



**TUGAS AKHIR – SF141501**

**PEMODELAN DATA MAGNETOTELURIK DENGAN  
*REMOTE REFERENCE* UNTUK EKSPLORASI  
CEKUNGAN MIGAS  
STUDI KASUS: LAPANGAN EM-4**

**Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu  
NRP 1110 100 007**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U  
NIP. 19620802 198701.1.001**

**Jurusan Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015**



**FINAL PROJECT – SF141501**

**MAGNETOTELLURIC DATA MODELING WITH  
REMOTE REFERENCE FOR OIL AND GAS BASIN  
EXPLORATION  
CASE STUDY: EM-4 FIELD**

**Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu  
NRP 1110 100 007**

**Advisor**

**Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U  
NIP. 19620802 198701.1.001**

**Department of Physics  
Faculty of Mathematics and Natural Science  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PEMODELAN DATA MAGNETOTELURIK DENGAN *REMOTE REFERENCE* UNTUK EKSPLORASI CEKUNGAN MIGAS STUDI KASUS: LAPANGAN EM-4

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains

pada

Bidang Studi Fisika Bumi

Program Studi S-1 Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

**MUHAMMAD IQBAL MUSLIM WACHISBU**

**NRP. 1110 100 007**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, S.U. (.....)

SURABAYA, JANUARI 2015

**PEMODELAN DATA MAGNETOTELURIK DENGAN  
REMOTE REFERENCE UNTUK EKSPLORASI  
CEKUNGAN MIGAS  
STUDI KASUS: LAPANGAN EM-4**

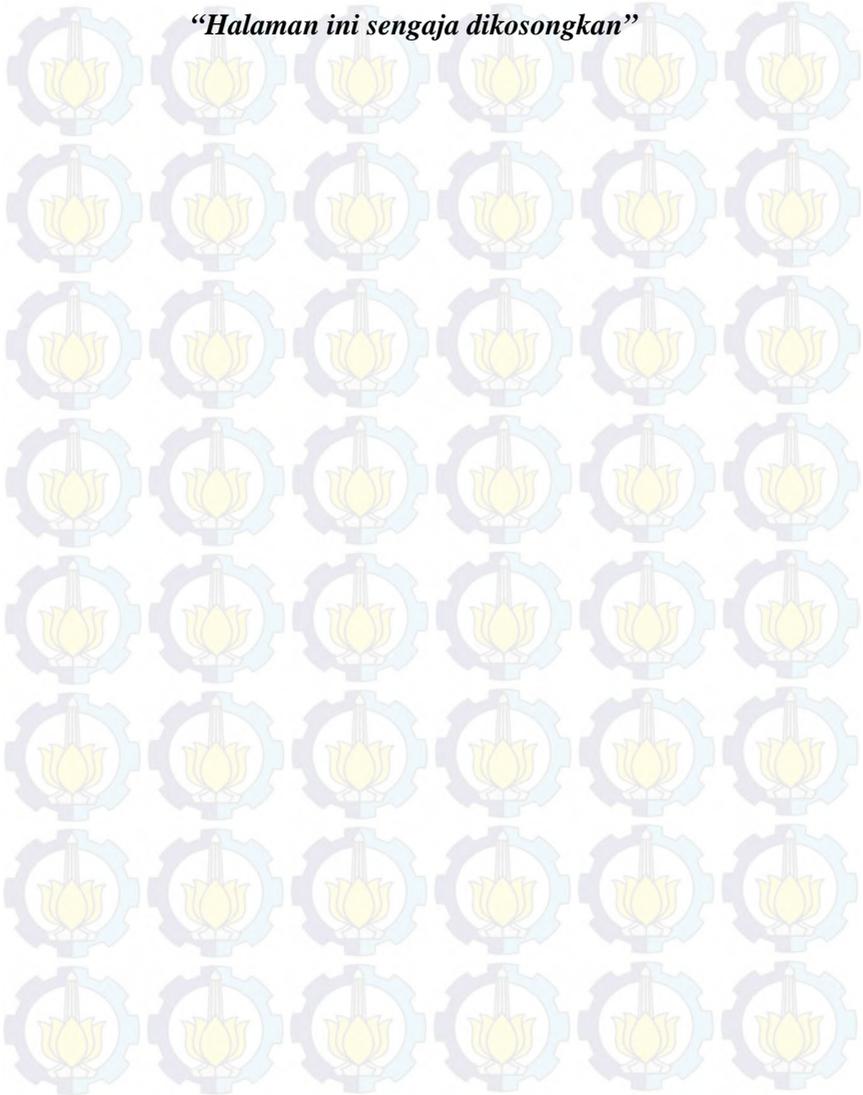
**Nama Mahasiswa** : Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu  
**NRP** : 1110 100 007  
**Jurusan** : Fisika FMIPA  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa,  
S.U.

**ABSTRAK**

*Pemodelan data magnetotelurik digunakan untuk eksplorasi cekungan migas dengan parameter berupa resistivitas semu dan fase. Data magnetotelurik yang digunakan berupa line JBS4 yang terdiri dari 71 titik pengukuran dan line JBS8 yang terdiri dari 66 titik pengukuran. Data magnetotelurik dilengkapi dengan data remote reference yang digunakan untuk meminimalisir noise sehingga didapatkan data yang lebih baik. Tahapan pengolahan data magnetotelurik dimulai dari seleksi time series, transformasi Fourier, robust processing, seleksi cross power, dan inversi 2 dimensi. Pada hasil penelitian ini didapatkan bahwa metode magnetotelurik dapat menampilkan model bawah permukaan dengan baik. Pada hasil interpretasi terpadu dari hasil inversi magnetotelurik dan data pendukung berupa peta anomali gaya berat, didapatkan model bawah permukaan dan didapatkan dua zona interest pada lapangan EM-4 berupa cekungan Bantarkalong dan cekungan Citanduy dengan sedimen yang cukup tebal (4000 meter untuk cekungan Bantarkalong dan 3000 meter untuk cekungan Citanduy) dan memiliki nilai resistivitas dominan sebesar 22-119 Ohm.meter.*

***Kata kunci: Magnetotelurik, Frekuensi, Impedansi, Resistivitas***

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**MAGNETOTELLURIC DATA MODELING WITH  
REMOTE REFERECE FOR OIL AND GAS BASIN  
EXPLORATION  
CASE STUDY: EM-4 FIELD**

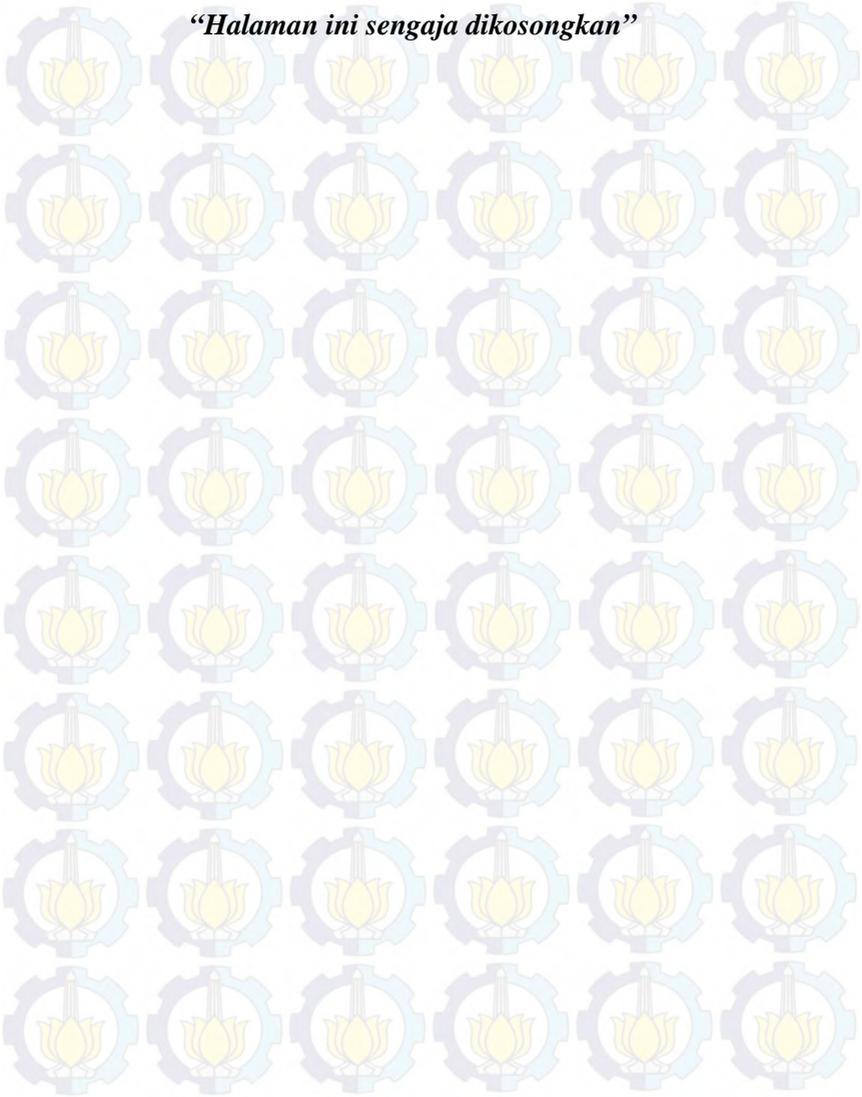
**Name** : Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu  
**Student Identity** : 1110 100 007  
**Department** : Fisika FMIPA  
**Advisor** : Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa,  
S.U.

**Abstract**

*Magnetotelluric data modeling was used for oil and gas exploration. The parameters are apparent resistivity and phase. The magnetotelluric data of this research were line JBS4 with 71 sounding sites and line JBS8 with 66 sounding sites. The magnetotelluric data was completed by remote reference data which used for reducing the noise so that good data could be gotten. The magnetotelluric data was proceed in stage as follow: time series selection, Fourier transform, robust processing, cross power selection, and 2 dimension inversion. The result of this research showed that magnetotelluric method can figured out the sub-surface model well. From the result of interpretation 2D inversion magnetotelluric and other geophysical data (gravity anomaly map), we can conclude that magnetotelluric modeling figured out 2 sub-basins. Those sub basins had thick sediment layer (4000 meter for Bantarkalong Basin and 3000 meter for Citanduy Basin) and the dominant resistivity value was 22-119 Ohm.meter.*

**Key word:** *Magnetotelluric, Frequency, Impedance, Resistivity*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis berhasil menjalani perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

### **“PEMODELAN DATA MAGNETOTELURIK DENGAN REMOTE REFERENCE UNTUK EKSPLORASI CEKUNGAN MIGAS STUDI KASUS: LAPANGAN EM-4”**

Selama pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Maka dengan segenap kerendahan dan ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah dan ibu dan adik-adikku yang telah banyak berkorban dalam memberikan dukungan moral, memberikan doa dan motivasi sehingga penulis tetap semangat menyelesaikan kuliah di ITS.
2. Prof. Dr. rer.nat. Bagus Jaya Santosa, SU sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, nasihat, saran dan bimbingan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Dr. Mashuri dan Dr. rer.nat. Eko Minarto selaku dosen penguji penulis ketika Sidang Tugas Akhir.
4. Dr. rer.nat. Triwikantoro, M.Sc. sebagai dosen wali yang telah memberikan “wejangan” kepada penulis selama masa kuliah.
5. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng. selaku Ketua Jurusan dan seluruh Staf Pengajar dan Staf Tata Usaha di Jurusan Fisika ITS.
6. Agung Indriarto Purnomo, S.T. selaku pembimbing penulis ketika melaksanakan Kerja Praktek di Kangean Energy Indonesia tentang *Seismic Data Processing*.

7. Dr. Djedi S. Widarto selaku pembimbing penulis ketika melaksanakan Tugas Akhir di Pertamina UTC.
8. Mas Chevy, Mbak Sabrina, Mas Hanif dan teman-teman seperjuangan TA di Pertamina UTC, Nahry (Unhas), Ahmad (Unhas), Arie (Unhas), dan Taufiq (Unila), terima kasih atas diskusi dan kebersamaannya.
9. Teman-teman Fisika 2010 dan pejuang Himasika ITS, terima kasih atas kenangan yang telah dibuat bersama.
10. Teman-teman di KM ITS, terima kasih untuk cerita dan proses pendewasaannya.
11. Mas Ari Teguh Sugiarto, terima kasih telah bersedia “menampung” penulis selama di Jakarta
12. Martha Adi Afrianto, teman seperjuangan penulis selama kuliah di ITS. Terima kasih sudah mendukung penulis selama ini
13. Ruang G-201 dan *Blackhole*, terima kasih buat cerita dan petualangannya
14. Dan pihak lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis sampaikan terima kasih, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembacanya. Untuk perbaikan di masa mendatang penulis juga mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak untuk kesempurnaan laporan ini. Semoga dapat berguna bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Januari 2015

**Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu**  
iqbalmuslim16@gmail.com

## DAFTAR ISI

<b>Halaman Judul</b> .....	<b>i</b>
<b>Lembar Pengesahan</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstrak</b> .....	<b>vii</b>
<b>Kata Pengantar</b> .....	<b>xi</b>
<b>Daftar Isi</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Daftar Gambar</b> .....	<b>xv</b>
<b>Daftar Lampiran</b> .....	<b>xvii</b>

### **BAB I PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Metode Magnetotelurik (MT) .....	5
2.2 Persamaan Maxwell pada Metode Magnetotelurik ..	9
2.3 Tensor Impedansi .....	10
2.4 Akuisisi Magnetotelurik (MT) .....	13
2.5 <i>Remote Reference</i> .....	16
2.6 Pengolahan Data MT .....	17
2.6.1 <i>Fourier Transform</i> .....	17
2.6.2 <i>Robust Processing</i> .....	18
2.6.3 Inversi 2 Dimensi .....	19

### **BAB III METODOLOGI**

3.1 Lokasi Penelitian .....	21
3.2 Data .....	21
3.3 Perangkat Lunak .....	21
3.4 Pengolahan Data .....	21
3.4.1 Seleksi Data <i>Time Series</i> .....	22
3.4.2 Transformasi <i>Fourier</i> .....	24

3.4.3 <i>Robust Processing</i> . . . . .	25
3.4.4 Seleksi <i>Cross Power</i> . . . . .	26
3.4.5 Inversi 2D . . . . .	27
3.5 Analisis dan Pembahasan . . . . .	30
3.6 Kesimpulan . . . . .	31
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 <i>Time Series</i> . . . . .	33
4.2 Kurva <i>Sounding</i> . . . . .	35
4.2.1 Efek <i>Remote Reference</i> . . . . .	35
4.2.2 Efek Rotasi . . . . .	37
4.2.3 Efek Seleksi <i>Cross Power</i> . . . . .	39
4.3 Hasil Pemodelan 2D . . . . .	42
4.3.1 Pemodelan <i>TE Mode</i> dan <i>TM Mode</i> . . . . .	42
4.3.2 Pemodelan Gabungan . . . . .	47
4.4 Data Pendukung . . . . .	52
4.5 Interpretasi Terpadu . . . . .	53
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan . . . . .	57
5.2 Saran . . . . .	57
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>LAMPIRAN</b> . . . . .	<b>63</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS</b> . . . . .	<b>89</b>

## Daftar Gambar

Gambar 2.1: Ilustrasi Perambatan Gelombang Elektromagnetik . . . . .	6
Gambar 2.2: Prinsip Dasar MT . . . . .	6
Gambar 2.3: Sumber Gelombang MT. . . . .	8
Gambar 2.4: Ilustrasi Mode Pengukuran MT, TE dan TM . . . . .	14
Gambar 2.5: Konfigurasi Alat ketika Akuisisi MT . . . . .	14
Gambar 2.6: Perbedaan hasil <i>robust processing</i> dan <i>least square Processing</i> . . . . .	18
Gambar 3.1: Alur Pengoalahan sampai Tahap Inversi dari Data Magnetotelurik . . . . .	22
Gambar 3.2: Tampilan Awal Perangkat Lunak SSMT 2000 . . . . .	23
Gambar 3.3: Tampilan <i>Time Series Ranges</i> . . . . .	23
Gambar 3.4: Tampilan <i>Edit Parameter</i> untuk Transformasi <i>Fourier</i> . . . . .	24
Gambar 3.5: Tampilan <i>Setup</i> dari <i>Robust Processing</i> . . . . .	25
Gambar 3.6: Tampilan Perangkat Lunak MT Editor dengan Tampilan Data Titik JBS8-53self . . . . .	26
Gambar 3.7: Tampilan <i>Setting Rotasi</i> . . . . .	27
Gambar 3.8: Perangkat Lunak WinGLink . . . . .	28
Gambar 3.9: Tampilan Depan WinGLink . . . . .	28
Gambar 3.10: Posisi <i>Line</i> JBS4 ( <i>line</i> 4) dan JBS 8 ( <i>line</i> 8) . . . . .	29
Gambar 3.11: Tampilan Kurva <i>Sounding</i> pada WinGLink . . . . .	29
Gambar 3.12: Tampilan Proses Inversi yang Sedang Berlangsung . . . . .	30
Gambar 4.1: Tampilan Awal Perangkat Lunak Syncro Time Series View . . . . .	33
Gambar 4.2: Tampilan <i>Time Series</i> . . . . .	34
Gambar 4.3: Perbandingan Kurva MT (a) tanpa <i>Remote Reference</i> , (b) dengan <i>Remote Reference</i> . . . . .	36
Gambar 4.4: Tampilan Kurva (a) sebelum Rotasi (b) sesudah Rotasi . . . . .	38
Gambar 4.5: Proses Seleksi <i>Cross Power</i> yang Sedang Berlangsung . . . . .	39

Gambar 4.6: Pembobotan Hasil <i>Robust Processing</i> pada Frekuensi Tinggi . . . . .	40
Gambar 4.7: Pembobotan Hasil <i>Robust Processing</i> pada Frekuensi Rendah . . . . .	40
Gambar 4.8: Perbandingan Kurva MT (a) sebelum Seleksi (b) sesudah Seleksi . . . . .	41
Gambar 4.9: Permodelan TE Mode dari <i>Line JBS4</i> . . . . .	43
Gambar 4.10: Permodelan TE Mode dari <i>Line JBS8</i> . . . . .	44
Gambar 4.11: Permodelan TM Mode dari <i>Line JBS4</i> . . . . .	45
Gambar 4.12: Permodelan TM Mode dari <i>Line JBS8</i> . . . . .	46
Gambar 4.13: Kurva Hasil Inversi pada Satu Titik Pengukuran . . . . .	47
Gambar 4.14: Hasil Pemodelan <i>Line JBS4</i> . . . . .	48
Gambar 4.15: Hasil Pemodelan <i>Line JBS8</i> . . . . .	49
Gambar 4.16: Hasil Pemodelan <i>Line JBS4 (Section View)</i> . . . . .	50
Gambar 4.17: Hasil Pemodelan <i>Line JBS8 (Section View)</i> . . . . .	51
Gambar 4.18: Peta Anomali Gaya Berat Residual pada Lapangan EM-4 . . . . .	53
Gambar 4.19: Hasil Interpretasi <i>Line JBS4</i> . . . . .	54
Gambar 4.20: Hasil Interpretasi <i>Line JBS8</i> . . . . .	55

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Ketersediaan energi di Negara Indonesia sudah semakin berkurang. Walaupun sudah mulai dikembangkan energi baru terbarukan, energi minyak dan gas (migas) masih menjadi pilihan utama. Menurut artikel dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang dipublikasikan pada tahun 2011, sumber daya minyak dan gas yang diperkirakan mencapai 87.22 miliar barel dan 594.43 TSCF tersebar di Indonesia, menjadikan Indonesia tujuan investasi yang menarik pada sektor minyak dan gas bumi.

Potensi sumber daya migas nasional saat ini masih cukup besar. Terakumulasi dalam 60 cekungan sedimen (*basin*) yang tersebar di hampir seluruh wilayah Indonesia. Dari 60 cekungan tersebut, 38 cekungan sudah dilakukan kegiatan eksplorasi dan sisanya sama sekali belum dilakukan eksplorasi. Dari cekungan yang telah dieksplorasi, 16 cekungan sudah memproduksi hidrokarbon, 9 cekungan belum diproduksi walaupun telah ditemukan kandungan hidrokarbon, sedangkan 15 cekungan sisanya belum ditemukan kandungan hidrokarbon. Kondisi di atas menunjukkan bahwa peluang kegiatan eksplorasi di Indonesia masih terbuka lebar, terutama dari 22 cekungan yang belum pernah dilakukan kegiatan eksplorasi dan sebagian besar berlokasi di laut dalam (*deep sea*) terutama di Indonesia bagian Timur.

Eksplorasi secara masif perlu dilakukan demi mencari cadangan energi migas baru di Indonesia. Eksplorasi memegang peranan penting dalam produksi migas. Dalam dunia eksplorasi migas terdapat beberapa metode geofisika yang digunakan untuk mengetahui lapisan bawah permukaan. Dalam melakukan eksplorasi cekungan migas, salah satu metode yang bisa digunakan adalah metode magnetotelurik (MT).

Menurut Simpson & Bahr (2005), metode MT merupakan metode elektromagnetik pasif yang melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak

lurus di permukaan bumi yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi dari kedalaman beberapa meter hingga ratusan kilometer. Penggunaan metode magnetotelurik ini secara umum adalah untuk penelitian panas bumi, minyak dan gas bumi, geohidrologi, geologi regional, batas-batas cekungan dan penelitian-penelitian dalam lainnya yang berkaitan dengan eksplorasi bawah permukaan bumi. Eksplorasi dengan metode MT ini terdiri dari beberapa tahap yaitu tahap akuisisi data, pengolahan data, dan pemodelan (inversi).

### 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana model bawah permukaan yang dihasilkan dari inversi 2 dimensi data MT?
2. Bagaimana *zona interest* yang dihasilkan dari interpretasi data magnetotelurik dan data pendukung yang ada?
3. Bagaimana nilai resistivitas dominan pada lapisan sedimen di cekungan yang ada pada lapangan EM-4?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses eksplorasi dengan magnetotelurik dibatasi dari pemrosesan data sampai interpretasi
2. Data magnetotelurik yang digunakan adalah untuk eksplorasi cekungan migas
3. Data magnetotelurik yang digunakan diproses sampai tahap inversi 2 dimensi (2D)
4. Digunakan data pendukung untuk melakukan interpretasi berupa peta anomali gaya berat residual pada lapangan EM-4

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui model bawah permukaan yang dihasilkan dari inversi 2 dimensi data MT
2. Untuk mengetahui *zona interest* yang dihasilkan dari interpretasi data magnetotelurik dan data pendukung yang ada.
3. Untuk mengetahui nilai resistivitas dominan pada lapisan sedimen di cekungan yang ada pada lapangan EM-4

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah:

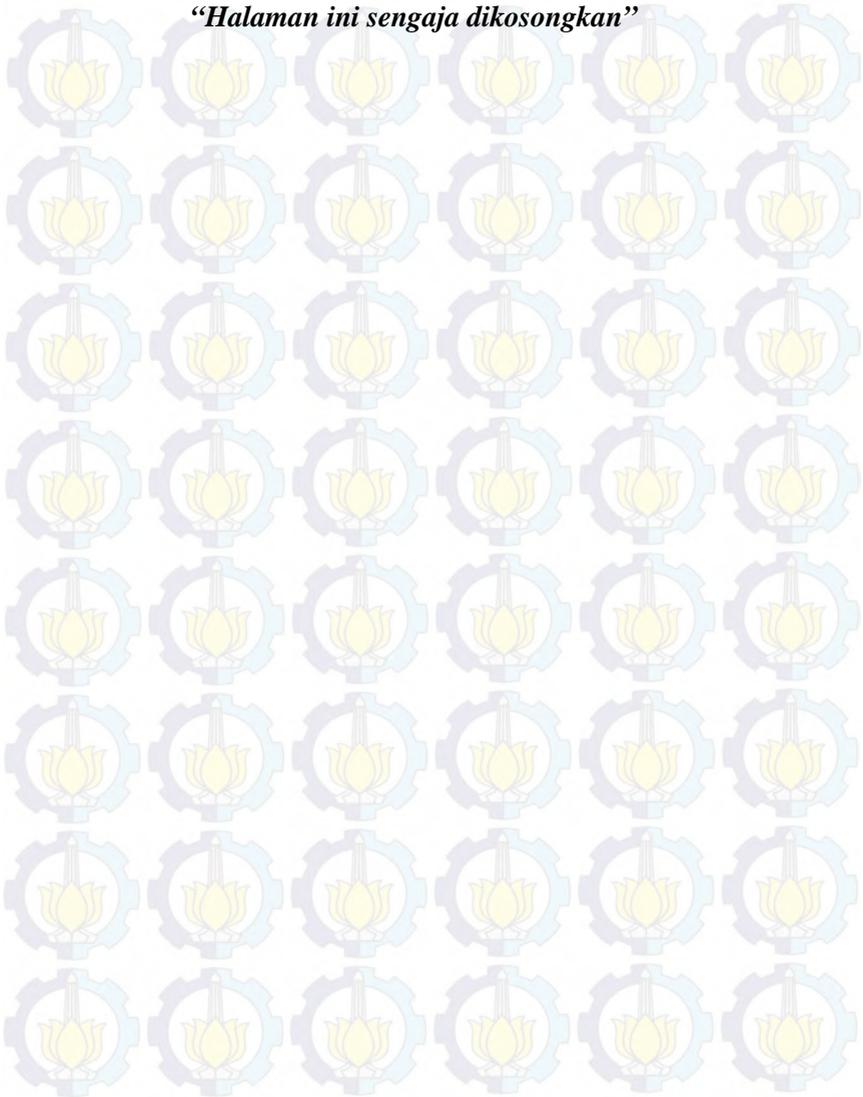
1. Untuk mengetahui proses pengolahan data magnetotelurik yang baik dan benar untuk kepentingan eksplorasi migas
2. Untuk mengetahui struktur cekungan yang digunakan sebagai lapangan penelitian

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Secara garis besar sistematika penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut

1. BAB I Pendahuluan, menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
2. BAB II Tinjauan Pustaka meliputi teori dasar sebagai landasan penulis dalam melakukan Tugas Akhir
3. BAB III Metodologi Penelitian, merupakan prosedur kerja yang dilakukan pada penelitian ini.
4. BAB IV Hasil dan Pembahasan, meliputi hasil pengolahan data MT dan pembahasan terkait hasil interpretasinya
5. BAB V Penutup, merupakan bagian penutup dari Tugas Akhir ini yang berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Metode Magnetotelurik (MT)

Metode magnetotelurik (MT) merupakan metode elektromagnetik (EM) pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) alami pada arah yang orthogonal dengan arah permukaan bumi dengan tujuan untuk menentukan konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman puluhan meter hingga ribuan meter (Simpson dan Bahr, 2005). Cakupan rentang frekuensi dari medan elektromagnetik yang bisa direkam oleh metode ini adalah 300-0.001 Hz (Daud, 2010).

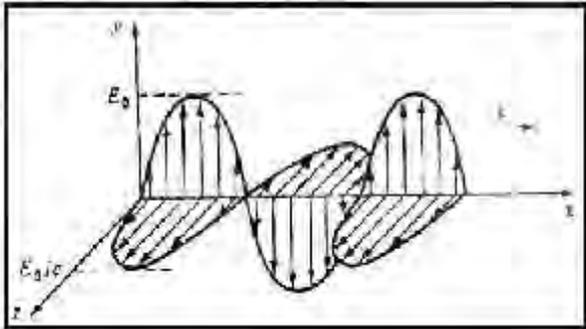
Induksi medan magnet di bawah permukaan bumi dihubungkan dengan medan EM dan resistivitas batuan. Pada umumnya, kebanyakan batuan adalah konduktor yang buruk. Resistivitas batuan tersebut akan besar secara ekstrim jika batuan tersebut bersifat kompak. Hukum Archie, menjelaskan secara empiris untuk mendapatkan nilai resistivitas formasi batuan ( ),

$$\rho = a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_w \dots\dots\dots (2.1)$$

Pada persamaan tersebut,  $a$  adalah koefisien yang bergantung pada litologi,  $m$  dan  $n$  adalah faktor sementasi,  $\rho_w$  adalah resistivitas fluida di formasi,  $\phi$  adalah porositas,  $S_w$  adalah saturasi fluida (Bedrosian, 2001). Dapat dilihat pada persamaan (2.1) menunjukkan bahwa nilai resistivitas berbanding terbalik dengan porositas.

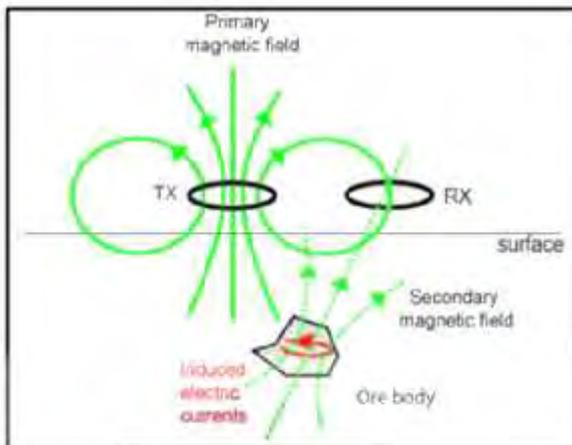
Medan EM merupakan sumber yang digunakan pada metode MT ini. Seorang ilmuwan bernama Maxwell (1873) mengajukan sebuah hipotesis mengenai perambatan gelombang elektromagnetik. Hipotesis tersebut yaitu, *“Jika perubahan fluks magnet dapat menimbulkan medan listrik maka perubahan fluks listrik juga harus dapat menimbulkan medan magnetik.”* Hipotesis ini dikenal sebagai sifat simetri medan listrik dengan medan magnet. Dari hipotesis ini diketahui bahwa perubahan medan listrik akan menghasilkan perubahan medan magnet, begitu juga

sebaliknya dan keadaan ini akan terus berulang. Medan listrik atau medan magnet yang muncul akibat dari perubahan medan listrik atau medan magnet sebelumnya akan bergerak atau merambat menjauhi tempat awal kejadian. Perambatan medan magnetik dan medan listrik inilah yang disebut sebagai gelombang elektromagnetik.



Gambar 2.1: Ilustrasi Perambatan Gelombang Elektromagnetik (Griffiths, 1999)

Secara singkat proses terjadinya medan listrik dan medan magnetik di permukaan Bumi dapat dijelaskan dengan gambar 2.2 berikut ini:



Gambar 2.2: Prinsip Dasar MT (Unsworth, 2006)

Dari gambar di atas dapat dijelaskan pada saat arus dialirkan dari Transmitter TX akan timbul medan magnetik primer maka terjadilah medan elektromagnetik (EM) primer di permukaan bumi. Arus di sini dapat dibuat sendiri atau secara alami. Untuk sumber arus yang alami, digunakan pada metode magnetotelurik. Apabila arus dimatikan kemudian dinyalakan kembali secara berulang, medan magnetik tersebut akan mengalami perubahan. Perubahan medan magnetik ini dikenal sebagai fluks magnet. Jika terdapat benda konduktor atau *ore body* di bawah permukaan bumi, medan magnetik primer ini akan menghasilkan arus listrik akibat adanya induksi arus listrik. Arus listrik yang dihasilkan dinamakan arus eddy (*Eddy current*). Arus eddy ini akan menimbulkan medan magnetik sekunder maka terjadilah medan elektromagnetik sekunder. Medan listrik (E) dan medan magnetik (B) primer maupun sekunder inilah yang diukur di *Receiver RX* (Unsworth, 2006).

Bumi memiliki medan magnet yang konstan, namun yang dibutuhkan dalam metode MT bukanlah medan magnet yang konstan, melainkan medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu sehingga dapat menimbulkan adanya medan listrik. Variasi medan elektromagnetik dapat berasal dari petir ataupun interaksi dari *solar wind* dengan lapisan *magnetosphere* bumi (Newman dkk, 2005). Medan elektromagnetik dengan frekuensi lebih dari 1 Hz berasal dari aktivitas meteorology seperti cahaya petir. Signal petir oleh cahaya dikenal sebagai *sferics* dan mencakup rentang frekuensi elektromagnetik. *Sferic* menjalar dalam *waveguide* sebagai gelombang listrik transversal (TE), magnetik transversal (TM), atau gelombang listrik dan magnetik transversal (TEM). Sedangkan interaksi antara *solar wind* dengan lapisan *Magnetosphere* dan *Ionosphere* bumi menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi kurang dari 1 Hz. *Solar wind* adalah suatu aliran yang kontinu dari plasma, memancarkan sebagian besar proton dan elektron matahari. Pada saat *solar wind* mengenai medan magnetik pada *magnetopause*, proton dan elektron akan berdefleksi ke arah yang berlawanan sehingga menimbulkan medan listrik (Simpson & Bahr, 2005).



Gambar 2.3: Sumber Gelombang MT (Daud, 2010)

Respon medan elektromagnetik pada batuan di bawah permukaan pada kedalaman yang dalam dapat diperoleh dengan menaikkan periode *sounding* elektromagnetik. Prinsip ini sesuai dengan persamaan *electromagnetic skin depth* yang menggambarkan kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik ketika berdifusi ke dalam suatu medium:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \text{ (m)} \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana  $\delta$  adalah *electromagnetic skin depth*,  $f$  adalah frekuensi (keterbalikan dari periode), dan  $\rho_a$  adalah *apparent resistivity*. Persamaan di atas menunjukkan bahwa *skin depth* tidak hanya bergantung pada nilai resistivitas batuan di bawah permukaan, melainkan juga bergantung pada periode atau frekuensi alat yang digunakan. Semakin tinggi frekuensi alat yang digunakan maka akan semakin dangkal penetrasinya. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi alat yang digunakan, maka semakin dalam pula penetrasi yang didapatkan.

Medan elektromagnetik yang menginduksi Bumi secara alami dan digunakan untuk penelitian MT memiliki rentang periode dari  $10^{-3}$  sampai dengan  $10^5$  detik. Jika diasumsikan resistivitas rata-rata batuan di kerak dan mantel bumi adalah 100 m, maka dengan persamaan di atas didapatkan penetrasi gelombang elektromagnetik mampu mencapai ~160 m hingga >500 km. Inilah keuntungan menggunakan metode MT dibanding metode elektromagnetik yang lainnya (Simpson & Bahr, 2005).

## 2.2 Persamaan Maxwell pada Metode Magnetotelurik

Menurut Cagniard (1953), terdapat beberapa asumsi penyederhanaan dalam menurunkan persamaan yang mendeskripsikan perambatan gelombang EM yang digunakan dalam metode MT:

1. Persamaan Maxwell berlaku.
2. Bumi tidak membangkitkan gelombang EM. Bumi hanya mendisipasikan dan menyerap gelombang EM.
3. Medan dianggap konservatif (hukum kekekalan 20ertic berlaku) dan jauh dari sumber.
4. Medan yang dibangkitkan dianggap seragam (*uniform*), terpolarisasi bidang, dan merambat dalam arah vertikal.
5. Hukum ohm berlaku.
6. Medan listrik dianggap *quasi-static*. Arus pergeseran diabaikan, hanya memperhitungkan arus konduksi.
7. Permittivitas dan permeabilitas batuan dianggap konstan.

Beberapa hukum-hukum seperti Hukum Faraday, Hukum Ampere, dan konsep tentang *displacement current*, telah disusun oleh Maxwell secara sistematis dan menjadi apa yang dikenal dengan Persamaan Maxwell, persamaan – persamaan Maxwell tersebut adalah:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Hukum Faraday} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Hukum Ampere} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Hukum Kontinuitas Fluks Magnet} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \eta_f \quad \text{Hukum Coulumb} \quad (2.6)$$

Dimana  $\mathbf{E}$  adalah medan listrik (V/m),  $\mathbf{B}$  adalah induksi magnetik (T),  $\mathbf{H}$  adalah intensitas magnet (A/m),  $\mathbf{D}$  adalah *displacement*

*current* ( $C/m^2$ ),  $\mathbf{j}_f$  adalah densitas arus listrik ( $A/m^2$ ),  $\eta_f$  adalah densitas muatan listrik ( $C/m^3$ ).

Pada Persamaan (2.3), Hukum Faraday disini menjelaskan bahwa perubahan induksi medan magnetik terhadap waktu akan menyebabkan timbulnya perubahan medan listrik. Hukum Ampere pada Persamaan (2.4) menjelaskan bahwa adanya sumber arus listrik dan perubahan medan listrik terhadap waktu akan menyebabkan terbentuknya medan magnetik. Hukum Kontinuitas pada Persamaan (2.5) menyatakan bahwa tidak ada medan magnetik yang bersifat monopole. Pada Persamaan (2.6), Hukum Coulomb disini menjelaskan bahwa adanya muatan listrik akan menimbulkan medan listrik (Telford dkk, 2004).

### 2.3 Tensor Impedansi

Impedansi yang dimaksud pada metode MT ini adalah perbandingan antara medan listrik dan medan magnetik. Pada metode magnetotellurik (MT), salah satu variabel yang dicari yaitu tensor impedansi  $Z(\omega)$ . Secara umum, hubungan linier antara medan listrik, medan magnetik, dan impedansi dapat dirumuskan dengan Persamaan (2.7) dan (2.8) berikut:

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \dots \dots \dots (2.7)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

dimana  $[Z]$  merepresentasikan tensor impedansi.

Pada Persamaan (2.7) dan (2.8),  $H_x(\omega)$ ,  $H_y(\omega)$ ,  $E_x(\omega)$ , dan  $E_y(\omega)$  adalah transformasi *Fourier* dari perubahan medan magnetik ( $H$ ) dan medan listrik ( $E$ ). Apabila diasumsikan Bumi 1-D maka nilai impedansi dapat ditunjukkan pada persamaan (2.8) (Vozoff, 1991):

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega \mu}{k} = (1 + i) \left( \frac{\omega \mu}{2\sigma} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana

$$E_x = \text{medan listrik pada arah } x \left( \frac{V}{m} \right)$$

$$H_y = \text{medan magnet pada arah } y \left( \frac{A}{m} \right)$$

$\omega$  = frekuensi angular

$$\mu = \text{Permeabilitas magnetik} \left( \frac{H}{m} \right)$$

$k$  = bilangan gelombang

Resistivitas semu,  $\rho_a$  untuk lapisan Bumi dapat diperoleh dari Persamaan (2.10) berikut (Cagniard, 1953):

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \dots \dots \dots (2.10)$$

Apabila kita asumsikan Bumi seragam maka nilai resistivitas semu harus sama pada setiap frekuensi dan medan listrik akan berada di atas medan magnetik pada fase 45 derajat untuk semua frekuensi. Kemudian nilai resistivitas semu dan fase tersebut diplot pada grafik resistivitas semu vs frekuensi dan fase vs frekuensi.

Dua modulus independen dari impedansi dianalisis untuk analisis pendekatan bumi 2-D dalam sistem koordinat Kartesian dengan y searah dengan arah *strike* dan x tegak lurus terhadap arah *strike*. Modus *Transverse Electric* (TE) adalah modulus yang medan listriknya searah dengan *strike*, sedangkan modulus *Transverse Magnetic* (TM) adalah modulus yang medan magnetiknya searah dengan *strike*. Bagian diagonal dari impedansi tensor untuk pendekatan Bumi 2-D adalah nol.

$$[Z] = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

dimana

$$Z_{yx} = Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$Z_{xy} = Z_{TM} = \frac{E_x}{H_y} \dots \dots \dots (2.12)$$

Asumsikan data yang diperoleh dengan menggunakan sistem koordinat (x',y') dan sistem koordinat struktural (x,y) dimana y searah dengan *strike*, data MT dirotasi dari (x',y') ke (x,y). Jika

sudut rotasi dari (x',y') ke (x,y) adalah maka kita dapat menerapkan matriks rotasi :

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.13)$$

sehingga

$$E=RE' \text{ dan } H=RH'$$

Sudut rotasi ( ) di atas dapat ditentukan dengan melakukan rotasi tensor impedansi secara meningkat atau dapat dihitung secara analitik berdasarkan persamaan berikut:

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left( \frac{2R_1 R_2 + I_1 I_2}{R_1^2 + I_1^2 - R_2^2 - I_2^2} \right) \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_e(Z_{xx} - Z_{yy}) \\ I_1 &= I_m(Z_{xx} - Z_{yy}) \\ R_2 &= R_e(Z_{xy} - Z_{yx}) \\ I_2 &= I_m(Z_{xy} - Z_{yx}) \end{aligned} \right\} \dots \dots (2.15)$$

Tensor impedansi, Z merupakan bilangan kompleks yang terdiri dari bagian riil dan imajiner. Oleh karena itu, masing – masing komponen, Z<sub>ij</sub> dan Z tidak hanya memiliki besar, tetapi juga memiliki fase (Simpson & Bahr, 2005), sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\beta_{a,th}(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \dots \dots \dots (2.16)$$

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{Im\{Z_{ij}\}}{Re\{Z_{ij}\}} \right) \dots \dots \dots (2.17)$$

## 2.4 Akuisisi Magnetotelurik (MT)

Parameter yang diukur pada saat akuisisi MT adalah medan listrik dan medan magnetik bumi yang bervariasi terhadap waktu. Pada gelombang elektromagnetik, medan listrik dan medan magnet selalu tegak lurus satu sama lain dan gelombang EM mencapai Bumi dalam bentuk gelombang planar/bidang. Rasio dari kuat medan listrik dan kuat medan magnet dapat didefinisikan sebagai impedansi gelombang ( $Z$ ) dari suatu medium. Hal ini menunjukkan untuk penjalaran gelombang planar, rasio tersebut hanya bergantung pada karakteristik listrik di suatu medium dan frekuensi gelombangnya. Secara dimensional, impedansi gelombang diekspresikan pada persamaan (2.8) dalam ohm.

Untuk merekam gelombang elektromagnetik tersebut maka digunakan dua sensor pada saat akuisisi, yaitu sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus. Cara peletakan sensor elektrik dan sensor magnetik menghasilkan 2 jenis modulus pengukuran (Unsworth, 2006):

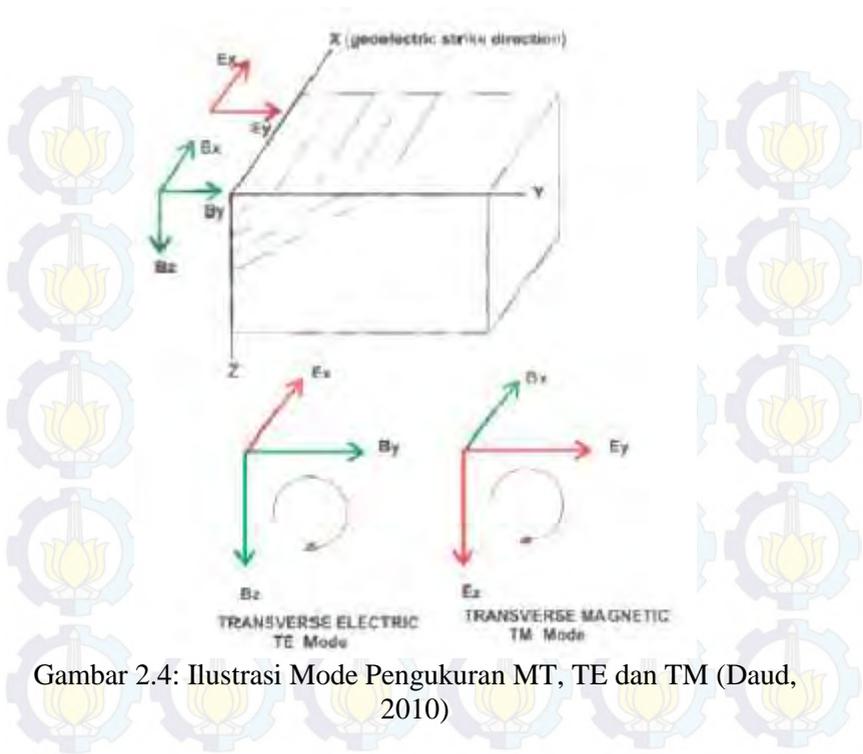
1. *Transverse Magnetic Mode* (TM)

Mode ini mengukur medan magnet yang **searah** dengan struktur geologi dan medan listrik yang **tegak lurus** dengan arah struktur

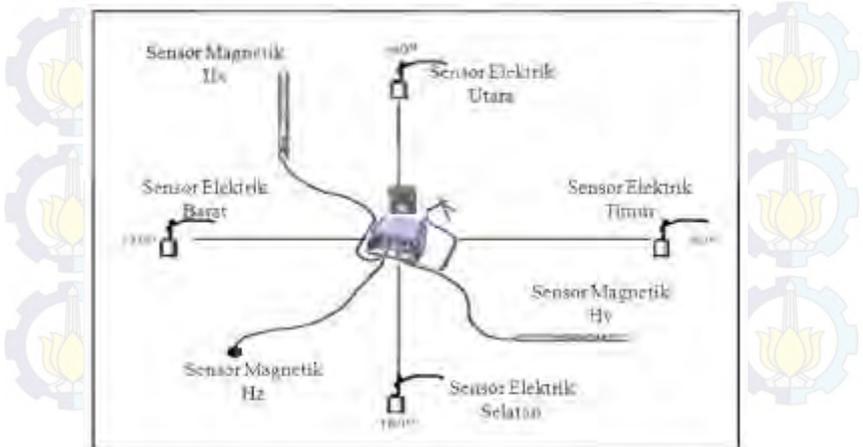
2. *Transverse Electric Mode* (TE)

Mode ini mengukur medan magnet yang **tegak lurus** dengan struktur geologi dan medan listrik yang **searah** dengan arah struktur

Dalam pengukuran MT, peletakan alat-alatnya harus sesuai dengan prosedur standard seperti pada Gambar 2.5. Alat utama di sini adalah MT unit yang terletak di tengah-tengah. Sensor elektrik berjumlah 5 buah. Satu di masing-masing arah utara, timur, selatan, dan barat, dan satu lagi berada di tengah-tengah keempatnya. Sensor magnetik berjumlah 3 buah, satu diletakkan sejajar sumbu x, satu diletakkan sejajar dengan sumbu y, dan satu lagi dikubur dalam arah vertikal. Alat lainnya yang digunakan adalah kabel untuk menghubungkan MT unit dengan sensor elektrik maupun magnetik, dan *power supply* untuk menghidupkan alat MT unit.



Gambar 2.4: Ilustrasi Mode Pengukuran MT, TE dan TM (Daud, 2010)



Gambar 2.5 Konfigurasi Alat ketika Akuisisi MT (Daud, 2010)

Alat utama yang digunakan adalah MT unit. Alat inilah yang akan membaca besarnya nilai medan listrik maupun medan magnet yang terekam di sensor elektrik dan magnetik. MT unit akan bekerja merekam data dalam waktu yang lama. Karena semakin lama waktu perekaman, semakin rendah frekuensi yang diperoleh, semakin dalam pula penetrasinya yang didapatkan. Oleh sebab itu dibutuhkan *power supply* yang mampu menghidupkannya dalam selang waktu yang diinginkan.

Umumnya sensor elektrik yang berada di arah utara, timur, selatan, dan barat berjarak 50 m dari MT unit. Sensor elektrik yang berada di utara dan selatan merupakan sensor Ex. Sedangkan sensor elektrik yang terletak di barat dan timur merupakan sensor Ey. Salah satu jenis sensor elektrik adalah *porous pot*. Pemasangan *porous pot* merupakan hal yang penting karena pemasangan yang baik menghasilkan pengukuran medan listrik yang baik pula. *Porous pot* ditanam minimal kedalaman 50 cm. Isi dari *porous pot* adalah campuran dari air, garam, dan bentonit yang berfungsi untuk menangkap arus listrik dari dalam tanah. Kemiringan pada saat peletakan porous pot tidak boleh lebih besar dari  $30^\circ$

Sensor magnetik yang digunakan adalah *induction coil* dan *fluxgate* magnetometers. *Induction coil* dapat merespon fluktuasi medan magnet dengan periode antara 0,001 s hingga 3600 s. Sedangkan *fluxgate* magnetometers dapat merespon fluktuasi medan magnet pada selang periode 10 s hingga 100.000 s (Simpson & Bahr, 2005). Sensor magnetik ini diletakkan pada jarak sekitar 6-8 m dari MT unit. Sensor magnetik yang digunakan untuk mengukur medan magnet di sumbu x ( $H_x$ ) harus diletakkan sejajar dengan arah utara-selatan dengan arah arus dari selatan ke utara. Sensor magnetik yang digunakan untuk mengukur medan magnet di sumbu y harus diletakkan sejajar dengan arah timur-barat dengan arah arus dari barat ke timur ( $H_y$ ). Sedangkan untuk mengukur medan magnet di sumbu z ( $H_z$ ) maka Sensor magnetik tersebut dikubur dalam arah vertikal. Peletakan sensor magnetik juga sangat penting agar dapat menangkap medan magnet bumi dengan baik. Kedua Sensor magnetik ( $H_x$  dan  $H_y$ ) yang digunakan harus diletakkan pada kuadran yang berbeda. Sensor magnetik juga

dikubur lebih kurang setengah meter agar stabil dan peletakannya harus rata menggunakan water level. Kegunaan dari penanaman sensor magnetik ini adalah agar posisinya tetap, tidak ada getaran yang bisa mengakibatkan fluks magnetik, dan agar temperaturnya tidak berubah secara drastis jika temperatur udara saat pengukuran berubah. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, peletakan sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus menghasilkan 2 jenis mode pengukuran. Yang pertama adalah model TM mode dimana komponen medan magnet searah dengan arah strike dan komponen medan listrik berada pada bidang y-z. Model akuisisi yang kedua adalah TM mode dimana komponen medan listrik searah dengan arah strike dan komponen medan magnet berada pada bidang y-z. Kedua jenis mode ini terukur bersamaan saat akuisisi.

Unsworth (2006) menjelaskan bahwa pengukuran MT dilakukan selama kurang lebih 14 jam. Hal ini dilakukan karena metode ini mengukur gelombang elektromagnet dengan frekuensi sangat rendah, yang berarti periodenya sangat besar. Pengukuran biasanya dilakukan waktu sore hari – pagi hari. Hal ini dilakukan untuk menghindari adanya fluktuasi gelombang elektromagnet yang sangat besar yang disebabkan oleh aktivitas matahari.

### **2.5 Remote Reference**

Data yang diperoleh dari pengukuran MT pada umumnya memiliki *noise* lokal yang dapat mengganggu pemodelan maupun interpretasi. Untuk meningkatkan kualitas sinyal yang diinginkan, kita harus memastikan bahwa kombinasi sinyal antara medan listrik dan medan magnetik yang kita dapat adalah kombinasi yang koheren. Pada saat pengukuran MT dilakukan, kita akan memperoleh nilai medan listrik dan medan magnetik dimana ketika sinyal tersebut terekam maka masih terdapat sinyal *noise* yang tidak kita inginkan. Oleh karena itu, *noise* pada data MT ini harus dihilangkan dengan menggunakan metode *remote reference* (Unsworth, 2006).

Metode *remote reference* adalah proses penambahan sensor pada suatu titik/stasiun tertentu (*remote*) yang dapat

meredam noise pada titik/stasiun pengukuran lokal. Sensor ini biasanya merekam medan magnetik saja karena medan magnetik memiliki nilai regional. Sehingga dapat menjadi acuan untuk nilai medan magnetik lokal.

Pada pengukuran MT *remote reference*, data MT selalu direkam secara bersamaan di dua tempat berbeda dengan pengaturan waktu dilakukan dengan menggunakan GPS. Jika sinyal yang terekam pada kedua stasiun itu sama maka kemungkinan sinyalnya itu merupakan sinyal yang sebenarnya. Pengukuran MT *remote reference* harus dilakukan pada daerah yang jauh dari noise. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas data MT. Untuk menghilangkan pergerakan tanah (*ground motion*), jarak stasiun MT *remote reference* 500 m sudah cukup, sedangkan untuk menghilangkan sinyal dari rangkaian arus listrik DC, 500 km mungkin diperlukan (Unsworth, 2006).

## 2.6 Pengolahan Data MT

Pada proses pengolahan data MT, tahap – tahap yang harus dilakukan diantaranya adalah *Fourier transform* untuk mengubah data *time domain* menjadi *frequency domain*, *robust processing* yang dapat berguna sebagai filter *noise* awal, dan metode NLCC untuk melakukan inversi 2-dimensi.

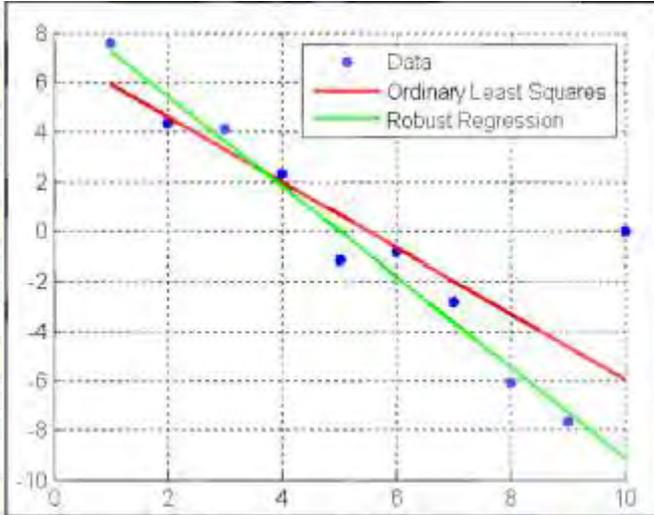
### 2.6.1 Fourier Transform

*Fourier transform* merupakan suatu fungsi yang dapat mengubah sinyal dari *time series* menjadi *frequency domain*. *Fourier transform* hanya dapat digunakan untuk *space* atau *time series* yang merupakan fungsi kontinu (Simpson & Bahr, 2005). Berikut ini adalah fungsi dari *Fourier transform* dengan  $x(\omega)$  adalah fungsi gelombang dalam *frequency domain*,  $x(t)$  adalah fungsi gelombang dalam *time domain*,  $i$  adalah bilangan imajiner,  $\omega = 2\pi f$  adalah frekuensi angular, dan  $t$  adalah waktu.

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{i\omega t} dt. \dots \dots \dots (2.18)$$

### 2.6.2 Robust Processing

*Robust processing* adalah teknik pemrosesan statistik yang menggunakan bobot *iterative* dari residual untuk mengidentifikasi dan menghapus data yang menyimpang oleh *noise non-Gaussian*. *Robust processing* menggunakan beberapa pengukuran dari *departure* suatu kontribusi individual dari rata-rata untuk merendahkan bobot *outliers* pada iterasi selanjutnya (Simpson & Bahr, 2005). *Outlier* adalah data dengan nilai yang menyimpang jauh dari nilai rata-rata, umumnya data tersebut dapat dianggap sebagai *noise* sehingga *robust processing* dapat berperan sebagai filter *noise* awal bagi data MT. *Robust processing* berbeda dengan *least-square* karena dalam proses *least-square*, nilai dari *outlier* tetap diperhitungkan sehingga *outlier* tersebut dapat mempengaruhi semua data. Dari Gambar 2.6 dapat dilihat perbedaan hasil dari *robust processing* dan *least-square processing*.



Gambar 2.6: Perbedaan hasil *robust processing* dan *least square processing* (Daud, 2010)

### 2.6.3 Inversi 2-Dimensi

Inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisis bawah permukaan. Analisis terhadap data lapangan dilakukan dengan cara melakukan pencocokan kurva antara model matematika dengan data lapangan (Suparno, 2007). Pada penelitian ini digunakan metode inversi *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG).

Melly (2007) menjelaskan bahwa permasalahan inversi diselesaikan dengan meminimalisir sebuah fungsi objek  $S$ . Fungsi objek berisi jumlah beban *weighted* dari model fungsi objektif dan data *misfit*:

$$S = \frac{1}{2} d^T d + \tau \Phi_m \dots \dots \dots (2.19)$$

dimana  $d$  adalah data *misfit* dan  $m$  adalah model fungsi objektif.  $\tau$  adalah parameter regulasi yang mengontrol *trade-off*  $d$  dan  $\Phi_m$ .  $\tau$  dipilih agar  $d$  sama dengan nilai konsistensi error data. Nilai  $\tau$  semakin besar mengindikasikan model cocok dengan data.

Inversi 2D untuk mengatur model fungsi objektif dan data *misfit* sama dengan

$$\Phi_m = \|L(m - m_0)\|^2 \dots \dots \dots (2.20)$$

$$d = (d - F(m))^T R_{dd}^{-1} (d - F(m)) \dots \dots \dots (2.21)$$

dimana

- $L$  = operator linear
- $m$  = model vektor *unknown*
- $m_0$  = model awal
- $d$  = vektor data observasi
- $F(m)$  = Operator pemodelan *forward*
- $R_{dd}$  = matrik kovarian error

Operator linear yang dipilih adalah Laplacian  $L = \Delta$ :

$$\|L(m - m_0)\|^2 = \left( \Delta (m_{(x,z)} - m_{0(x,z)}) \right)^2 dx dz \dots (2.22)$$

Solusi masalah inversi dilakukan dengan iteratif, metode NLCG mengaplikasikan secara langsung minimalisasi nilai  $S$ . Rangkaian model diberikan oleh:

$$m^{j+1} = m^j + \alpha^{j+1} h^{j+1}, \dots \dots \dots (2.23)$$

Dimana  $h^{j+1}$  adalah arah pencarian didapatkan dari NLCG dan  $\alpha^{j+1}$  dihitung untuk meminimumkan nilai  $S$  dengan *line search*.

*Misfit* rata-rata antara data prediksi dan data observasi diwakili oleh eror RMS (*root mean square*). Eror RMS untuk program inversi 2D ditentukan dengan

$$RMS = \sqrt{\frac{(d-F(m))^T R_{dd}^{-1} (d-F(m))}{N}} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana  $N$  adalah jumlah titik data (Melly, 2007)

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Lokasi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan selama dua bulan yaitu Nopember – Desember 2014 di Pertamina UTC Jakarta Pusat.

### **3.2 Data**

Data magnetotelurik (MT) yang digunakan pada penelitian ini merupakan data yang dimiliki Pertamina UTC untuk studi cekungan migas yang berada pada lapangan “EM-4”. Data yang diolah terdiri dari 2 *line* yaitu *line* JBS4 dan *line* JBS8. *Line* JBS4 memiliki 71 titik pengukuran sedangkan *Line* JBS8 memiliki 66 titik pengukuran. Data MT dilengkapi dengan data *remote reference* dan data kalibrasi. Untuk data MT dan *remote reference* berupa *file* dengan format .TBL dilengkapi dengan *file* pendukung dengan format .TS3, .TS4, .TS5. Untuk data kalibrasi berupa *file* dengan format .CLB (untuk kalibrasi alat) dan .CLC (untuk kalibrasi sensor).

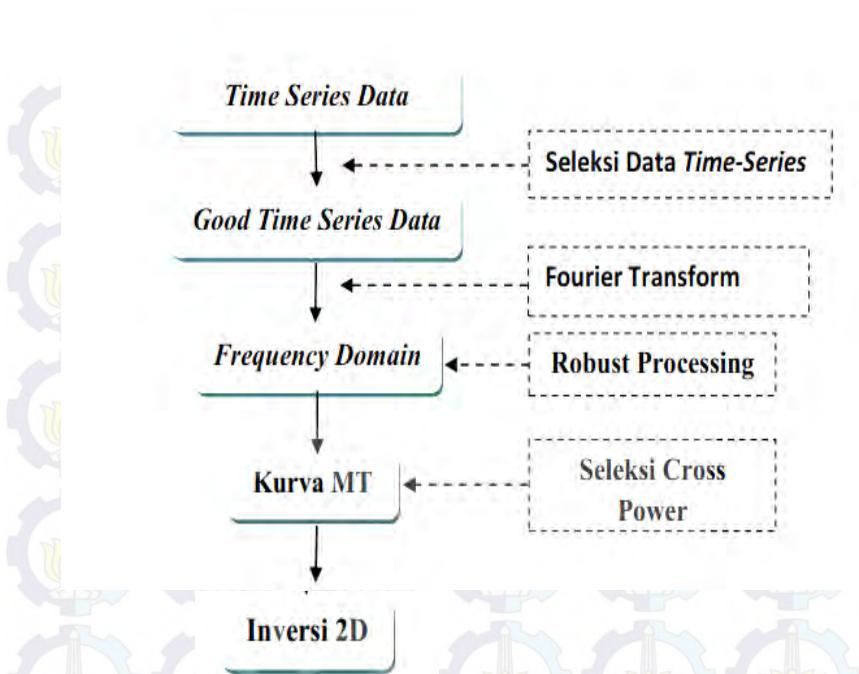
Selain itu, sebagai pelengkap data MT, pada penelitian ini digunakan pula Peta Anomali Gaya Berat (Metode *Gravity*) berupa peta anomali residual.

### **3.3 Perangkat Lunak**

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah Syncro Time Series View yang digunakan untuk menampilkan data mentah MT. SSMT 2000 yang digunakan untuk memproses dari tahap transformasi *Fourier* sampai *robust processing*. Kemudian digunakan perangkat lunak bernama MT Editor yang digunakan untuk menseleksi *cross power* data MT. Selanjutnya perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan inversi adalah WinGlink.

### **3.4 Pengolahan Data**

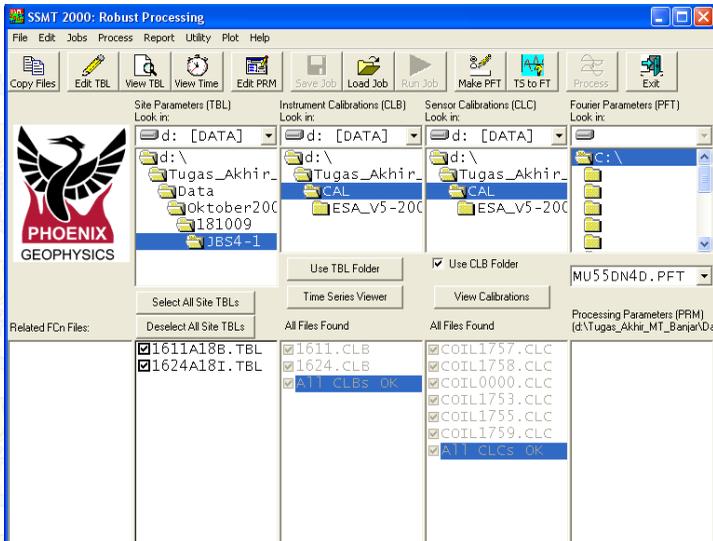
Berikut ini adalah diagram alur yang digunakan dalam pemrosesan data MT pada penelitian ini.



Gambar 3.1: Alur Pengolahan sampai Tahap Inversi dari Data Magnetotelurik

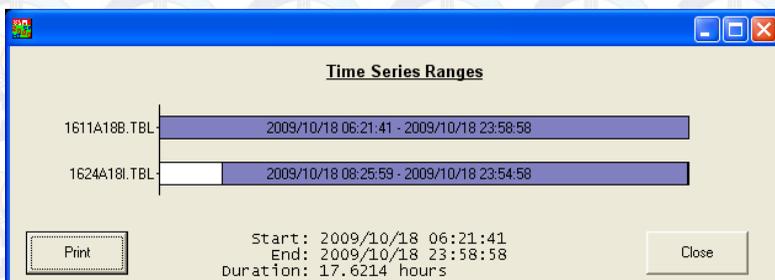
### 3.4.1 Seleksi Data *Time Series*

Pada pemrosesan data MT, terutama yang dilengkapi dengan data *remote reference*, perlu dilakukan seleksi data *time series*. Perangkat lunak yang digunakan adalah SSMT 2000 dengan cara membuka data MT dan *remote reference* serta data kalibrasinya.



Gambar 3.2: Tampilan Awal Perangkat Lunak SSMT 2000

*Time series range* antara data MT dan data *remote reference* ditampilkan untuk kemudian dicari perpotongan waktu pengukuran yang seolah-olah antara data MT dan data *remote reference* dilakukan pada waktu yang bersamaan.



Gambar 3.3: Tampilan *Time Series Ranges*

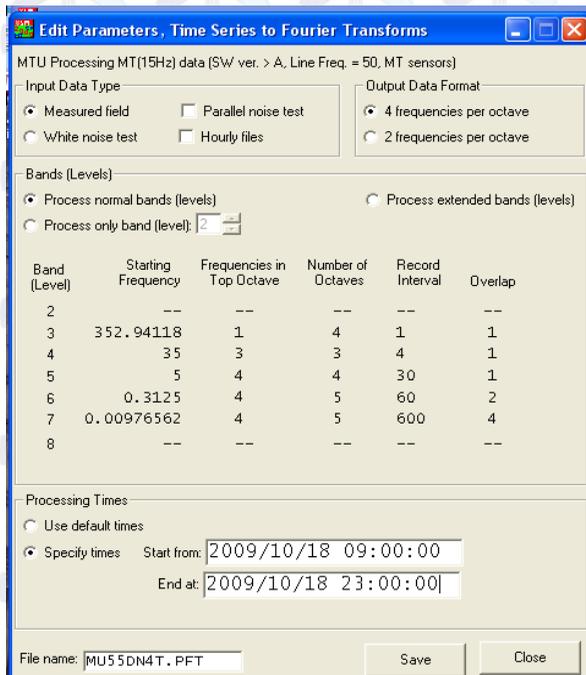
Pada Gambar 3.3 ditampilkan *time series ranges* dari data MT (1624A18I.TBL) dan data *remote reference* (1611A18B.TBL).

Dari contoh data ini dapat diambil waktu perpotongannya adalah 09.00-23.00.

### 3.4.2 Transformasi *Fourier*

Karena parameter yang dianalisis pada pemrosesan data MT adalah frekuensi, maka *range* waktu dari setiap data ditransformasikan ke dalam domain frekuensi dengan metode transformasi *Fourier*. Tahap ini masih dilakukan menggunakan perangkat lunak SSMT 2000.

Setelah diketahui *range* waktu yang akan diproses, kemudian pada tahap ini, ditentukan terlebih dahulu parameter untuk proses transformasi *Fourier* dengan cara memasukkan *Specify Time* dari waktu pengukuran dimulai sampai selesai pengukuran pada titik tersebut.

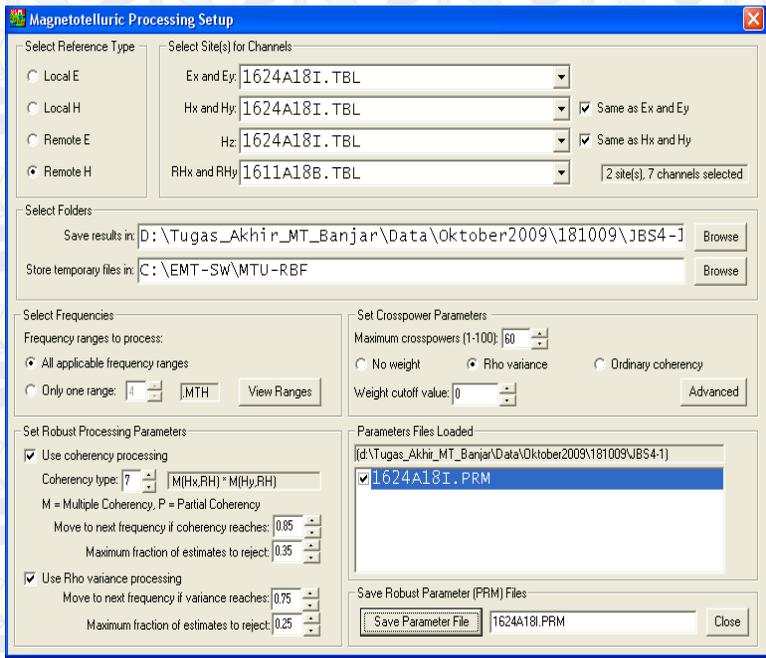


Gambar 3.4: Tampilan *Edit Parameter* untuk Transformasi *Fourier*

Setelah proses selesai, pada *folder* yang berisi data MT dan data *remote reference*, akan muncul *file* hasil transformasi *Fourier* dan *file-file* tersebut berformat *.fc3*, *.fc4*, *.fc5*, *.fc6*, dan *.fc7*, tergantung panjang *range* waktu yang ditentukan.

### 3.4.3 Robust Processing

Setelah proses transformasi *Fourier* dilakukan selanjutnya dilakukan tahap *robust processing*. Proses ini masih dilakukan menggunakan perangkat lunak SSMT 2000. Terlebih dahulu ditentukan parameternya diantaranya adalah penentuan data MT dan data *remote reference* yang digunakan, lokasi penyimpanan hasil, dan penentuan jumlah *cross power* yang akan digunakan pada proses selanjutnya. Untuk penentuan *cross power*, diambil angka antara 20-100 dengan kelipatan 20.

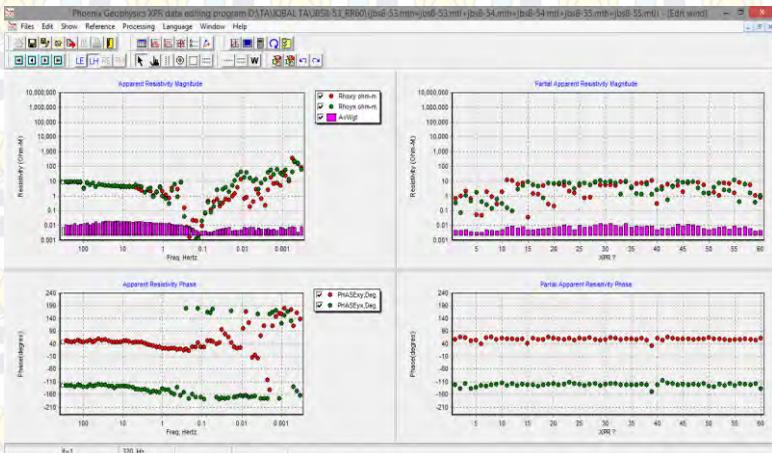


Gambar 3.5: Tampilan *Setup* dari *Robust Processing*

Hasil dari proses ini adalah berupa *file* dengan format .MTH dan .MTL dimana jumlah *file* ini bergantung pada jumlah *cross power* yang diinginkan.

### 3.4.4 Seleksi *Cross Power*

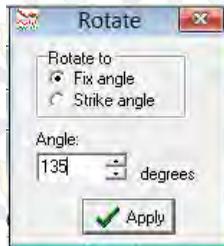
Pada tahap seleksi *cross power*, digunakan perangkat lunak bernama MT Editor dimana perangkat lunak ini akan menampilkan nilai resistivitas semu dan fase pada setiap frekuensi dari satu titik pengukuran. Gambar 3.6 berikut merupakan contoh tampilan perangkat lunak MT Editor yang menampilkan data dari titik 53 pada *line* JBS8.



Gambar 3.6: Tampilan Perangkat Lunak MT Editor dengan Tampilan Data Titik JBS8-53self

Pada kurva sebelah kiri atas dari sudut pandang pembaca, merupakan grafik hubungan antara frekuensi dengan nilai resistivitas sedangkan kurva sebelah kanan atas, menunjukkan nilai resistivitas dari satu nilai frekuensi. Kurva di bawah menunjukkan hubungan antara frekuensi dengan fase. Sebelum dimulai proses seleksi, terlebih dahulu data dirotasi sebesar  $135^\circ$  dengan tujuan supaya antara arah *strike* geologi yang diukur dan lintasan

pengukuran menjadi sama. Setelah itu baru proses seleksi *cross power* dimulai.



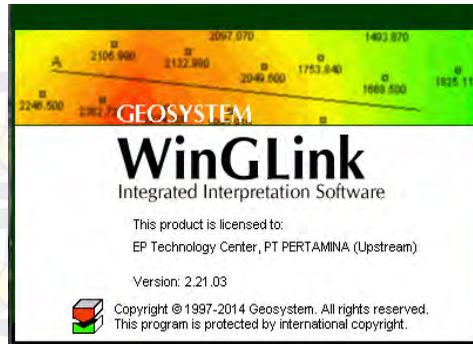
Gambar 3.7: Tampilan *Setting* Rotasi

Seleksi *cross power* merupakan tahap yang membutuhkan waktu cukup lama karena pada tahap ini, harus dilakukan seleksi pada tiap titik data MT agar data tersebut memiliki *trend* yang *smooth*. Proses seleksi dilakukan dengan cara menghidupkan dan mematikan data pada grafik sebelah kanan (*cross power*) agar kumpulan data yang dipilih membuat grafik sebelah kiri (baik atas maupun bawah) dapat terlihat *smooth*.

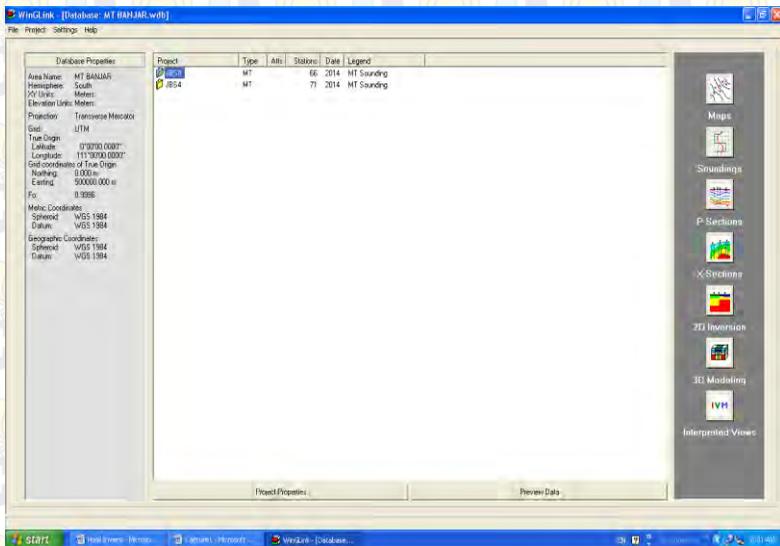
Setelah semua titik pada *line* JBS4 dan JBS8 sudah dilakukan proses ini, *file* disimpan ke dalam format .MPK dan kemudian di-*export* menjadi *file* dengan format .EDI pada satu *folder* yang sama untuk setiap *line* dan selanjutnya dilakukan proses inversi.

### 3.4.5 Inversi 2D

Untuk proses selanjutnya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak WinGLink milik Pertamina UTC. Pada proses inversi 2D dilakukan dengan beberapa proses seperti pemilihan lokasi *line* dan titik pengukuran yang akan diproses, pemilihan rentang frekuensi, tampilan gradien warna dan rentang jarak dan kedalaman yang ingin ditampilkan. Semua dapat diatur pada perangkat lunak WinGLink.

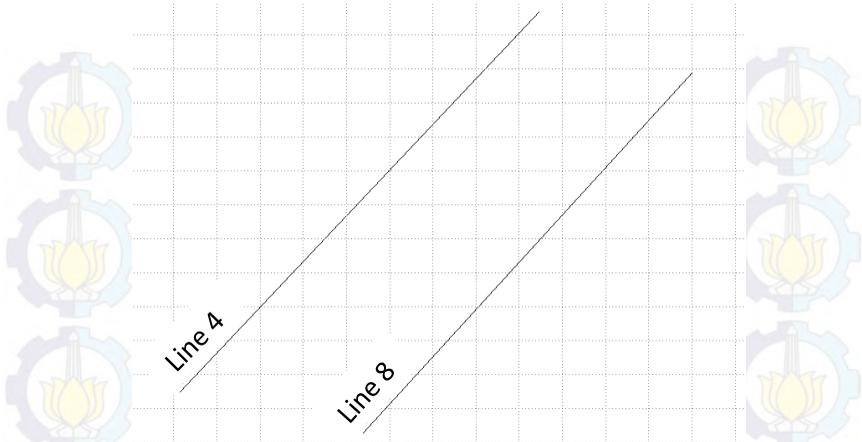


Gambar 3.8: Perangkat Lunak WinGLink



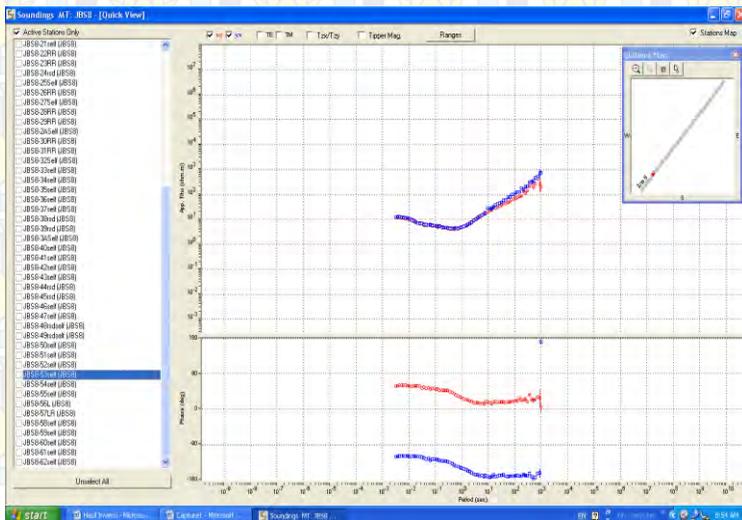
Gambar 3.9: Tampilan Depan WinGLink

Pada perangkat lunak WinGLink, dapat ditampilkan posisi antara *line* JBS4 dan JBS8 seperti pada Gambar 3.10. Pada tampilan tersebut, dapat dipilih titik mana yang akan diproses. Namun pada penelitian ini, 71 titik pada *line* JBS4 dan 66 titik pada *line* JBS8 semua dipilih untuk dilakukan proses inversi 2D.



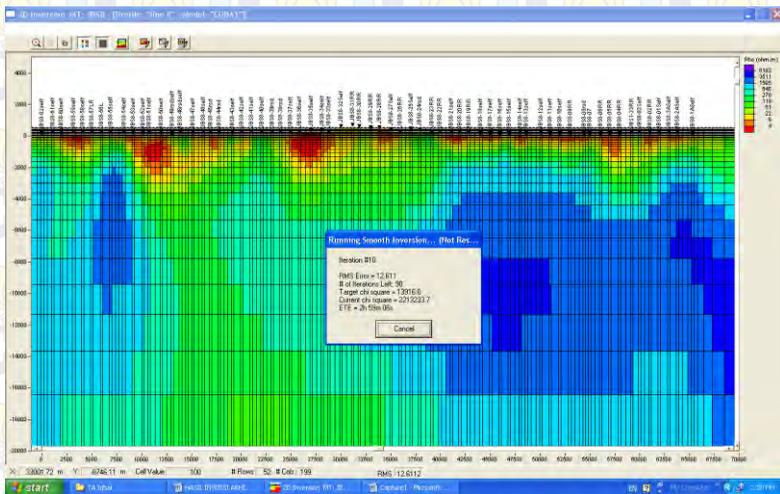
Gambar 3.10: Posisi *Line* JBS4 (*line* 4) dan JBS 8 (*line* 8)

Pada perangkat lunak ini juga dapat ditampilkan kurva hasil *sounding* data MT yang sudah dilakukan *editing* (seleksi *cross power*).



Gambar 3.11: Tampilan Kurva *Sounding* pada WinGLink

Tepat sebelum proses inversi dilakukan, terlebih dahulu diatur *mesh* yang akan dipakai. Pengaturan *mesh* akan berpengaruh pada lamanya waktu inversi dan hasil inversinya. Semakin detail *mesh* yang dipakai, maka akan memakan semakin banyak waktu pada proses inversinya dan hasil inversinya akan terlihat lebih detail begitu juga sebaliknya.



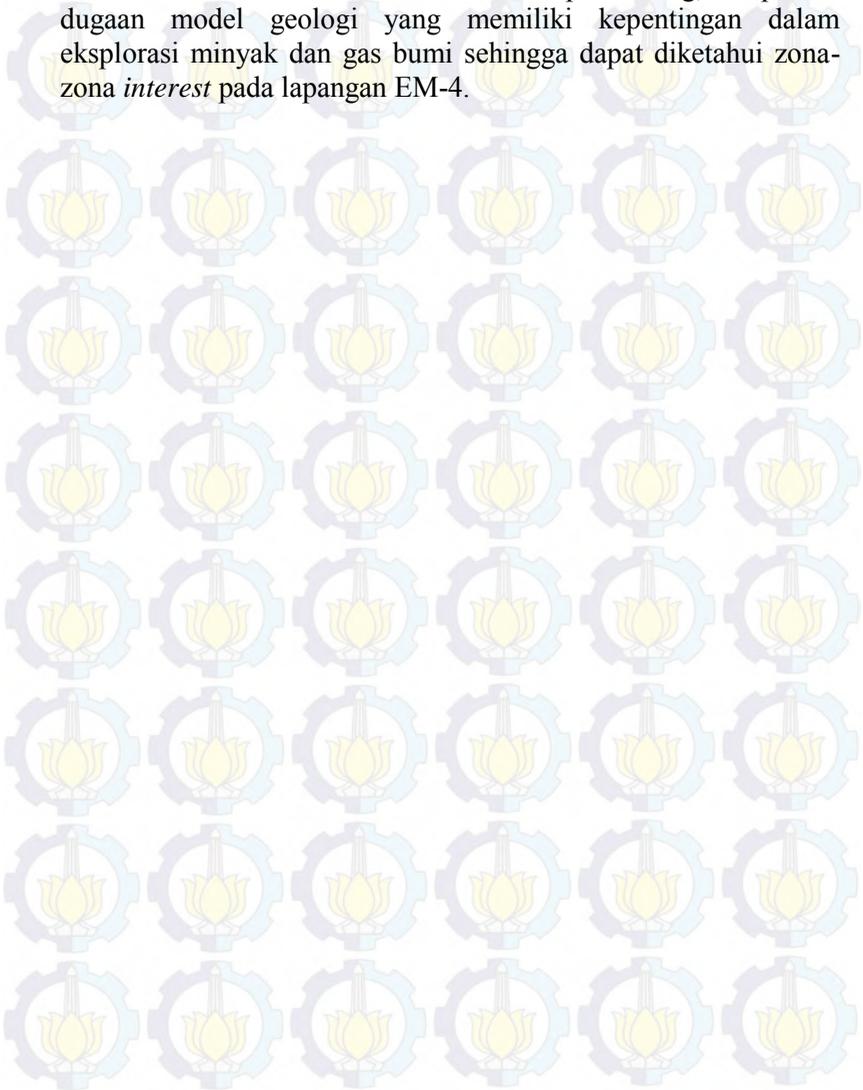
Gambar 3.12: Tampilan Proses Inversi yang Sedang Berlangsung

### 3.5 Analisis dan Pembahasan

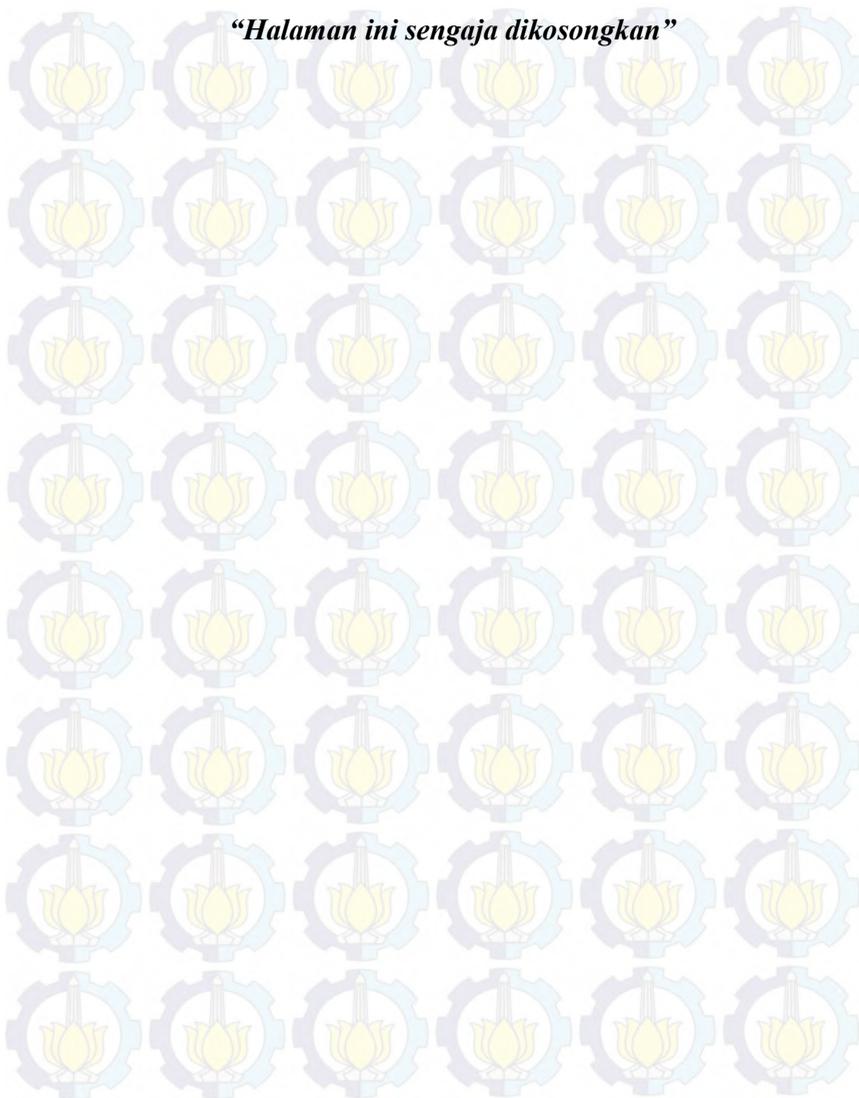
Pengolahan data MT ini dilakukan untuk melakukan studi cekungan migas pada lapangan EM-4 dengan data pendukung peta anomali gaya berat berupa Peta Anomali Gaya Berat Residual. Penelitian ini lebih dikhususkan pada proses pengolahan data MT sehingga perlu dilakukan analisis pada setiap tahap pengolahan dan hasil yang didapatkan. Data pendukung yang ada digunakan untuk meyakinkan hasil dari inversi 2D MT yang didapatkan sehingga diharapkan dapat dilakukan analisis lebih pada penelitian ini.

### 3.6 Kesimpulan

Dari hasil inversi 2D MT dan data pendukung, didapatkan dugaan model geologi yang memiliki kepentingan dalam eksplorasi minyak dan gas bumi sehingga dapat diketahui zona-zona *interest* pada lapangan EM-4.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 *Time Series*

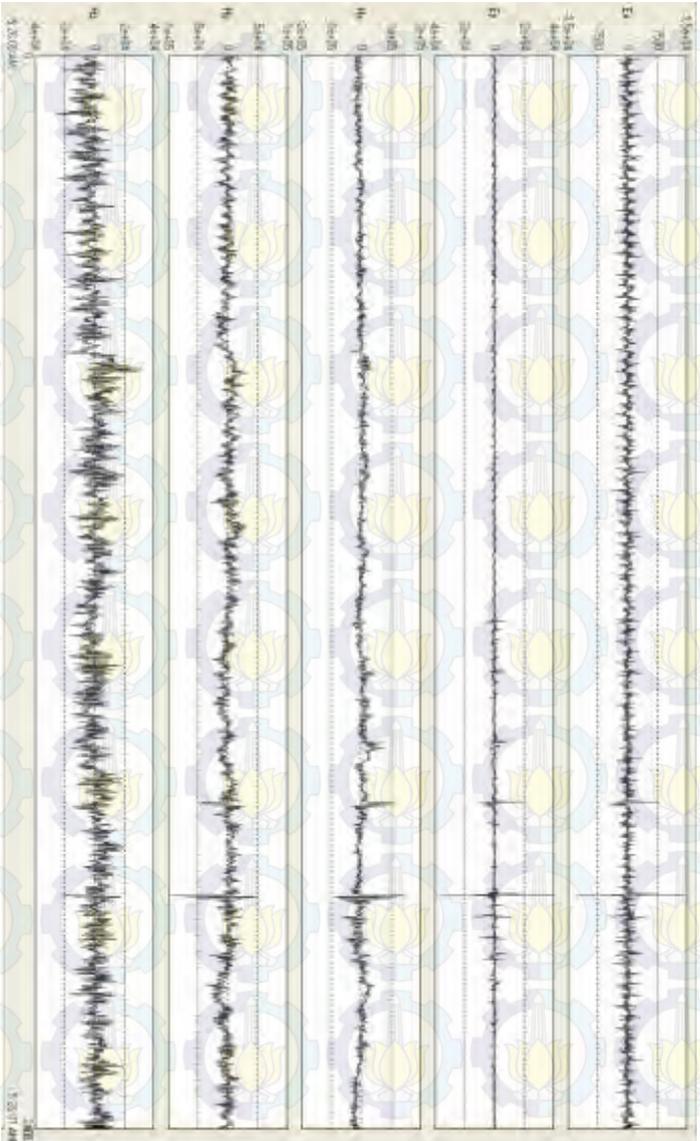
Data mentah (*raw data*) dari metode MT merupakan nilai medan magnet dan medan listrik selama waktu pengukuran yang disajikan dalam bentuk *time series*. Berikut adalah tampilan *time series* dari salah satu titik yang digunakan pada penelitian ini (pada file 1611CO1D.TS3) yang ditampilkan dengan perangkat lunak Syncro Time Series View:



Gambar 4.1: Tampilan Awal Perangkat Lunak Syncro Time Series View

Pada Gambar 4.2, terdapat nilai medan listrik pada 2 dimensi yaitu  $E_x$  dan  $E_y$  serta medan magnet pada 3 dimensi yaitu  $H_x$ ,  $H_y$ , dan  $H_z$ . Seperti pada konsep medan elektromagnet yang sudah dijelaskan sebelumnya (Gambar 2.1), medan listrik pada arah  $x$  ( $E_x$ ) harus berkorelasi dengan medan magnet pada arah  $y$  ( $H_y$ ). Begitu juga dengan  $E_y$  yang berkorelasi dengan  $H_x$ . Nilai  $H_z$  tidak digunakan pada penelitian ini karena inversi yang digunakan adalah *2D inversion*.

Berdasarkan tampilan *time series*, dapat dianalisis kualitas dari data yang didapatkan. Sinyal gangguan atau *noise* pada data MT dapat dikenali dengan pola yang khusus.



Menurut Melly (2007), ciri data MT yang baik yang dapat dilihat secara sederhana dari tampilan *time series* adalah:

1. Sinyal yang terekam tidak ada pengulangan dalam bentuk gelombang, hal ini disebabkan karena sinyal alam biasanya bersifat acak. Bila terdapat sinyal dalam bentuk pengulangan terus menerus, itu kemungkinan besar adalah bentuk *noise* harmonis. Contoh *noise* harmonis adalah tiang listrik, kendaraan yang lewat atau aktivitas pabrik
2. Tidak ada *amplitude* yang besar pada waktu yang sangat singkat atau *spike* yang terlalu ekstrem. *Spike* ekstrem pada sinyal listrik biasanya akan muncul jika saat perekaman data terjadi petir yang menjadikan data memiliki *noise*.

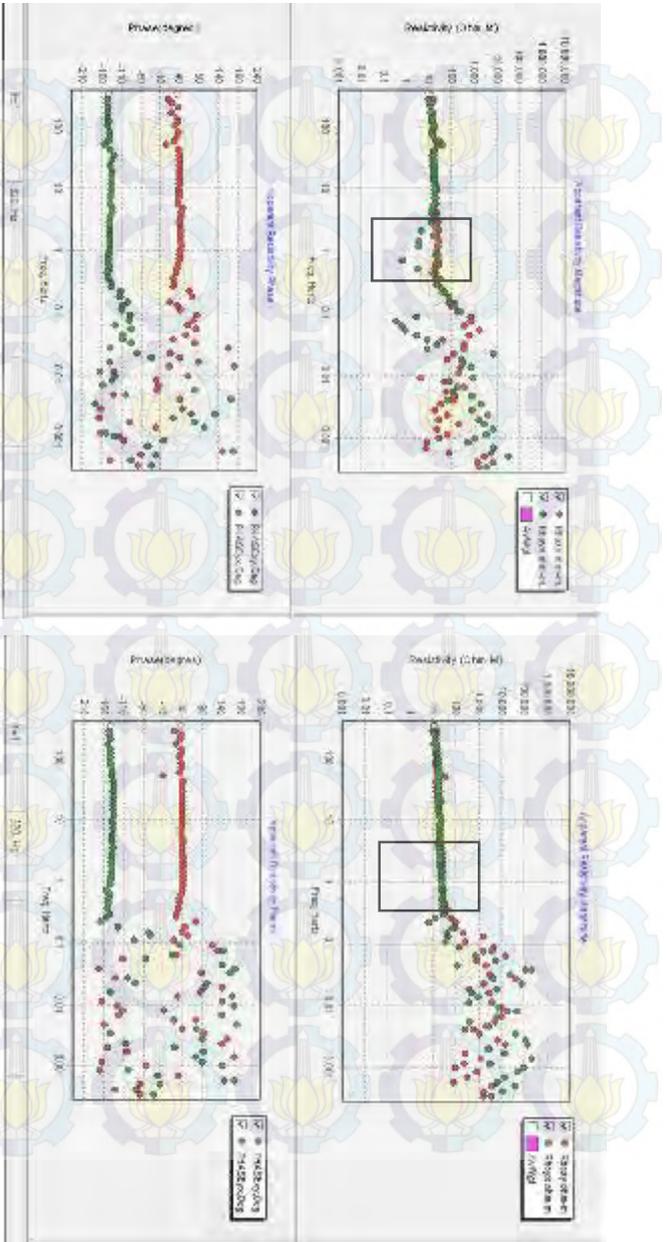
#### 4.2 Kurva *Sounding*

Kurva *Sounding* MT sangat menentukan hasil dari pengolahan data MT. *Trend* dan tingkat *smoothness* menjadi parameter utama. *Trend* kurva akan mempengaruhi nilai resistivitas bawah permukaan sedangkan *smoothness* kurva akan mempengaruhi kualitas hasil inversi. Beberapa tahap yang dapat mempengaruhi kurva diantaranya adalah efek *remote reference*, efek rotasi, dan efek seleksi *cross power*.

##### 4.2.1. Efek *Remote Reference*

Untuk mendapatkan kurva *sounding* yang baik, maka pada penelitian ini digunakan data *remote reference* dengan harapan *noise* yang mempengaruhi kualitas kurva akan berkurang. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, *remote reference* akan mengurangi *noise* untuk medan magnet saja karena medan magnet bersifat regional.

Gambar 4.3 menampilkan kurva MT sebelum dan sesudah dilakukan seleksi *cross power*. Jika diperhatikan pada kotak warna hitam yang berada di tengah kurva, dapat dilihat bahwa pada kurva (a) terdapat data *outlier* sedangkan pada kurva (b) *outlier* tersebut menghilang dan data sudah berada pada *trend* yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa data *remote reference* dapat membantu untuk mendapatkan kurva MT yang baik.



(a)

(b)

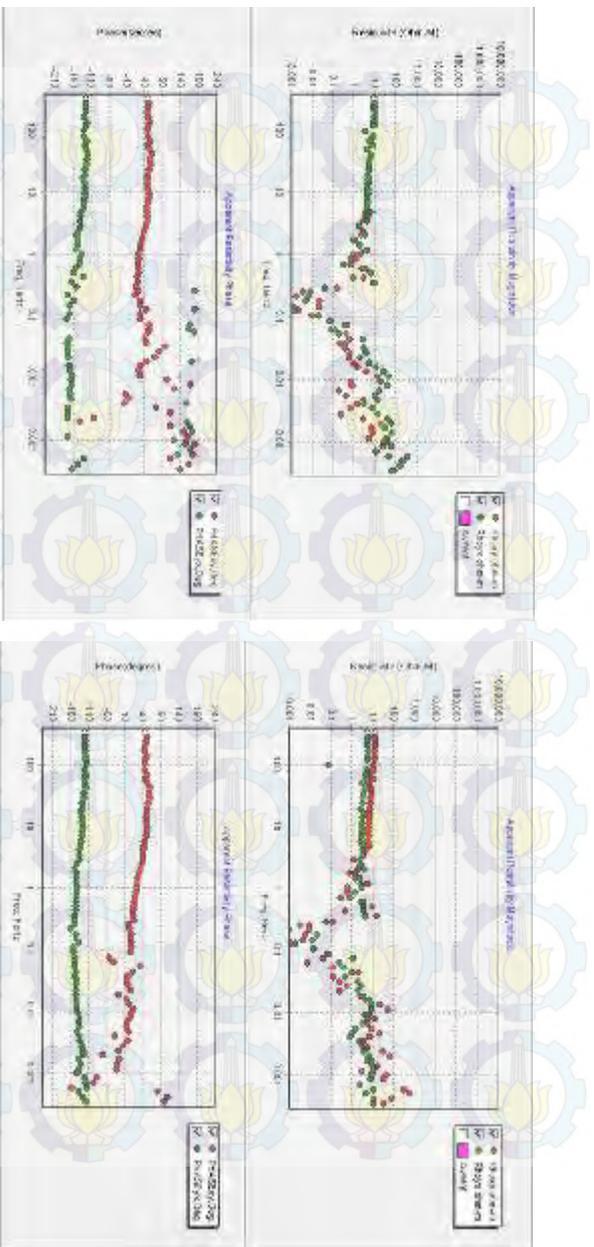
Gambar 4.3: Perbandingan Kurva MT (a) tanpa Remote Reference, (b) dengan Remote Reference

#### 4.2.2 Efek Rotasi

Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa pada pengolahan data MT di penelitian ini, digunakan rotasi sebesar  $135^\circ$ . Pada awal pengukuran, alat MT diarahkan pada arah utara karena belum diketahui arah *strike* geologi. Pada saat pengolahan data MT, diketahui (berdasarkan data geologi) bahwa arah *strike* terhadap arah utara bumi adalah sebesar  $135^\circ$  sehingga pada saat pengolahan dapat dilakukan rotasi supaya pengukuran MT yang dilakukan searah dengan arah *strike*.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa rotasi menyebabkan perubahan kurva MT (perubahan yang paling terlihat ada pada kurva fasenya). Hal ini mengindikasikan bahwa mengetahui arah *strike* adalah hal yang penting karena akan mempengaruhi hasil pemodelannya nanti.

Aswo (2011) menjelaskan bahwa sebenarnya struktur bawah permukaan sangat kompleks. Pola struktur yang tersaji pada peta geologi juga merupakan hasil interpretasi yang berarti masih ada kemungkinan terjadi *error* (memiliki persentase kesalahan). Namun jika diteliti satu per satu efek dari struktur terhadap data MT akan sangat sulit. Hal ini dikarenakan satu data MT dipengaruhi oleh banyak struktur bawah permukaan dengan arah yang berbeda-beda. Oleh karena itu walaupun memiliki persentase kesalahan referensi arah struktur dominan pada data geologi cukup merepresentasikan struktur yang berkerja pada daerah penelitian.



(a)

(b)

Gambar 4.4: Tampilan Kurva (a) sebelum Rotasi (b) sesudah Rotasi

### 4.2.3 Efek Seleksi *Cross Power*

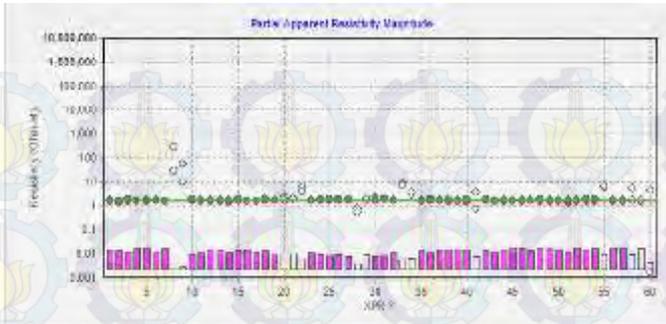
Upaya yang paling utama dalam mendapatkan kurva MT yang baik adalah seleksi *cross power*. Seleksi *cross power* biasa juga disebut sebagai *main processing* pada pengolahan data MT.



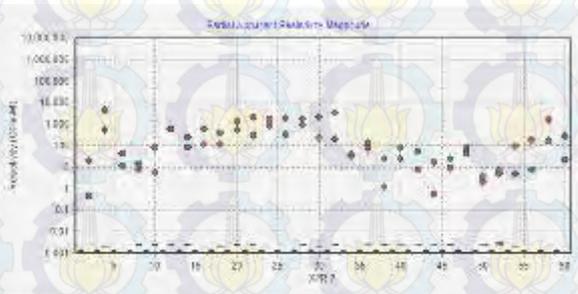
Gambar 4.5: Proses Seleksi *Cross Power* yang Sedang Berlangsung

Pada gambar 4.5 di atas dapat dilihat bahwa proses seleksi sudah sampai pada frekuensi 0.1 Hz dari frekuensi tertingginya. Rentang frekuensi dapat merepresentasikan nilai kedalaman yang akan didapatkan ketika proses inversi nantinya. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, semakin rendah frekuensi maka akan semakin dalam data yang didapatkan. Pada kurva di atas, terdapat dua warna kurva yaitu merah dan hijau. Kedua warna ini merupakan pembeda dari kurva TE mode (kurva merah) dan TM mode (kurva hijau).

Pada saat proses penyeleksian, hasil dari *robust processing* yang berupa pembobotan data dapat menjadi acuan dalam mematikan dan menghidupkan data. Namun pada rentang frekuensi yang semakin kecil, hasil *robust processing* tidak akan banyak membantu karena hasil pembobotannya rata-rata memiliki nilai yang sama. Hal ini dapat dikarenakan pada frekuensi rendah, semakin sedikit data yang didapatkan.



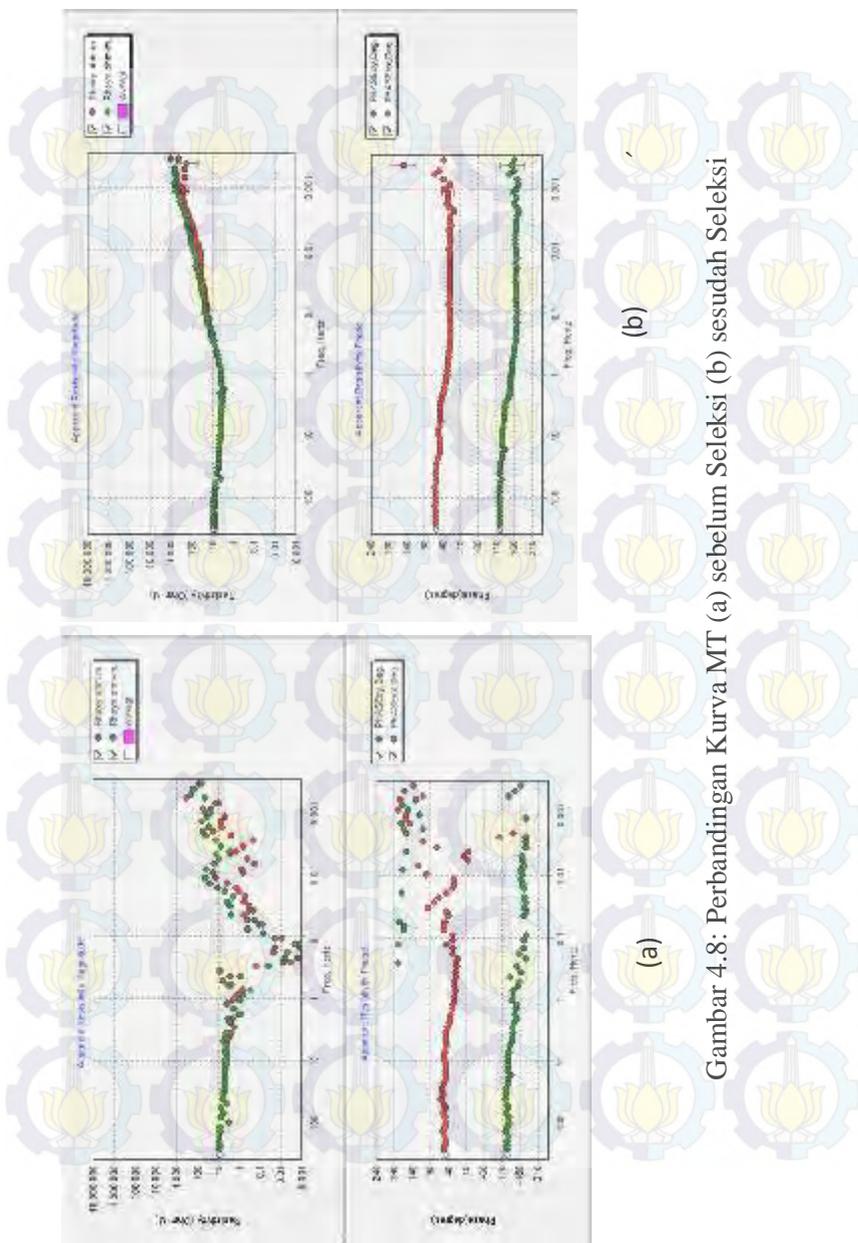
Gambar 4.6: Pembobotan Hasil *Robust Processing* pada Frekuensi Tinggi



Gambar 4.7: Pembobotan Hasil *Robust Processing* pada Frekuensi Rendah

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat data yang memiliki bobot rendah dan diasumsikan sebagai *outlier* sehingga pada frekuensi yang masih relatif tinggi, hasil pembobotan dapat menjadi acuan. Sedangkan pada Gambar 4.7, pembobotan data sudah mulai tidak terlihat dan data yang didapatkan semakin sedikit sehingga hasil *robust processing* tidak akan banyak membantu. Kurva MT harus sedapat mungkin *smooth* karena pada dasarnya MT merupakan data dengan *range* frekuensi rendah sehingga perubahan *trend* kurvanya tidak akan terjadi secara ekstrem pada *range* frekuensi yang sempit.

Berikut perbandingan kuva sebelum dan sesudah seleksi *cross power*



Gambar 4.8: Perbandingan Kurva MT (a) sebelum Seleksi (b) sesudah Seleksi

### 4.3 Hasil Pemodelan 2D

Tri (2011) menjelaskan bahwa pada proses inversi tidak hanya memodelkan secara dua dimensi melainkan juga kembali dilakukan *smoothing* terhadap nilai-nilai fase dan resistivitas pada data yang ada namun proses tersebut tetap mengacu pada data sebelumnya. Oleh sebab itu, terdapat faktor selisih atau perbedaan nilai yang didapatkan untuk proses *modeling* dengan data sebelumnya yang disebut dengan *root mean square error* (RMS Error).

Pada saat pemodelan, dapat ditentukan data yang akan diproses hanya dari kurva TE atau kurva TM atau gabungan dari keduanya.

*Line* JBS4 dan JBS8 memiliki arah bentangan yang sama yaitu dari barat daya ke timur laut. *Line* JBS4 memiliki 71 titik pengukuran dan terbentang sejauh lebih kurang 70.000 meter. *Line* JBS8 memiliki 66 titik pengukuran dan terbentang sejauh 65.000 meter.

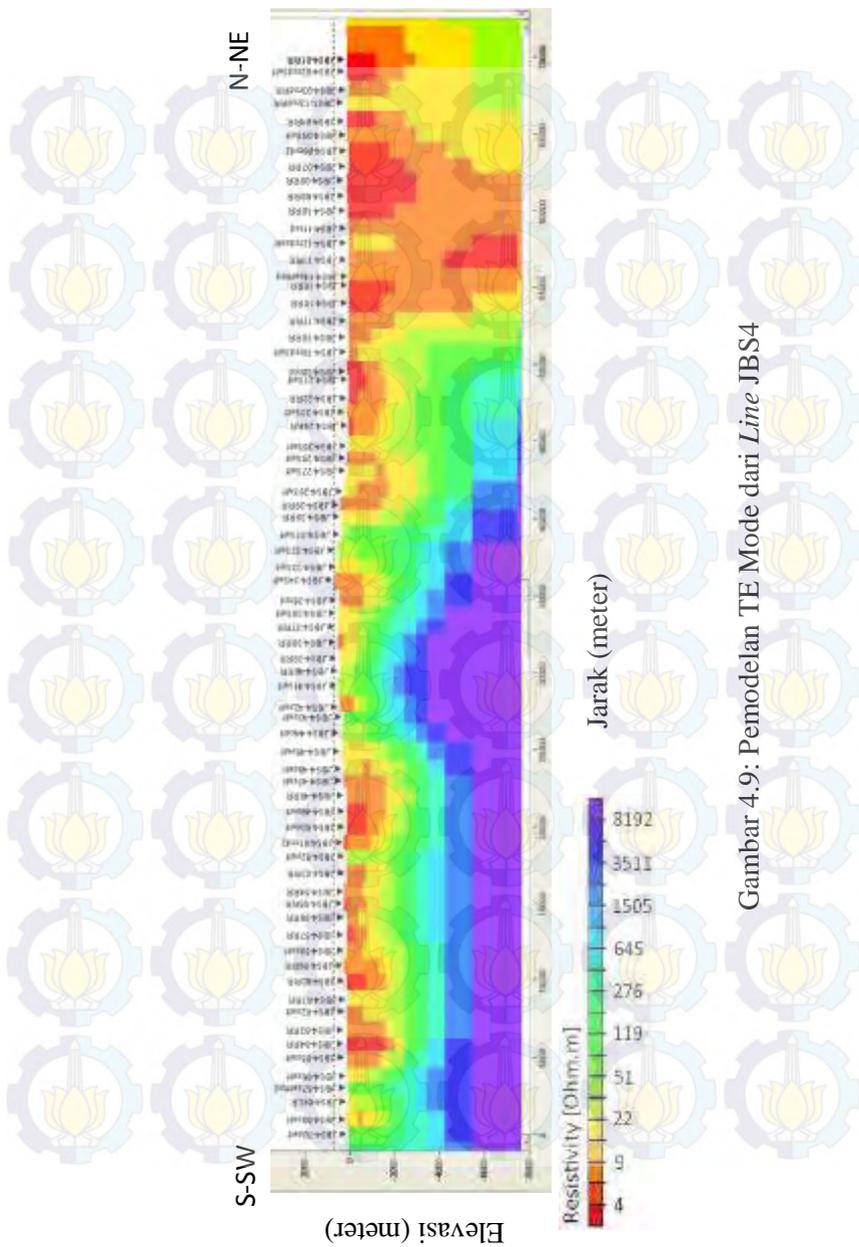
#### 4.3.1 Pemodelan TE Mode dan TM Mode

Pada TE mode, arus yang melewati batas lapisan tidak akan terekam karena itu TE mode masih dapat menghasilkan hasil inversi yang baik pada 1-D (Tri, 2011).

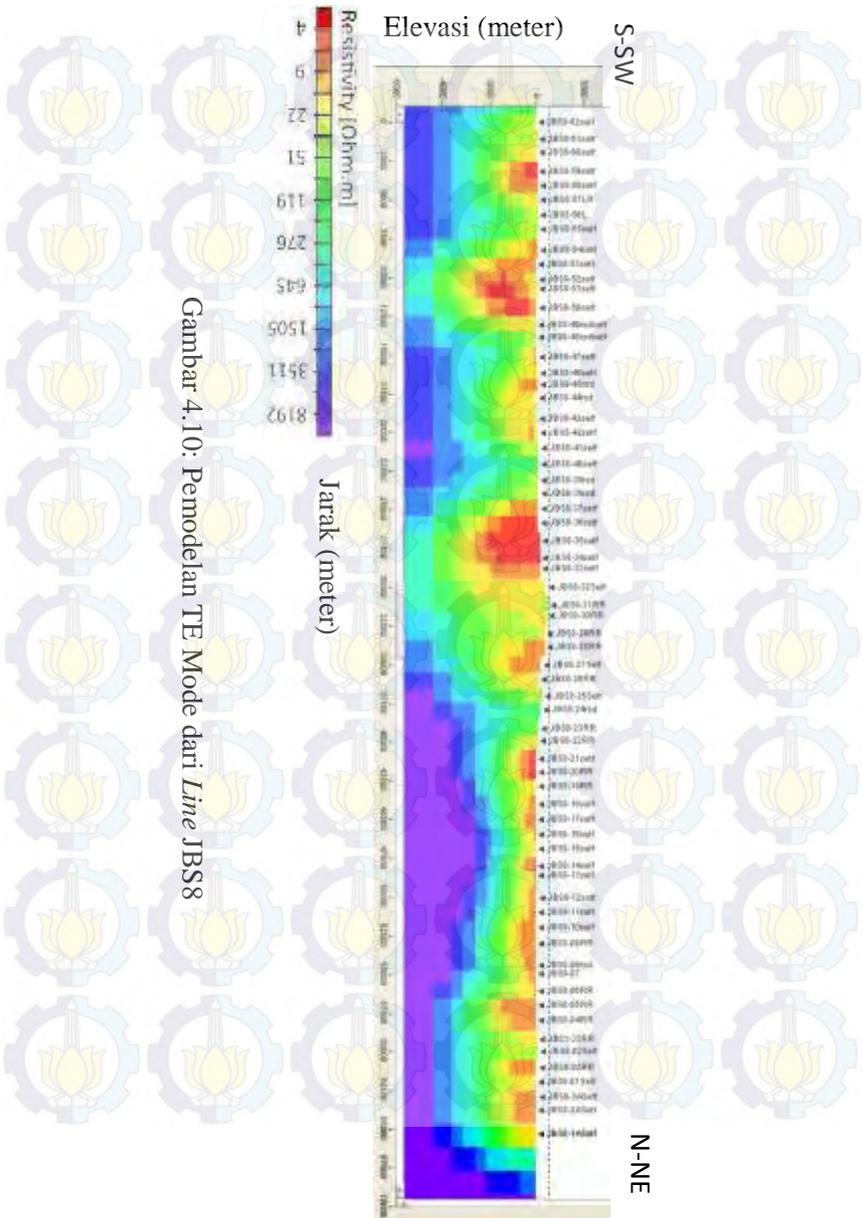
Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan pemodelan yang cukup baik yang ditandai dengan kemunculan lapisan berpola yang memiliki resistivitas tinggi (lebih besar dari 200 ohm.meter) dan diduga berupa *basement*. Namun pemodelan yang dihasilkan oleh TE mode masih belum sempurna karena menurut (Unsworth, 2006) TE mode tidak dapat menampilkan beda resistivitas pada *range* nilai yang tinggi.

Pada TM mode, arus listrik yang melewati batas lapisan akan terekam dan nilai resistivitas pada frekuensi rendah akan tetap terlihat (Unsworth, 2006).

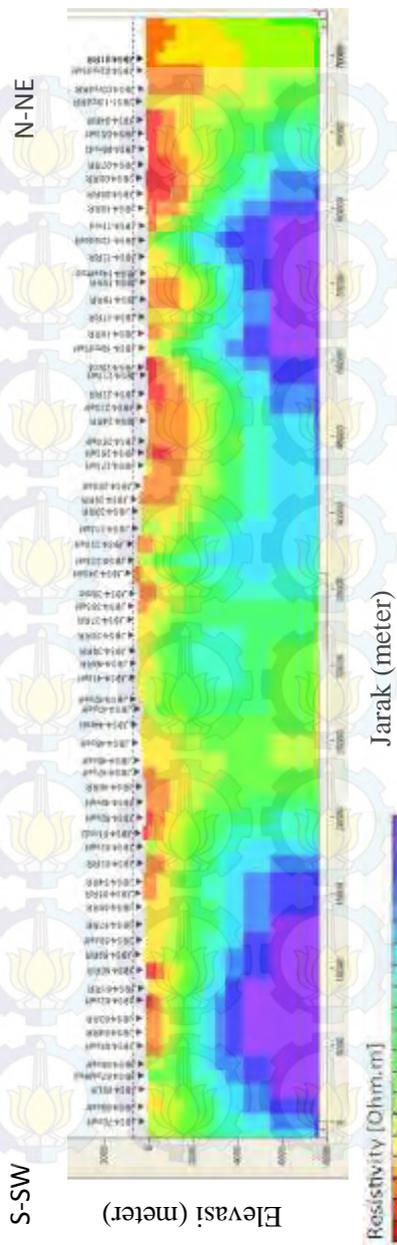
Hal ini menunjukkan bahwa TE mode dan TM mode merupakan metode yang akan saling melengkapi dan menghasilkan hasil inversi yang lebih baik jika digunakan secara bersamaan.



Gambar 4.9: Pemodelan TE Mode dari Line JBS4



Gambar 4.10: Pemodelan TE Mode dari Line JBSS8



N-NE

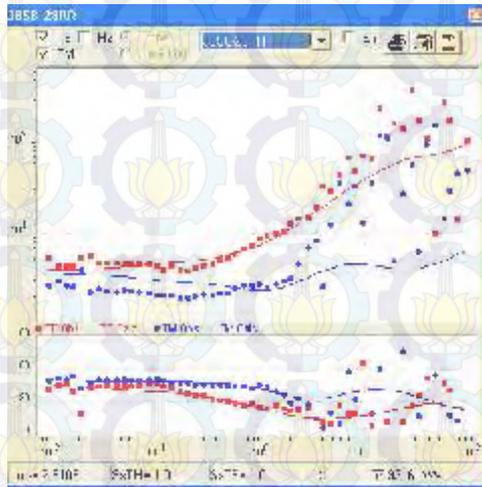
S-SW

Gambar 4.1.1 : Pemodelan TM Mode dari Line JBS4



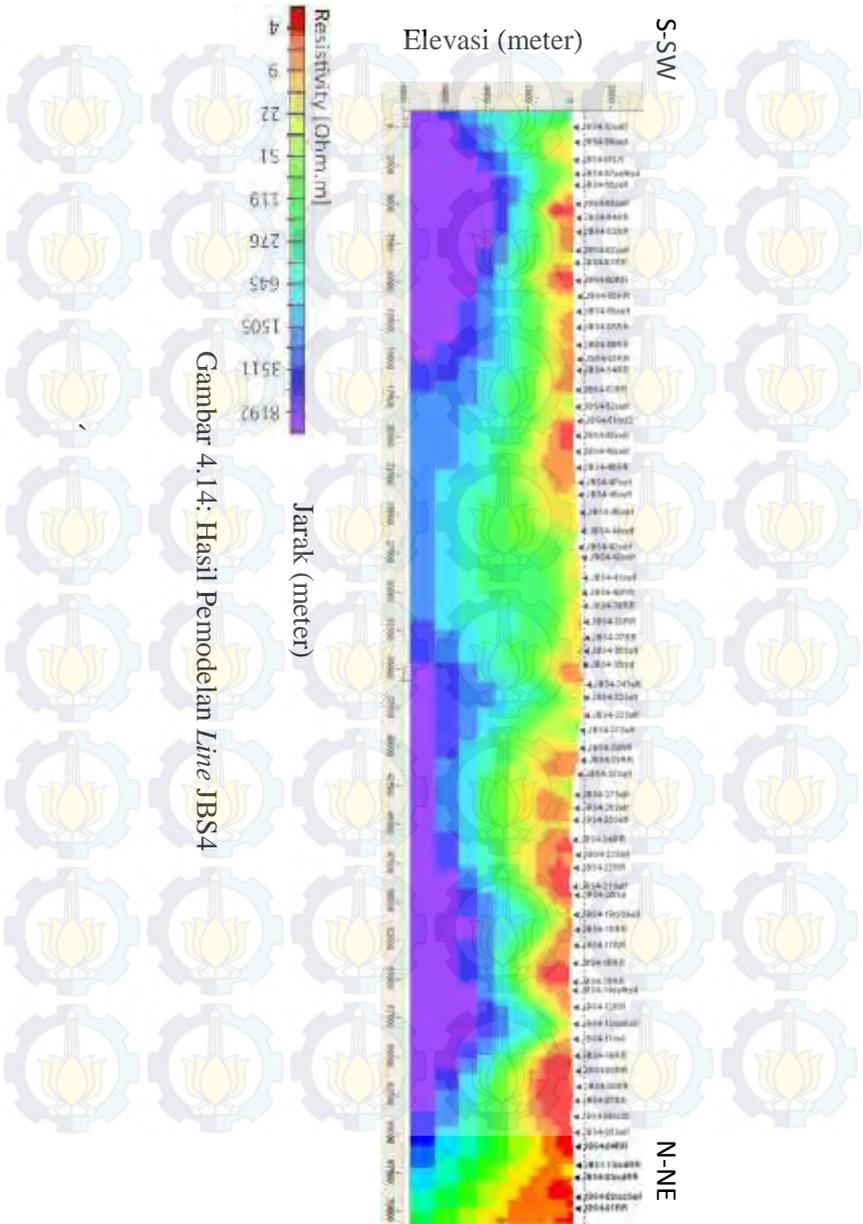
### 4.3.2 Pemodelan Gabungan

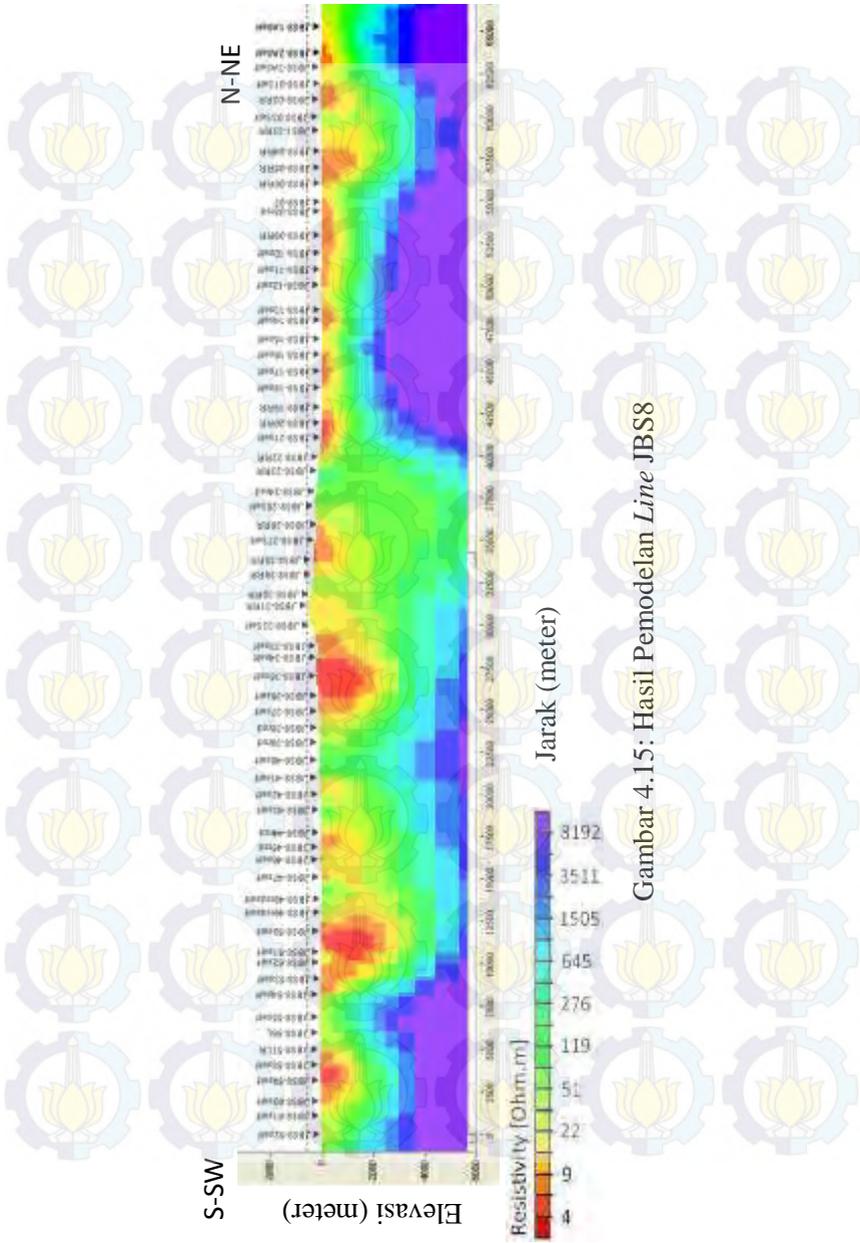
Pada proses inversi, kembali akan dilakukan *smoothing* data yang sudah diberlakukan banyak proses sebelumnya. Proses *smoothing* ini menghasilkan kurva yang berbeda dengan kurva data maka dari itu terdapat *error* atau selisih antara kurva data dengan kurva hasil inversi.



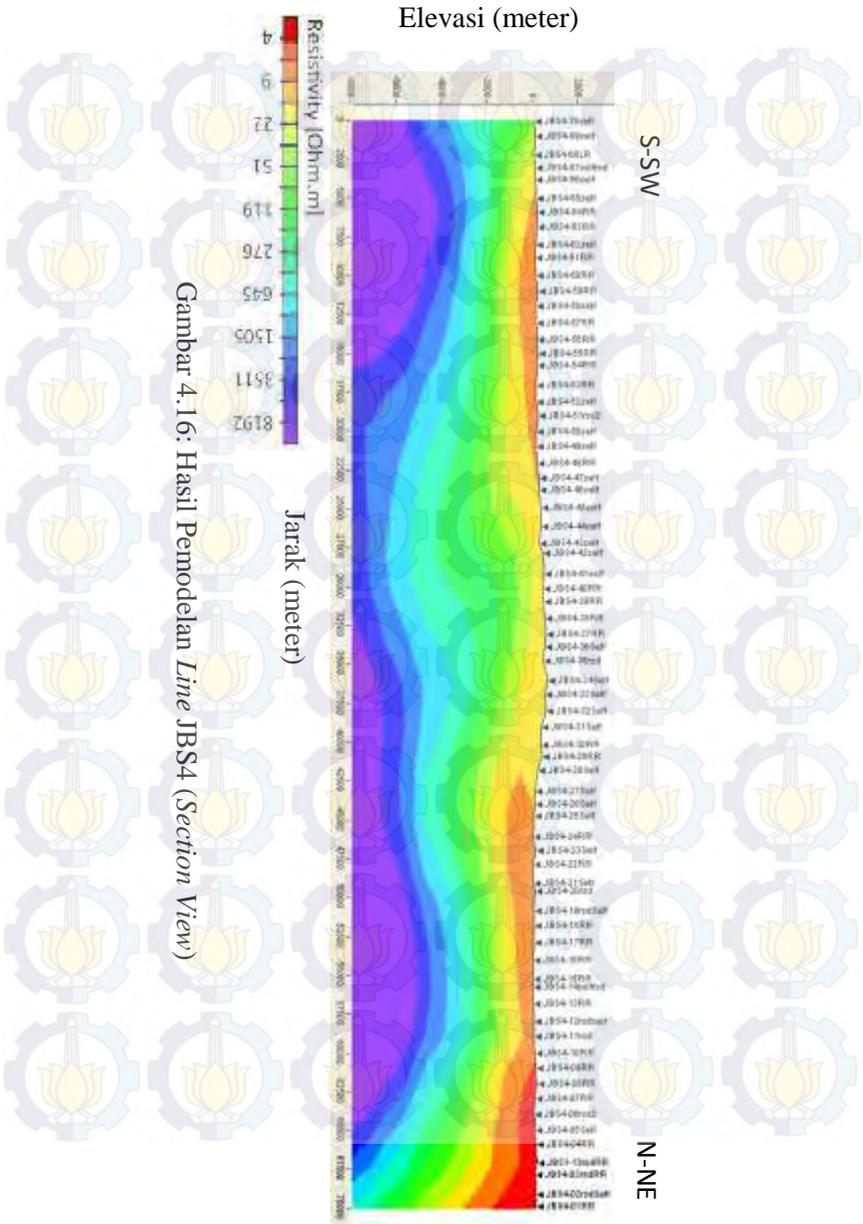
Gambar 4.13: Kurva Hasil Inversi pada Satu Titik Pengukuran

Pada Gambar 4.13 menampilkan data MT hasil pengukuran atau observasi (ditandai dengan titik warna merah dan biru) dengan kurva hasil perhitungan inversi (ditandai dengan garis warna merah dan biru). Warna merah untuk TE mode dan warna biru untuk TM mode. Pada gambar dapat terlihat bahwa antara data observasi dengan kurva hasil inversi masih memiliki sedikit pergeseran (*error*) dan semakin terlihat pada range frekuensi rendah. RMS *error* hasil dari inversi pada titik pengukuran adalah sebesar 2.6106. Semakin kecil nilai RMS maka akan semakin cocok antara data observasi dengan perhitungannya begitu juga sebaliknya. Berikut adalah hasil inversi 2D dari *line* JBS4 dan *line* JBS8:

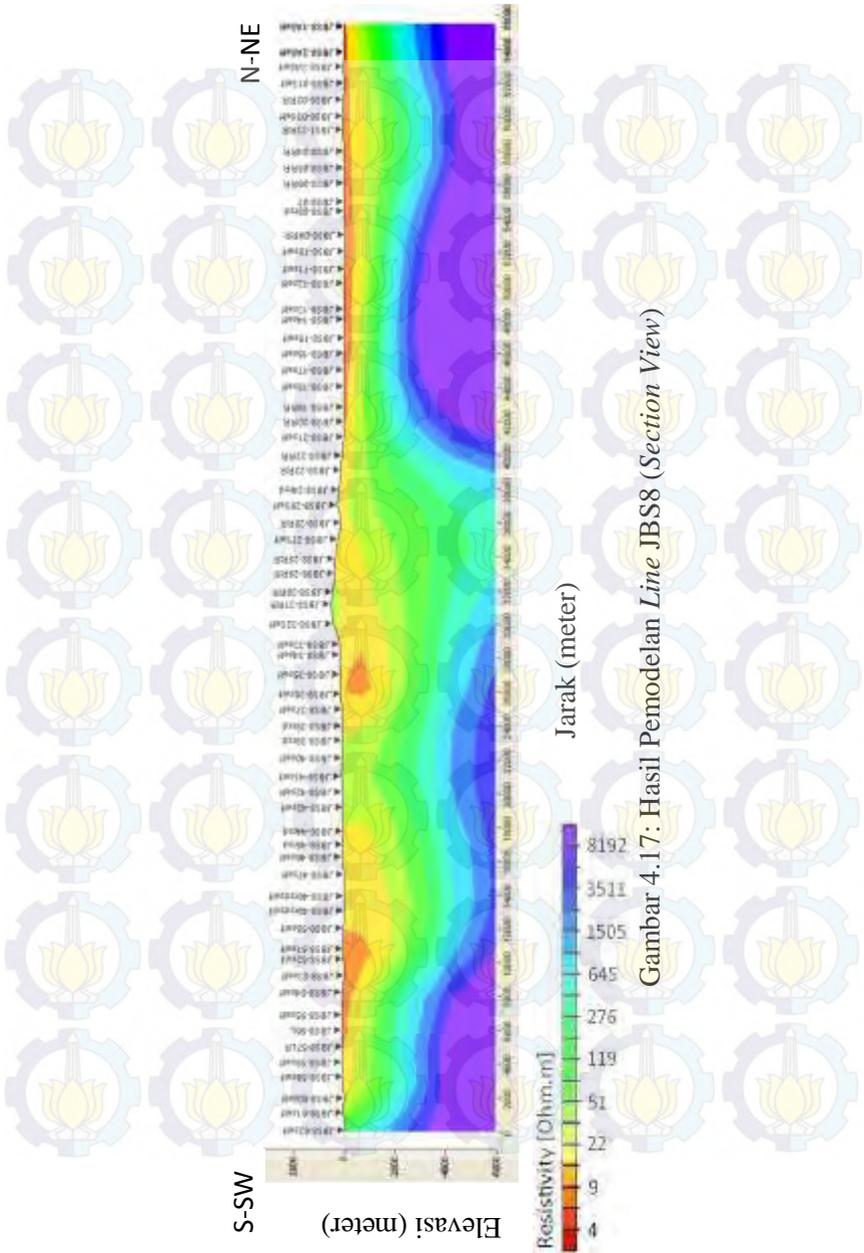




Gambar 4.15: Hasil Pemodelan Line JBS8



Gambar 4.16: Hasil Pemodelan Line JBS4 (Section View)



Gambar 4.17: Hasil Pemodelan Line JBS8 (Section View)

Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 menampilkan hasil inversi akhir dari pengolahan MT ini. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa sebelum pengolahan inversi dimulai, terlebih dahulu dibuat *setting mesh* dimana semakin detail *mesh* yang dibuat maka semakin detail pula hasil inversi yang dihasilkan namun akan memakan banyak waktu dalam proses inversinya. Terlihat bahwa pada kedua gambar tersebut, nilai resistivitas ditentukan secara kotak-kotak. Sedangkan untuk Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 merupakan tampilan hasil inversi dengan *section view* dimana pada tampilan ini disajikan hasil inversi pada setiap lapisan (*section*) berdasarkan nilai resistivitasnya.

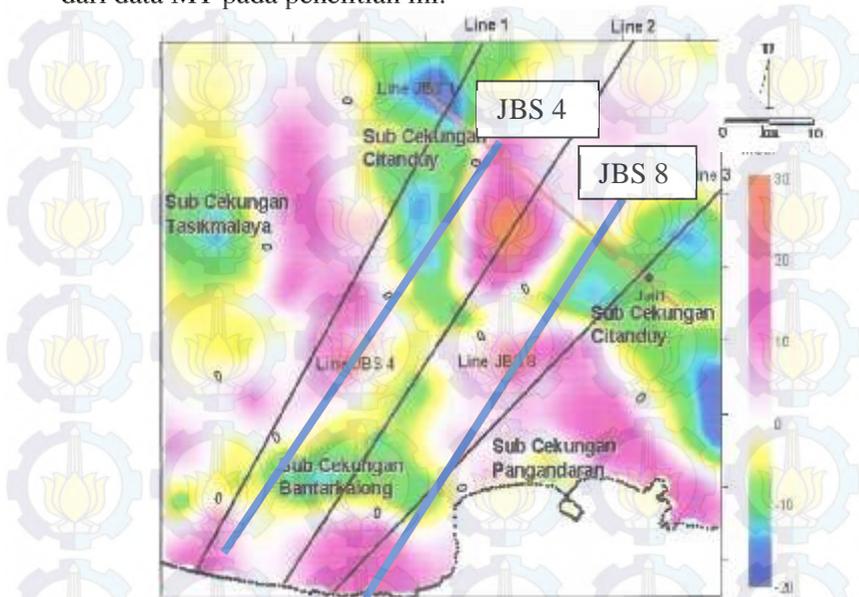
Untuk hasil inversi dari *line* JBS4, antara *basement* dan lapisan sedimen sudah dapat ditampilkan dengan baik. Keberadaan *basement* ditandai dengan adanya lapisan dengan nilai resistivitas yang tinggi ( $>200$  Ohm.meter). *Basement* memiliki topografi yang bervariasi dan untuk *basement* terdangkal mulai terlihat pada elevasi -2000 meter sedangkan untuk *basement* terdalam berada pada elevasi -4000 meter. Ketebalan sedimentasi juga bervariasi dengan nilai resistivitas yang dominan berkisar 22-119 Ohm.meter.

Untuk hasil inversi dari *line* JBS8 menunjukkan pola sebaran resistivitas yang tidak jauh berbeda dengan *line* JBS4. Hal ini dikarenakan kedua *line* ini sejajar (membentang pada arah yang hampir sama) sedangkan jarak antara keduanya lebih kurang 35.000 meter. *Basement* yang terlihat dari hasil inversi *line* JBS8 juga memiliki topografi yang bervariasi. *Basement* terendah mulai terlihat pada elevasi -2000 meter dan *basement* terdalam pada elevasi lebih kurang -4000. Sedimentasi juga terlihat memiliki ketebalan yang bervariasi dengan nilai resistivitas dominan berkisar 22-119 Ohm.meter.

#### 4.4 Data Pendukung

Pada penelitian ini, digunakan data pendukung untuk meningkatkan keyakinan data MT yang sudah diolah. Data pendukung yang digunakan adalah peta anomali gaya berat

residual dari lapangan EM-4, lokasi dimana dilakukannya akuisisi dari data MT pada penelitian ini.

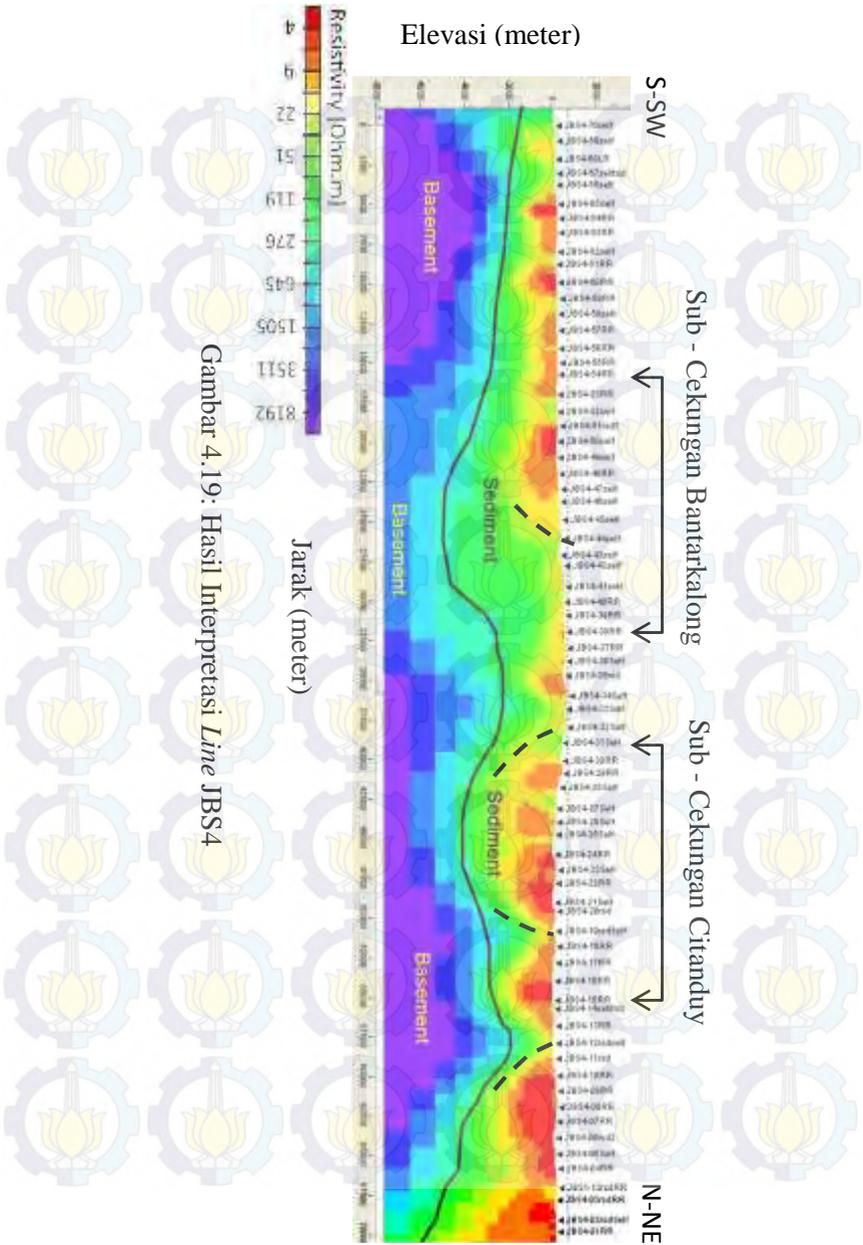


Gambar 4.18: Peta Anomali Gaya Berat Residual pada Lapangan EM-4

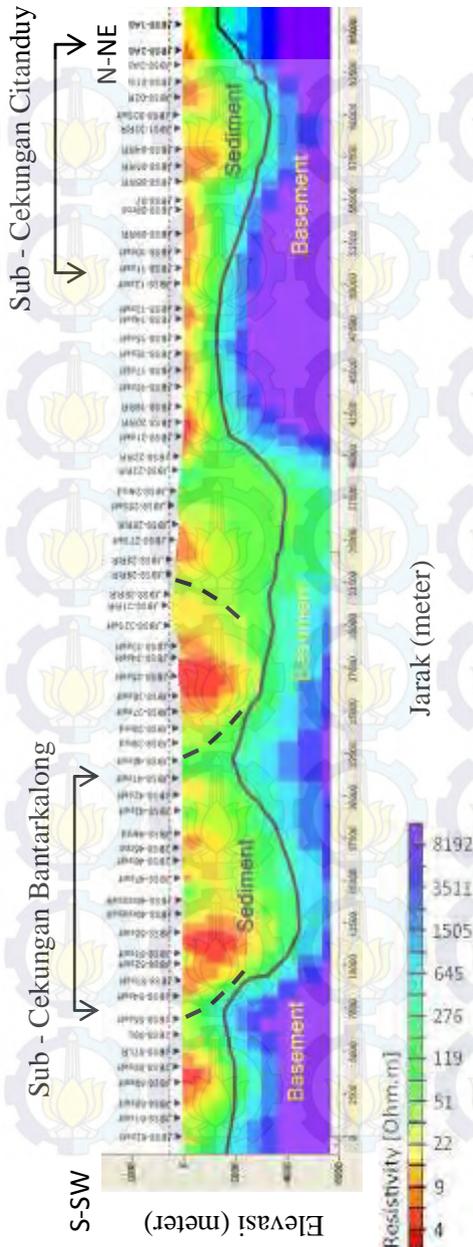
Peta Anomali Gaya Berat di atas menunjukkan nilai gaya berat dari lapangan EM-4. Daerah yang memiliki nilai gaya berat tinggi menunjukkan indikasi adanya tinggian sedangkan untuk nilai gaya berat yang rendah (sampai *minus*) mengindikasikan adanya rendahan.

#### 4.5 Interpretasi Terpadu

Pada Gambar 4.18, lintasan MT yang digunakan pada penelitian ini ditandai dengan garis berwarna biru tebal dengan keterangan nama *line* yang sudah tertera pada gambar tersebut. Peta anomali gaya berat digunakan untuk membantu dilakukannya interpretasi dari hasil inversi 2D MT yang sudah dilakukan.



Gambar 4.19: Hasil Interpretasi Line JBS4



Gambar 4.20: Hasil Interpretasi Line JBS8

Lapangan EM-4 memiliki 4 cekungan yang diketahui berdasarkan peta anomali gaya berat residual. Cekungan tersebut adalah cekungan Tasikmalaya, Cekungan Citanduy, Cekungan Bantarkalong, dan Cekungan Pangandaran. Empat cekungan tersebut ditandai dengan wilayah yang memiliki nilai gaya berat rendah (satuan mGal). Sedangkan dari lintasan MT, terlihat bahwa lintasan tersebut melewati cekungan Bantarkalong dan Cekungan Pangandaran.

Hasil dari inversi 2D MT telah dapat menampilkan model cekungan yang dilewati oleh *line* JBS4 dan JBS8. Pada *line* JBS4, cekungan Bantarkalong memiliki sedimentasi yang tebal sampai lebih kurang 4000 meter dan cekungan Citanduy memiliki ketebalan sedimen mencapai lebih kurang 3000 meter. Pada *line* JBS8, cekungan Bantarkalong memiliki sedimentasi dengan tebal mencapai lebih kurang 4000 meter dan untuk cekungan Citanduy memiliki tebal sedimentasi mencapai lebih kurang 3000 meter. Cekungan – cekungan ini memiliki sedimentasi yang cukup tebal dan bisa diasumsikan sebagai zona *interest* untuk dilakukan eksplorasi berikutnya.

Pada hasil inversi 2D MT ini, secara spekulatif dapat digambarkan struktur patahan yang terbentuk berdasarkan *discontinue electricity* atau terputusnya nilai resistivitas pada suatu lapisan (pada gambar 4.16 dan 4.17, patahan digambarkan dengan garis putus-putus). Pada kedua model yang dihasilkan, dapat dilihat bahwa lapisan sedimen yang mengisi cekungan, memiliki nilai resistivitas dominan sekitar 22-119 Ohm.meter.

Interpretasi dari data MT dan Peta Anomali Gaya Berat ini masih berupa dugaan awal dari struktur bawah permukaan dari lapangan EM-4. Untuk melakukan interpretasi lebih mendalam, diperlukan data pendukung yang lain terutama data geologi yang tidak didapatkan pada penelitian ini. Namun secara umum, metode MT telah dapat menggambarkan struktur bawah permukaan dengan baik dengan nilai resistivitas sebagai parameter utamanya dan dari data MT ini pula dapat diidentifikasi zona-zona yang nantinya menjadi target eksplorasi selanjutnya.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

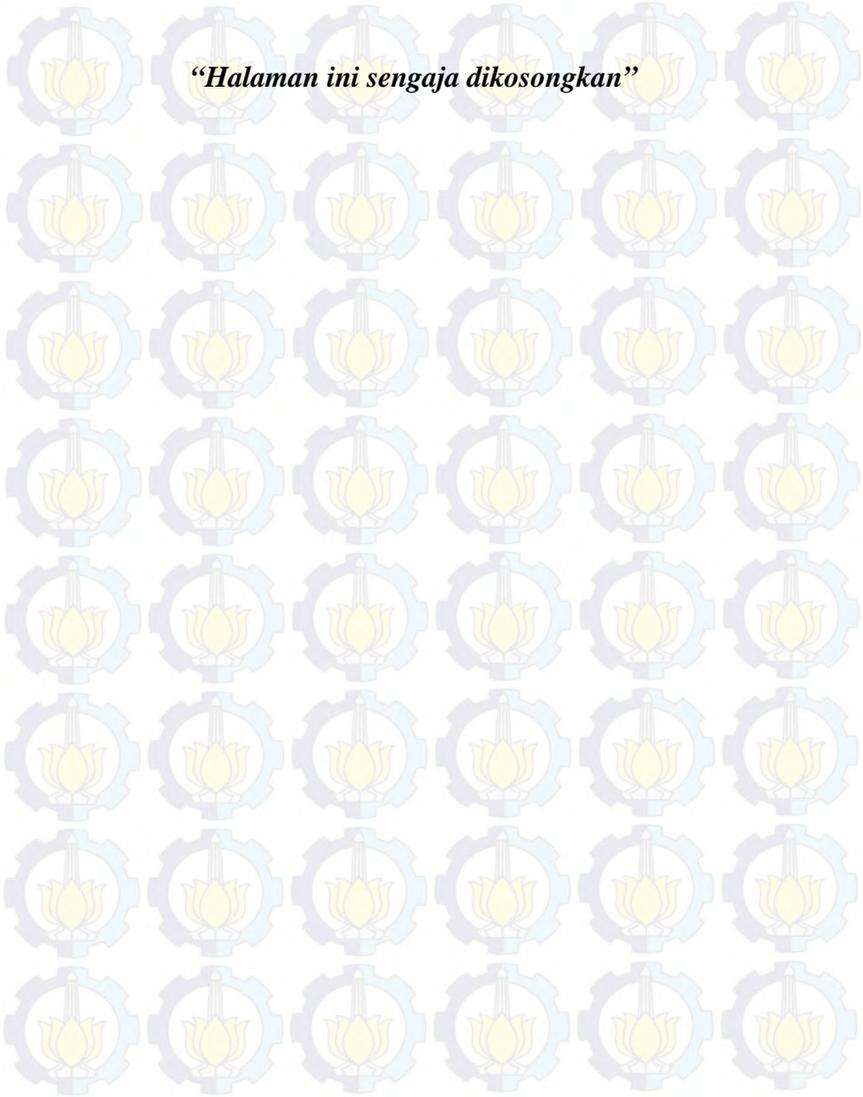
Berdasarkan hasil pengolahan data MT pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode MT mampu memetakan struktur geologi serta menampilkan zona *interest* berdasarkan kontras tahanan jenis material bawah permukaan secara baik serta sejalan dengan data pendukung.
2. Pada *line* JBS4 dan JBS8 menampilkan model hasil inversi 2D yang tidak jauh beda satu sama lain dengan ketebalan sedimen berkisar 4000 meter untuk cekungan Bantarkalong dan 3000 meter untuk cekungan Citanduy.
3. Berdasarkan hasil interpretasi hasil inversi 2D data MT dengan peta anomali gaya berat pada lapangan EM-4, diindikasikan adanya sedimentasi yang tebal pada cekungan Bantarkalong dan Citanduy dengan nilai resistivitas sedimen dominan sebesar 22-119 Ohm.meter.

#### **5.2 Saran**

1. Diperlukan data pendukung lebih banyak untuk memperdalam interpretasi pada lapangan penelitian.
2. Perlu dilakukan eksplorasi lebih pada daerah *interest* yang ditunjukkan dari hasil pengolahan data MT yaitu cekungan yang memiliki sedimen tebal.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## DAFTAR PUSTAKA

Aswo, W. 2011. **Pemodelan Sistem Panas Bumi dengan Metode Magnetotelurik di Daerah Arjuno-Wilerang Jawa Timur**. Depok: Universitas Indonesia

Bedrosian, P.A, Unsworth, M.J., and Wang, F., 2001. **Structure of The Altyn Tagh Fault and Daxue Shan from Magnetotelluric Surveys: Implications for Faulting Associated With The Rise of The Tibetan Plateau**, *Tectonics* v. 20, No. 4, p. 474-486.

Cagniard, L. 1953. **Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting**. *Geophysics* 18.

Daud, Y. 2010, **Diktat Kuliah : Metode Magnetotelluric (MT)**. Depok: Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.

Griffiths, D. J. 1999. **Introduction to Electrodynamics Third Edition**. New Jersey: Prentice Hall

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2011. **Peluang Investasi Migas di Indonesia**, <URL: <http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4586-peluang-investasi-migas-di-indonesia.html>>

Maxwell, J.C. 1864. "A **Dynamical Theory of the Electromagnetic Field**", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459-512 (1865). (This

article accompanied a December 8, 1864 presentation by Maxwell to the Royal Society.).

Mely, M. 2007. **Pemodelan Data Magnetotelurik Menggunakan Inversi 1 Dimensi Occam dan Inversi 2 Dimensi NLCG.**

Depok: Universitas Indonesia

Newman, G. A., Hoversten, M., Gasperikova, E., & Wannamaker, P. E. 2005. **3D Magnetotelluric Characterization of The Coso Geothermal Field.** California: Proceedings 30th Workshop on Geotermal Reservoir Engineering.

Simpson, F., & Bahr, K. 2005. **Practical Magnetotellurics.** United Kingdom: Cambridge University Press.

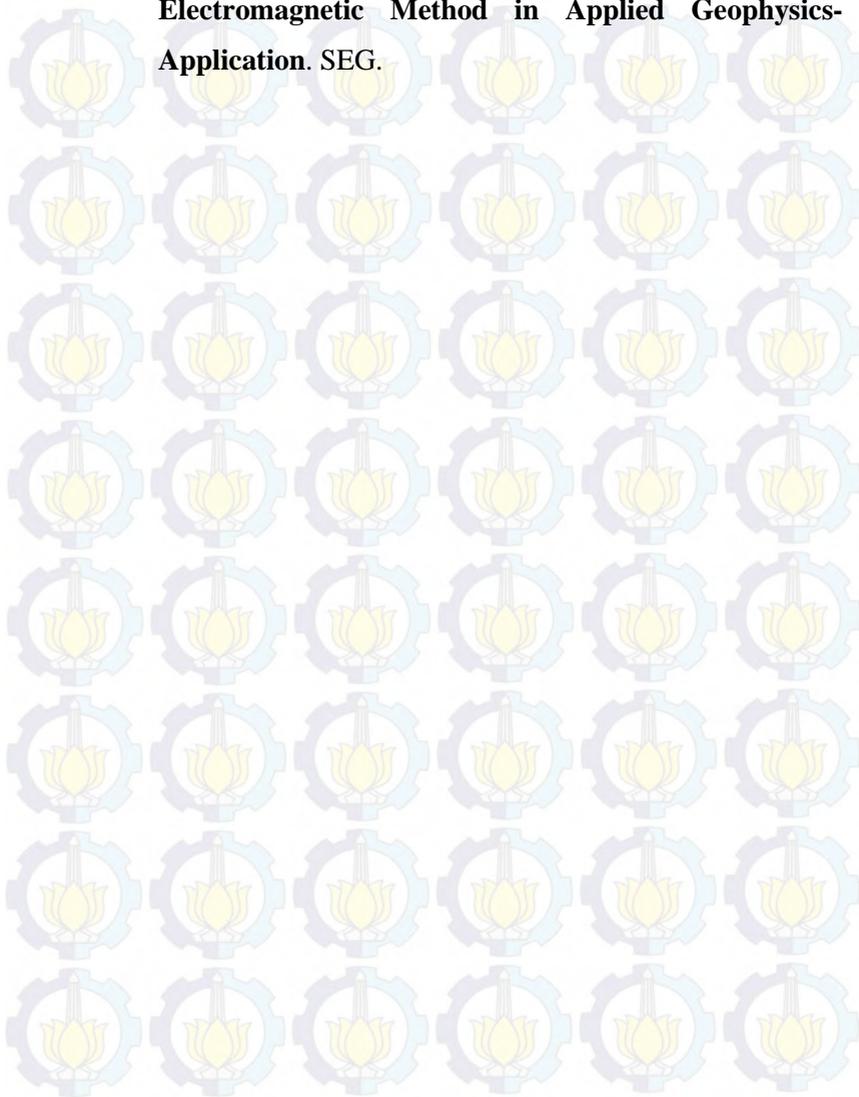
Suparno, S. 2007. **Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi.** Departemen Fisika-FMIPA, Universitas Indonesia.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. 2004. **Applied Geophysics Second Edition.** Cambridge University Press.

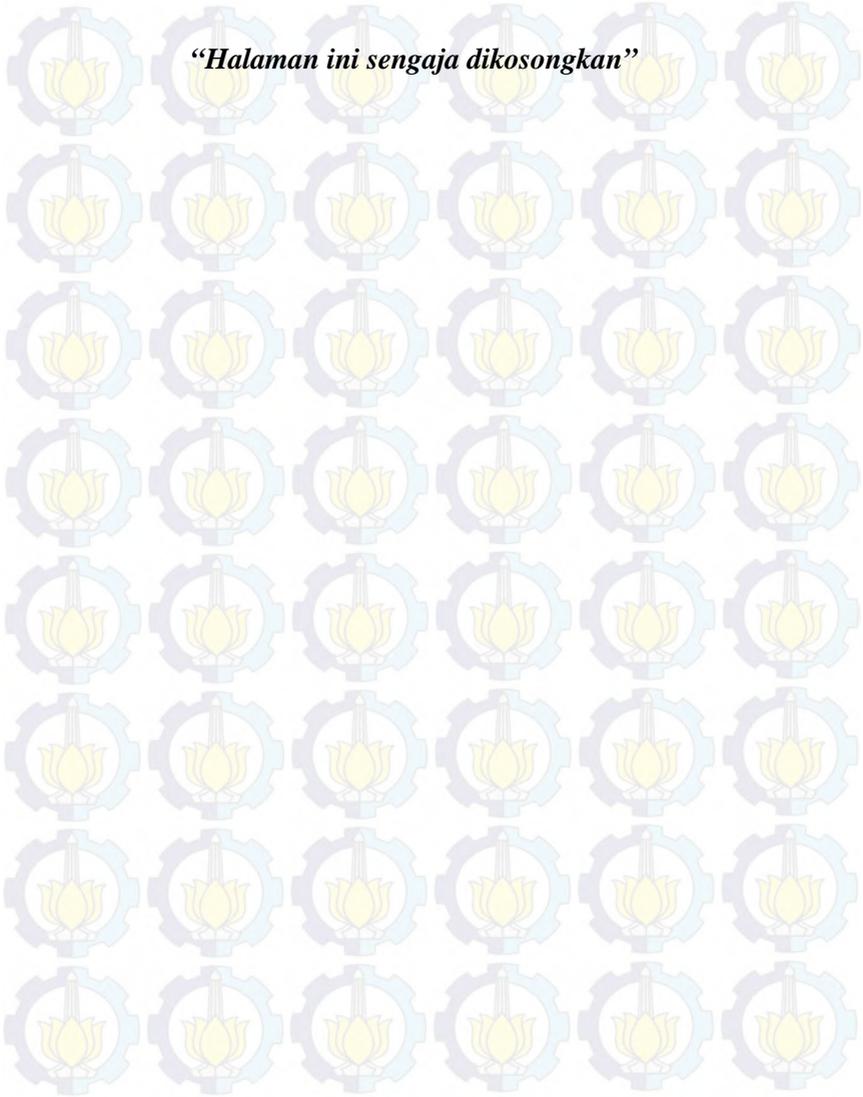
Tri, V. 2011. **Metode Magnetotelurik (MT) untuk Eksplorasi Panas Bumi Daerah Lili Sulawesi Barat dengan Data Pendukung Metode Gravitasi.** Depok: Universitas Indonesia

Unsworth, M. 2006. **Overview of Electromagnetic Exploration Methods.** Geophysics 424.

Vozoff, K. (1991). **The Magnetotelluric Method, Electromagnetic Method in Applied Geophysics-Application.** SEG.



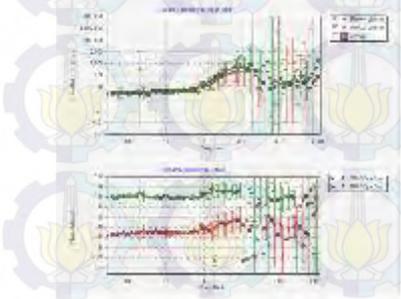
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



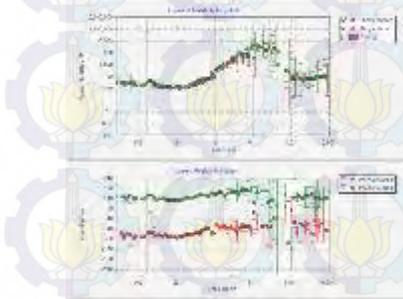
# LAMPIRAN I

## Kurva Sounding MT

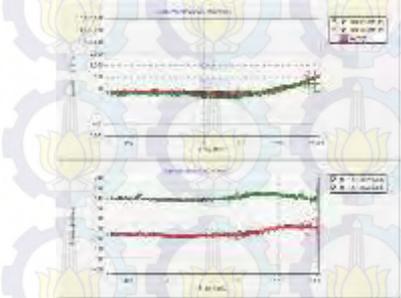
JBS4-01RR



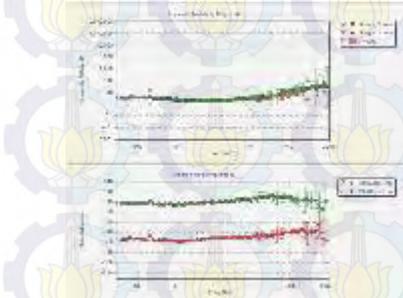
JBS1-13RSDRR



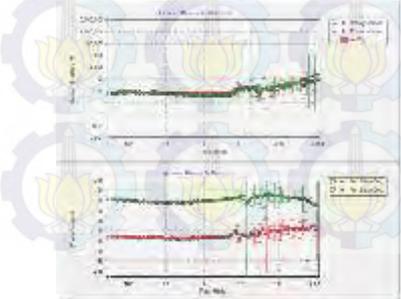
JBS4-02RSDSELF



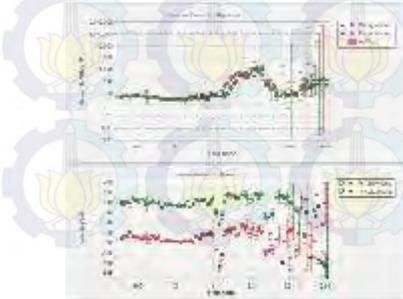
JBS4-04RR



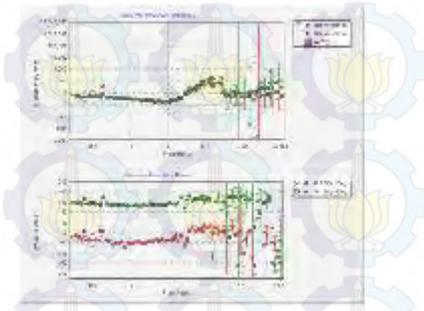
JBS4-03RSDRR



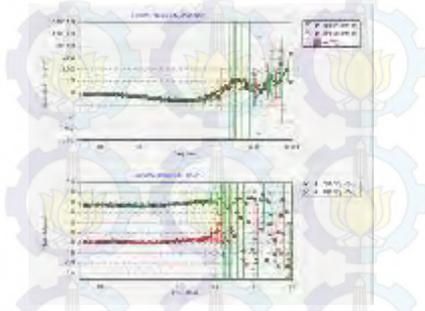
JBS4-05SELF



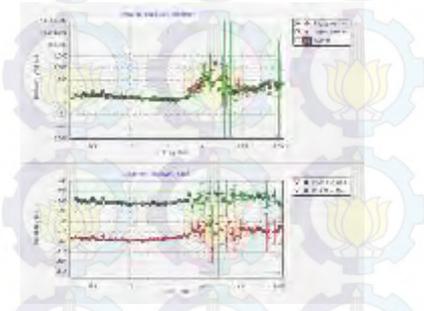
JBS4-06RSD2



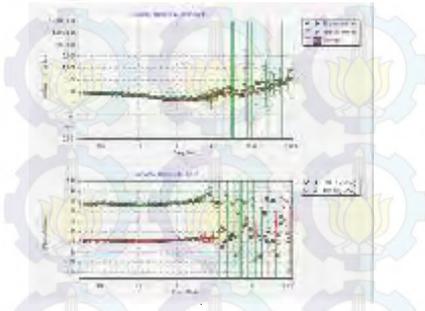
JBS4-09RR



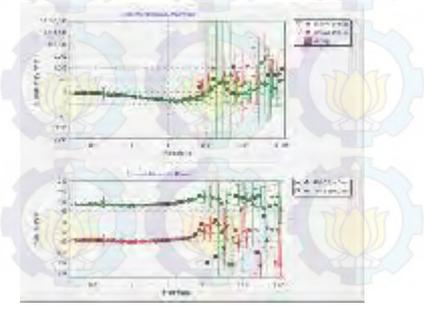
JBS4-07RR



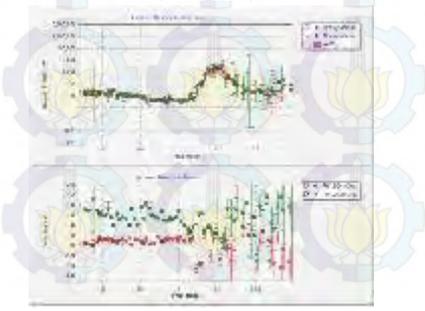
JBS4-10RR



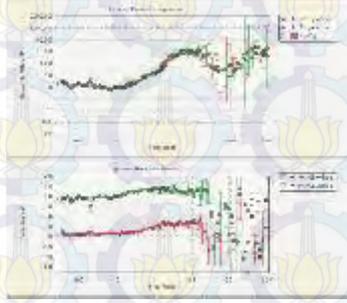
JBS4-08RR



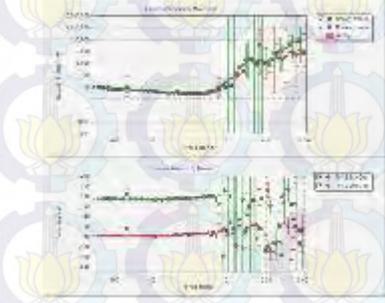
JBS4-11RSD



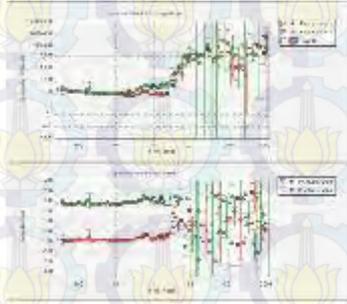
JBS4-12RSDSELF



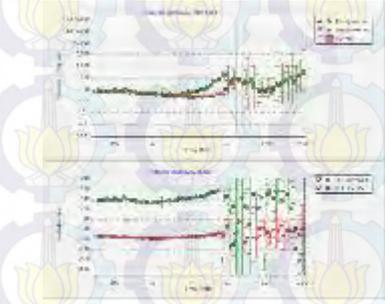
JBS4-15RR



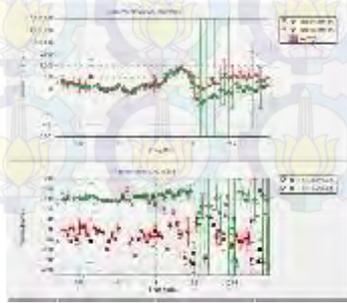
JBS4-13RR



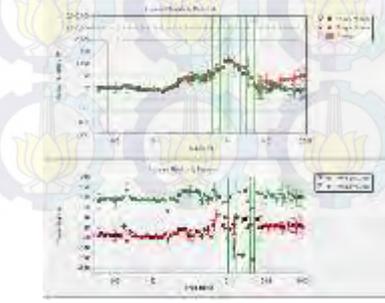
JBS4-16RR



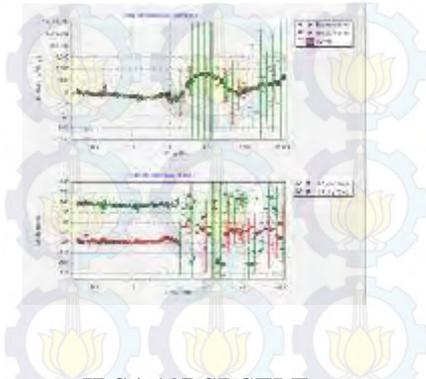
JBS4-14SELRSD



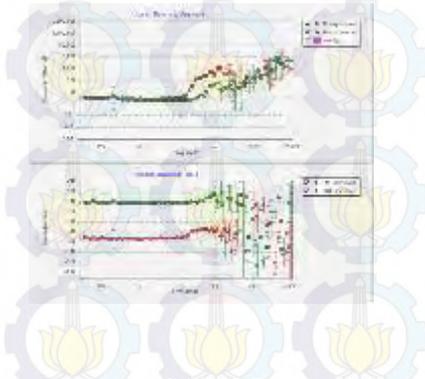
JBS4-17RR



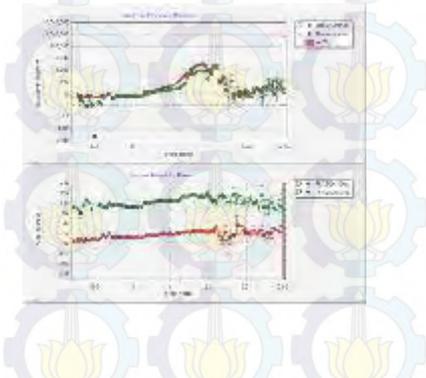
JBS4-18RR



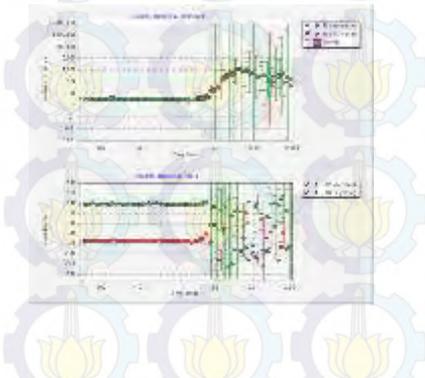
JBS4-21SELF



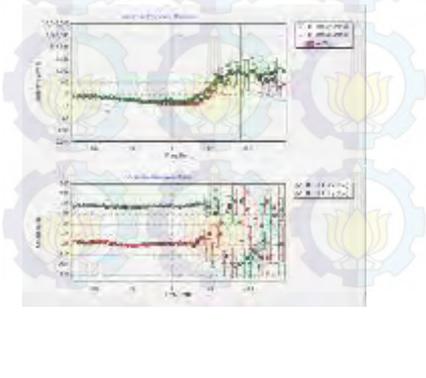
JBS4-19RSDSELF



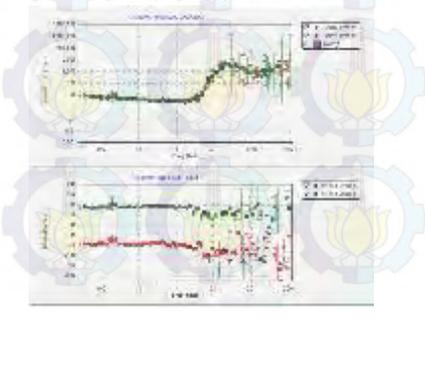
JBS4-22RR



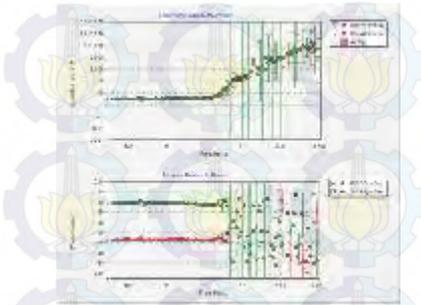
JBS4-20RSD



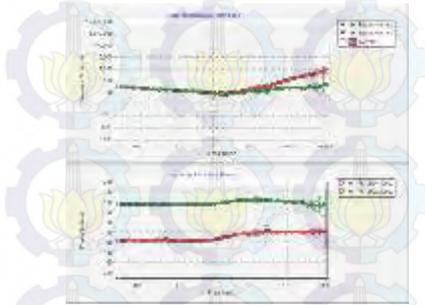
JBS4-23SELF



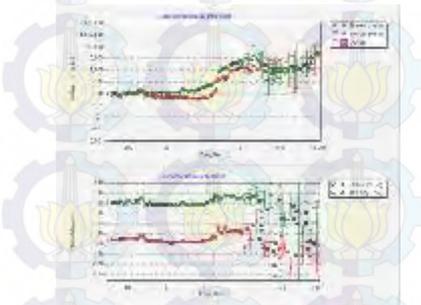
JBS4-24RR



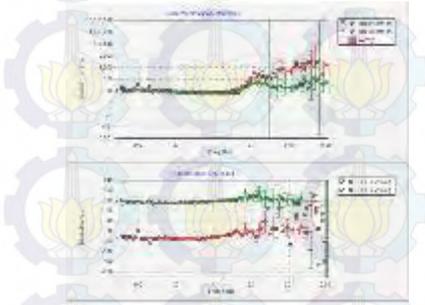
JBS4-27SELF



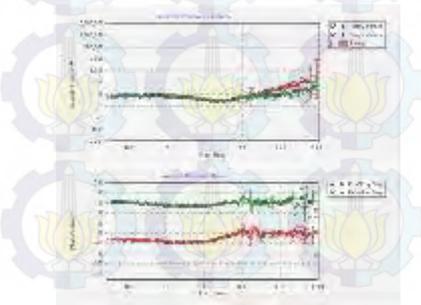
JBS4-25SELF



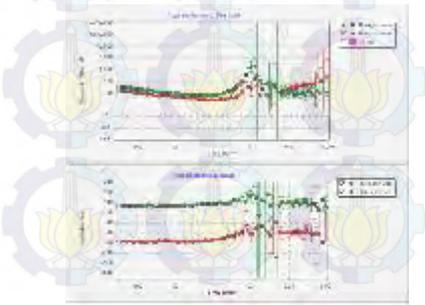
JBS4-28SELF



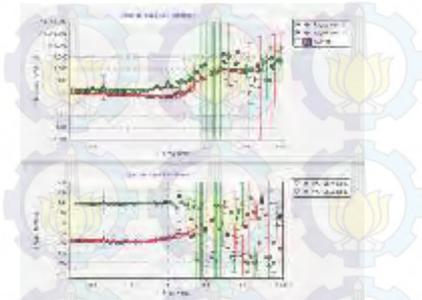
JBS4-26SELF



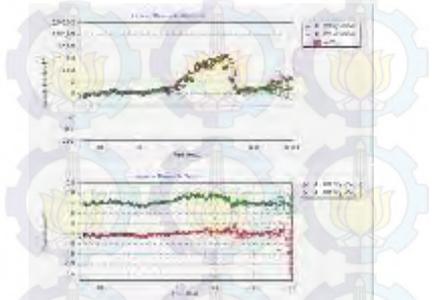
JBS4-29RR



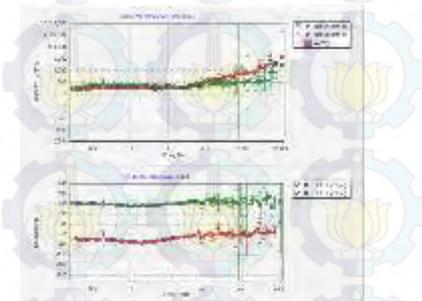
JBS4-30RR



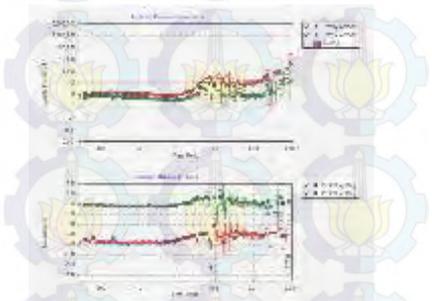
JBS4-33SELF



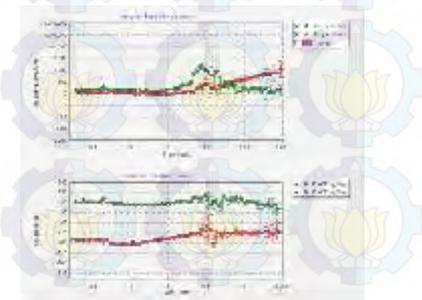
JBS4-31SELF



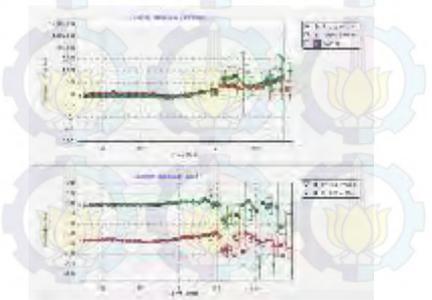
JBS4-34SELF



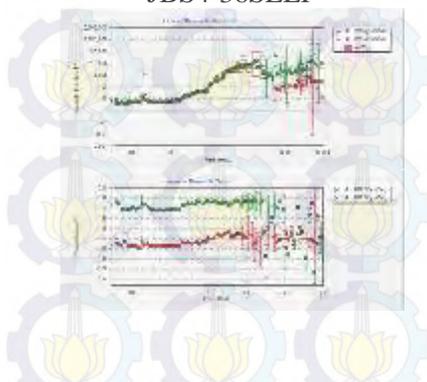
JBS4-32SELF



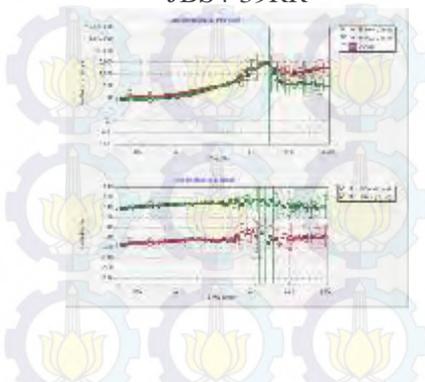
JBS4-35RSD



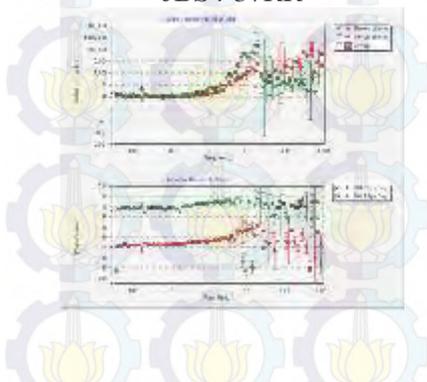
JBS4-36SELF



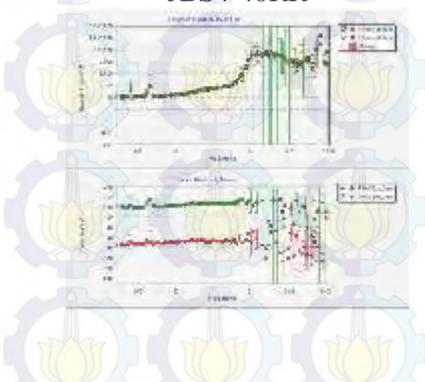
JBS4-39RR



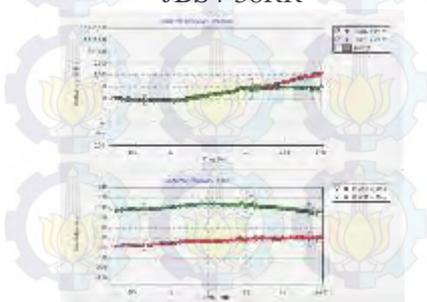
JBS4-37RR



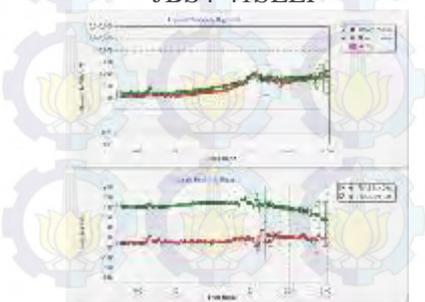
JBS4-40RR



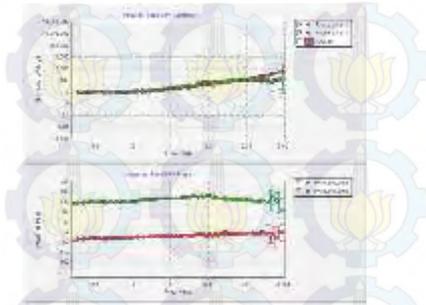
JBS4-38RR



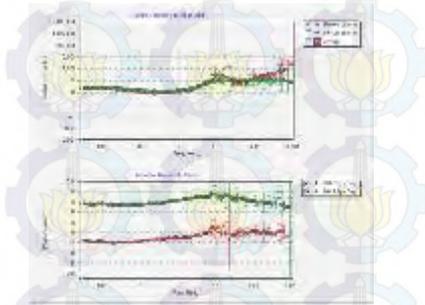
JBS4-41SELF



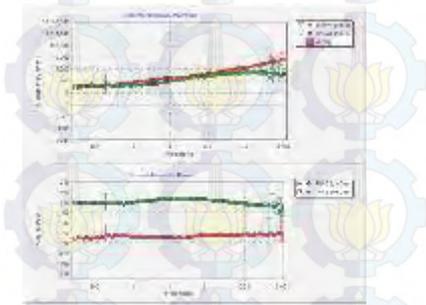
JBS4-42SELF



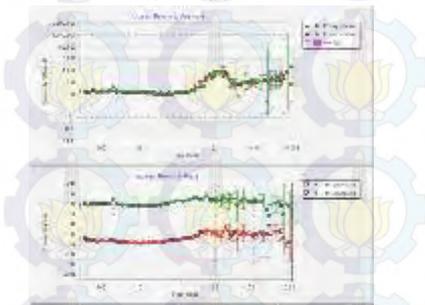
JBS4-45SELF



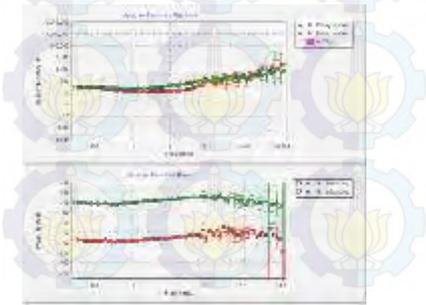
JBS4-43SELF



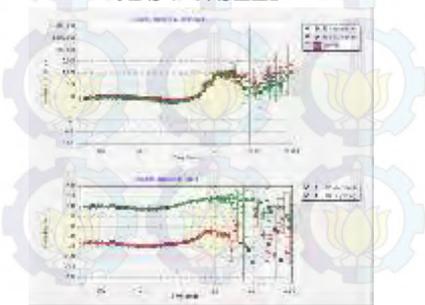
JBS4-46SELF



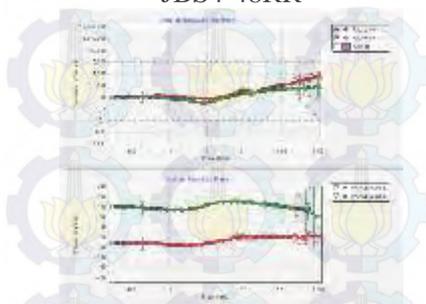
JBS4-44SELF



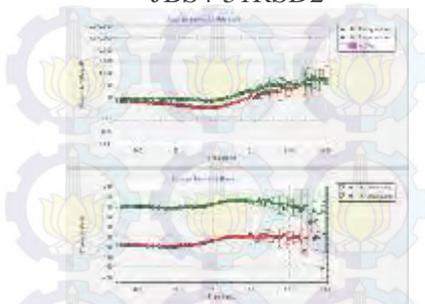
JBS4-47SELF



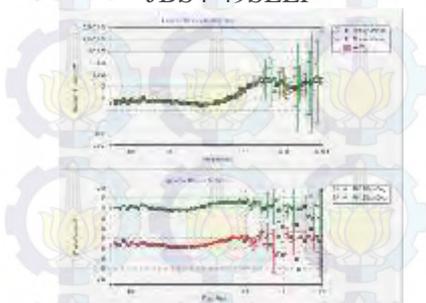
JBS4-48RR



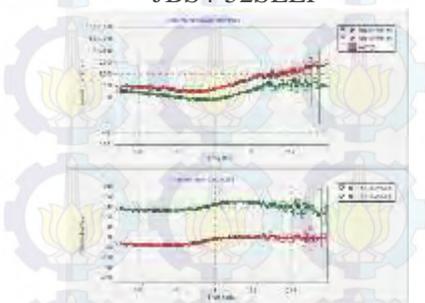
JBS4-51RSD2



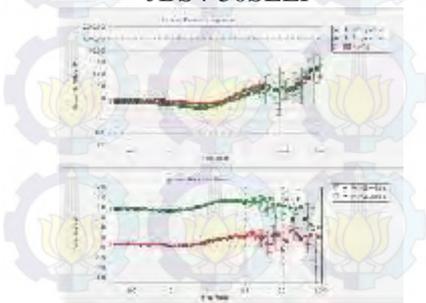
JBS4-49SELF



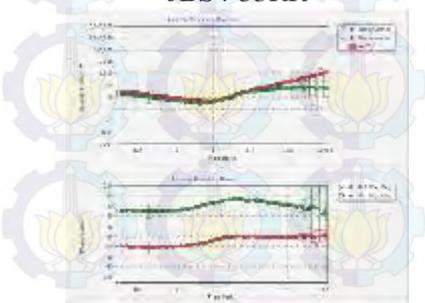
JBS4-52SELF



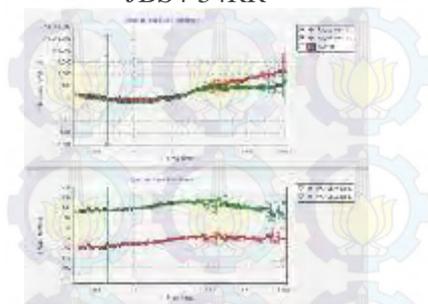
JBS4-50SELF



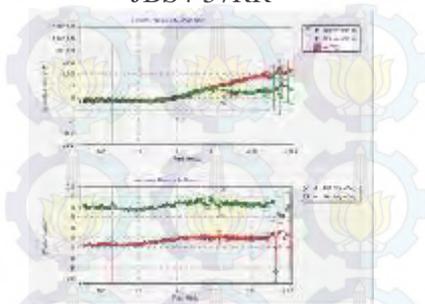
JBS4-53RR



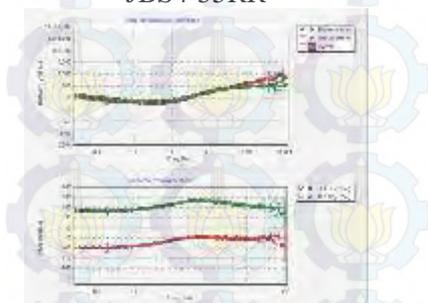
JBS4-54RR



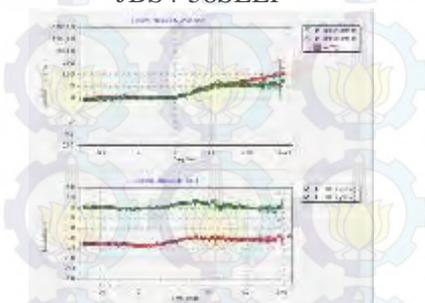
JBS4-57RR



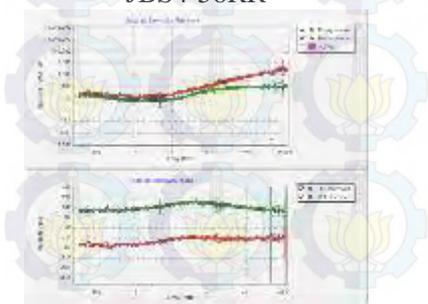
JBS4-55RR



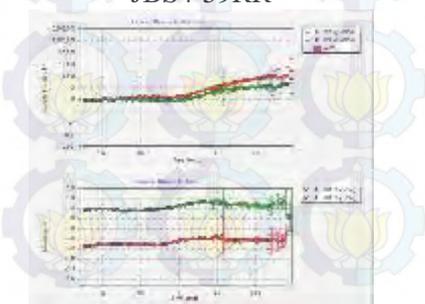
JBS4-58SELF



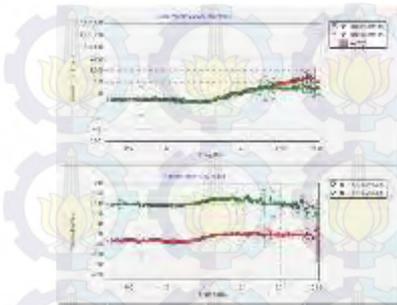
JBS4-56RR



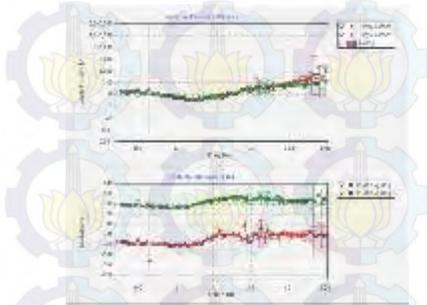
JBS4-59RR



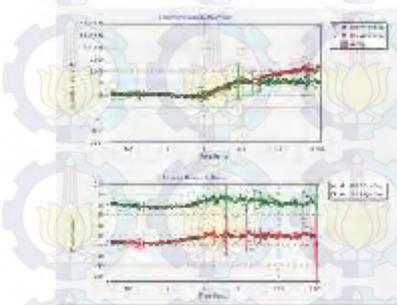
JBS4-60RR



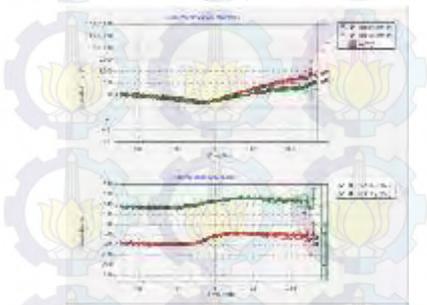
JBS4-63RR



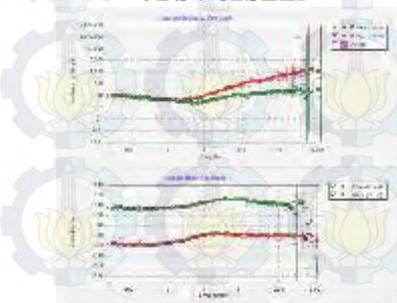
JBS4-61RR



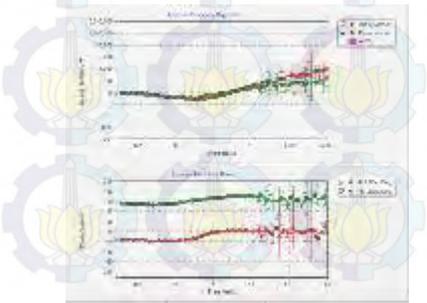
JBS4-64RR



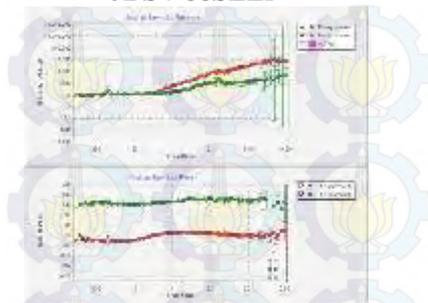
JBS4-62SELF



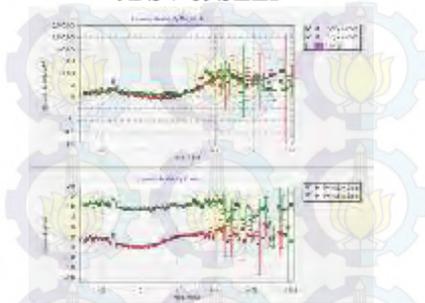
JBS4-65SELF



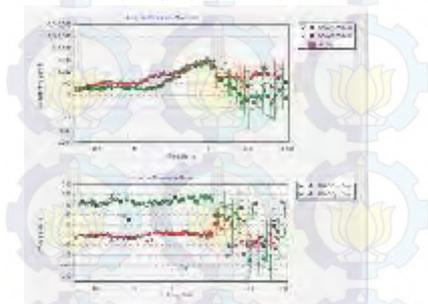
JBS4-66SELF



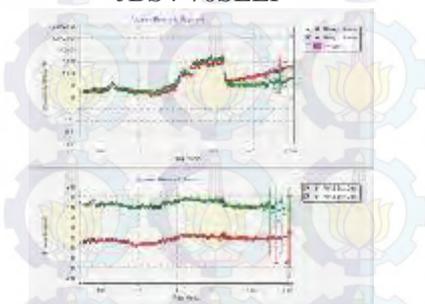
JBS4-69SELF



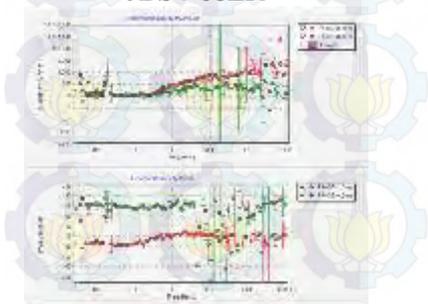
JBS4-67SELFERSD



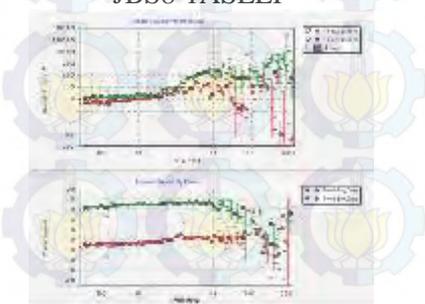
JBS4-70SELF



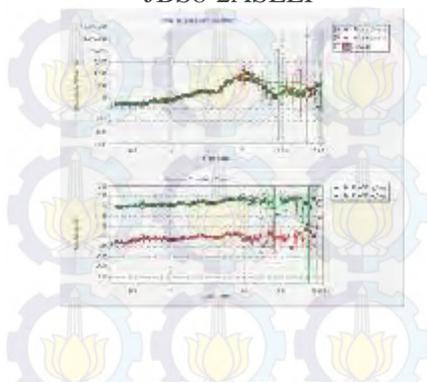
JBS4-68LR



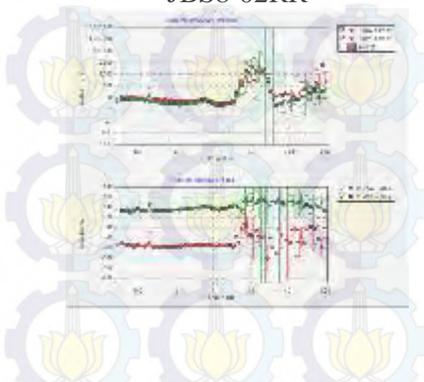
JBS8-1ASELF



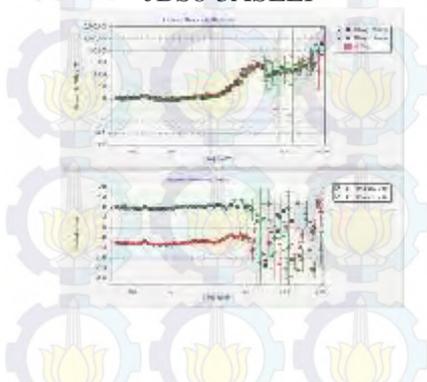
JBS8-2ASELF



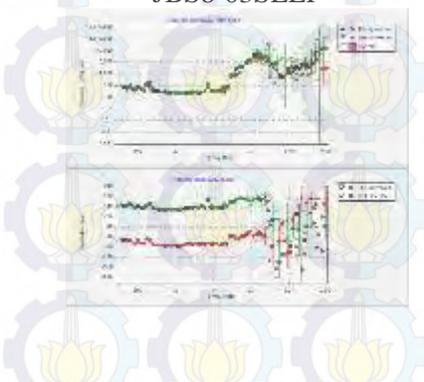
JBS8-02RR



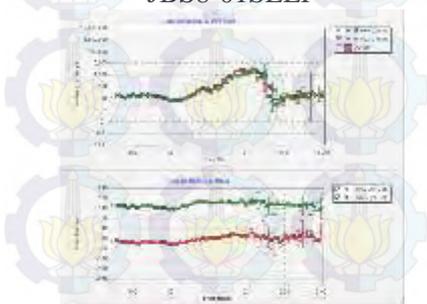
JBS8-3ASELF



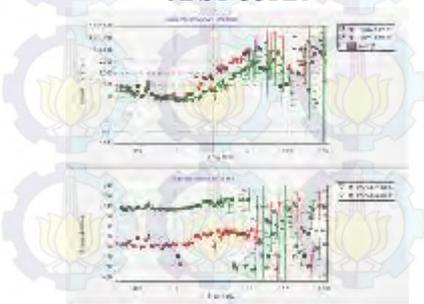
JBS8-03SELF



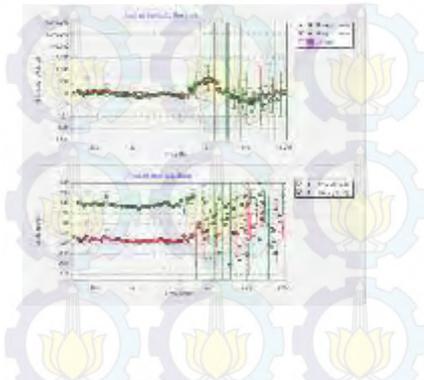
JBS8-01SELF



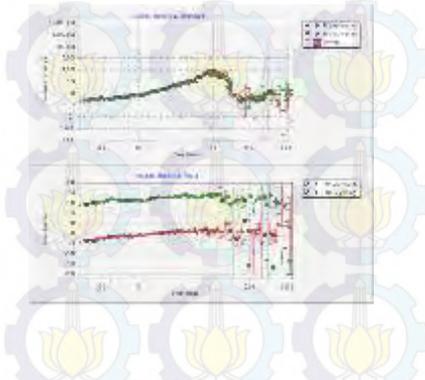
JBS1-33RR



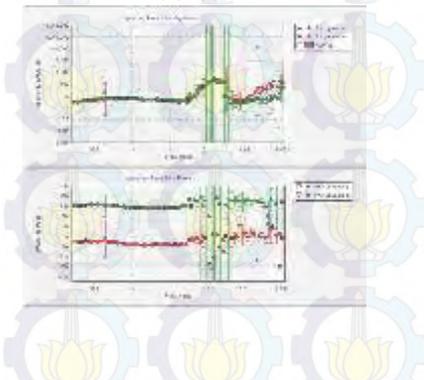
JBS8-04RR



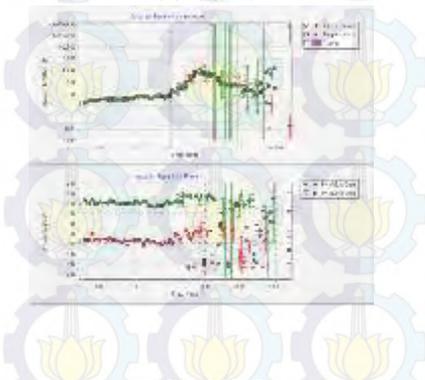
JBS8-07



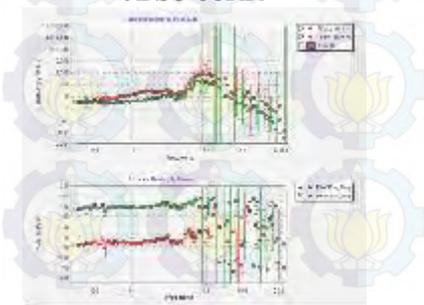
JBS8-05RR



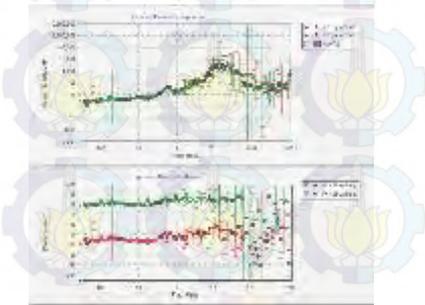
JBS8-08RSD



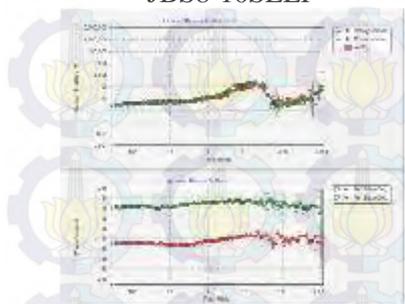
JBS8-06RR



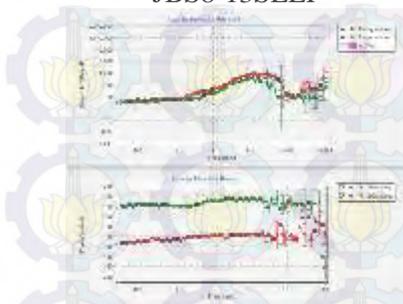
JBS8-09RR



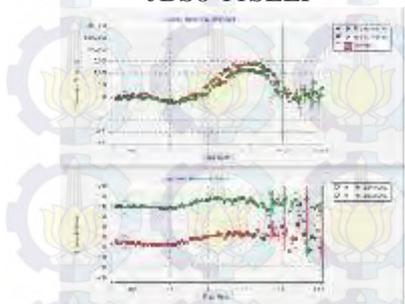
JBS8-10SELF



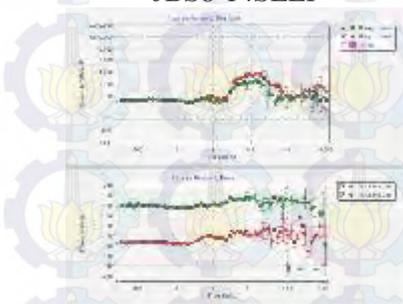
JBS8-13SELF



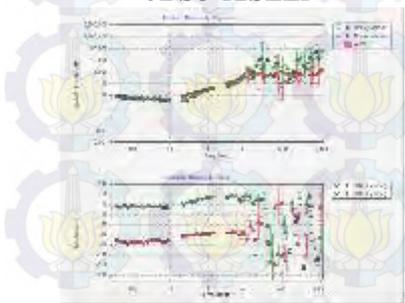
JBS8-11SELF



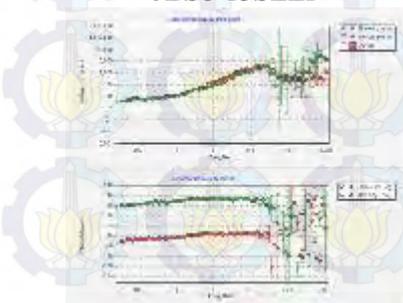
JBS8-14SELF



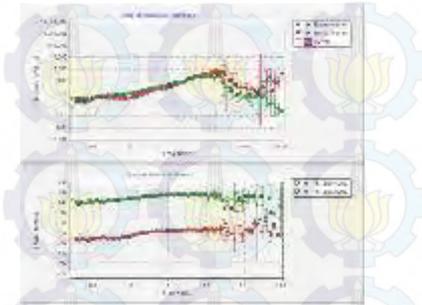
JBS8-12SELF



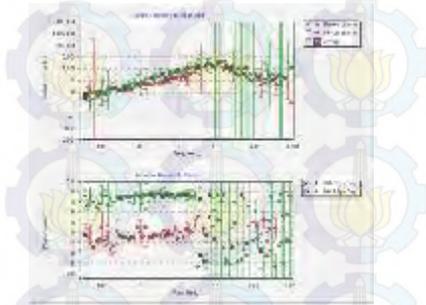
JBS8-15SELF



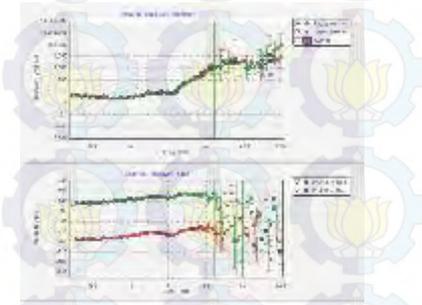
JBS8-16SELF



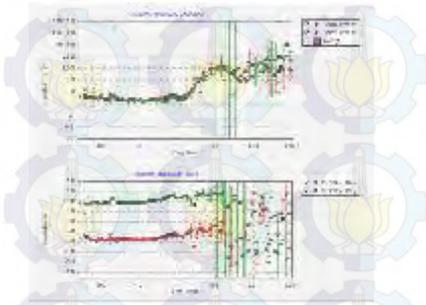
JBS8-19RR



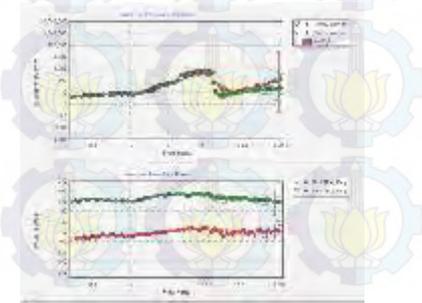
JBS8-17SELF



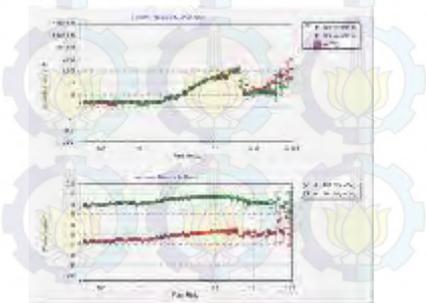
JBS8-20RR



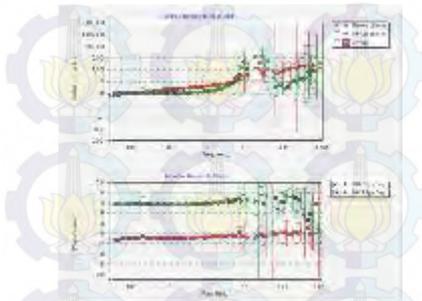
JBS8-18SELF



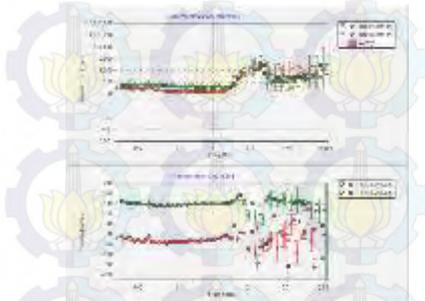
JBS8-21SELF



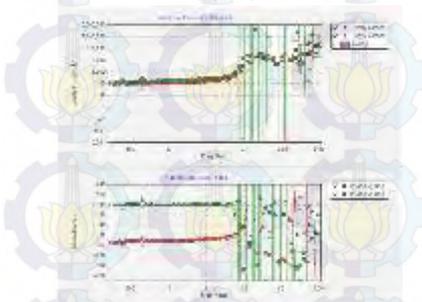
JBS8-22RR



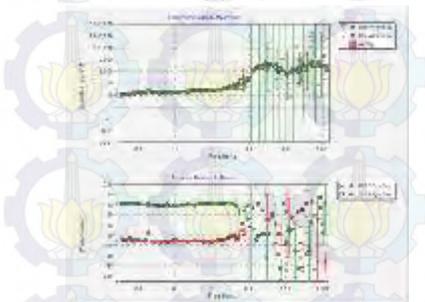
JBS8-25SELF



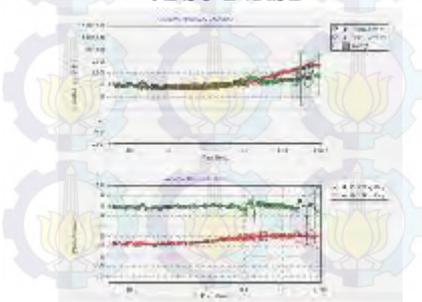
JBS8-23RR



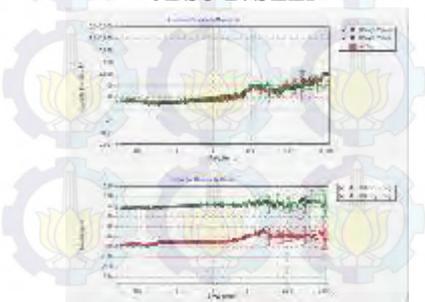
JBS8-26RR



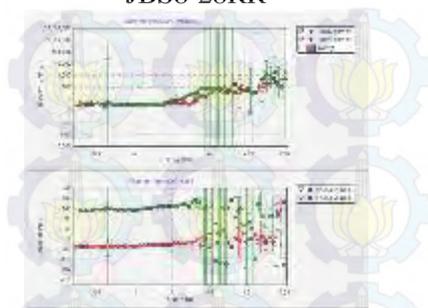
JBS8-24RSD



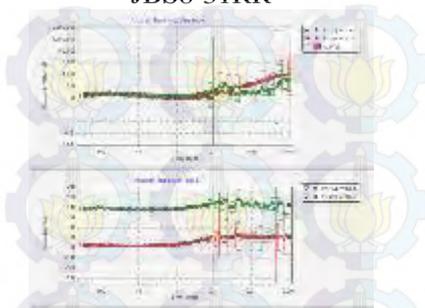
JBS8-27SELF



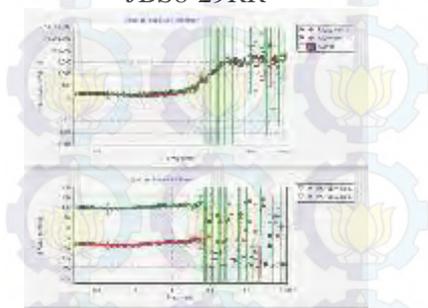
JBS8-28RR



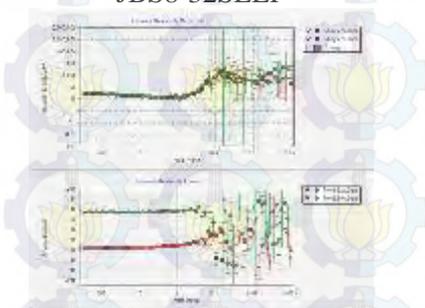
JBS8-31RR



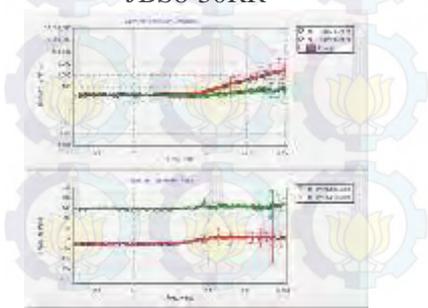
JBS8-29RR



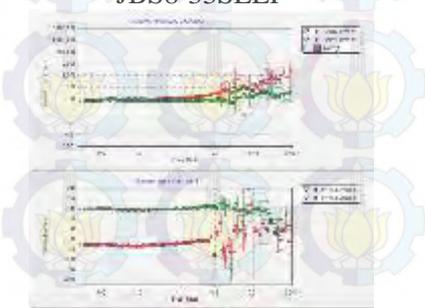
JBS8-32SELF



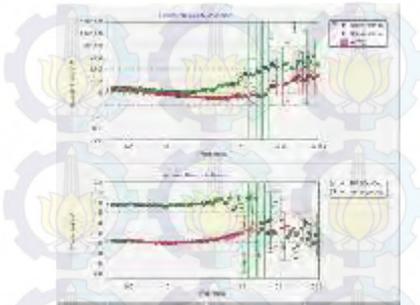
JBS8-30RR



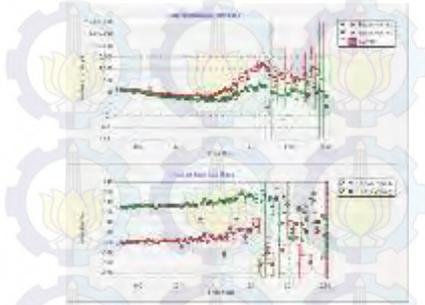
JBS8-33SELF



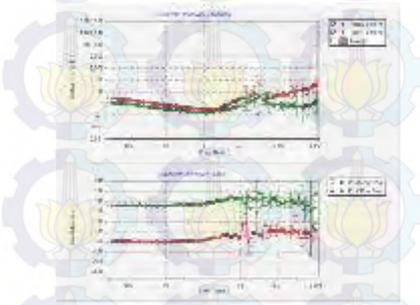
JBS8-34SELF



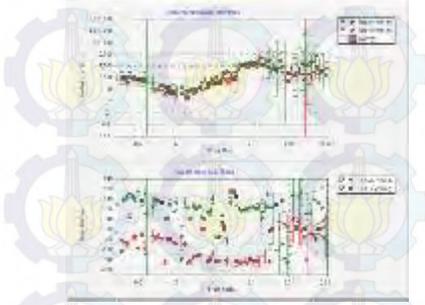
JBS8-37SELF



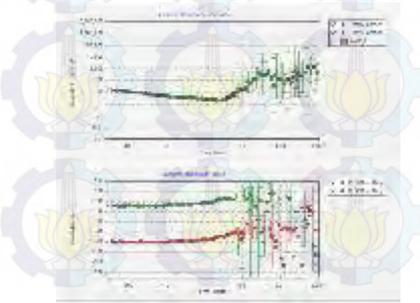
JBS8-35SELF



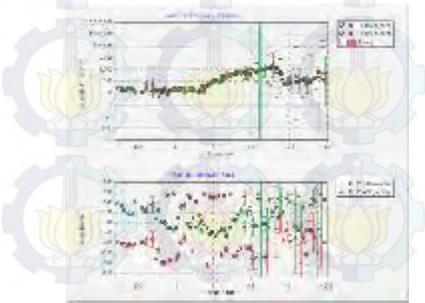
JBS8-38RSD



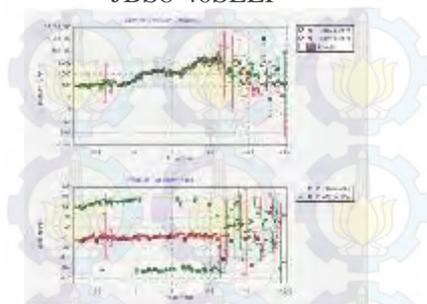
JBS8-36SELF



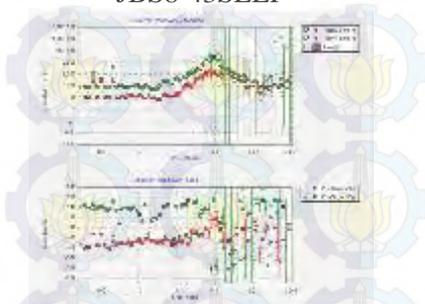
JBS8-39RSD



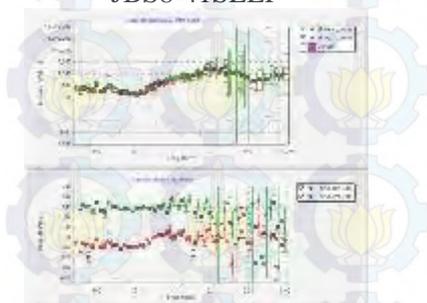
JBS8-40SELF



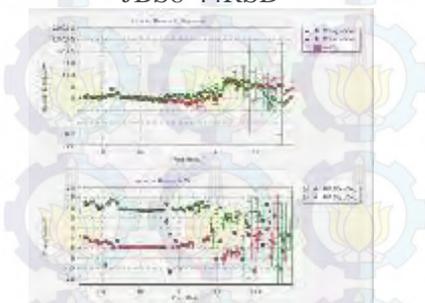
JBS8-43SELF



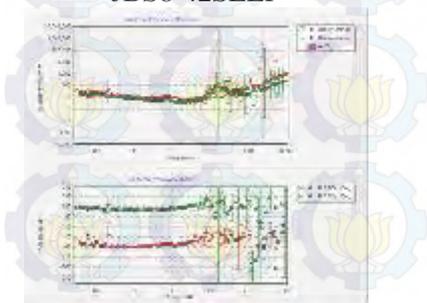
JBS8-41SELF



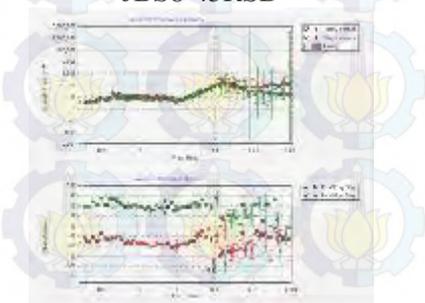
JBS8-44RSD



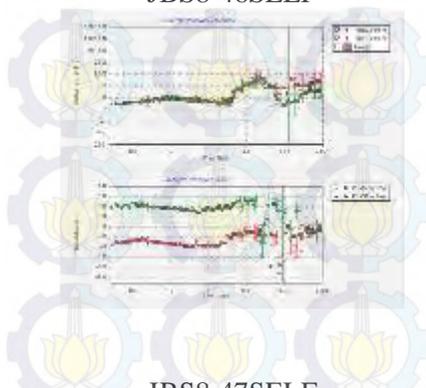
JBS8-42SELF



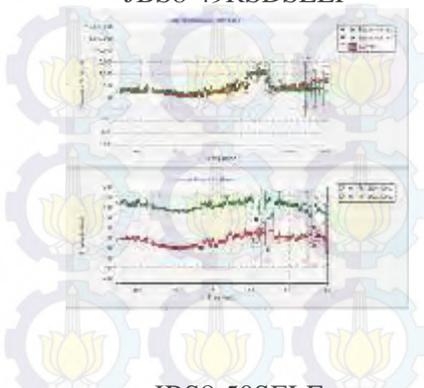
JBS8-45RSD



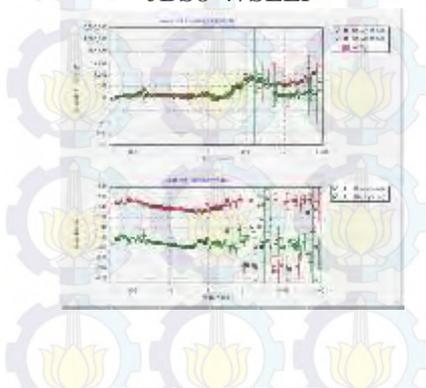
JBS8-46SELF



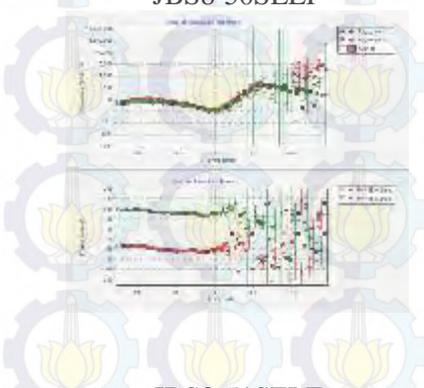
JBS8-49RSDSELF



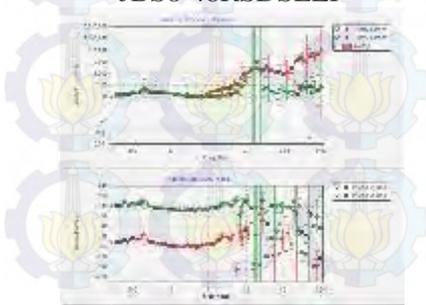
JBS8-47SELF



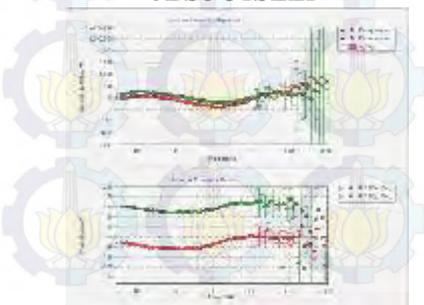
JBS8-50SELF



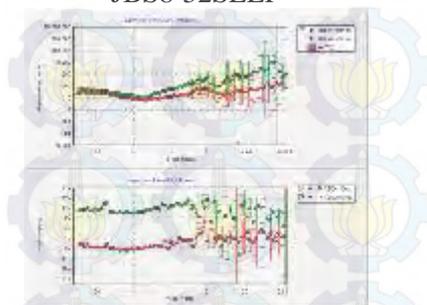
JBS8-48RSDSELF



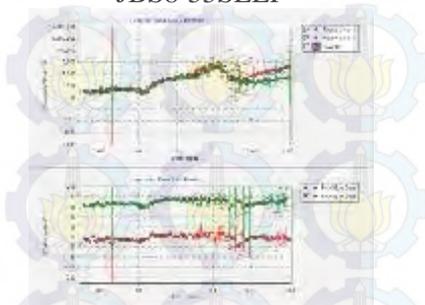
JBS8-51SELF



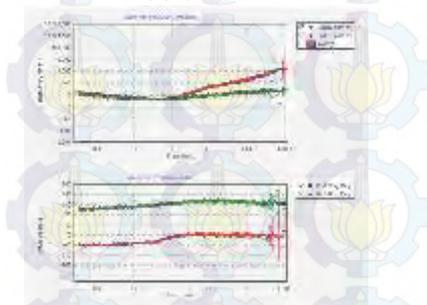
JBS8-52SELF



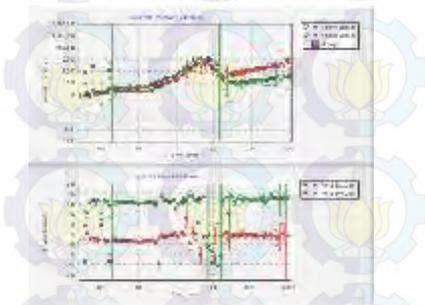
JBS8-55SELF



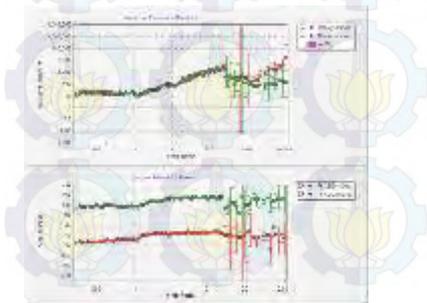
JBS8-53SELF



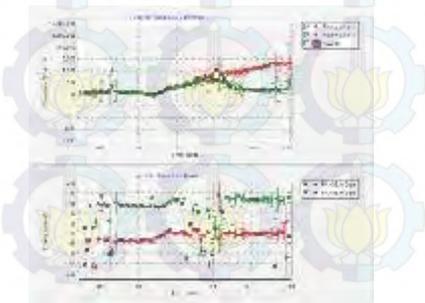
JBS8-56L



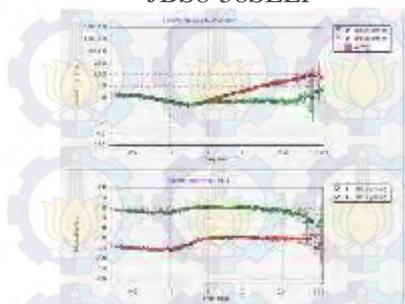
JBS8-54SELF



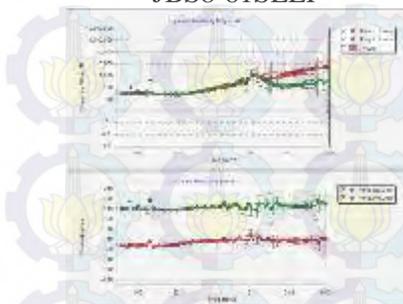
JBS8-57LR



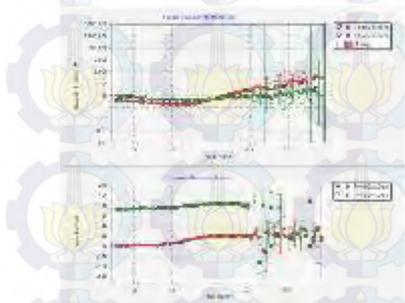
JBS8-58SELF



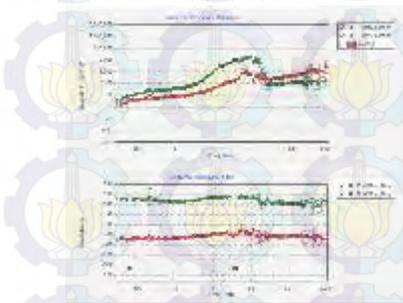
JBS8-61SELF



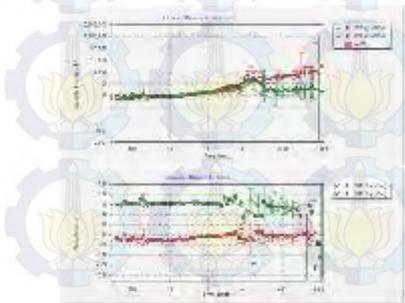
JBS8-59SELF



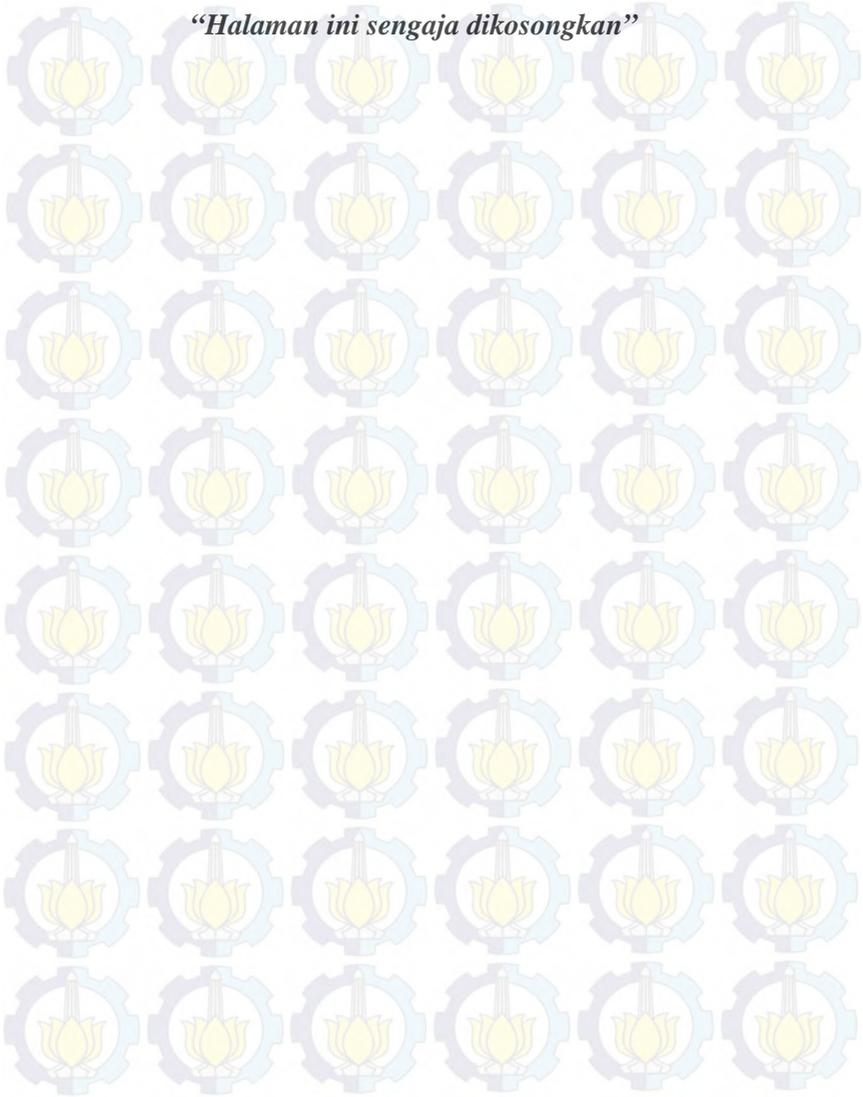
JBS8-62SELF



JBS8-60SELF



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## LAMPIRAN II

### Perhitungan *Robust Processing*

Data yang diperoleh pada pengukuran menggunakan metode MT berupa medan listrik dan magnet. Oleh karena itu, pada persamaan tersebut,  $E_x$ , dan  $E_y$  berlaku sebagai variabel terikat,  $H_x$ , dan  $H_y$ , sebagai variabel bebas.

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{t1} + \beta_2 X_{t2} + \dots + \beta_{p-1} X_{t,p-1} + \varepsilon_t \dots (1)$$

dimana

$Y_t$  adalah variabel tidak bebas untuk pengamatan ke- $i$ , untuk  $i=1,2,\dots,n$ .

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1}$  adalah parameter regresi

$X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{t,p-1}$  adalah variabel bebas

Persamaan (1) dapat menjadi bentuk persamaan fungsi error untuk  $p=3$ , sehingga menjadi sebagai berikut:

$$\varepsilon_t = Y_t - \beta_0 - \beta_1 X_{t1} - \beta_2 X_{t2} \dots \dots \dots (2)$$

Solusi regresi linear dengan metode kuadrat terkecil adalah dengan meminimalisir kuadrat dari fungsi error tersebut.

$$\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \text{minimal} \dots \dots \dots (3)$$

Suatu fungsi akan memiliki nilai minimum salah satunya ketika berada pada titik kritis, yang secara matematis nilai turunan pertamanya adalah nol. Fungsi error tersebut diturunkan secara berturut-turut terhadap  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ , yaitu sebagai berikut

$$n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n X_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n X_{i2} = \sum_{i=1}^n Y_i \dots \dots \dots (4)$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n X_{i1} + \beta_1 \sum_{i=1}^n (X_{i1})^2 + \beta_2 \sum_{i=1}^n X_{i1} X_{i2} = \sum_{i=1}^n Y_i Y_{i1} \dots (5)$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n X_{i2} + \beta_1 \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} + \beta_2 \sum_{i=1}^n (X_{i2})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i Y_{i2} \quad (6)$$

Untuk memperoleh nilai parameter regresi, persamaan (4), (5), dan (6) dapat diselesaikan menggunakan metode matriks. Dimana, dalam bentuk matriks persamaan tersebut menjadi sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2} \\ \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n (X_{i1})^2 & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} \\ \sum_{i=1}^n X_{i2} & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} & \sum_{i=1}^n (X_{i2})^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i Y_{i1} \\ \sum_{i=1}^n Y_i Y_{i2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dengan persamaan matriks tersebut kita bisa mendapatkan nilai  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ , yang mana dalam fungsi transfer metode magnetotelurik merupakan impedansi.

Telah terbukti bahwa penggunaan metode *robust regression* memberikan hasil yang lebih stabil dan meyakinkan meskipun terdapat sejumlah *noise* pada data dari pada metode kuadrat terkecil biasa. Dalam metode *robust regression* dikenal adanya istilah *breakdown point*, yaitu jumlah terkecil dari eror kasar yang dapat menyebabkan kesalahan penaksiran karenanya. *Breakdown point* dari metode kuadrat terkecil adalah nol. Metode *robust* yang sering digunakan dalam MT adalah Huber M-estimator yang memiliki *breakdown point* sebesar 30%.

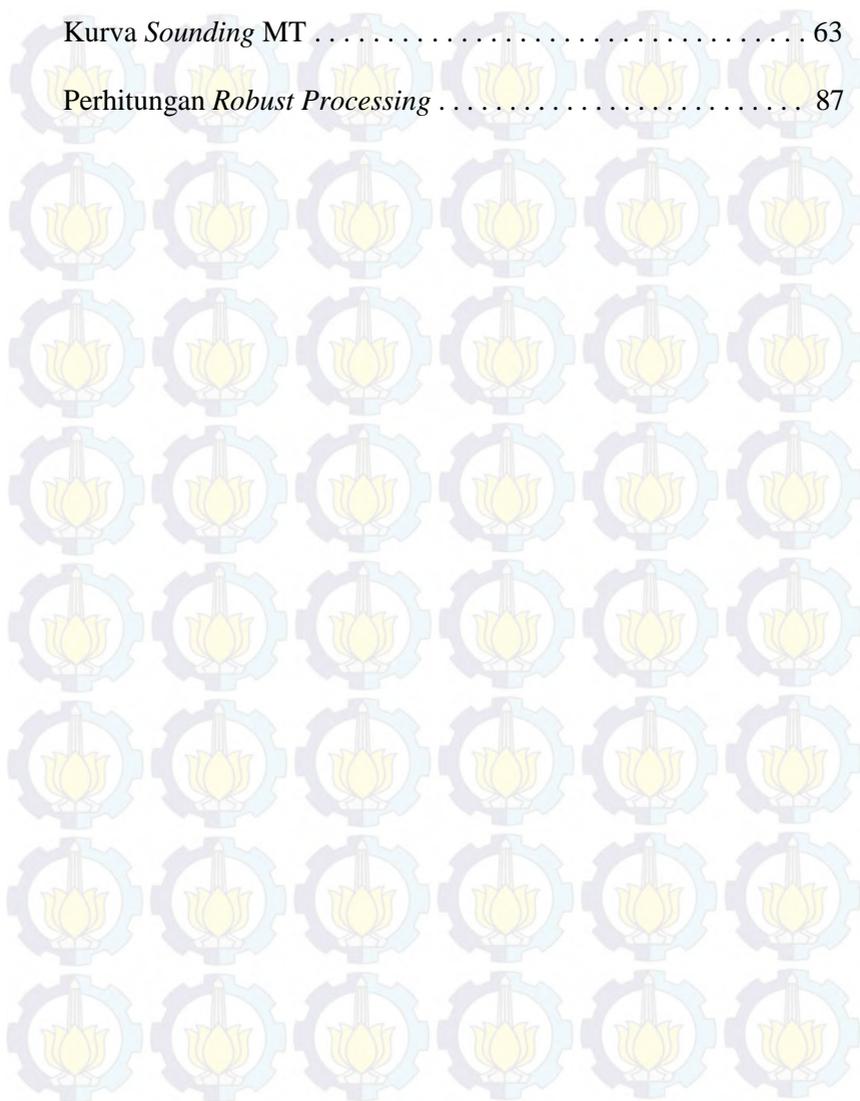
M-Estimator ini dilakukan dengan cara memodifikasi error function dan turunannya. Dimana untuk metode kuadrat terkecil dilakukan dengan cara menurunkan kuadrat dari fungsi error, sedangkan M-estimator dilakukan dengan cara menurunkan fungsi error dibagi nilai taksiran *robust*. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{e_i}{s}\right) = \sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{x_i - \beta_1}{s}\right) = \text{minimal} \dots (8)$$

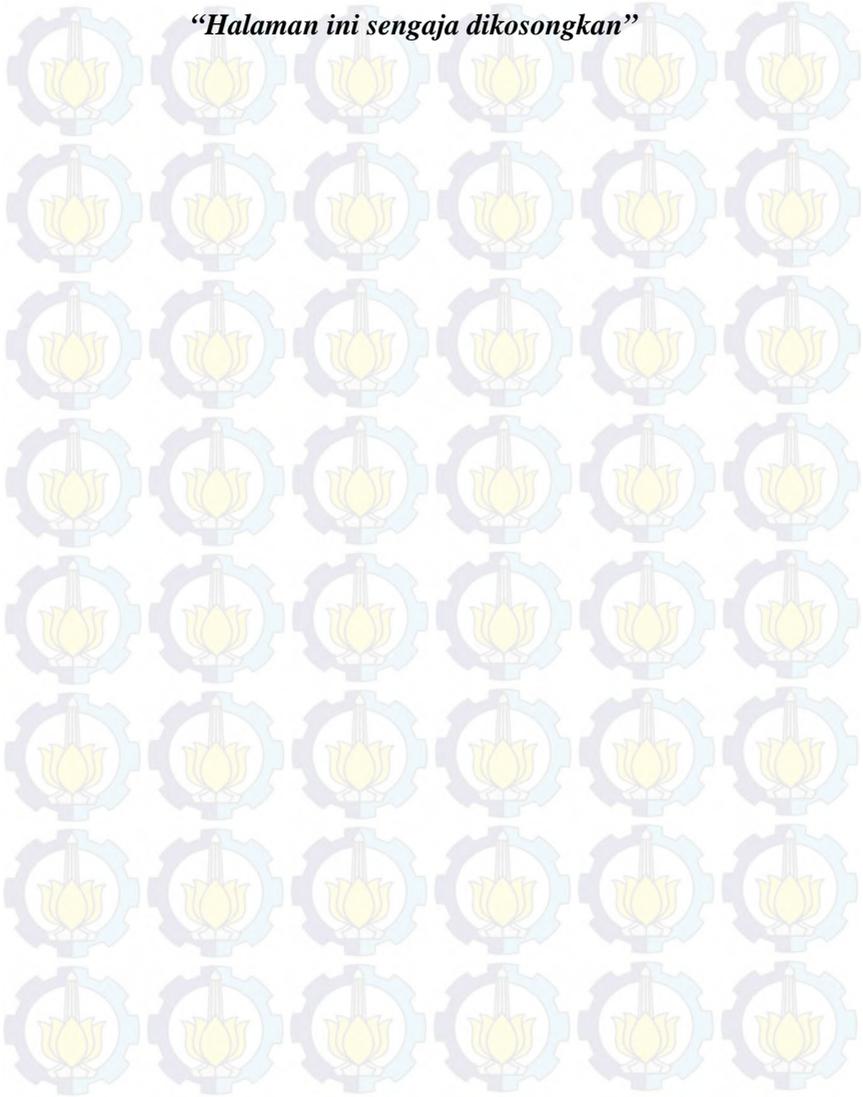
Dimana  $s$  adalah nilai taksiran *robust*. Untuk setiap metode *robust*, nilai  $s$  berbeda-beda.

## DAFTAR LAMPIRAN

Kurva <i>Sounding</i> MT .....	63
Perhitungan <i>Robust Processing</i> .....	87



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## BIOGRAFI PENULIS



**Muhammad Iqbal Muslim Wachisbu**, lahir di Kota Pahlawan, Surabaya pada tanggal 5 Agustus 1992. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dan memulai pendidikan formalnya di SDN Kedungwonokerto 1 kemudian beranjak ke pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Krian dan selanjutnya mengenyam pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Krian. Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan menimba ilmu di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya di Jurusan Fisika FMIPA dengan bidang minat Fisika Bumi. Selama kuliah, penulis aktif tidak hanya di dunia akademik melainkan juga aktif di dunia non akademik. Penulis pernah menjadi pengurus AAPG-ITS SC (*ITS Student Chapter American Association of Petroleum Geologist*), Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS, Lembaga Dakwah Jurusan Forum Studi Islam Fisika (LDJ FOSIF) ITS, dan pernah mengemban amanah sebagai Ketua Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMASIKA) ITS. Penulis juga pernah beberapa kali mengikuti ajang keilmiahan seperti Pekan Keilmiahan Mahasiswa (PKM) dan pernah mendapatkan pendanaan dari DIKTI. Untuk keperluan berdiskusi, penulis dapat dihubungi di email [iqbalmuslim16@gmail.com](mailto:iqbalmuslim16@gmail.com).