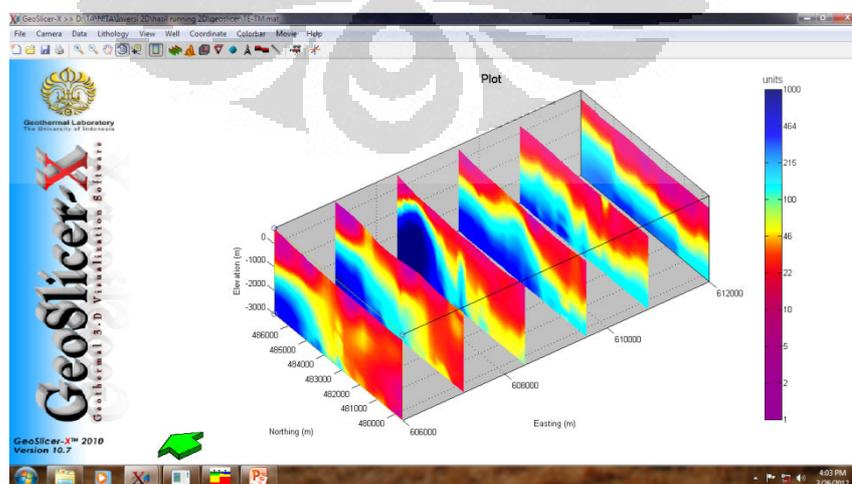
Setelah semua parameter tampilan di set, langkah selanjutnya adalah menyimpan *file* hasil inversi. Proses penyimpanan *file* ini dilakukan dengan

memilih menu **Tools** → **Eksport** → **Model in GEMCOM format**. Kemudian, *software* akan menampilkan kotak dialog yang berisi informasi penyimpanan data. Dalam proses ini kita dapat memilih menu **Full Model** dalam kolom **Save Model** dan menentukan maksimal kedalaman yang akan disimpan.



Gambar 4.15. Langkah Penyimpanan *File* Inversi 2D

Untuk memudahkan interpretasi, hasil inversi 2D yang telah disimpan tersebut ditampilkan kedalam *software* Geoslicer-X. Geoslicer-X merupakan *software* yang dapat menampilkan hasil inversi 2D semua lintasan dalam 1 gambar. Hasil inversi 2D tiap lintasan tersebut akan disusun berdasarkan lokasinya sesuai dengan data koordinat. Kemudian *software* akan memvisualisasikannya seperti tampilan 3 dimensi. Oleh karena inversi 3D memerlukan komputasi yang lebih signifikan dan waktu yang relatif lebih lama dibandingkan dengan inversi 2D, maka sangat logis jika pemodelan 3D dimulai dari *section profile line* 2D (Newman, et al., 2005).



Gambar 4.16. Contoh Tampilan Hasil Inversi 2D dalam Geoslicer-X

4.3 Pengolahan Inversi 3D

Inversi 3D Magnetotellurik tidak sepenuhnya merupakan metode otomatis, melainkan tetap memerlukan kontrol dari operator. Hal ini berbeda dengan inversi 2D, dimana bentuk *profile* dan *resistivity*-nya berasal dari fungsi polinomial yang otomatis dijalankan dari perangkat (Schnegg, 1999).

Pengolahan inversi 3D bergantung kedalam 2 hal, yakni data (N) dan model (M). Secara garis besar, yang dimaksudkan dengan data (N) pada inversi 3D meliputi jumlah stasiun (Ns), jumlah periode (Np) dan jumlah response impedansi (Nr). Sementara itu, yang dimaksudkan dengan model (M) pada inversi 3D meliputi jumlah blok pada arah x (Mx), jumlah blok pada arah y (My) dan jumlah blok pada arah vertikal (Mz).

Response impedansi yang dimaksudkan dalam inversi 3D ini adalah jumlah impedansi yang digunakan. Sesuai dengan studi pustaka, di dalam inversi 3D dipergunakan keseluruhan impedansi yakni Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} dan Z_{yy} . Dalam pengolahan inversi kali ini, dipergunakan nilai real dan imajiner dari keempat nilai impedansi tersebut. Hal ini menyebabkan, total response impedansi (Nr) yang digunakan berjumlah 8.

Untuk melakukan inversi 3D, diperlukan adanya spesifikasi besar perangkat RAM tertentu agar proses inversi dapat berjalan dengan baik. Besar kecilnya RAM yang diperlukan bergantung pada besarnya data MT yang ada (N) dan model (M) yang dibuat (Weerachai, 2006). Adapun spesifikasi minimal RAM komputer yang dibutuhkan untuk *running* inversi 3D MT dirumuskan kedalam persamaan berikut :

$$\text{Kebutuhan RAM} = 1.2 \cdot (8N^2 + 8NM)$$

dimana :

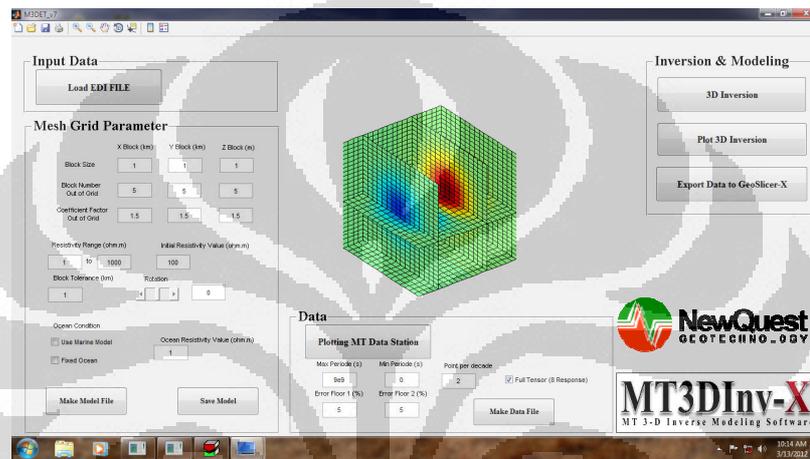
$$N = N_s \cdot N_p \cdot N_r$$

$$M = M_x \cdot M_y \cdot M_z$$

Spesifikasi komputer yang digunakan untuk melakukan *running* harus diperhitungkan dengan baik. Hal ini dikarenakan, besar kecilnya RAM komputer yang digunakan akan berhubungan dengan lamanya waktu yang dibutuhkan.

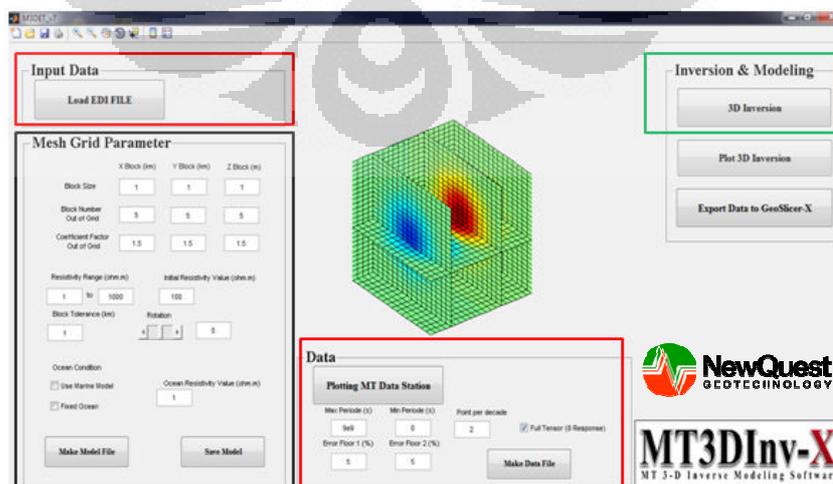
4.3.1 Pengenalan *Software*

Inversi 3D Magnetotellurik dilakukan dengan mempergunakan *software* MT3DInv-X yang dikembangkan oleh PT NewQuest Geotechnology. Adapun algoritma yang digunakan di dalam *software* ini adalah prinsip *data space method* (Sipunvaraporn, 2006). Secara garis besar, parameter yang dibutuhkan di dalam *software* adalah meliputi 3 hal, yakni *input data*, pembuatan *initial model* dan pendefinisian *file* untuk inversi (*start up*). Proses *input data* dan pembuatan *initial model* dilakukan terlebih dahulu.



Gambar 4.17. Tampilan *Software* MT3DInv-X

Selanjutnya, ketika inversi 3D akan dilakukan, *software* akan meminta konfirmasi *file data* dan *file model* mana saja yang akan digunakan untuk diolah. Ketika hal itu dilakukan, berarti proses *start up* sedang dilakukan.



Gambar 4.18. Definisi Bagian pada *Software* MT3DInv-X

4.3.2 Data

Pada proses pengolahan inversi 3D, input yang dimasukkan didalam *software* adalah *file* data. *File* data yang dimasukkan secara umum berisi beberapa hal mengenai informasi jumlah stasiun yang diolah, jumlah periode yang digunakan, jumlah response impedansi, lokasi titik stasiun, nilai impedansi tiap stasiun dan nilai error impedansi tiap stasiun. Adapun format *file* data yang dimasukkan kedalam *software* dapat dituliskan sebagai berikut.

```

42 15 8                                → bagian 1
Station Location : N-S                  → bagian 2
-2500 ..... -2500
....
2500 ..... 2500
Station Location : W-E
-3000 -2000 -1000 .... 3000
....
-3000 -2000 -1000 ... 3000
DATA_Period : 100                       → bagian 3
0.2528E-05 -0.7146E-05 0.1979E-01 -0.1958E-01 -0.1979E-01 0.1958E-01 -0.2735E-05 0.6835E-05
.....
EROR_Period : 100                       → bagian 4
0.2528E-06 -0.7146E-06 0.1979E-02 -0.1958E-02 -0.1979E-02 0.1958E-02 -0.2735E-06 0.6835E-06
.....
ERMAP_Period : 100                     → bagian 5
1 1 1 1 1 1 1
.....

```

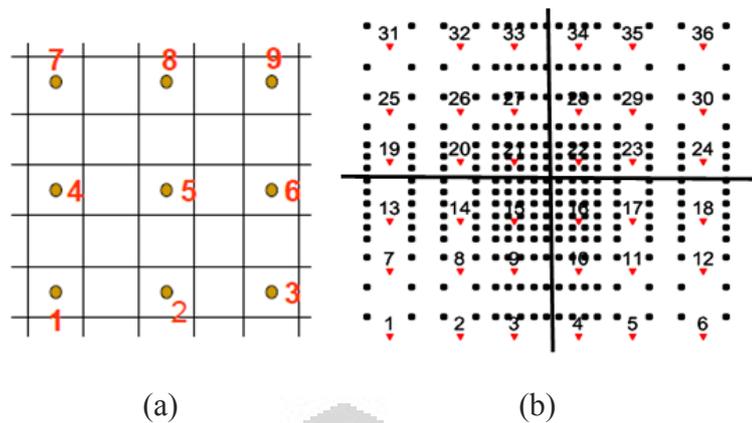
Dari format *file* data diatas terlihat bahwa untuk melakukan inversi 3D, dibutuhkan 5 hal yang harus dimasukkan ke dalam *software*. Secara keseluruhan, kelima hal tersebut berisikan informasi mengenai kondisi data dan lokasi dari titik stasiun MT yang dimiliki. Adapun penjelasan rinci mengenai tiap-tiap bagian dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Bagian 1 memberikan informasi berturut-turut mengenai jumlah stasiun MT yang diolah, jumlah periode dan jumlah response impedansi yang digunakan.

2. Selanjutnya, bagian 2 berisikan informasi tentang lokasi titik stasiun yang dimiliki.
3. Bagian 3 dan 4 berturut-turut memberikan informasi mengenai nilai impedansi dan nilai error impedansi. Adapun nilai impedansi dan nilai error impedansi yang dituliskan pada bagian ini adalah nilai real dan imajiner dari impedansi Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} dan Z_{yy} tiap stasiun ditiap periode. Banyaknya baris yang ditulis pada bagian ini disesuaikan dengan banyaknya jumlah stasiun yang ada. Selain itu, data nilai impedansi dan nilai error impedansi pada bagian ini dituliskan sebanyak periode yang telah ditetapkan pada bagian 1.
4. Kemudian, hal terakhir yang juga harus dituliskan didalam *file* data adalah error scale map (ERMAP). Ermap menunjukkan konfirmasi kepastian nilai error impedansi yang telah dituliskan dibagian 4. Jika nilai error impedansi tidak berubah, maka pada bagian ermap dapat ditulis angka 1 (*default*). Penulisan angka 1 pada tiap barisnya dituliskan sebanyak jumlah response yang digunakan (dalam hal ini 8). Selain itu, total jumlah baris yang ditulis disesuaikan dengan jumlah stasiun yang dimiliki.

Hal yang harus diperhatikan pada segmen *input* data ini adalah dalam proses pemasukan informasi lokasi titik stasiun. Informasi lokasi titik stasiun yang dimasukkan ke dalam *file* data (pada bagian 2) bukanlah dalam satuan UTM, melainkan dalam satuan *dummy*. Posisi nilai 0 (untuk satuan *dummy*) harus berada ditengah-tengah dari keseluruhan posisi stasiun yang ada. Selanjutnya, ketika posisi 0 telah diset, maka lokasi titik stasiun yang dimiliki dapat dikonversi ke dalam satuan *dummy* berdasarkan posisi nilai 0 tersebut.

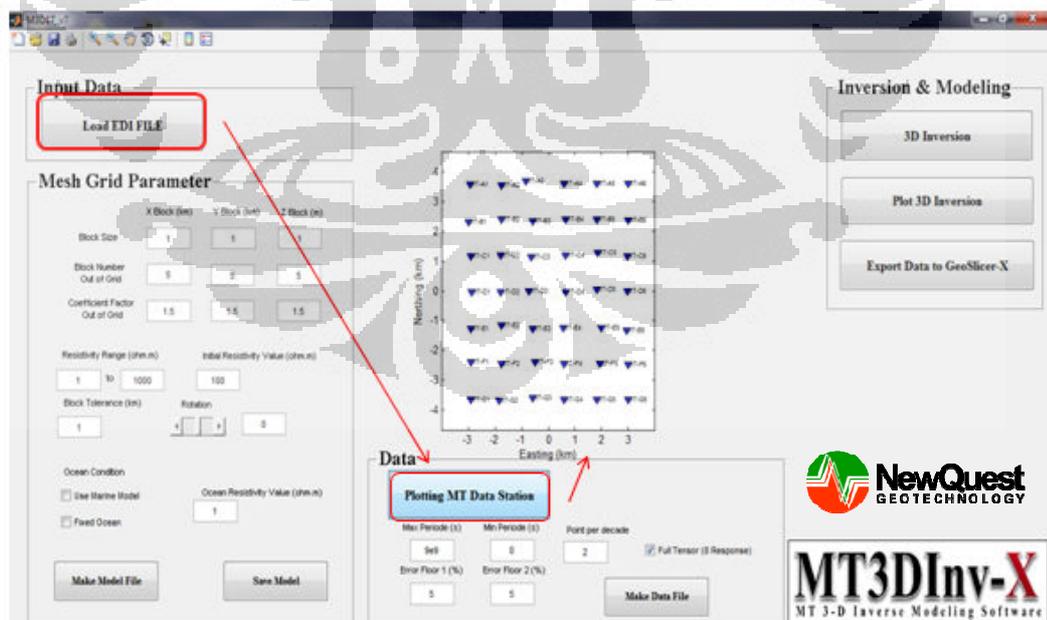
Tidak hanya dalam satuan *dummy*, penulisan lokasi titik stasiun (pada bagian 2) harus pula mengikuti aturan tertentu. Yang dituliskan pertama kali adalah lokasi stasiun yang berada di bawah kiri dari keseluruhan posisi stasiun. Kemudian, penulisan berlanjut ke arah kanan dan naik ke arah atas, begitu seterusnya.



Keterangan : (a) aturan penulisan titik stasiun, (b) posisi 0 (untuk satuan dummy)

Gambar 4.19. Format Penulisan Lokasi Stasiun dalam *File Data*

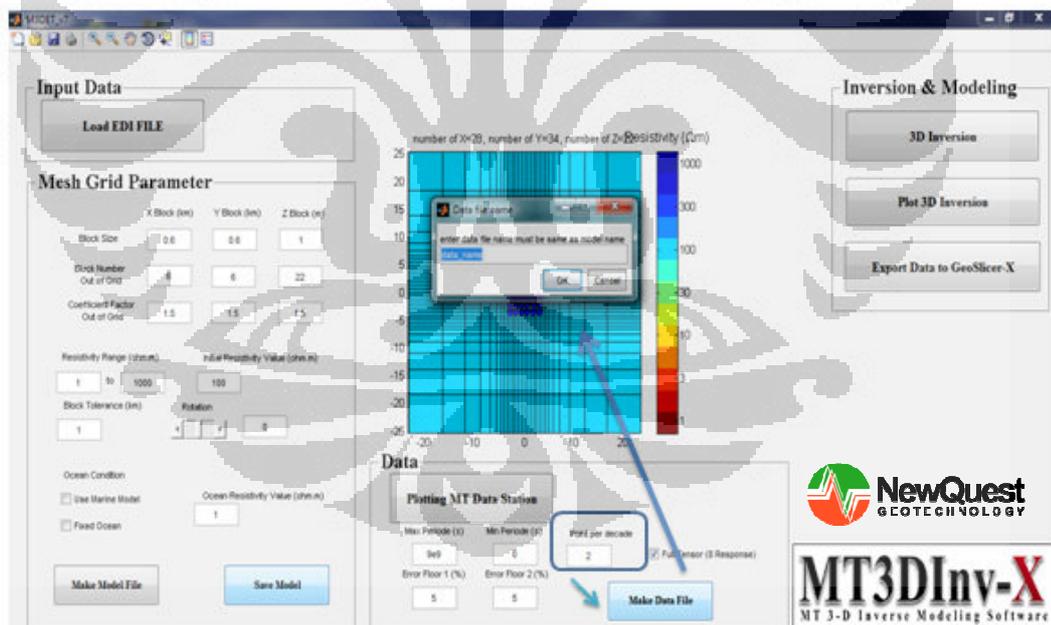
Di dalam *software* MT3DInv-X, *input* data untuk kelima hal tersebut dilakukan perbagian. Langkah pertama yang dilakukan setelah membuka *software* adalah *meload* semua data EDI *file* dari titik MT yang dimiliki. Dengan menjalankan langkah ini, *software* akan langsung menetapkan jumlah stasiun yang akan diolah untuk inversi 3D.



Gambar 4.20. Langkah *Input Data* dalam MT3DInv-X

Selanjutnya, melakukan **plotting data** stasiun. *Software* akan secara otomatis mengkonversi informasi lokasi titik stasiun yang semula dalam satuan UTM ke dalam satuan *dummy* dan memplotnya di dalam grafik. Jika proses ini dilakukan, dapat dikatakan bahwa penulis sudah melakukan proses *input* data untuk bagian 1 dan 2.

Sementara itu, untuk melakukan proses *input* data bagian 3, 4 dan 5, *software* membutuhkan adanya penetapan bentuk model terlebih dahulu. Ketika model telah selesai di set, kita dapat menuliskan jumlah **point per decade** yang akan digunakan didalam data. *Point per decade* bermakna bahwa untuk satu *decade* periode, akan diambil berapa banyak periode untuk di inversi. Jika dipilih *point per decade* 2, berarti untuk tiap satu *decade* periode akan diambil 2 data periode saja, begitu pula seterusnya. Pemilihan besar kecilnya *point per decade* yang dilakukan pada bagian ini akan menentukan jumlah total data periode yang akan di inversi.



Gambar 4.21. Langkah *Input* Data (2) dalam MT3DInv-X

Ketika penentuan jumlah *point per decade* selesai dilakukan, proses selanjutnya adalah mengklik **Make Data File**. Setelah diklik, *software* secara otomatis akan langsung menyusun data nilai impedansi, nilai error impedansi dan nilai ermap sesuai dengan jumlah periode yang ditentukan dan meminta

konfirmasi nama *file* untuk disimpan. Setelah menjalankan langkah ini, dapat dikatakan keseluruhan proses *input* data telah selesai dilakukan.

4.3.3 Initial Model

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, yang dimaksudkan model (M) secara umum didalam inversi 3D adalah jumlah blok pada arah x, y dan z. Akan tetapi, yang diperlukan di dalam pembuatan *initial* model ternyata tidak hanya jumlah blok saja, melainkan dibutuhkan beberapa hal yang lain. Adapun beberapa hal yang diperlukan didalam pembuatan *initial* model tersebut dapat terlihat di dalam format *file* berikut ini.

```

30 28 22 2                                → bagian 1
12000 8000 ..... 8000 12000
10000 8000 ..... 8000 10000             → bagian 2
1 3 7 ..... 2000 4000
100 100                                    → bagian 3
1 10                                        → bagian 4
1 1 1 1 1 1 ..... 1 1 1 1 1
.....
1 1 1 1 1 1 ..... 1 1 1 1 1
11 22
1 1 1 1 1 1 ..... 1 1 1 1 1
.....
1 1 1 1 1 1 ..... 1 1 1 1 1

```

Dari format *file initial* model tersebut, terlihat bahwa untuk pembuatan *initial* model, *software* membutuhkan adanya 4 hal. Penjelasan mengenai format *file* diatas dapat dijabarkan berikut ini.

1. Bagian 1 menunjukkan informasi berturut-turut mengenai jumlah blok pada arah x (N-S), y (W-E), z (arah vertikal) dan nomor index resistivitas. Index resistivitas menunjukkan jumlah nilai *initial resistivity* yang di set di dalam model. Dalam inversi kali ini, nomor index resistivitas selalu di set

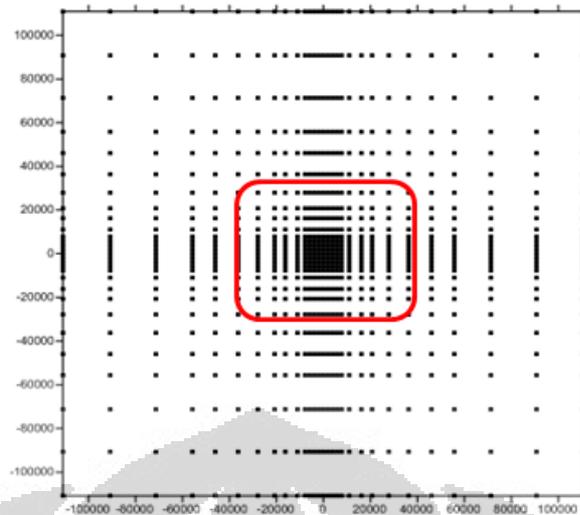
bernilai 2. Meskipun nilai *initial resistivity* yang di set di dalam model hanya 1 nilai, tetapi *software* akan secara otomatis menyusun nomor index resistivitas menjadi 2 dengan nilai *initial resistivity* yang bernilai sama.

2. Selanjutnya, bagian 2 berisikan informasi berturut-turut mengenai ukuran blok yang digunakan untuk inversi 3D pada arah x (N-S), y (W-E) dan z (permukaan-kebawah).
3. Bagian 3 menunjukkan nilai *initial resistivity* yang di set di dalam model. Bagian ini berhubungan dengan nomor index resistivitas pada bagian 1. Ketika nomor index resistivitas di set 2, maka nilai *initial resistivity* dituliskan dalam 2 nilai.
4. Kemudian, bagian 4 adalah bagian penetapan identitas nilai *initial resistivity* pada tiap layer arah z. Bagian ini berhubungan dengan nilai *initial resistivity* pada bagian 3. Nilai yang dituliskan pada bagian 4 ini hanya angka 1 atau 2 saja untuk tiap selang layer tertentu. Hal tersebut disesuaikan dengan nilai *initial resistivity* yang di set di dalam model.

Hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan *initial* model adalah diharuskannya membuat grid yang rapat didalam, yang kemudian semakin melebar kearah luar. Penetapan ukuran besar kecilnya grid ini dilakukan pada bagian 2 dalam format *file initial* model.

Selain itu, keseluruhan posisi stasiun MT yang dimiliki harus diletakkan ditengah kotak model dan berada di dalam grid yang rapat. Dalam inversi kali ini, letak titik stasiun yang satu dengan stasiun yang lain dibatasi oleh satu kotak grid. Hal ini menyebabkan, ukuran 'grid rapat' dalam pembuatan *initial* model harus diperhitungkan dengan baik dan disesuaikan dengan jarak antar stasiun MT yang dimiliki.

Titik stasiun MT tidak boleh berada di pinggir batas antara kotak grid yang satu dengan kotak grid yang lain, tetapi harus berada tepat di dalam satu kotak grid. Hal ini dikarenakan, data-data impedansi satu titik stasiun harus benar-benar jelas diperuntukkan untuk satu kotak grid saja. Dengan demikian, proses inversi akan berjalan dengan baik.



Keterangan : untuk pembuatan *initial* model dalam inversi 3D diharuskan terdapat grid rapat didalam dan semakin melebar ke luar. Posisi stasiun MT harus diletakkan ditengah kotak (dalam hal ini diletakkan didalam kotak merah).

Gambar 4.22. Visualisasi Ukuran Grid dalam *Initial* Model

Di dalam *software* MT3DInv-X, proses pembuatan *initial* model dilakukan pada area **Mesh Grid Parameter**. Proses ini dilakukan setelah memplot stasiun MT yang dimiliki ke dalam satuan *dummy*.

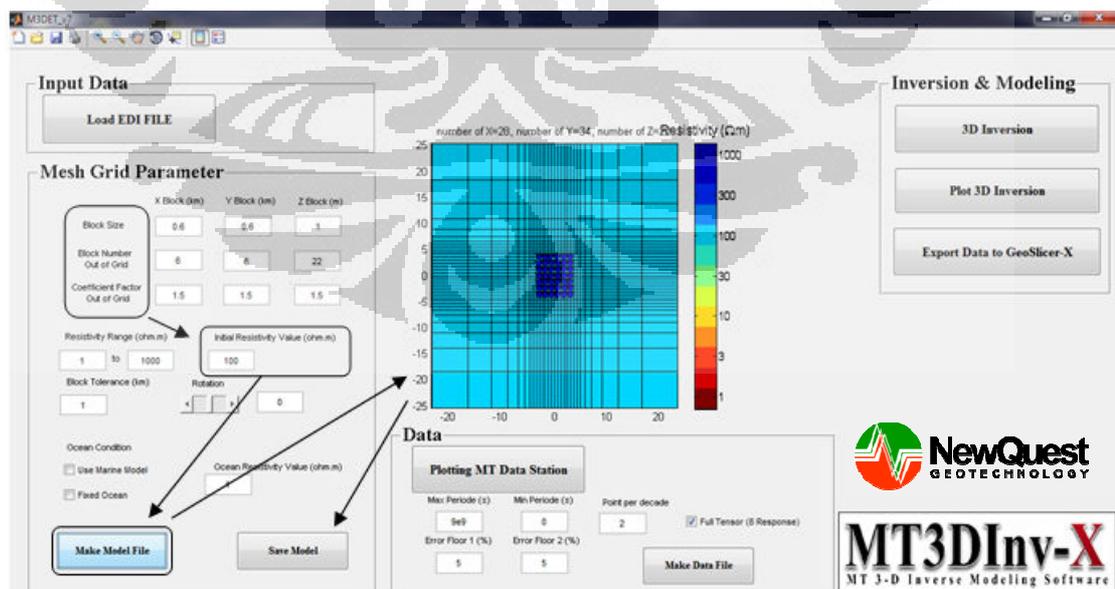
Mesh Grid Parameter		
X Block (km)	Y Block (km)	Z Block (m)
Block Size: 0.6	0.6	100
Block Number Out of Grid: 4	4	20
Coefficient Factor Out of Grid: 1.5	1.5	1.5
Resistivity Range (ohm.m): 1 to 1000	Initial Resistivity Value (ohm.m): 100	
Block Tolerance (km): 1		
Ocean Condition		
<input type="checkbox"/> Use Marine Model	Resistivity Value (ohm.m): 1	
<input type="checkbox"/> Fixed Ocean		
Make Model File		Save Model

Gambar 4.23. Mesh Grid Parameter dalam MT3DInv-X

Ukuran blok x dan y yang rapat dapat dituliskan di dalam **Block Size** dalam satuan km. Sementara itu, perluasan ukuran kotak yang melebar ke arah luar dapat dibuat dengan memasang sejumlah kotak diluar area rapat pada **Block Number Out of Grid** dengan ukuran yang diset sekian kali dari ukuran kotak sebelumnya pada **Coefficient Factor Out of Grid**. Ketika hal ini dilakukan, berarti bagian 1 dan 2 yang dibutuhkan dalam format *file initial* model secara otomatis telah selesai dilakukan.

Proses selanjutnya adalah memasang nilai *initial resistivity* pada model. Penetapan nilai *initial resistivity* ini dapat dilakukan pada area Mesh Grid Parameter. Ketika hal ini dilakukan, *software* akan secara otomatis menyusun nilai *initial resistivity* pada tiap layer yang berarti bahwa bagian 3 dan 4 pada format *file initial* model telah selesai dilakukan.

Hasil model yang telah dibuat dapat dilihat terlebih dahulu dengan cara mengklik **Make Model File** dalam Mesh Grid Parameter. Setelah diklik, *software* akan langsung menampilkan visualisasi bentuk model yang telah dibuat berdasarkan ukuran blok yang telah di set di dalam Mesh Grid Parameter. Jika ukuran blok yang telah dibuat masih belum sesuai dengan keinginan, maka ukuran blok tersebut masih dapat diubah.



Gambar 4.24. Langkah Pembuatan *Initial* Model dalam MT3DInv-X

Selanjutnya, ketika seluruh penetapan parameter *initial* model selesai dilakukan, model dapat disimpan dengan cara mengklik **Save Model**. Jika titik stasiun MT yang dimiliki berada di pinggir batas kotak grid, maka *software* akan secara otomatis tidak menyimpan model dan akan mengatakan bahwa terdapat error didalam pembuatan *initial* model. Jika demikian, berarti ukuran blok harus diubah dan disesuaikan dengan jarak antar stasiun MT yang dimiliki.

4.3.4 Konversi Output

Output yang dikeluarkan dari proses inversi terdiri dari 4 *file* dengan akhiran *.data*, *.error*, *.model* dan *.resp*. *File* yang berisi hasil inversi terdapat dalam *file output* dengan akhiran *.model*. Sementara itu, *file* lain dengan akhiran *.data*, *.error* dan *.resp* adalah *file* yang memiliki format yang sama dengan *file input* data.

Secara umum, format yang ada di dalam *file output* dengan akhiran *.model* dapat dilihat sebagai berikut.

```
#Iteration No. 2   RMS = 4.448   LM = 10.000           → bagian 1
30 28 22 0                → bagian 2
12000 8000 ..... 8000 12000
10000 8000 ..... 8000 10000           → bagian 3
1 2 3 7 ..... 2000 4000
0.4973E+02
0.4952E+02           → bagian 4
0.4945E+02
.....
```

Penjelasan mengenai format diatas dapat dijabarkan berikut ini.

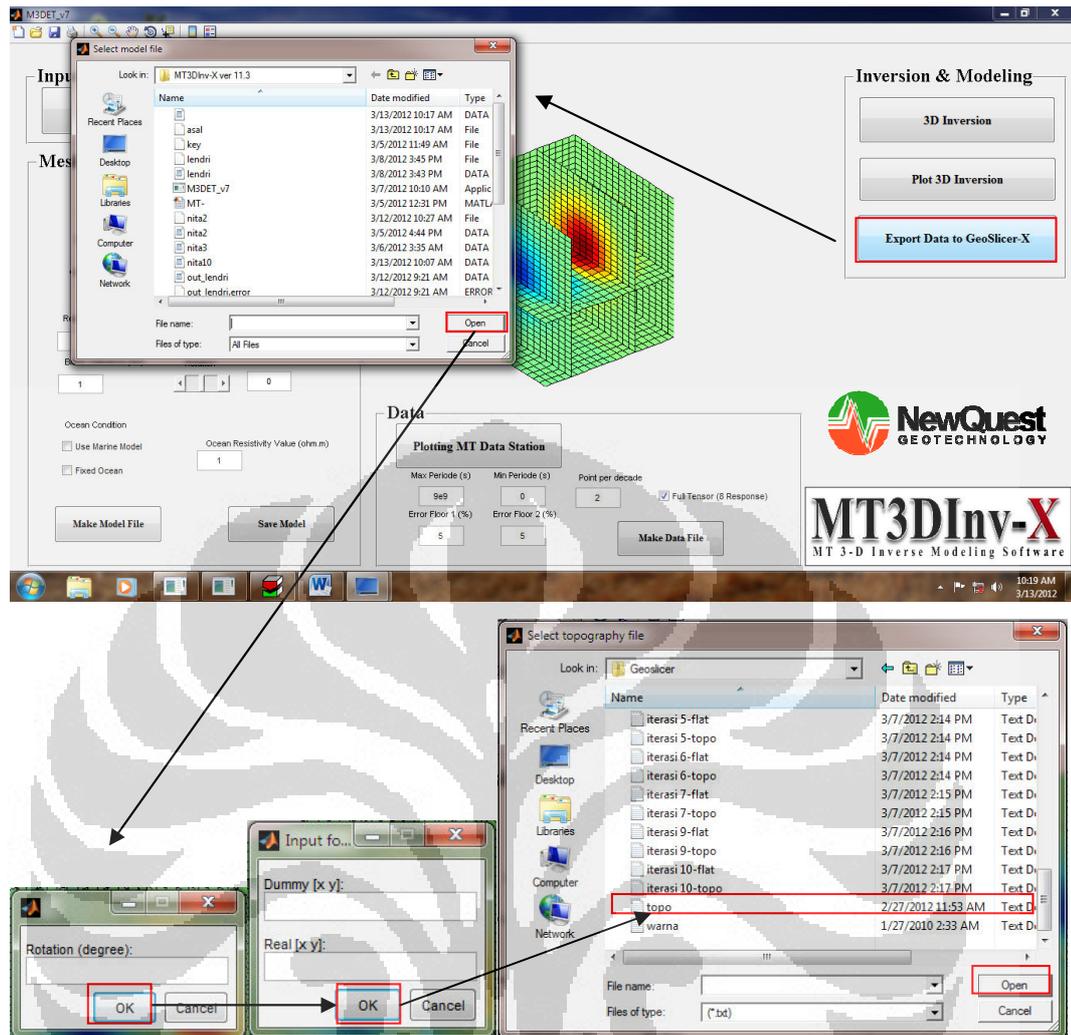
1. Bagian 1 berisikan informasi mengenai nilai RMS yang diperoleh dari hasil iterasi yang dilakukan
2. Bagian 2 berisikan informasi mengenai jumlah blok pada arah x (N-S), y (W-E) dan z. Jumlah blok pada bagian ini sesuai dengan jumlah blok yang di set di dalam *file initial* model.

3. Bagian 3 berisikan informasi mengenai ukuran blok pada arah x (N-S), y (W-E) dan z dalam satuan *dummy*. Ukuran blok pada bagian ini bernilai sama dengan ukuran blok yang di set di dalam *file initial* model.
4. Bagian 4 berisikan nilai *true* resistivitas bawah permukaan, hasil inversi 3D. Jumlah data yang dihasilkan dari inversi ini sebanyak hasil kali antara jumlah blok x, y, dan z.

Dari penjelasan diatas, terlihat bahwa hasil mentah yang diperoleh dari proses inversi 3D adalah dalam bentuk angka. Jika hanya mengacu kepada *file output* ini, kita tidak memiliki kepastian yang jelas mengenai angka hasil inversi yang tertulis didalam *file* tersebut dimiliki oleh koordinat yang mana. Sementara itu, ukuran blok yang dihasilkan dalam *file output* ini pun masih dalam satuan *dummy*. Oleh karenanya, agar dapat melihat kondisi bawah permukaan dengan lebih jelas, *file* keluaran dari proses inversi tersebut harus dikonversi sedemikian rupa ke dalam satuan UTM.

Di dalam *software* MT3DInv-X, *file* keluaran dari proses inversi dapat langsung dikonversi ke dalam satuan UTM. Pada prinsipnya, pengkonversian *file* ke dalam satuan UTM ini dilakukan agar hasil yang diperoleh dari proses inversi yang berupa angka dapat digambarkan dengan jelas sesuai dengan lokasinya. Dengan demikian, penggambaran kondisi bawah permukaan akan dapat terlihat dengan mudah secara visual.

Proses konversi *output* hasil inversi di dalam *software* MT3DInv-X dilakukan dengan cara mengklik **Eksport Data to Geoslicer-X**. Setelah diklik, *software* akan meminta konfirmasi *file* model mana yang akan diekspor. Selanjutnya, *software* akan meminta keterangan mengenai sudut rotasi data dan meminta informasi mengenai konversi satu titik *dummy* ke dalam satuan UTM. Koordinat *dummy* yang dipilih berasal dari *file* data stasiun yang telah diketahui konversinya kedalam UTM. Kemudian, untuk melengkapi proses konversi *output*, *software* akan meminta data topografi. Ketika semua hal telah dilakukan, bisa dikatakan proses konversi telah selesai dilakukan.



Gambar 4.25. Langkah Ekspor Data dalam MT3DInv-X

BAB 5

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Waktu Inversi (CPU Time)

Untuk melakukan inversi MT 3D, kesesuaian antara besar kecilnya data yang akan diolah dan spesifikasi komputer yang digunakan untuk inversi harus diperhitungkan dengan baik. Selama penelitian, penulis mencoba melakukan pengamatan mengenai efek spesifikasi komputer terhadap lamanya waktu inversi yang dibutuhkan. Untuk mendapatkan hasil yang signifikan, penulis melakukan inversi dengan data yang sama tetapi mempergunakan tiga jenis komputer yang berbeda. Adapun hasil yang diperoleh dari pengamatan tersebut dapat terlihat pada bagan dibawah ini.

Tabel 5.1. Spesifikasi Komputer

Kriteria	Komputer 1	Komputer 2	Komputer 3
Processor	Intel Core i7-2600 8 CPU @ 3.4 GHz	Intel Core 2 Duo 2 CPU @ 1.5 GHz	Intel Atom 4 CPU @ 1.66 GHz
Memory	16 GB	2 GB	2 GB

Tabel 5.2. Hasil Pengamatan Jenis Komputer Terhadap Waktu Inversi

Iterasi	Waktu (menit)		
	Komputer 1	Komputer 2	Komputer 3
1	13	60	117
2	21	93	200
3	22	98	202

Dari hasil yang telah dijabarkan diatas, terlihat bahwa komputer Intel (R) i7-2600 yang berkapasitas memori 16GB melakukan proses inversi 3D yang jauh lebih

cepat daripada dua komputer lainnya, yaitu komputer Intel (R) Core 2 Duo dan Intel (R) Atom dengan kapasitas memori 2 GB. Secara statistik, terlihat bahwa komputer Intel (R) i7-2600 dengan RAM 16GB memiliki kecepatan sekitar 9.5 kali lebih cepat dibandingkan dengan komputer Intel (R) Atom 2GB. Sementara itu, jika dibandingkan dengan komputer Intel (R) Core 2 Duo 2GB, ternyata komputer i7 16GB lebih cepat sekitar 4.5 kali darinya. Dari pengamatan ini dapat disimpulkan bahwa besar kecilnya kapasitas komputer yang digunakan akan mempengaruhi lamanya waktu inversi yang dibutuhkan. Ketika kapasitas komputer yang digunakan semakin besar, maka waktu yang dibutuhkan untuk melakukan inversi pun akan menjadi semakin kecil.

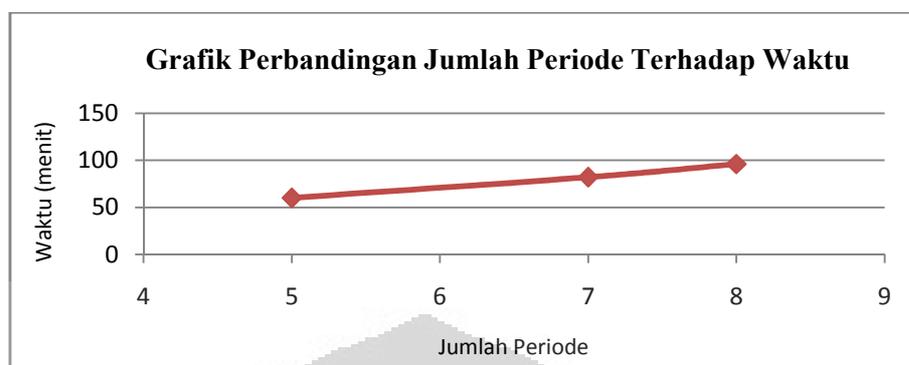
Dari data yang sama, terlihat bahwa jumlah iterasi yang digunakan selama inversi akan mempengaruhi lamanya waktu inversi yang dibutuhkan (*CPU time*). Dari hasil pengamatan, iterasi ke-2 ternyata membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan iterasi ke-1. Sementara itu, waktu yang dibutuhkan untuk iterasi ke-3 ternyata sama besar dengan waktu yang dibutuhkan untuk iterasi ke-2. Secara statistik, dapat disimpulkan bahwa iterasi ke-2 membutuhkan waktu sekitar 1.6 kali lebih lama dibandingkan dengan waktu untuk iterasi ke-1. Dari hasil statistik ini, dapat dikatakan bahwa semakin banyak iterasi yang dilakukan, maka *CPU time* yang dibutuhkan akan menjadi semakin besar.

Sementara itu, lamanya waktu untuk inversi juga dipengaruhi oleh besar kecilnya data yang akan diolah. Dalam hal ini, penulis mencoba melakukan inversi pada komputer yang sama tetapi dengan memvariasikan jumlah periode yang berbeda di dalam *file* data.

Tabel 5.3. Hasil Pengamatan Jumlah Periode Terhadap Waktu Inversi

Keterangan : data berikut merupakan data iterasi 1 yang dilakukan pada komputer Intel (R) Core 2 Duo 2 GB

Periode	Waktu (menit)
5	60
7	82
8	96

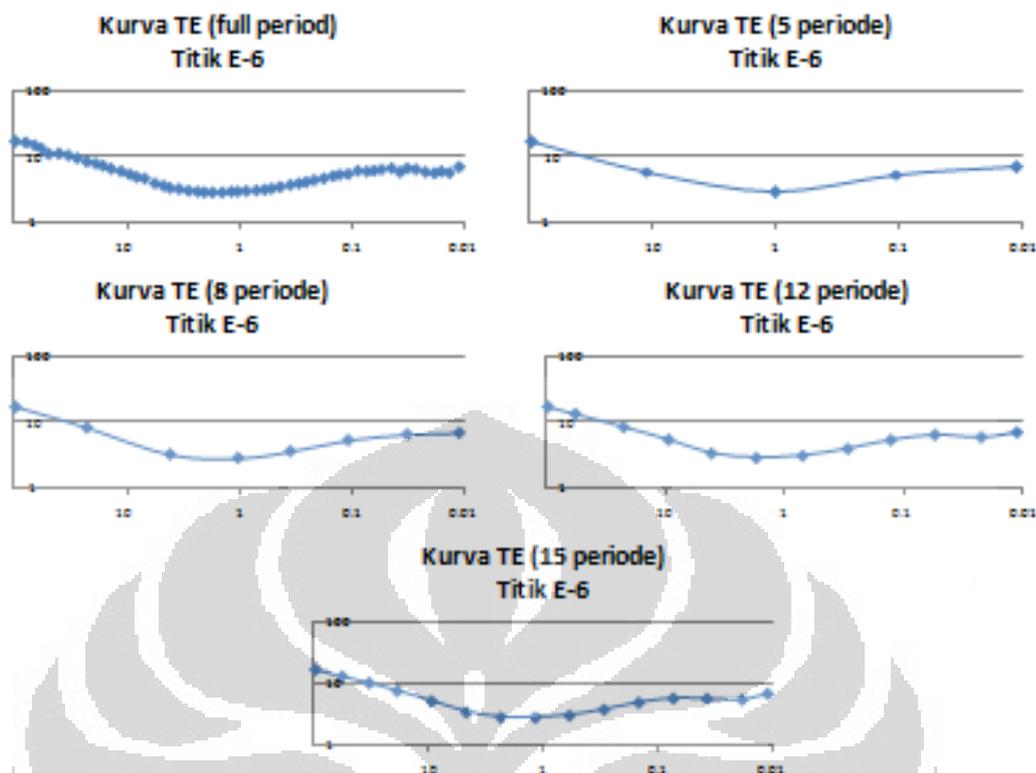


Gambar 5.1. Grafik Perbandingan Jumlah Periode Terhadap Waktu Inversi

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa semakin banyak periode yang digunakan di dalam inversi (dalam hal ini berarti data menjadi semakin besar), maka waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses inversi akan menjadi semakin besar. Berdasarkan data yang diperoleh, banyaknya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses inversi pada data dengan periode 8 ternyata lebih besar sekitar 1.2 kali dibandingkan dengan waktu inversi untuk data dengan periode 7. Mengacu dari hasil tersebut, maka secara statistik perkiraan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan inversi pada data untuk periode yang lebih besar dapat diperhitungkan.

Pada dasarnya, untuk melakukan proses inversi, semua data impedansi di tiap periode yang terdapat pada EDI *file* tidak selalu harus dimasukkan. Oleh karena lamanya proses inversi juga dipengaruhi oleh banyaknya periode yang digunakan, maka kita dapat memilih berapa jumlah data periode per decade yang akan diinversi. Jumlah data yang dipilih adalah sejumlah data yang diperkirakan dapat mewakili satu kurva MT. Adapun proses pemilihan data periode ini dilakukan untuk mengefisienkan waktu proses inversi 3D yang diperlukan.

Untuk menentukan berapa jumlah data periode yang sebaiknya diambil, penulis melakukan perbandingan antara kurva MT *full* periode dengan kurva MT beberapa *sample* periode. Adapun hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut.



Gambar 5.2. Grafik Perbandingan Kurva MT dengan Beberapa Periode

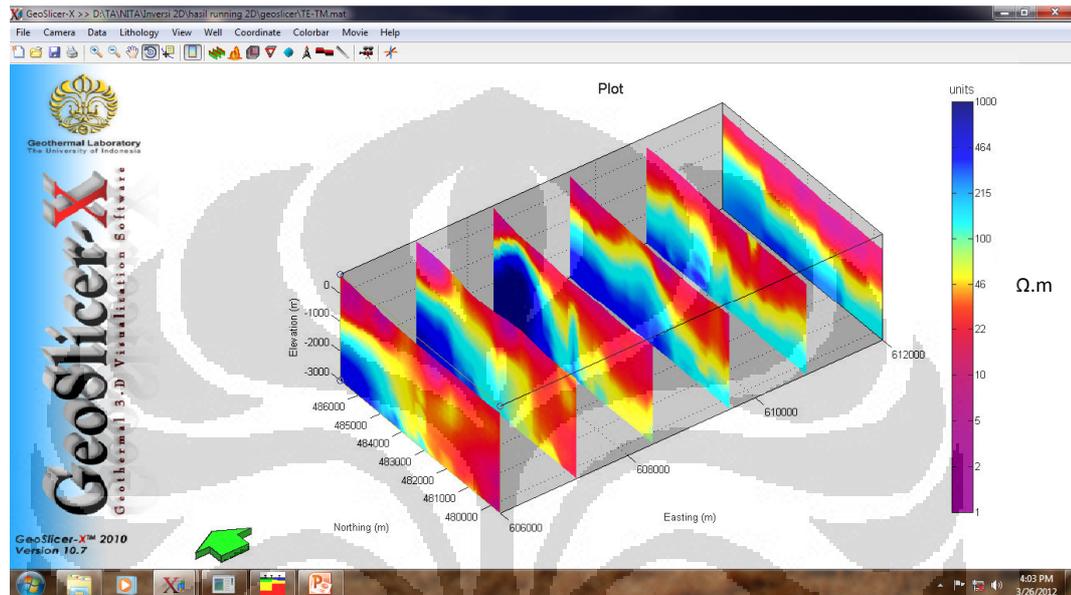
Dari hasil perbandingan tersebut, terlihat bahwa kurva MT dengan periode 12 dan periode 15 cukup dapat mewakili kurva MT *full* periode dengan cukup signifikan. Sementara itu, kurva MT dengan periode yang lebih kecil terlihat masih belum dapat mewakili kurva MT *full* periode dikarenakan kurangnya data yang ada. Untuk mengefisienkan CPU *time* yang akan dibutuhkan untuk menjalankan inversi 3D, maka diperlukan adanya perhatian dengan besarnya data yang akan digunakan.

5.2 Hasil Inversi

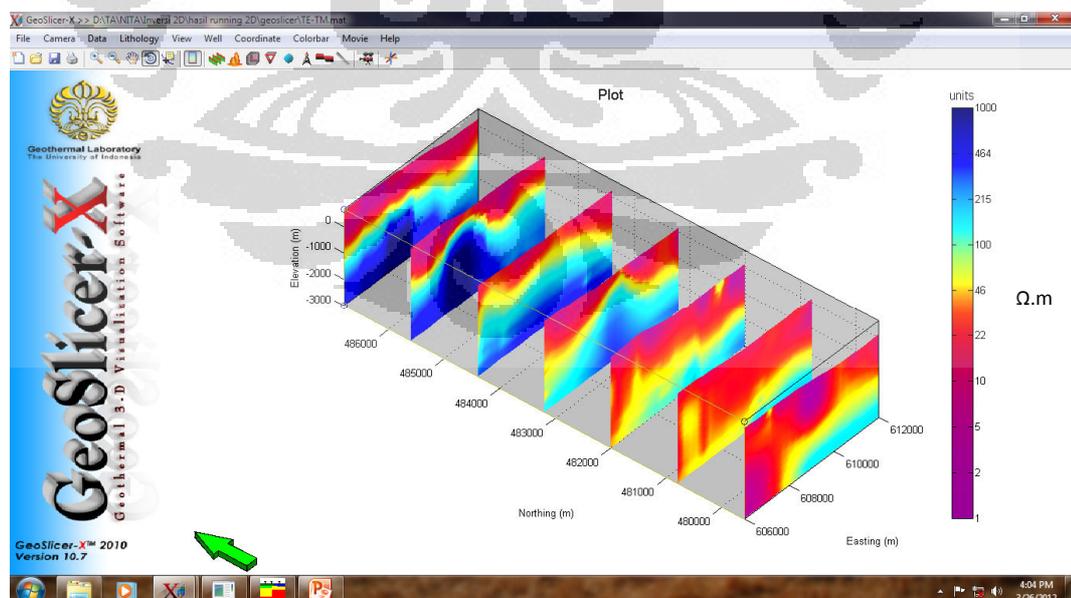
Hasil inversi yang diperoleh dari pengolahan, selanjutnya ditampilkan dengan menggunakan *software* Geoslicer-X yang dikembangkan oleh Laboratorium Geofisika Eksplorasi, Universitas Indonesia. *Software* ini merupakan *software* interaktif yang dapat memvisualisasikan tampilan gambar secara 3 dimensi sehingga analisa kondisi bawah permukaan dapat dilakukan dengan lebih mudah.

5.2.1 Hasil Inversi 2D

Setelah dilakukan pengolahan data MT Tawau, Malaysia maka diperoleh penampang hasil inversi 2D. Gambar 5.3 merupakan penampang hasil inversi 2D dalam arah utara-selatan dan Gambar 5.4 merupakan penampang hasil inversi 2D dalam arah barat-timur.



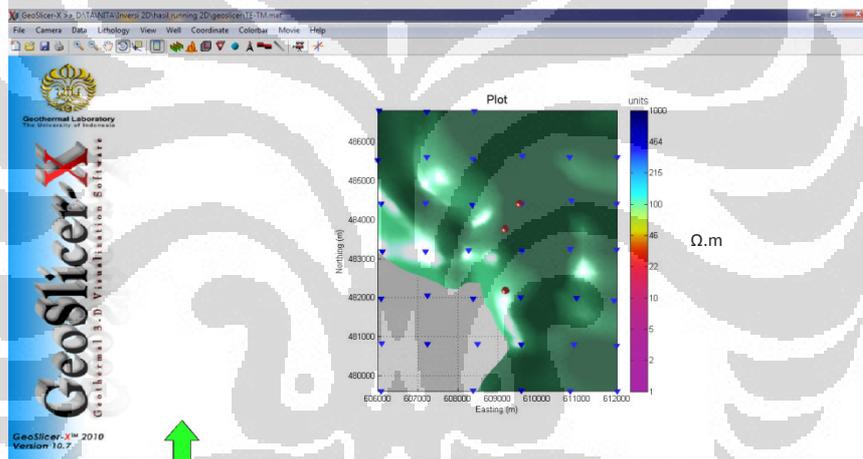
Gambar 5.3. Hasil Inversi 2D MT Tawau, Malaysia Arah Utara-Selatan



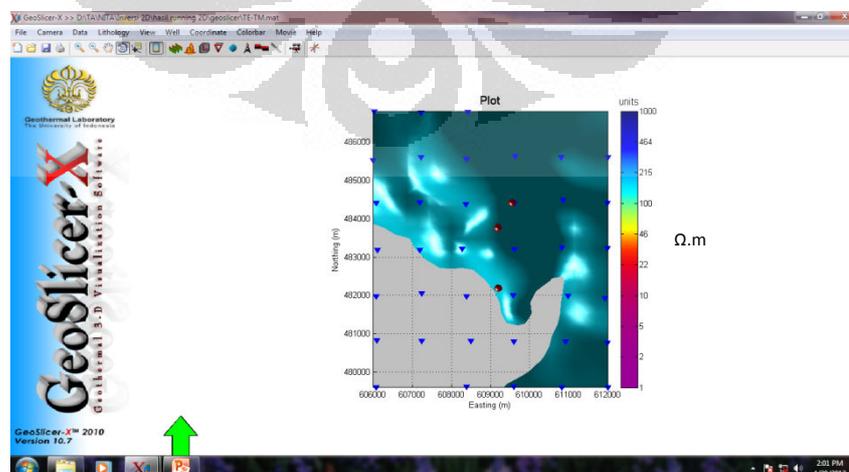
Gambar 5.4. Hasil Inversi 2D MT Tawau, Malaysia Arah Barat-Timur

Dari kedua gambar diatas, terlihat bahwa terdapat layer dengan nilai resistivitas rendah, yakni 1-10 ohm.m berada dari permukaan hingga kedalaman sekitar 1000 m. Layer ini diinterpretasikan sebagai *clay cap* yang konduktif, sebagai penutup dari sistem geotermal. Kemudian, layer dengan nilai resistivitas 80-200 ohm.m yang diinterpretasikan sebagai zona reservoir geotermal berada pada kedalaman sekitar 1000-2000m. Adapun layer dengan resistivitas tinggi >300 ohm.m yang diinterpretasikan sebagai batuan *heat source* berada pada kedalaman >2000m.

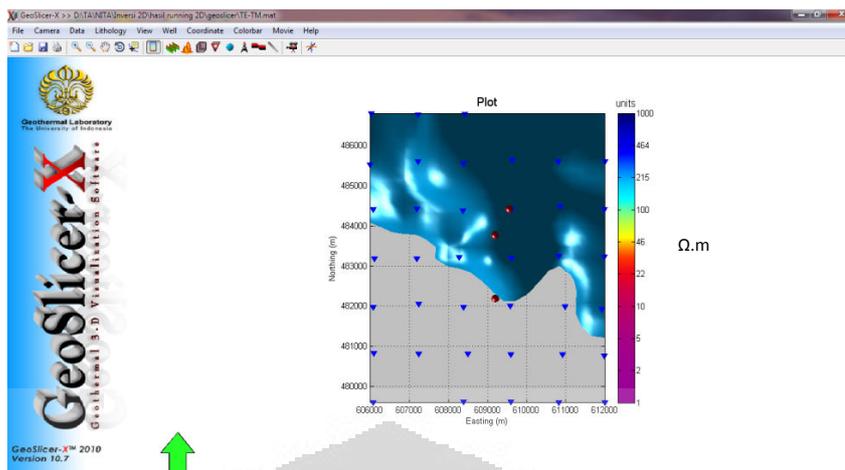
Penyebaran daerah yang diinterpretasikan sebagai zona reservoir dengan nilai resistivitas sekitar 100-200 ohm.m dapat digambarkan dari penampang isovalue (perspektif dari atas) sebagai berikut.



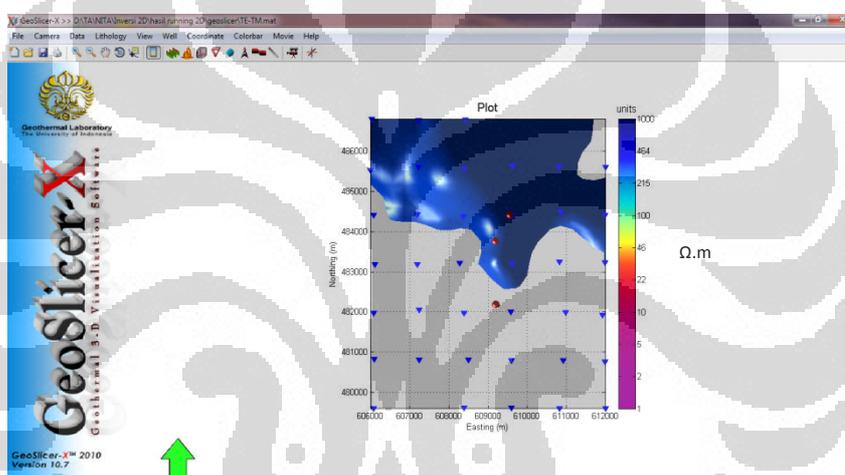
Gambar 5.5. Penampang Isovalue Resistivitas 100 ohm.m



Gambar 5.6. Penampang Isovalue Resistivitas 150 ohm.m



Gambar 5.7. Penampang Isovalue Resistivitas 200 ohm.m

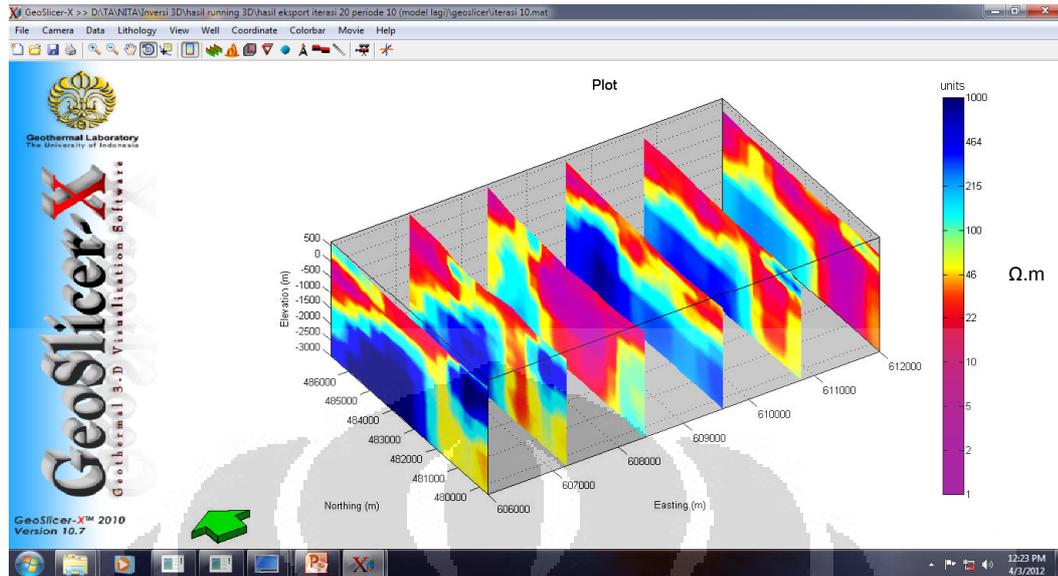


Gambar 5.8. Penampang Isovalue Resistivitas 300 ohm.m

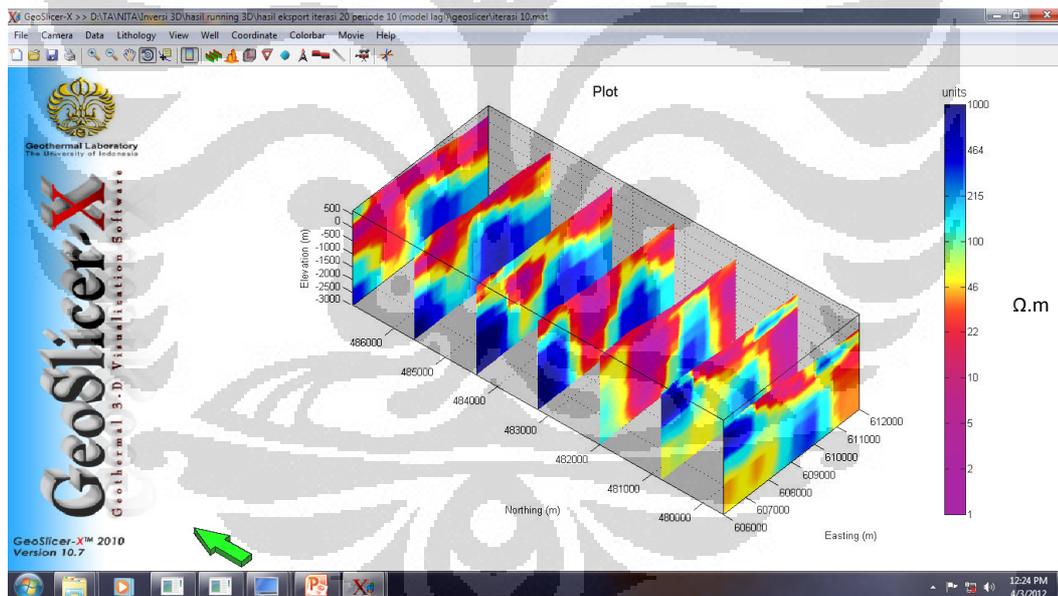
Dari penampang diatas, terlihat bahwa resistivitas 100 ohm.m menyebar hingga ke daerah selatan, dekat dengan Gunung Andrassy. Sementara itu, penyebaran resistivitas 200 ohm.m terlihat hanya berada pada bagian utara dari daerah survey. Hal yang sama terjadi untuk penyebaran resistivitas 300 ohm.m. Dari penjabaran tersebut, terlihat bahwa resistivitas tinggi untuk wilayah ini terjadi di daerah utara, dekat dengan Gunung Maria.

5.2.2 Hasil Inversi 3D

Hasil data yang diperoleh dari proses inversi 3D selanjutnya ditampilkan di dalam *software* Geoslicer-X. Adapun hasil yang diperoleh diperlihatkan pada Gambar 5.9 dan Gambar 5.10.

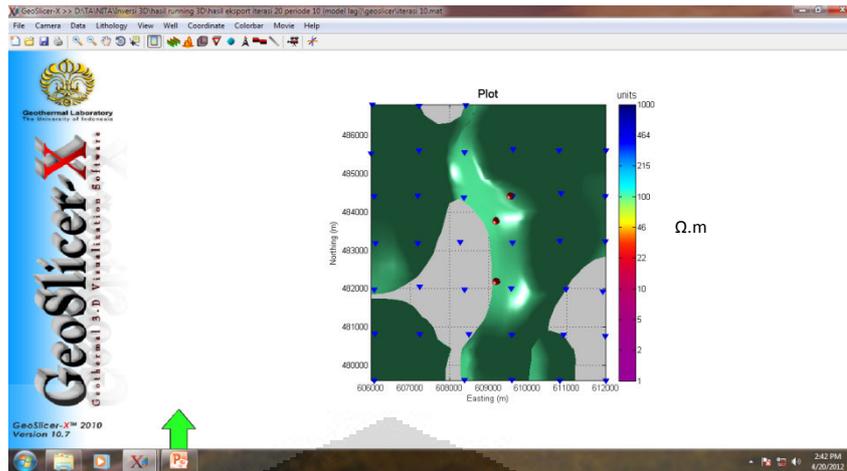


Gambar 5.9. Hasil Inversi 3D Arah Utara-Selatan

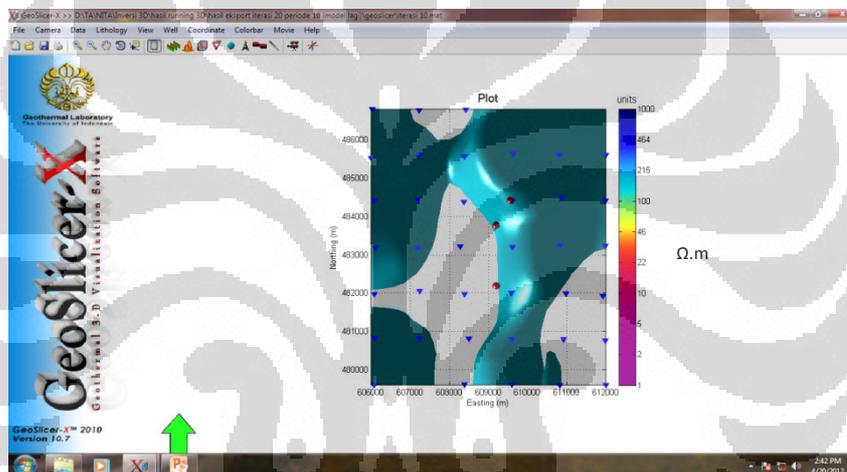


Gambar 5.10. Hasil Inversi 3D Arah Barat-Timur

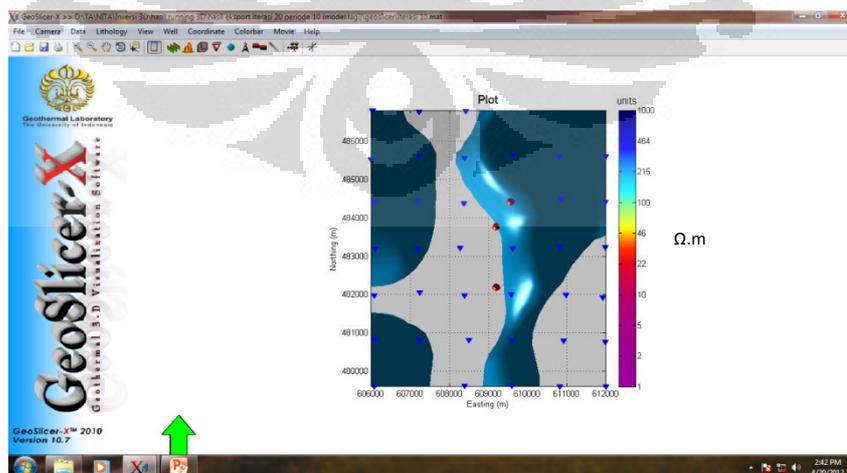
Untuk mempermudah analisa hasil, dilakukan visualisasi penyebaran nilai resistivitas tertentu di dalam penampang isovalue (perspektif dari atas). Adapun penampang yang ditampilkan adalah penampang yang memiliki nilai resistivitas antara 100-200 ohm.m, yang diduga sebagai zona reservoir.



Gambar 5.11. Penampang Isovalue Resistivitas 100 ohm.m



Gambar 5.12. Penampang Isovalue Resistivitas 150 ohm.m

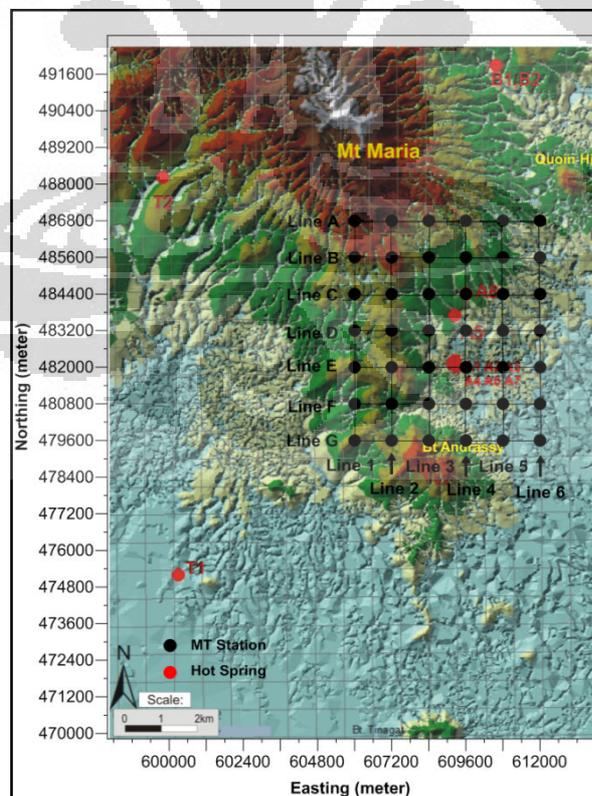


Gambar 5.13. Penampang Isovalue Resistivitas 200 ohm.m

Dari Gambar 5.9 terlihat bahwa layer yang berwarna merah (bernilai resistivitas rendah) yang diinterpretasikan sebagai *clay cap* berada hingga kedalaman sekitar 1000m. Sementara itu, penyebaran resistivitas tinggi (berwarna biru) terlihat berada pada kedalaman >1000m dan tampak terputus pada lintasan 3. Terputusnya penyebaran resistivitas tinggi semakin terlihat pada penampang isovalue (Gambar 5.11-5.13). Dari Gambar 5.13 terlihat dengan jelas bahwasanya dibagian utara daerah survey, resistivitas dengan nilai 200 ohm.m terputus diantara lintasan 2 dan lintasan 3.

5.3 Interpretasi Terpadu

Berdasarkan hasil plot titik *hot spring* yang muncul di permukaan terhadap lokasi titik stasiun MT, diperoleh hasil bahwa terdapat beberapa *hot spring* yang berlokasi di sekitar wilayah survey. *Hot spring* tersebut di antaranya adalah titik *hot spring* A1-A4 dan A8, *mud pools* A5, *hot spring* T1 dan T2 serta *hot spring* B1 dan B2.

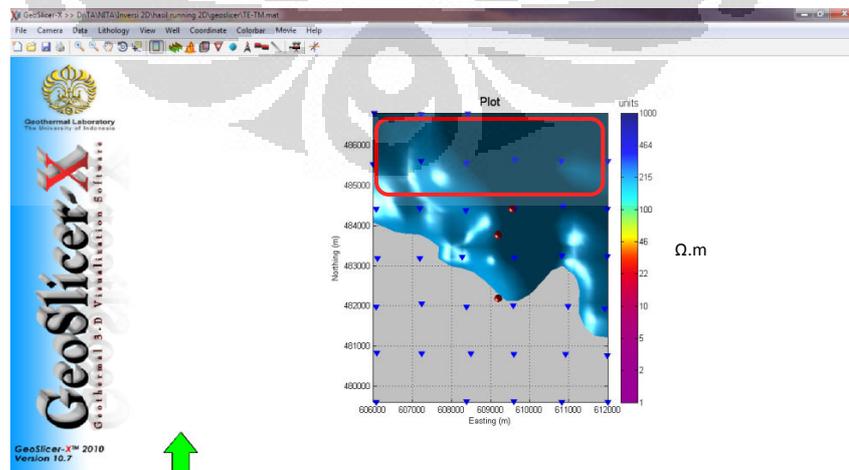


Gambar 5.14. Penyebaran Lokasi *Hot Spring* di Area Survey

Berdasarkan data geokimia, *hot spring* A1 dan A5 memiliki pH yang netral yang mengindikasikan bahwa kedua *hot spring* tersebut merupakan *outflow* dari sistem geotermal yang ada di bawah permukaan. Kemudian, investigasi geokimia berlanjut ke pengukuran temperatur beberapa *hot spring*. Dari hasil pengukuran isotop dan geotermometer Na-K-Mg yang dilakukan oleh Javino (2010), diketahui bahwa *hot spring* yang memiliki temperatur tertinggi adalah *hot spring* Apas Kiri.

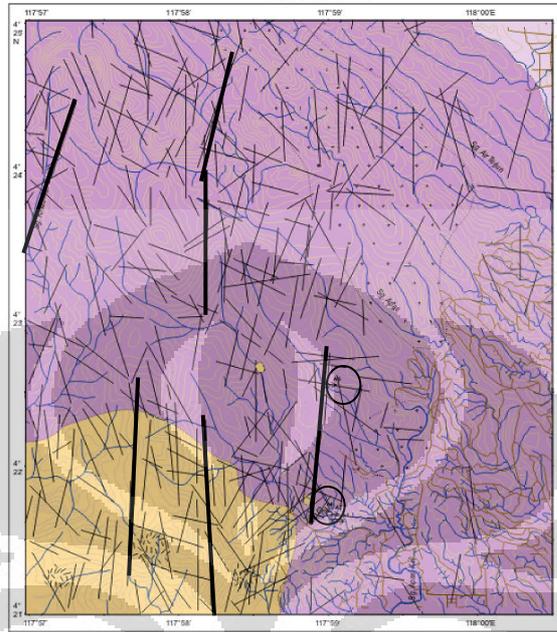
Sementara itu, berdasarkan hasil investigasi kandungan anion di dalam *hot spring*, diperoleh hasil bahwa *hot spring* A5 memiliki kandungan boron dan klorida yang tinggi. Kesemua hal tersebut mengindikasikan bahwa *hot spring* A5 merupakan *outflow* yang posisinya dekat dengan *heat source*. Data geokimia menduga bahwa lokasi pusat reservoir berada di sebelah tenggara Gunung Maria dan meluas ke area Balung.

Dugaan tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh di dalam penampang inversi 2D MT. Berdasarkan hasil inversi 2D yang diperoleh (lihat Gambar 5.3 - 5.7), penyebaran resistivitas sebesar 100-300 ohm.m secara signifikan berada di bagian utara daerah survey, dekat dengan Gunung Maria. Dari gambar itu pula terlihat bahwa penyebaran resistivitas tinggi tersebut meluas hingga area di sebelah kanan, yakni daerah Balung. Sementara itu, dari Gambar 5.5 terlihat bahwa penyebaran resistivitas 100 ohm.m juga meluas hingga ke bagian selatan, dekat dengan Gunung Andrassy.



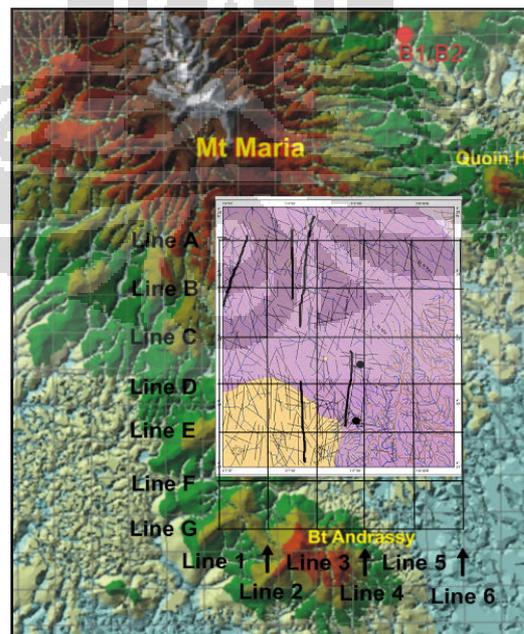
Gambar 5.15. Dugaan Posisi Reservoir Geotermal Berdasarkan Inversi 2D

Berdasarkan hasil studi geologi daerah setempat, daerah survey Tawau, Malaysia berada di daerah yang dominan memiliki arah struktur utara-selatan. Adapun beberapa struktur tersebut tergambar di dalam Gambar 5.16.



Keterangan : Garis tebal menunjukkan struktur utama. Lingkaran menunjukkan lokasi *hot spring*.

Gambar 5.16. Peta Struktur Daerah Tawau, Malaysia



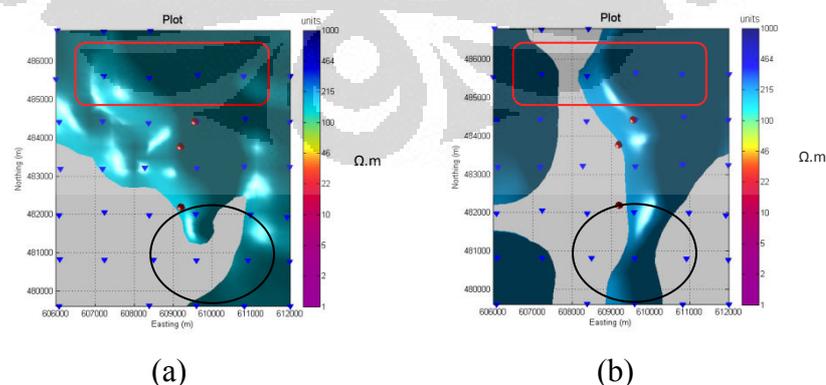
Gambar 5.17. Peta Struktur di dalam Peta Lokasi Survey MT

Dari Gambar 5.16 terlihat bahwa posisi *hot spring* yang ada di sekitar wilayah survey berada di daerah yang banyak patahan. Oleh karenanya, sangat memungkinkan bahwa patahan yang ada tersebut merupakan penyebab munculnya manifestasi yang ada di sekitar wilayah survey.

Sementara itu, ketika peta struktur disatukan di dalam peta lokasi survey MT (seperti yang terlihat pada Gambar 5.17), diperoleh hasil bahwa terdapat struktur yang cukup panjang di sekitar wilayah bagian utara survey, tepatnya di daerah antara *line 2* dan *line 3*. Struktur yang cukup panjang tersebut tidak tergambar di dalam penampang hasil inversi 2D. Akan tetapi, hasil yang berbeda ternyata diperoleh di dalam penampang inversi 3D.

Hasil penampang inversi 3D memperlihatkan adanya efek struktur patahan yang menyebabkan penyebaran resistivitas 150-200 ohm.m terputus di daerah antara lintasan 2 dan lintasan 3. Hasil ini mengindikasikan bahwa inversi 3D lebih dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan bumi yang bersifat kompleks dibandingkan dengan inversi 2D.

Sementara itu, dari hasil penampang inversi 3D pula (Gambar 5.18), terlihat bahwa penyebaran resistivitas 100 ohm.m juga meluas ke arah selatan, dekat dengan Gunung Andrassy. Akan tetapi, perluasan tersebut tidak seluas dengan yang diperoleh dari hasil inversi 2D. Untuk hasil penyebaran resistivitas 100 ohm.m di dalam inversi 3D, perluasannya hanya tertuju ke arah Gunung Andrassy.

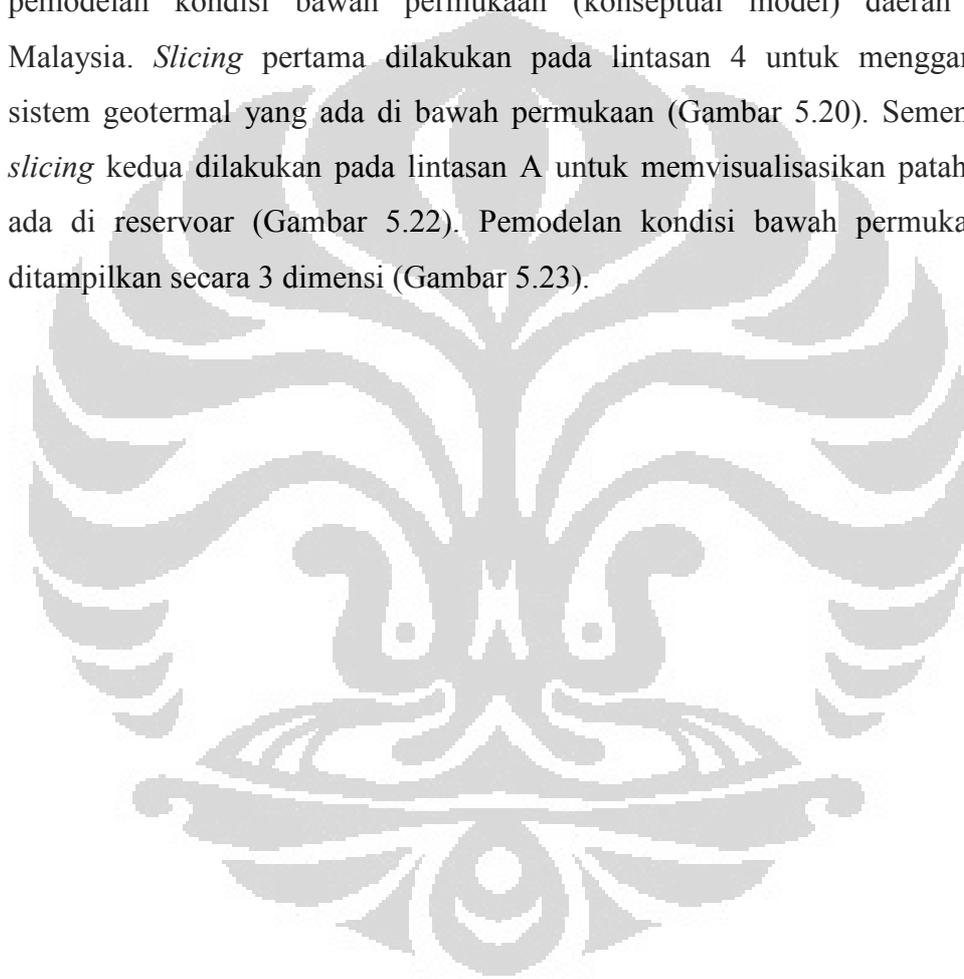


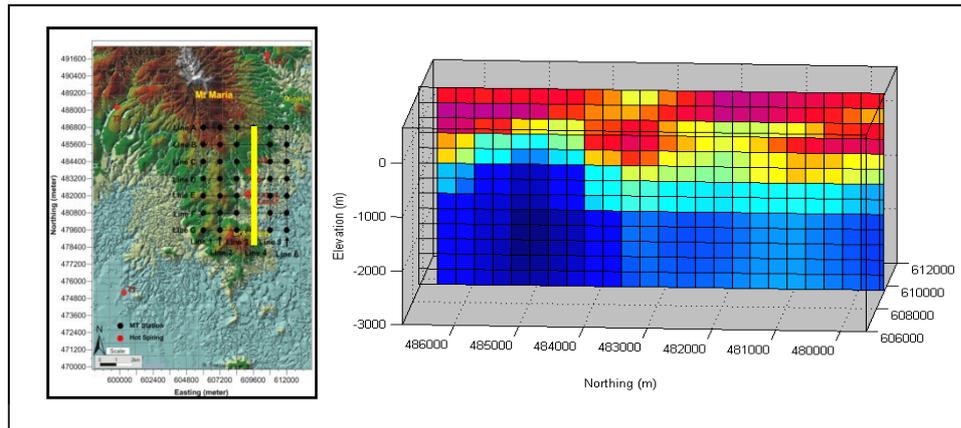
Keterangan : (a) Hasil Inversi 2D ; (b) Hasil Inversi 3D

Gambar 5.18. Perbedaan Hasil Penampang Inversi 2D dan 3D

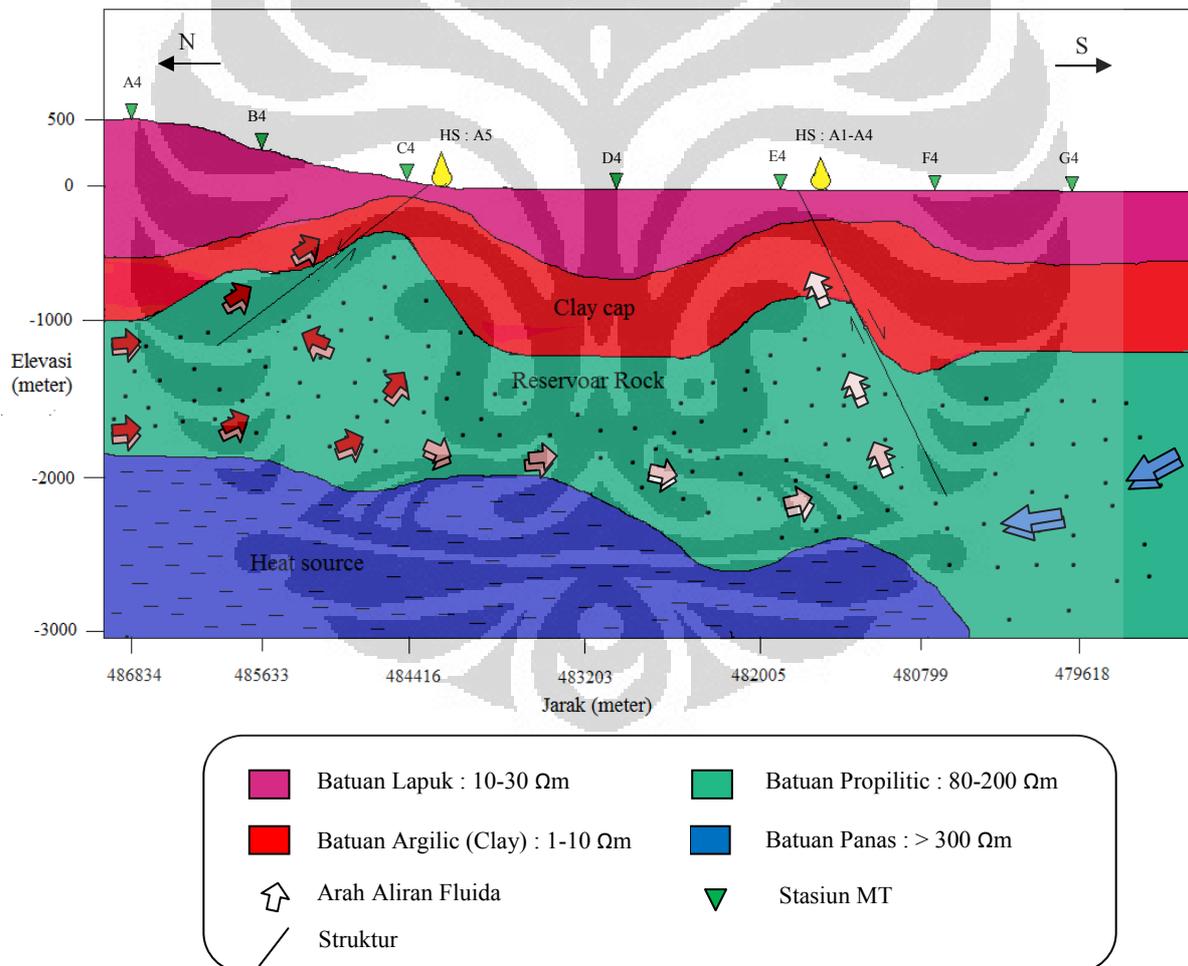
Mengacu dari hasil inversi 2D dan 3D MT yang diperoleh selama penelitian dan integrasi dengan data geologi-geokimia, diperkirakan bahwa lokasi reservoir geotermal berada di bagian utara daerah survey. Akan tetapi berdasarkan hasil inversi 3D MT, diketahui bahwa reservoir tersebut terbagi menjadi dua akibat adanya struktur.

Dua *slicing* pada hasil inversi 3D MT dilakukan untuk membuat pemodelan kondisi bawah permukaan (konseptual model) daerah Tawau, Malaysia. *Slicing* pertama dilakukan pada lintasan 4 untuk menggambarkan sistem geotermal yang ada di bawah permukaan (Gambar 5.20). Sementara itu, *slicing* kedua dilakukan pada lintasan A untuk memvisualisasikan patahan yang ada di reservoir (Gambar 5.22). Pemodelan kondisi bawah permukaan juga ditampilkan secara 3 dimensi (Gambar 5.23).

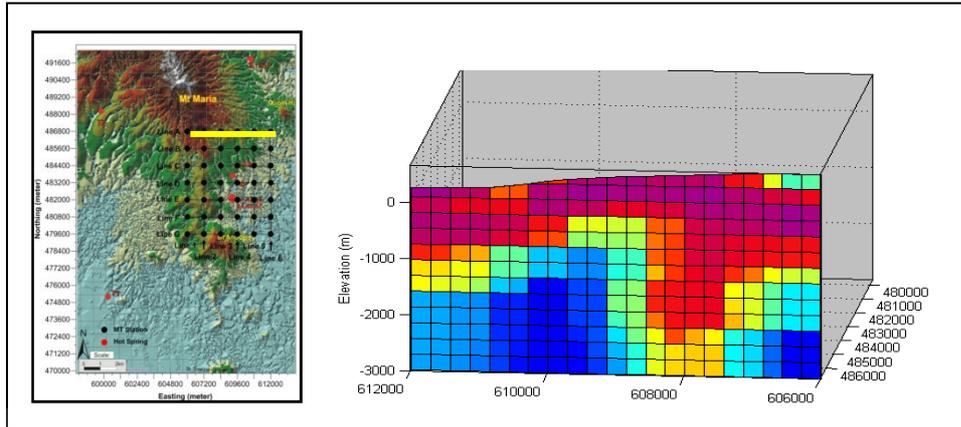




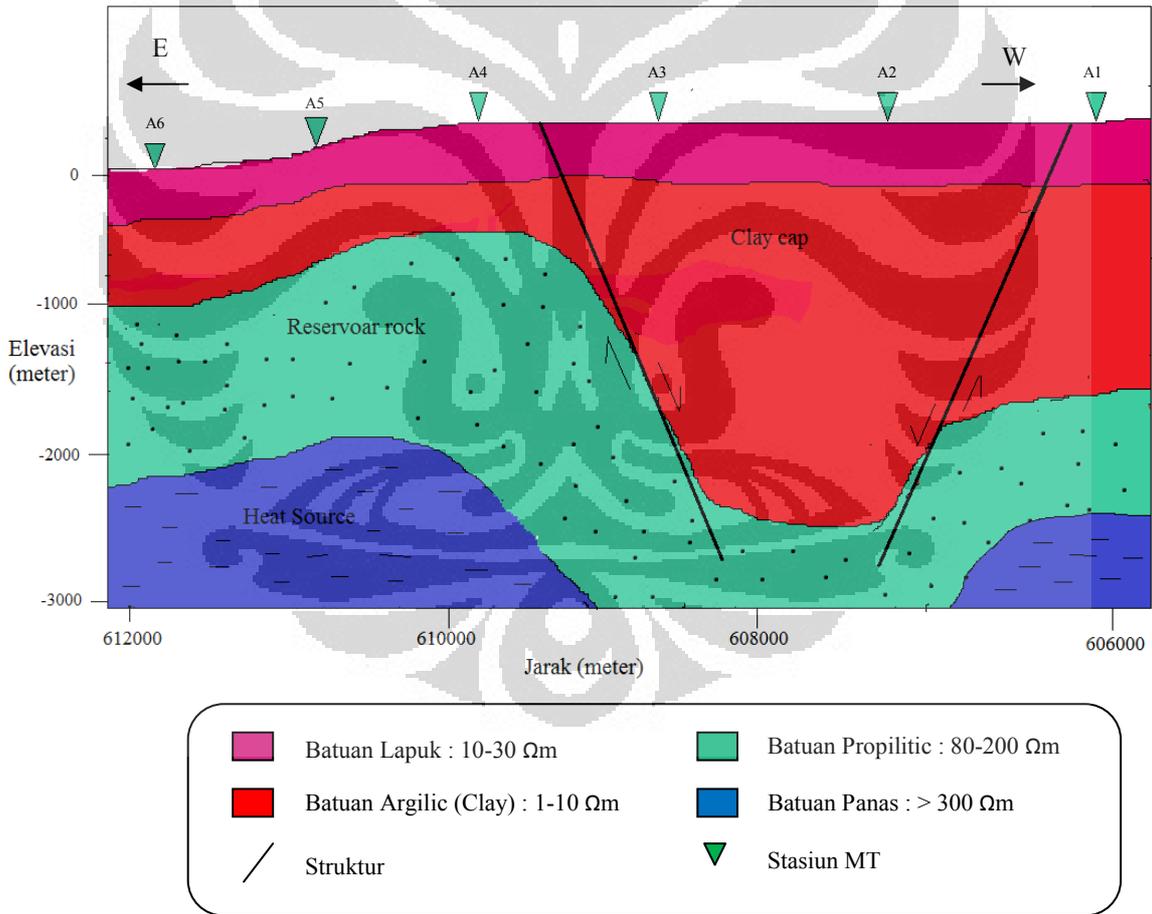
Gambar 5.19. Lokasi Slicing Lintasan 4 (kiri), Penampang Resistivitas Hasil Inversi 3D MT (kanan)



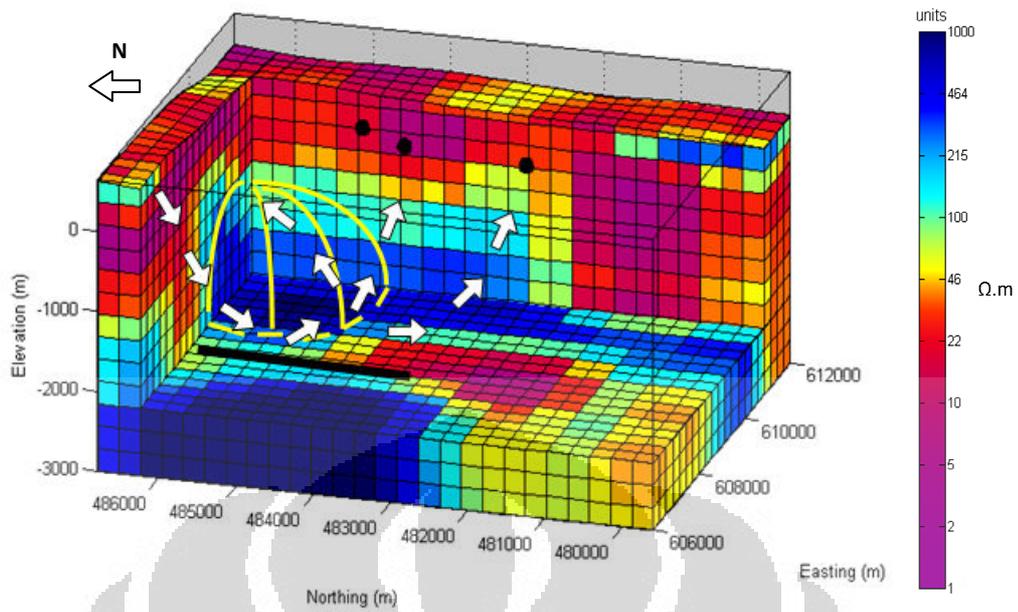
Gambar 5.20. Konseptual Model untuk Slicing Lintasan 4



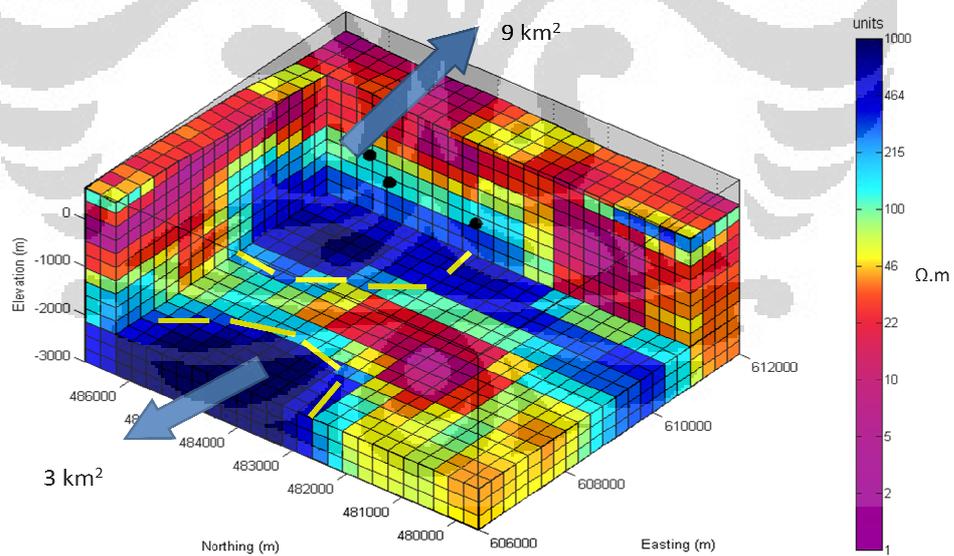
Gambar 5.21. Lokasi Slicing Lintasan A (kiri), Penampang Resistivitas Hasil Inversi 3D MT (kanan)



Gambar 5.22. Konseptual Model untuk Slicing Lintasan A



Gambar 5.23. Konseptual Model Terintegrasi Geotermal Prospek Tawau, Malaysia dalam 3 Dimensi



Gambar 5.24. Luasan Daerah Reservoir

BAB 6 PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan selama penelitian, diperoleh beberapa kesimpulan yang diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Kedua hasil inversi (2D dan 3D) sama-sama menunjukkan bahwa :
 - a. clay cap (resistivitas 1-10 ohm.m) berada hingga kedalaman sekitar 1000m.
 - b. zona reservoir (resistivitas 100-200 ohm.m) berada pada kedalaman sekitar 1000-2000m
 - c. Batuan panas/*heat source* (resistivitas >300 ohm.m) berada pada kedalaman >2000m
 - d. Penyebaran resistivitas 100 ohm.m meluas ke arah selatan, dekat dengan Gunung Andrassy
2. Perbedaan antara hasil inversi 2D dan 3D terletak pada penyebaran resistivitas tinggi.
 - a. Pada hasil inversi 2D, penyebaran resistivitas tinggi (>100 ohm.m) berada pada bagian utara daerah survey, yakni area dekat Gunung Maria dan meluas ke area Balung
 - b. Pada hasil inversi 3D, penyebaran resistivitas tinggi (>100 ohm.m) juga berada pada bagian utara daerah survey, tetapi terputus pada lintasan 2 dan 3
3. Inversi 3D lebih baik dibandingkan inversi 2D dalam hal pendelineasian struktur
4. Pusat reservoir geotermal diperkirakan berada di bagian utara daerah survey, tepatnya dari lintasan 4 hingga 6
5. Integrasi antara inversi 2D dan 3D akan sangat membantu interpretasi kondisi bawah permukaan yang lebih akurat

6.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk perkembangan penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Sebaiknya dilakukan metode geofisika lain, seperti metode gravitasi untuk mengoptimalkan penggambaran kondisi bawah permukaan.
2. Untuk pengembangan inversi 3D, sebaiknya dilakukan pula penelitian lebih lanjut mengenai efek variasi ukuran dan jumlah grid untuk satu data yang sama. Hal ini akan sangat membantu dalam hal pemahaman mengenai kriteria ukuran grid yang terbaik.



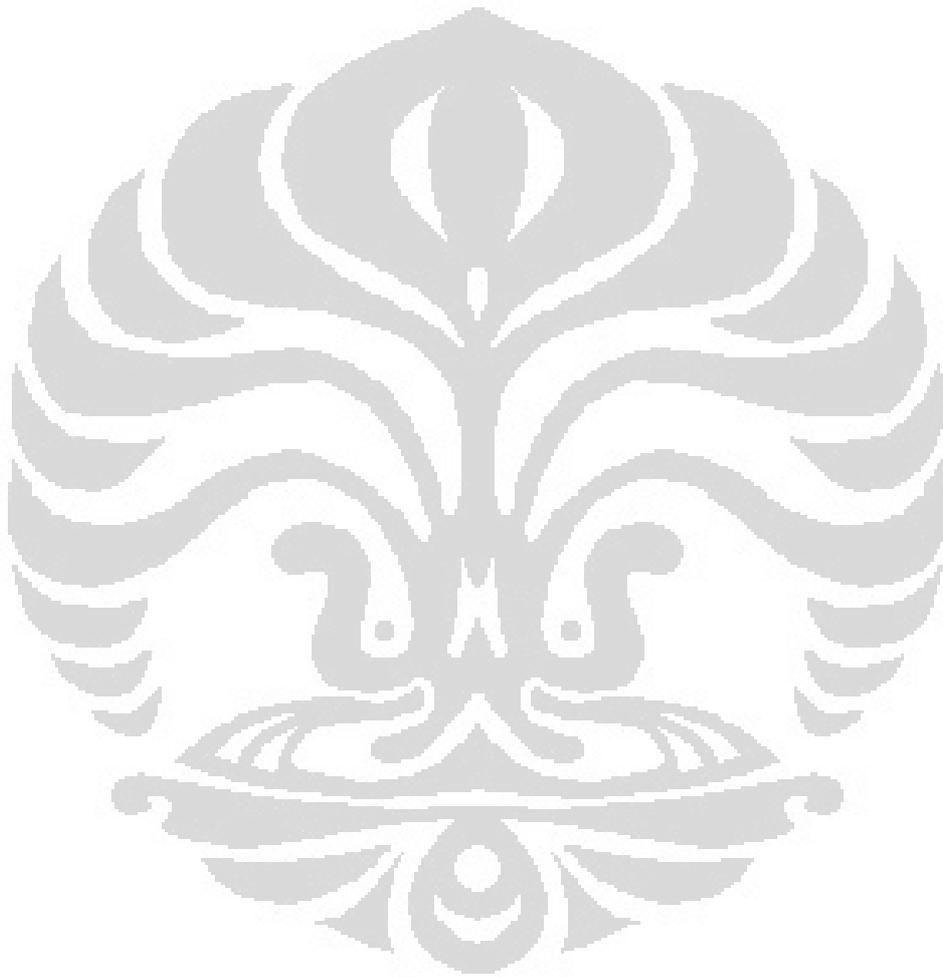
DAFTAR ACUAN

- Baranwal V.C., Franke A., Borner R.U., Spitzer K., and Sharma S.P., 2010, *2D Inversion for Plane Wave EM Methods Using an Adaptive Unstructured Grid Finite Element Approach : Formulation, Calculation of Sensitivities and First Results*, Springer.
- Cumming, William and Mackie, Randall, 2010, *Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History*, Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Citrosiswoyo, Wahyudi, 2008, *Geotermal : Dapat Mengurangi Ketergantungan Bahan Bakar Fosil Dalam Menyediakan Listrik Negara*, http://www.migasindonesia.com/files/article/Geothermal,Sumber_Energi_Masa_Depan.pdf, Jumat 10 Februari 2012, jam 20.00 WIB.
- Constable, Steven C., Parker, Robert L., and Constable, Catherine G., 1987, *Occam Inversion : A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data*, Geophysics Vol. 52, No. 3 ; page 289-300.
- Darmawan, Budi. 2007. *Bab II Tinjauan Pustaka : Teori Dasar Metode Magnetotellurik*. repository.upi.edu/operator/upload/s_d5151_0608679_chapter2.pdf, 15 Agustus 2011, jam 13.30 WIB.
- Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Metode Magnetotelluric (MT)*, Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.
- Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah : Introduction to Geothermal System and Technology*, Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.
- Daud, Yunus, 2010, *Diktat Kuliah Static Shift dalam Metode Magnetotelluric (MT)*, Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.
- Daud, Yunus, et al., 2010, *The First Magnetotelluric Investigation of the Tawau Geothermal Prospect, Sabah, Malaysia*, Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Goff, Fraser and Janik, Cathy J., 2000, *Encyclopedia of Volcanoes : Geothermal Systems*, Academic Press : A Harcourt Science and Technology Company.

- Grandis, Hendra, 2010, *Metode Magnetotellurik (MT)*, http://hendragrandis.files.wordpress.com/2010/01/mt_teks1.pdf, Selasa 07 Februari 2012, jam 14.35 WIB.
- Green, Alisa Marie, 2003, *Magnetotelluric crustal studies in Kenai, Alaska*, Golden Colorado.
- Gupta, Harsh and Roy, Sukanta, 2007, *Geothermal Energy : An Alternative Resource For The 21st Century*, Elsevier B.V.
- Javino, Fredolin, Suratman, Saim, Pang, Zhonghe and Choudhry, Manzor Ahmed, 2010, *Isotope and Geochemical Investigations on Tawau Hot Springs in Sabah, Malaysia*, Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Newman, Gregory A., Hoversten, Michael, Gasperikova, Erika, and Wannamaker, Philip E., 2005, *3D Magnetotelluric Characterization of the Coso Geothermal Field*, Proceedings Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, California, January 31-February 2 2005 SGP-TR-176.
- Rodi, William and Mackie, Randall L., 2001, *Nonlinear Conjugate Gradient Algorithm for 2D Magnetotelluric Inversion*, Geophysics Vol. 66, No. 1 ; page 174-187.
- Rosid, Syamsu, 2011, *Teori Inversi*, Geofisika Universitas Indonesia.
- Schnegg, Pierre-Andre, 1999, *A Computing Method for 3D Magnetotelluric Modelling Directed by Polynomials*, Earth Planets Space, 51, 1005-1012, 1999.
- Simpson, Fiona and Bahr, Karsten, 2005, *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- Siripunvaraporn, Weerachai, Egbert, Gary, Lenbury, Yongmiwon and Uyeshima, Makoto, 2005, *Three-dimensional Magnetotelluric Inversion: Data Space Method*, Physics of The Earth and Planetary Interiors 150 (2005) 3-14.
- Siripunvaraporn, Weerachai, 2006, *WSINV3DMT version 1.0.0 for Single Processor Machine : User Manual*, Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University Thailand.
- Siripunvaraporn, Weerachai, 2012, *Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion : An Introductory Guide for Developers and Users*, Surv Geophys (2012) 33:5-27.
- Sukhyar, 2011, *Pengembangan Panas Bumi Di Indonesia : Menanti Pembuktian*, <http://www.migas-indonesia.net/index.php>, Jumat 20 Januari 2012, jam 19.40 WIB.

Takashima, Isao, Nazri, Azhar Ahmad, Siong, Lim Peng, Koseki, Takashiro, Mouri, Youji, Nasution, Asnawir and Sucipta, I.G.B. Eddy, 2005, *Precise Thermoluminescence Dating for Heat Source Volcanic Rocks and Alteration Products at Tawau Geothermal Area, Sabah, Malaysia*, Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey.

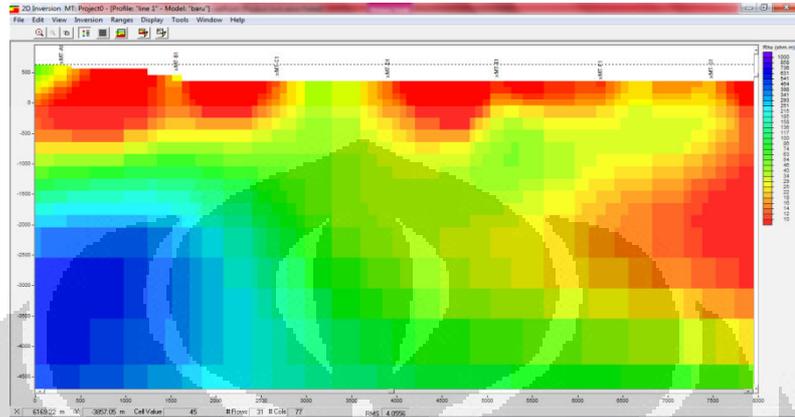
Wannamaker, E. Philip, Hohmann, W. Gerald and Ward, H. Stanley, 1984, *Magnetotelluric Responses of Three Dimensional Bodies in Layered Earths*, Geophysics, Vol. 49. No. 9. P. 1517-1533, 21 FIGS.



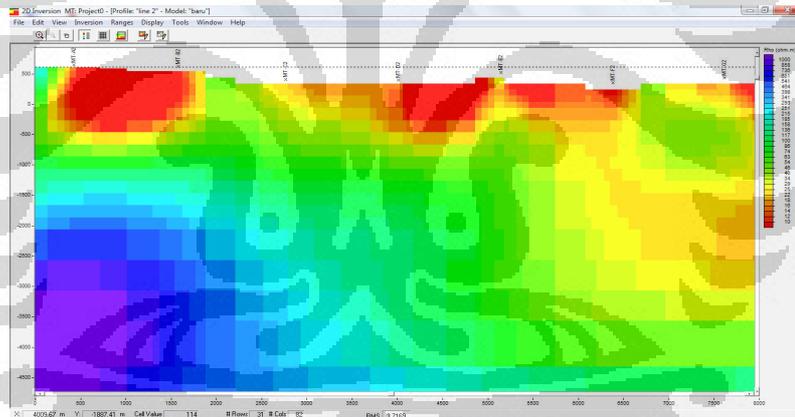
LAMPIRAN 1

Hasil Inversi 2D Tiap Lintasan (WinGlink)

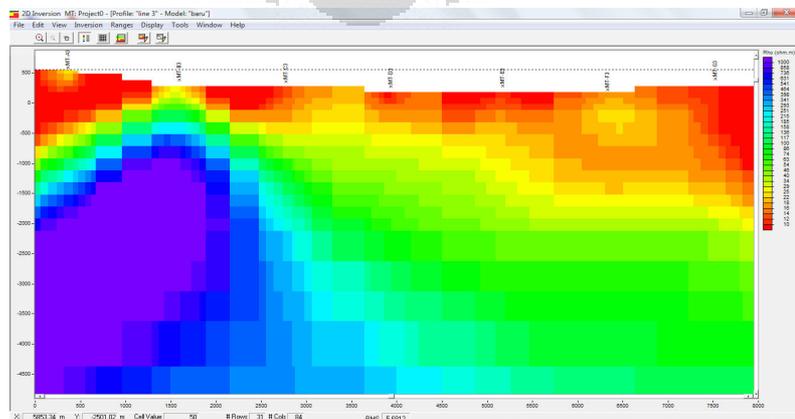
a. Line 1



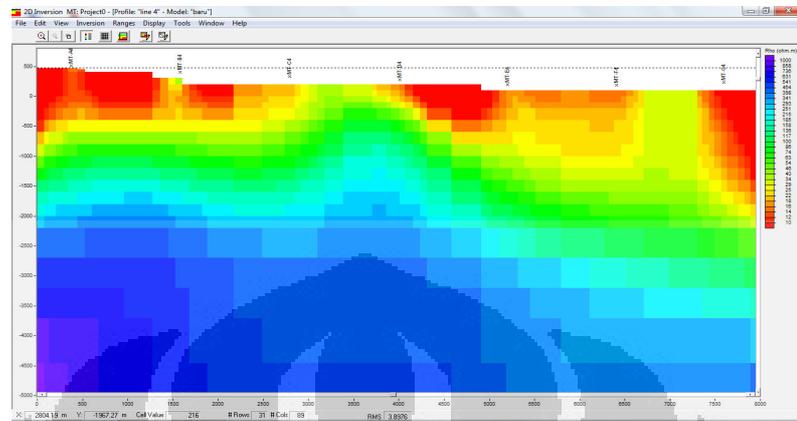
b. Line 2



c. Line 3



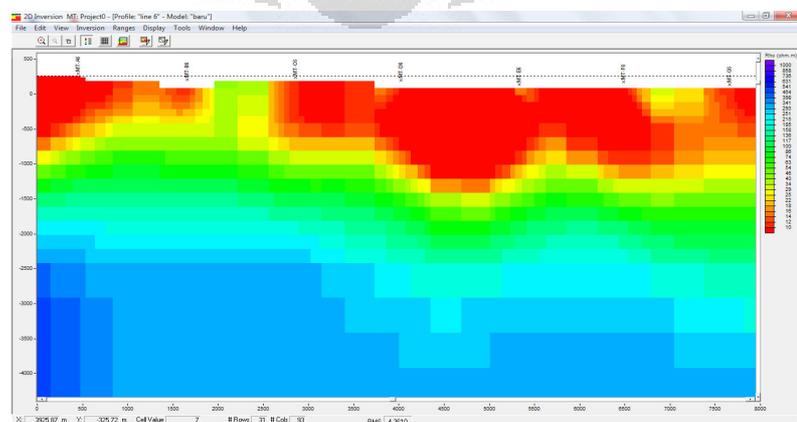
d. Line 4



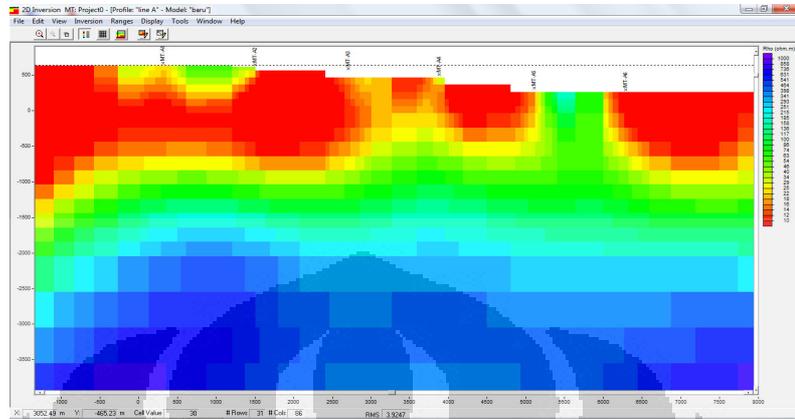
e. Line 5



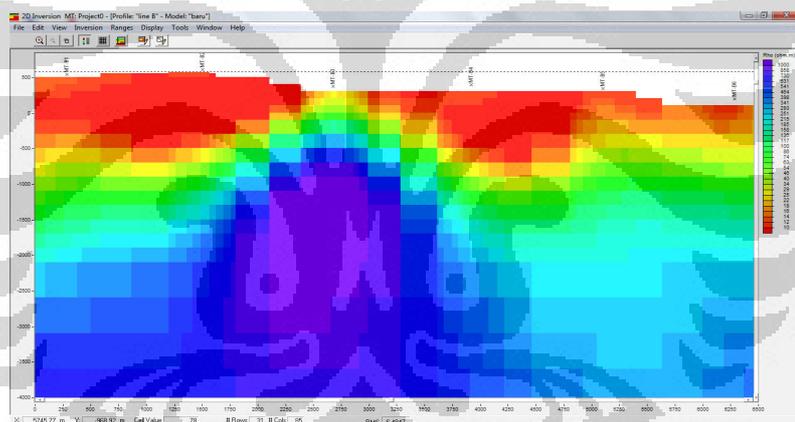
f. Line 6



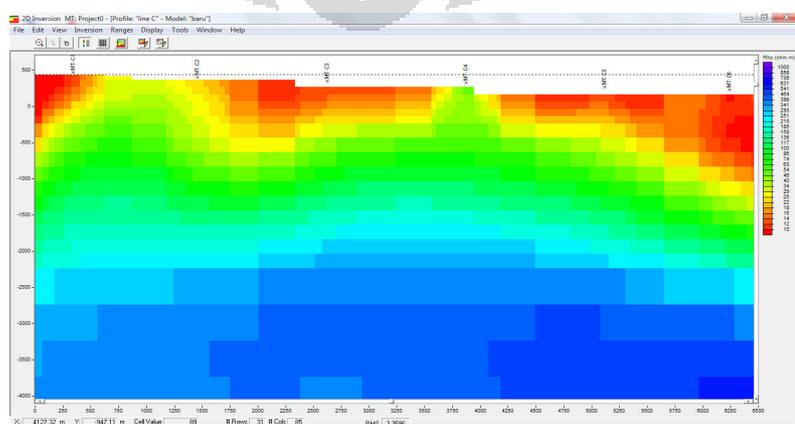
g. Line A



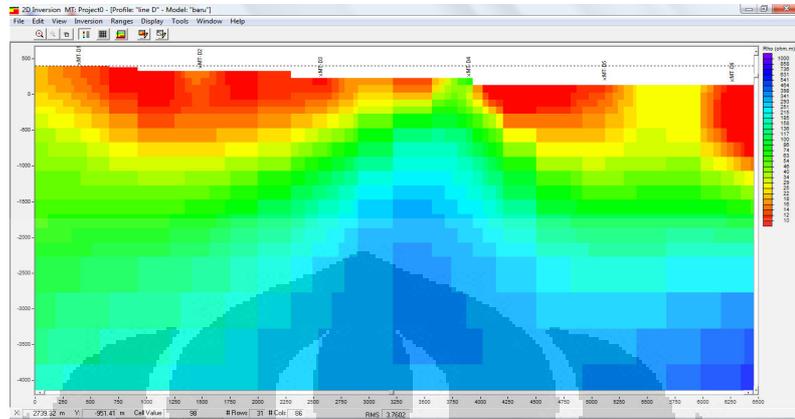
h. Line B



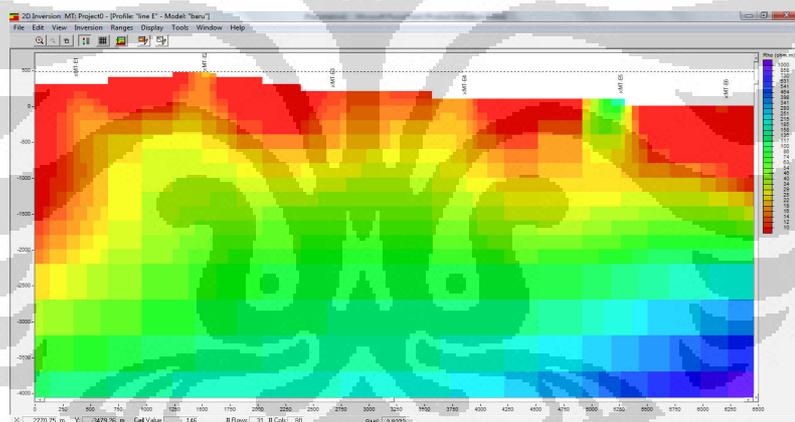
i. Line C



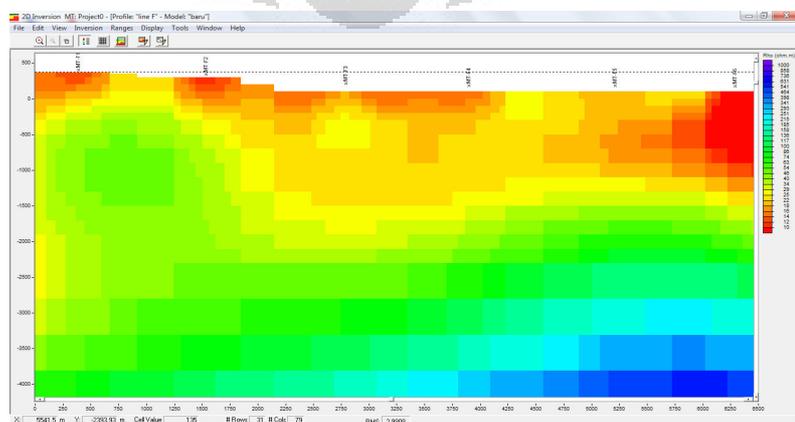
j. Line D



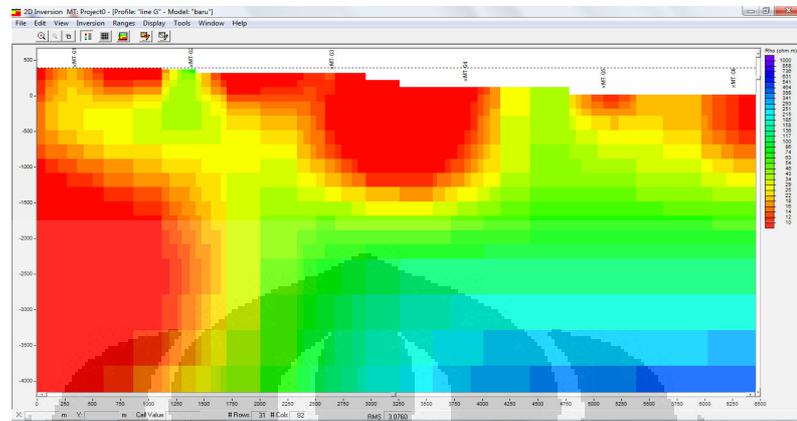
k. Line E



l. Line F

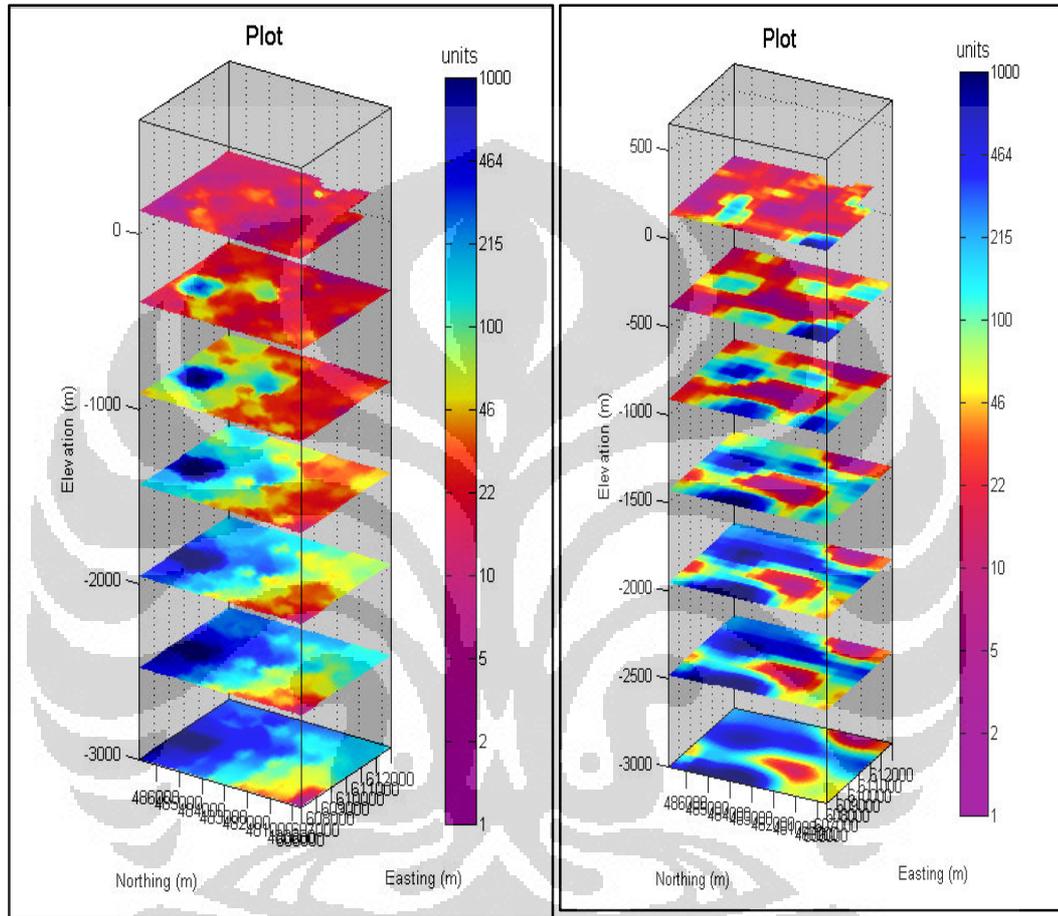


m. Line G



LAMPIRAN 2

Tampilan Slicing Kedalaman untuk Hasil Inversi 2D dan 3D



(a) Inversi 2D

(b) Inveri 3D