



TUGAS AKHIR - RF184838

**EVALUASI VOLUME TIMBUNAN BERDASARKAN
PEMODELAN GEOSTATISTIK 3D DATA RESISTIVITAS 2D
(STUDI KASUS: KECAMATAN MANYAR, KABUPATEN
GRESIK)**

AISYAH FAIRUZ SALSABILA
0341154000001

DOSEN PEMBIMBING:
Dr. WIDYA UTAMA, DEA.

Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RF184838

**EVALUASI VOLUME TIMBUNAN BERDASARKAN
PEMODELAN GEOSTATISTIK 3D DATA RESISTIVITAS 2D
(STUDI KASUS: KECAMATAN MANYAR, KABUPATEN
GRESIK)**

AISYAH FAIRUZ SALSABILA
0341154000001

DOSEN PEMBIMBING:
Dr. WIDYA UTAMA, DEA.

Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



UNDERGRADUATE THESIS - RF184838

**BACKFILL VOLUME EVALUATION BASED ON 3D
GEOSTATISTICAL MODEL OF 2D RESISTIVITY DATA
(CASE STUDY: KECAMATAN MANYAR, KABUPATEN
GRESIK)**

**AISYAH FAIRUZ SALSABILA
0341154000001**

**ADVISOR
Dr. WIDYA UTAMA, DEA**

**Geophysical Engineering Department
Faculty of Civil, Environment and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan




LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh

Nama : Aisyah Fairuz Salsabila
NRP : 0341154000001
Departemen : Teknik Geofisika
Judul : Evaluasi Volume Timbunan Berdasarkan
Pemodelan Geostatistik 3D Data Resistivitas 2D (Studi Kasus: Kecamatan
Manyar, Kabupaten Gresik)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 16 Juli 2019

1. 
.....
Dr. Widya Utama, DEA
NIP. 19611024 198803 1 001
(Pembimbing)
2. 
.....
Dr. Ir. Amien Widodo, M.Si
NIP. 19591010 198803 1 001
(Penguji 1)
3. 
.....
M. Haris Miftakhul Fajar, S.T., M. Eng.
NIP. 19890208 201803 1 001
(Penguji 2)

Mengetahui :

Kepala Laboratorium Petrofisika
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Wien Estari, S. T., M. T.
NIP. 19811002 201212 2 003

Halaman ini sengaja dikosongkan

Evaluasi Volume Timbunan Berdasarkan Pemodelan Geostatistik 3D Data Resistivitas 2D (Studi Kasus: Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik)

Nama : Aisyah Fairuz Salsabila
NRP : 0341154000001
Departemen : Teknik Geofisika
Pembimbing : Dr. Widya Utama, DEA

ABSTRAK

Tanah lempung yang mendominasi daerah Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik adalah tanah yang kurang ideal untuk dibangun dengan pabrik. Untuk menanggulangnya dilakukan stabilisasi tanah atau *soil improvement* dengan timbunan *limestone*. Namun, kadang jumlah *limestone* yang dibawa oleh truk berbeda dengan saat sudah melalui proses pemadatan. Untuk itu perlu dilakukan pemetaan bawah permukaan di lokasi timbunan guna mendapatkan nilai volume timbunan *limestone* sesungguhnya dengan mengaplikasikan metode geostatistika guna mempercepat proses pengerjaan. Penelitian ini menggunakan metode resistivitas 2D konfigurasi *Wenner-Schlumberger*. Menurut hasil pengukuran resistivitas menunjukkan nilai resistivitas lempung sebesar $<1 \Omega\text{m}$, pasir sebesar $1-1,6 \Omega\text{m}$, dan *limestone* $>1,6 \Omega\text{m}$. Nilai resistivitas ini diinterpolasi mengisi lokasi yang kosong dengan metode geostatistika. Pada metode ini dianalisis parameter histogram untuk menentukan distribusi data serta analisis parameter variogram untuk menentukan *trend* kemenerusan data. Berdasarkan hasil analisis kedua parameter geostatistika tersebut, dilakukan interpolasi Kriging yang dapat menghasilkan sebuah model 3D resistivitas. Model 3D yang dihasilkan terlihat lebih halus dan lebih representatif dengan kondisi bawah permukaan bumi dibandingkan dengan hasil inversi pengolahan data resistivitas. Sehingga dapat deliniasi lapisan timbunan *limestone*. Berdasarkan model ini, didapatkan volume *limestone* sebanyak $10344,8 \text{ m}^3$ yang berarti menyusut 5,6% dari volume awal yang dibawa oleh truk. Penyusutan ini dapat disebabkan oleh proses pengerasan yang dilakukan pada proses penimbunan.

Kata Kunci: Kriging, Metode Geostatistika, Resistivitas, Timbunan *Limestone*

Halaman ini sengaja dikosongkan

*Backfill Volume Evaluation Based On 3D Geostatistical Model Of
2D Resistivity Data (Case Study: Kecamatan Manyar, Kabupaten
Gresik)*

Name : Aisyah Fairuz Salsabila
NRP : 0341154000001
Department : Teknik Geofisika
Supervisor : Dr. Widya Utama, DEA

ABSTRACT

Manyar Subdistrict's litology had been dominated by clay, which is not an ideal type of soil to be constructed for building. One way to overcome this problem is a soil stabilization or soil improvement using limestone backfill. However, the amount of limestone carried by a truck could be different with the amount of limestone in the field where it's already being harden. Therefore, a research need to be done for subsurface mapping on backfill location in the interest of real limestone backfill volume using a geostatistical method to speed up the process. This research was done by 2D resistivity method with Wenner-Schlumberger configuration and shows that resistivity of clay is $<1 \Omega m$, sand $1-1,6 \Omega m$, and limestone $>1,6 \Omega m$. The result was interpolated to fill the empty spaces using geostatistical method. At first histogram and variogram was analyzed and then applied Kriging interpolation method using those parameters to make a 3D model. This model showed a finer cross section than it's shown in the resistivity inverse model. Based on the model created by the interpolation process, we can calculate the limestone volume. It results $10344,8 m^3$ which reduced 5,6% from the initial volume. This shrinkage that happened in the reasearch area could be caused by the hardening process.

Keywords: *Geostatistical, Kriging, Limestone Backfills, Resistivity*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas rahmat-Nya laporan Tugas Akhir yang berjudul “Evaluasi Volume Timbunan Berdasarkan Pemodelan Geostatistik 3D Data Resistivitas 2D (Studi Kasus: Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik)” ini dapat terselesaikan. Pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini dapat terlaksanakan dengan baik tanpa bimbingan, bantuan, dan dukungan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, Mas Aby, dan semua keluarga yang memberikan dukungan moril maupun materi selama penulis menjalani tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Widya Utama, DEA dan Bapak Firman Syaifuddin, S.Si., M.T. selaku pembimbing di perguruan tinggi yang telah meluangkan banyak waktu untuk memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
3. Tim Tugas Akhir JIPE (Faiz, Nadya, Widodo, Billy, Mirza, Risky, dan Mas Taufik) yang telah membantu dalam pengambilan data resistivitas dilapangan, pengolahan data, hingga pembuatan laporan Tugas Akhir serta mbak Vio yang sudah membantu selama akuisisi di lapangan.
4. Fahrenzy Yona Aisha yang sudah membantu memberikan inspirasi judul TA dan mengajari pengolahan pemodelan 3D.
5. Naomi, Indah, Radifan, Zofran, dan Bimo yang senantiasa menemani dan membantu penulis saat mengerjakan Tugas Akhir di Lab. Komputasi.
6. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Geofisika ITS yang telah banyak memberikan ilmu dan membantu secara administrasi selama penulis melakukan studi di Departemen Teknik Geofisika ITS.
7. Teman-teman badminton alumni SMAN 3 Bogor angkatan 2015 yang senantiasa menghibur dan menemani penulis selama kuliah di ITS.
8. Seluruh teman-teman Teknik Geofisika ITS angkatan 2015 atas semangat dan dukungannya.
9. Kakak tingkat (TG-03) serta adik tingkat (TG-05 dan TG-06) yang selalu menyemangati dan menghibur penulis.
10. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat dituliskan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan dan hasil tugas akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga tugas akhir ini membawa manfaat bagi penulis pribadi maupun bagi pembaca.

Surabaya, 19 Juli 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “Evaluasi Volume Timbunan Berdasarkan Pemodelan Geostatistik 3D Data Resistivitas 2D (Studi Kasus: Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik)” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 19 Juli 2019



Aisyah Fairuz Salsabila

NRP. 0341154000001

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah.....	1
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
1.6 Target Luaran	2
BAB II DASAR TEORI	3
2.1 Kajian Geologi	3
2.2 Metode Resistivitas	4
2.2.1 Prinsip Dasar.....	4
2.2.2 Konfigurasi <i>Wenner-Schlumberger</i>	6
2.3 Karakteristik <i>Limestone</i>	7
2.4 Metode Geostatistika	7
2.4.1 Parameter Distribusi Data	8
2.4.2 Variogram	9
2.4.3 Kriging	13
2.4.4 Ordinary Kriging.....	14
2.5 Metode Faust	15
2.6 Penelitian Terdahulu.....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Alat dan Bahan	17
3.2 Lokasi Penelitian	18
3.3 Skema Kerja	18
3.4 Tahapan Penelitian	20
3.4.1. Akuisisi Data.....	20
3.4.2. Pengolahan Data Resistivitas 2D	22
3.4.3. Pengelompokan (<i>Clustering</i>) Data.....	24
3.4.4. Konversi Nilai Resistivitas ke Kecepatan Gelombang.....	24
3.4.5. Pemodelan 3D.....	25

3.4.6. Perhitungan Volume	35
3.5 Jadwal Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Hasil Akuisisi Resistivitas	41
4.2 Konversi Data Resistivitas ke Kecepatan Gelombang P (V_p)	44
4.3 Pengelompokkan Data Resistivitas	50
4.4 Analisis Geostatistika.....	52
4.4.1 Histogram	52
4.4.2 Variogram.....	54
4.4.3 Interpolasi Kriging.....	58
4.5 Perbandingan Volume <i>Limestone</i>	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	67
PROFIL PENULIS	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Surabaya-Sapulu (Supandjono dkk., 1992)	3
Gambar 2. 2 Pola aliran arus listrik yang dipancarkan dan distribusi potensial yang dihasilkan oleh elektroda arus ganda di permukaan medium setengah tak berhingga (Loke, 2000)	5
Gambar 2. 3 Peletakkan elektroda arus dan potensial pada konfigurasi Wenner-Schlumberger (Loke, 2013)	6
Gambar 2. 4 Nilai resistivitas batuan. Tanda panah menunjukkan pengaruh air dalam pori terhadap resistivitas batuan (Schon, 2011)	7
Gambar 2. 5 Komponen variogram (Bodaghabadi, 2018)	10
Gambar 2. 6 Model anisotropi variogram dengan (a) anisotropi geometri dengan beda range saja dan (b) anisotropi geometri dengan zonal anisotropi akibat perbedaan sill (Soares dalam Negreiros dkk., 2010)	12
Gambar 2. 7 Grafik model variogram spherical (Negreiros dkk., 2010)	13
Gambar 3. 1 Peta Geologi Lokasi Pengukuran Resistivitas pada PT. JIPE 18	
Gambar 3. 2 Skema kerja penelitian perhitungan volume timbunan	19
Gambar 3. 3 Peta Lintasan Akuisisi Geolistrik 2D	22
Gambar 3. 4 Raw data pengukuran resistivitas	23
Gambar 3. 5 Input data ke Res2Dinv	23
Gambar 3. 6 penampang resistivitas 2D dengan kedalaman 5.37 m	24
Gambar 3. 7 (a) hasil ekspor format .xyz dari Res2Dinv dan (b) format input data ke Petrelprogram pemodelan	26
Gambar 3. 8 Input data resistivitas untuk pemodelan 3D	26
Gambar 3. 9 Grid model resistivitas	27
Gambar 3. 10 Input jumlah lapisan data pada window layering	28
Gambar 3. 11 Hasil histogram data resistivitas	29
Gambar 3. 12 Parameter yang dimasukkan ke variogram	30
Gambar 3. 13 Hasil perhitungan variogram pada (a) vertical range, (b) major range, dan (c) minor range yang menghasilkan nilai nugget dan sill	32
Gambar 3. 14 Petrophysical modelling	33
Gambar 3. 15 Parameter seismic cube	34
Gambar 3. 16 Penampang (surface) horizon hasil picking batas bawah limestone dari intersection 2D	35
Gambar 3. 17 Menu perhitungan volume dan peta ketebalan	36
Gambar 3. 18 Peta MC 0 Reklamasi (sumber: PT. JIPE, 2019)	37
Gambar 3. 19 Peta Kontur MC 100 Reklamasi (sumber: PT. JIPE, 2019)	38

Gambar 4. 1	Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 1	42
Gambar 4. 2	Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 2	43
Gambar 4. 3	Plot nilai V_p hasil konversi terhadap kedalaman	45
Gambar 4. 4	Grafik hubungan kecepatan gelombang P sintetis dengan densitas	47
Gambar 4. 5	Penampang model inversi kecepatan gelombang P pada (a) lintasan seismik 1 yang overlap dengan lintasan 1 resistivitas dan (b) lintasan seismik 4 yang overlap dengan lintasan 2 resistivitas	48
Gambar 4. 6	Kurva trend kecepatan gelombang P berdasarkan perhitungan sintetis (garis biru) dan pengukuran lapangan (garis merah) pada (a) lintasan seismik 1 dan (b) lintasan seismik 4.....	49
Gambar 4. 7	Penampang resistivitas 2D lintasan 1 dengan metode Kriging	50
Gambar 4. 8	Lintasan 1 (barat-timur) dan lintasan 2 (utara-selatan) pengukuran resistivitas yang saling berpotongan dengan hasil interpolasi Kriging.....	52
Gambar 4. 9	Histogram data resistivitas pada lokasi timbunan <i>limestone</i> dengan distribusi normal	53
Gambar 4. 10	Parameter variogram eksperimental.....	55
Gambar 4. 11	<i>Variogram map</i>	56
Gambar 4. 12	Fitting Variogram.....	57
Gambar 4. 13	Model 3D data resistivitas hasil interpolasi Kriging	59
Gambar 4. 14	Peta ketebalan limestone	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai resistivitas litologi batuan (Aisha, 2018).....	16
Tabel 3. 1 Alat akuisisi data resistivitas	17
Tabel 3. 2 Bahan pendukung yang digunakan dalam penelitian	17
Tabel 3. 3 Perangkat lunak yang digunakan untuk penelitian	17
Tabel 3. 4 Koordinat Lintasan Resistivitas 2D.....	20
Tabel 3. 5 Koefisien kedalaman datum berdasarkan spasi elektroda, panjang lintasan, dan nilai n yang digunakan.....	21
Tabel 3. 6 Jadwal penelitian tugas akhir	39
Tabel 4. 1 Hasil clustering data resistivitas	51
Tabel 4. 2 Parameter histogram data resistivitas	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik memiliki kondisi geologi berupa endapan aluvium yang didominasi oleh lempung (Soepandjono, 1992). Menurut Feld (2017), lempung kurang ideal untuk dilakukan pembangunan langsung di atasnya karena memiliki faktor keamanan yang kurang dari standar. Pada proses pembangunan di daerah tersebut dibutuhkan tindakan stabilisasi tanah atau *soil improvement* dengan memberikan sebuah lapisan *limestone* yang sudah dihancurkan menjadi partikel yang lebih kecil atau disebut dengan pedel di atasnya (Darwis, 2017). Penimbunan dengan *limestone* ini berfungsi agar sifat kembang susut lempung dapat dikurangi dan tanah menjadi stabil untuk dilakukan pembangunan.

Proses pemadatan dalam stabilisasi tanah menyebabkan volume *limestone* atau pedel saat ini tidak sesuai dengan keadaan awal (Hardiyatmo, 2002). Upaya dalam mengatasi ketidaksesuaian tersebut adalah perlu diketahui jumlah *limestone* yang dibawa menggunakan truk ke lapangan. Truk ini memiliki volume tertentu yang akan mempengaruhi biaya yang dikeluarkan. Dalam menangani hal tersebut, dapat dilakukan investigasi bawah permukaan secara 3 dimensi dengan menggunakan metode resistivitas. Namun, proses akuisisi resistivitas 3D pada lokasi penelitian yang luas membutuhkan biaya yang tinggi dan waktu yang lama. Maka dari itu, perlu dilakukan penggabungan antar titik-titik data survei 2 dimensi dengan metode geostatistika. Berdasarkan latar belakang tersebut, perlu dilakukan perhitungan volume timbunan menggunakan gabungan dari kedua metode. Dari proses ini akan mendapatkan jumlah *limestone* yang akurat dengan proses yang lebih cepat serta mengurangi biaya yang dikeluarkan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana evaluasi jumlah *limestone* yang sudah tertimbun pada lokasi penelitian?
2. Bagaimana cara pemodelan resistivitas 3D dengan metode geostatistika pada perhitungan volume timbunan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Akuisisi data pada lokasi timbunan menggunakan metode resistivitas 2D konfigurasi *Wenner-Schlumberger*

2. Kedalaman penetrasi pengukuran resistivitas yang diolah hanya sampai 5 m mengingat kondisi bawah permukaan yang sudah homogen pada kedalaman lebih dari 5 m.
3. Pemodelan 3D data resistivitas menggunakan estimasi geostatistika, yaitu interpolasi *Kriging*
4. Pemandangan volume pengukuran menggunakan volume ritase truk yang masuk.

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah

1. Mengevaluasi volume timbunan *limestone* di lokasi penelitian.
2. Membuat pemodelan 3D dengan metode geostatistika untuk perhitungan volume timbunan.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah

1. Memberikan hasil volume timbunan *limestone* yang kemudian akan dijadikan bahan evaluasi dari pihak PT. *Java Integrated Industrial and Port Estate* (JIPE) kepada kontraktor.
2. Memberikan referensi kepada penelitian selanjutnya mengenai perhitungan volume menggunakan metode resistivitas.
3. Mendapatkan pengetahuan dan keterampilan mengenai cara menghitung volume batuan dengan menggunakan konsep geostatistika.

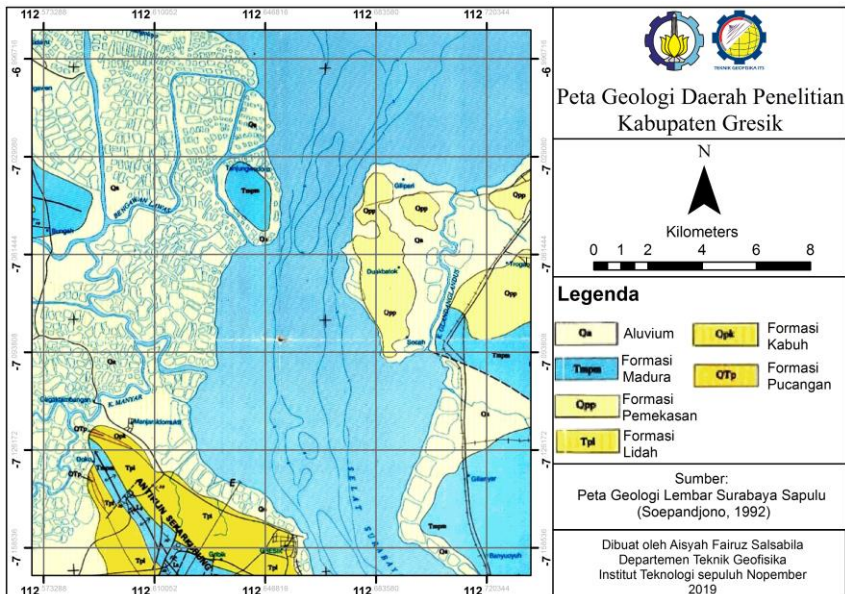
1.6 Target Luaran

Target luaran dari penelitian ini adalah laporan tugas akhir (TA) dengan judul Evaluasi Volume Timbunan Berdasarkan Pemodelan Geostatistik 3D Data Resistivitas 2D (Studi Kasus: Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik) dan juga akan dipublikasikan dalam Jurnal Geosaintek. Selain itu, akan dibuatkan sebuah modul tentang cara pemodelan geostatistik menggunakan program pemodelan.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Kajian Geologi

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Surabaya-Sapulu oleh Supandjono dkk. (1992), Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik merupakan daerah yang memiliki endapan geologi berupa endapan aluvium (Qa) (gambar 2.1). Endapan aluvium ini berbatasan langsung dengan Laut Selat Madura dan terbentuk pada masa Holosen. Endapan sedimen sepanjang Selat Madura dibentuk oleh endapan pantai yang masuk ke daratan sampai ± 5 km. Endapan pantai daerah ini terdiri dari lempung lanau serta terdapat sisipan tipis yang mengandung pecahan kerang di beberapa tempat (Bahri dan Madlazim, 2012).



Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Surabaya-Sapulu (Supandjono dkk., 1992)

Lokasi penelitian merupakan daerah dengan litologi berupa pasir pantai yang kemudian direklamasi menggunakan endapan sedimen dari tengah Selat Madura, yang diketahui berupa lempung, dan ditambahkan dengan timbunan *limestone* yang sudah dihancurkan atau disebut dengan pedel untuk dibangun pabrik. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Lugra (2017) menggunakan bor inti di perairan utara Gresik, menunjukkan bahwa endapan sedimen di kedalaman dangkal (0-22 m) memiliki persebaran jenis litologi yang seragam, yaitu lempung dengan sifat yang lunak dan liat. Berdasarkan analisis ukuran

butir, pada kedalaman yang sama merupakan sedimen dengan ukuran butir berupa lanau diikuti dengan lumpur lempung dengan sedikit kerikil.

2.2 Metode Resistivitas

Metoda resistivitas merupakan salah satu metoda yang sering digunakan dalam survei geofisika untuk eksplorasi yang relatif dangkal. Salah satunya adalah melakukan evaluasi timbunan *limestone* atau pedel yang dilakukan pada penelitian ini. Selain itu, metode ini juga dapat dalam eksplorasi sumber mata air, keadaan struktur bawah permukaan dan juga dapat digunakan sebagai pendukung eksplorasi bahan-bahan tambang.

2.2.1 Prinsip Dasar

Pada prinsipnya metode resistivitas digunakan untuk mengetahui perubahan resistivitas lapisan batuan di bawah permukaan tanah, khususnya pada penelitian ini adalah lapisan bawah permukaan pada lokasi timbunan *limestone* atau pedel, dengan cara mengalirkan arus listrik DC (*Direct Current*) yang dialirkan ke bawah permukaan tanah melalui dua elektroda arus. Kemudian beda potensial diukur melalui dua elektroda potensial. Setelah besar arus dan besar potensial yang dihasilkan terukur, maka resistivitas bawah permukaan dapat dihitung. Untuk mengetahui persamaan umum untuk mencari nilai resistivitas perlu diketahui hubungan antara rapat arus dan intensitas medan listrik berdasarkan hukum ohm yang dapat dilihat dibawah ini:

$$J = \frac{I}{A} = \sigma \cdot E \quad (2.1)$$

Dengan $J = \frac{I}{A}$ adalah rapat arus, σ adalah konduktivitas medium, $E = \frac{V}{L}$ adalah induktansi medan. (Telford dkk., 1991)

Maka didapatkan persamaan umum untuk mendapatkan nilai resistivitas medium homogen sebagai

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (2.3)$$

dengan R adalah resistansi (Ω), ρ adalah resistivitas penghantar (Ωm), l adalah panjang penghantar (meter) dan A adalah luas penampang penghantar (m^2). Semakin besar resistivitas suatu bahan maka semakin besar pula medan listrik yang dibutuhkan untuk menimbulkan sebuah kerapatan arus. Harga resistivitas yang diukur seolah-olah merupakan harga resistivitas untuk satu lapisan saja. Sehingga resistivitas yang terukur adalah resistivitas semu.

Untuk kasus suatu elektroda arus tunggal di permukaan medium setengah tak berhingga besar potensial V di suatu titik sejauh r dari pusat arus dinyatakan sebagai berikut

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.4)$$

Sedangkan untuk kasus arus ganda, gambar 2.2 menunjukkan terdapat dua elektroda arus C_1 yang terletak pada permukaan suatu medium homogen. Terangkai dengan elektroda arus C_2 dan diantaranya ada dua elektroda potensial P_1 dan P_2 yang dibuat dengan jarak tertentu seperti pada yang diinjeksikan di atas permukaan medium setengah tak berhingga. Sehingga potensial yang berada di dekat titik elektroda tersebut bisa dipengaruhi oleh kedua elektroda arus. Beda potensial antara P_1 dan P_2 dinyatakan sebagai berikut:

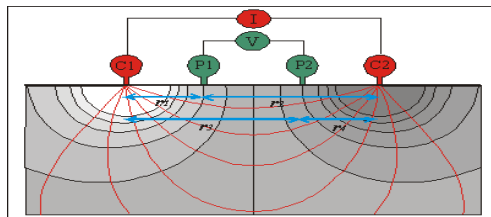
$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right] \quad (2.4)$$

dengan r_1 dan r_2 berturut-turut adalah jarak suatu titik dari elektroda arus C_1 dan C_2 , r_3 dan r_4 berturut-turut adalah jarak suatu titik dari elektroda arus C_3 dan C_4 . Persamaan (2.4) dapat dinyatakan juga dalam bentuk resistivitas dan disederhanakan sehingga dapat menentukan faktor geometri susunan elektrodanya sebagai berikut

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (2.5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)} \quad (2.6)$$

Dengan k adalah faktor geometri yang bergantung pada susunan elektrodanya. (Telford dkk., 1991)



Gambar 2.2 Pola aliran arus listrik yang dipancarkan dan distribusi potensial yang dihasilkan oleh elektroda arus ganda di permukaan medium setengah tak berhingga (Loke, 2000)

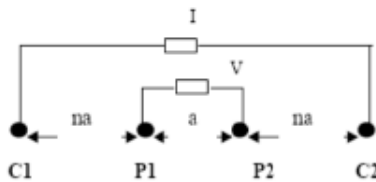
Titik datum (*datum point*) adalah titik pengukuran di bawah permukaan lintasan. Lokasi datum pengukuran dapat diketahui menggunakan persamaan 2.13 berikut ini.

$$D = C_1 \frac{(P_1 - C_1)}{2} \tag{2.7}$$

Dengan D adalah *datum point*, C_1 jarak titik awal dengan elektroda C_1 , dan P_1 adalah jarak titik awal dengan elektroda P_1 . Titik datum ini berada pada titik tengah dari total spasi elektroda arus. (Prastiawan dkk., 2013)

2.2.2 Konfigurasi Wenner-Schlumberger

Konfigurasi *Wenner-Schlumberger* adalah konfigurasi yang digunakan pada metode resistivitas dengan sistem aturan spasi yang konstan dengan catatan faktor pembanding “*n*” untuk konfigurasi ini adalah perbandingan jarak antara elektroda arus (C_1C_2) dengan potensial (P_1P_2). Apabila jarak elektroda potensial P_1P_2 adalah *a*, maka jarak elektroda C_1C_2 adalah $2na+a$. Ilustrasi konfigurasi ini dapat dilihat pada gambar 2.3. Konfigurasi ini memiliki cakupan vertikal yang lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi *Wenner* serta memiliki resolusi horizontal yang lebih baik dibandingkan konfigurasi lainnya (Loke, 2013). Lokasi timbunan yang cenderung memiliki persebaran batuan yang kurang merata dan batas lapisan yang berbeda-beda akan membutuhkan resolusi pembacaan data secara horizontal maupun vertikal yang baik. Berdasarkan alasan tersebut, pengukuran resistivitas di lokasi timbunan *limestone* menggunakan konfigurasi ini.



Gambar 2. 3 Peletakkan elektroda arus dan potensial pada konfigurasi *Wenner-Schlumberger* (Loke, 2013)

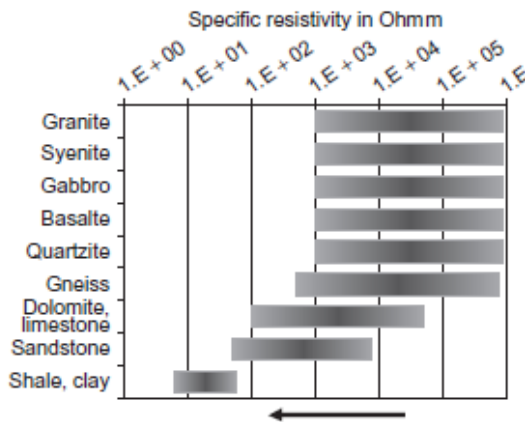
Sebelum perhitungan R , ρ , dan k , ditentukan nilai $C_1C_2/2$, yaitu setengah jarak antara elektroda C_1-C_2 dan nilai $P_1P_2/2$, yaitu jarak elektroda P_1-P_2 . Menghitung nilai konstanta geometri (k) untuk konfigurasi elektroda *Wenner-Schlumberger* menggunakan persamaan berikut

$$k=(n+1)\pi a \tag{2.8}$$

dengan a adalah jarak antara elektroda M dan N . (Loke, 2000)

2.3 Karakteristik *Limestone*

Limestone adalah batuan dengan kandungan material karbonat lebih dari 50% yang tersusun atas partikel karbonat klastik yang tersemenkan. Terdapat dua tipe *limestone* utama, yaitu *limestone* (batu gamping) yang memiliki komposisi lebih dari 50% karbonat yang setengahnya adalah kalsit (CaCO_3) dan dolomit yang memiliki komposisi lebih dari 50% adalah dolomit dan sisanya adalah karbonat (Schon, 2011). *Limestone* merupakan salah satu batuan yang sering digunakan untuk timbunan atau memperbaiki struktur tanah pada lokasi tertentu.



Gambar 2. 4 Nilai resistivitas batuan. Tanda panah menunjukkan pengaruh air dalam pori terhadap resistivitas batuan (Schon, 2011)

Secara fisis, *limestone* memiliki nilai resistivitas yang sangat beragam. Hal ini dikarenakan pengisi rongga serta mineral sebagai butir dalam *limestone* sendiri bergantung pada proses biologi. *Limestone* memiliki nilai resistivitas yang cenderung lebih tinggi daripada batu sedimen disekitarnya, yaitu sekitar $\geq 10 \Omega\text{m}$ seperti yang terlihat pada gambar 2.4. Lokasi penelitian memiliki lapisan timbunan *limestone* yang sudah dihancurkan menjadi partikel yang lebih kecil atau pedel, sehingga nilai resistivitas di lokasi penelitian akan berubah dan kurang sesuai dengan nilai resistivitas batuan karbonat pada umumnya.

2.4 Metode Geostatistika

Metode geostatistika merupakan metode yang terus berkembang untuk berbagai macam penelitian di bidang kebunian. Metode geostatistika juga banyak digunakan dalam mengestimasi cadangan atau volume suatu wilayah dengan timbunan *limestone*, seperti yang dilakukan dalam penelitian ini. Metode

ini sering digunakan untuk mempermudah perhitungan dalam wilayah yang luas serta menghemat waktu saat pengukuran di lapangan. Pada metode geostatistika diketahui sebuah populasi data yang kemudian dilakukan analisis terhadap persebaran antar data. Analisis ini menggunakan dua komponen penting, yaitu histogram dan variogram. Histogram akan mendefinisikan persebaran data berdasarkan nilai varians, standar deviasi, rata-rata, dan sebagainya. Sedangkan variogram akan mendefinisikan derajat kesamaan data terhadap jarak tertentu. Perhitungan geostatistika ini dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak analisis geostatistika, seperti SGEMS, Geovarians, atau program lain.

2.4.1 Parameter Distribusi Data

Nilai resistivitas dari hasil pengukuran dapat menentukan pola persebaran sedimen pada suatu wilayah. Pola persebaran sedimen akan menimbulkan nilai distribusi tertentu pada histogram akibat adanya perbedaan ukuran butir, bentuk butir, dan sebagainya dari endapan sedimen tersebut (Bunte dan Abt, 2001). Pada wilayah timbunan pedel, distribusi data seharusnya cenderung seragam karena memiliki tipe batuan yang sama, walaupun ukuran butir yang bisa sangat beragam akibat proses penghancuran batuan yang tidak seragam. Ukuran penyebaran atau ukuran keseragaman pengamatan pengamatan dari nilai rata-rata disebut dengan dispersi atau deviasi. Parameter yang digunakan untuk mengukur dispersi adalah varians, standar deviasi, *mean* (rata-rata), modus, median, nilai minimum, dan maksimum.

Varians merupakan salah satu ukuran persebaran data yang menggambarkan bagaimana persebaran suatu data pada populasi. Varians disebut juga dengan simpangan baku. Jika nilai varians sama dengan nol mengindikasikan bahwa semua nilai sama, nilai varians rendah mengindikasikan bahwa data sangat dekat dengan nilai rata-rata, dan nilai varians tinggi berarti nilai tersebar di sekitar nilai rata-rata dan antara data satu dengan data lainnya. Varians didapatkan berdasarkan persamaan sebagai berikut

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{(n-1)} \tag{2.9}$$

Standar deviasi mempertimbangkan seluruh data yang ada sehingga lebih stabil dibandingkan dengan ukuran penyebaran lainnya. Parameter ini dihitung dari frekuensi data yang sudah dikelompokkan menggunakan nilai data perkiraan (estimasi). Standar deviasi dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{(n-1)}} \tag{2.10}$$

Nilai *mean* atau rata-rata mempengaruhi distribusi sebuah data jika diasosiasikan dengan nilai standar deviasi dari data. Saat nilai rata-rata dan

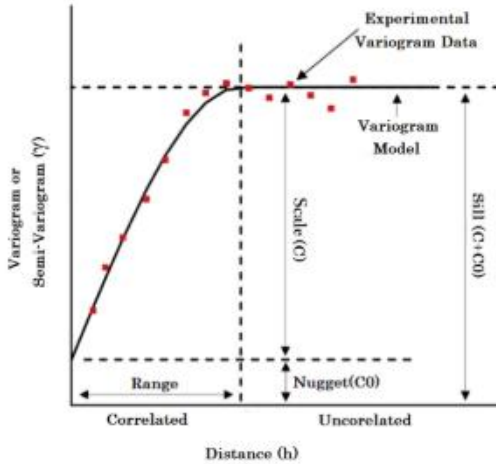
standar deviasi sama, maka data dikatakan terdistribusi normal atau *gaussian distribution*. Distribusi normal ini sangat dibutuhkan saat melakukan perhitungan geostatistika. Sifat lain dari distribusi normal adalah terdapat satu modus data, bentuk kurva distribusi simetris atau membentuk lonceng, dan nilai modus sama atau mendekati rata-rata. Jenis distribusi seperti ini sangat membantu dalam proses pemodelan. Jika nilai *mean* dan modus tidak mencapai syarat dari distribusi normal, maka dapat dilakukan transformasi data (*log transform*) menggunakan perangkat lunak geostatistik. Bisa juga melakukan dengan cara konvensional, yaitu menghilangkan *outliers* (data yang dianggap sebagai *noise*), mengurangi jumlah data, dan merubah jenis uji distribusi.

2.4.2 Variogram

Nilai resistivitas yang dihasilkan dari pengukuran di suatu kondisi geologi tertentu memiliki karakteristik dari variasi spasial. Variogram adalah alat yang penting dalam memprediksi fenomena geologi di wilayah yang tidak bisa diambil datanya. Analisa ini didasarkan pada suatu prinsip bahwa dua titik yang berdekatan akan lebih memiliki kecenderungan nilai parameter yang mirip dibandingkan dengan dua titik yang berjauhan. Pada kondisi wilayah dengan timbunan *limestone*, analisis variogram sangat berpengaruh pada proses pemodelan dengan interpolasi kriging karena dibutuhkan kondisi data yang seragam pada ketebalan tertentu.

2.4.2.1 Komponen Variogram

Hasil perhitungan varians pada variogram eksperimental digunakan dalam pemodelan variogram untuk menghasilkan analisis struktural berdasarkan analisis statistik. Menurut Bodaghabadi (2018), analisis struktural adalah analisis *fitting* model variogram dengan variogram eksperimental. *Sill*, *range*, dan *nugget effect* merupakan parameter paling penting dalam melakukan *fitting* model variogram (gambar 2.5). Masing-masing nilai dari parameter tersebut akan mendefinisikan tingkat persebaran data resistivitas hasil pengukuran di lokasi timbunan *limestone*.



Gambar 2. 5 Komponen variogram (Bodaghabadi, 2018)

Sill biasa disebut sebagai varians terbesar dari data atau populasi varians. Nilai *sill* merepresentasikan nilai kecenderungan variogram saat jarak semakin besar maka data-data semakin tidak berkorelasi. *Range* merupakan jarak yang ditunjukkan saat *sill* tercapai, seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.5. *Range* akan terus bertambah selama nilai pada titik masih saling mempengaruhi. Dengan kata lain, saat data belum mencapai *sill* maka data tersebut masih berkorelasi antara satu dengan lainnya. *Nugget effect* merupakan kondisi dengan variogram berpotongan dengan sumbu Y. Penggunaan *nugget effect* untuk memperlihatkan variabilitas jarak pendek baik itu disebabkan oleh faktor luar seperti eror dalam pengukuran, eror pada lokasi, dan sebagainya selain keberadaan dari *nugget* pada suatu cadangan. (Bodaghabadi, 2018)

2.4.2.2 Variogram Eksperimental

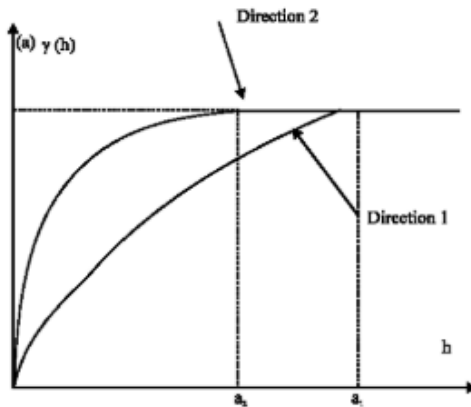
Variogram eksperimental ini merupakan variogram yang dihitung berdasarkan data yang ada dan merupakan komponen penting dalam metode geostatistika karena mempengaruhi hasil estimasi yang dilakukan. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data resistivitas hasil pengukuran pada lokasi timbunan *limestone* diatas area reklamasi. Perhitungan ini dilakukan dengan persamaan di bawah ini

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_{i+h})]^2 \quad (2.11)$$

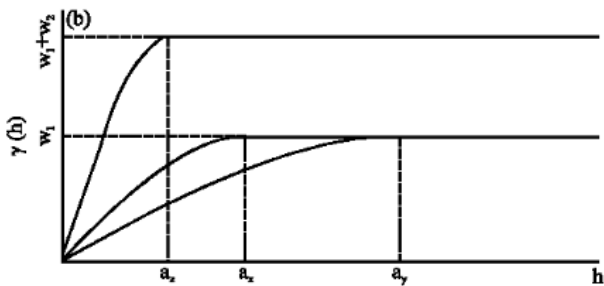
dengan $\gamma(h)$ adalah variogram untuk jarak sebesar h , $Z(X_i)$ adalah nilai pada titik X_i , $Z(X_{i+h})$ adalah nilai data di titik X_i pada jarak h , $N(h)$ adalah

banyaknya pasangan titik yang memiliki jarak h dan h adalah jarak antar titik. Persamaan 2.11 menjelaskan bahwa varians antara titik-titik data merupakan fungsi jarak pisah antara titik-titik data atau disebut dengan *lag*. Variogram eksperimental menghasilkan nilai arah atau derajat kesamaan data terhadap jarak yang telah ditentukan. (Negreiros dkk., 2010)

Arah atau *azimuth* dari perhitungan variogram ini menentukan sifat dari persebaran data. Jika variogram hanya tergantung pada jarak, proses dinamakan dengan isotropik. Jika variogram merupakan fungsi dari arah dan jarak, maka proses dinamakan anisotropi. Anisotropi menunjukkan respon autokorelasi spasial yang berbeda terhadap pengaruh kecenderungan akibat proses fisis lapangan, seperti angin, erosi atau formasi geologinya. Pemodelan anisotropi yang dilakukan bersamaan dengan proses *fitting variogram* dengan prinsip *trial and error*. Anisotropi dibagi menjadi dua tipe, yaitu anisotropi geometrik dan anisotropik zonal. Anisotropi geometri terjadi jika variogram dengan arah yang berbeda memiliki nilai *sill* dan *nugget* yang sama, tetapi *range* yang berbeda, seperti pada gambar 2.6(a). Sedangkan anisotropi zonal memiliki nilai *sill* yang berbeda, tetapi *range* dan *nugget* yang sama. Namun, terkadang dua tipe anisotropi ini menunjukkan respon bersamaan, seperti yang ada pada gambar 2.6(b) dengan terdapat perbedaan nilai *range* dan juga ada perbedaan nilai *sill* pada model variogramnya. (Negreiros dkk., 2010)



(a)



(b)

Gambar 2. 6 Model anisotropi variogram dengan (a) anisotropi geometri dengan beda *range* saja dan (b) anisotropi geometri dengan zonal anisotropi akibat perbedaan *sill* (Soares dalam Negreiros dkk., 2010)

2.4.2.3 Variogram Teoritis

Untuk keperluan analisis, variogram eksperimental ini harus dimodelkan dengan model variogram teoritis. Hal ini guna mendapatkan trend varians data resistivitas lokasi timbunan dari hasil perhitungan variogram eksperimental. Dalam geostatistik, pencocokan antara variogram eksperimental dan teoritis disebut dengan analisis struktur dan dilakukan dengan prinsip “*trial and error*”. Ada beberapa model variogram teoritis yang digunakan dalam pencocokan, yaitu model bola (*spherical*), model *Gaussian*, dan model eksponensial (Negreiros dkk., 2010). Pada penelitian ini, model teoritis yang digunakan adalah model bola atau *Spherical Model*. Model ini banyak digunakan dalam penelitian kebumihan karena hasil dari pemodelan interpolasi yang dilakukan sangat mirip dengan kondisi lapangan atau dapat dikatakan eror model yang dihasilkan sangat kecil (Bodaghabadi, 2018). Model ini dapat dilihat pada gambar 2.7. Persamaan umum dari model bola dapat ditulis sebagai berikut:

$$\gamma(h) = A + B \text{ sph}(h; C) \tag{2.12}$$

dengan A adalah nugget varians, B adalah *sill* parsial, dan C adalah *range*. Nilai *sill* atau total varians didapatkan dengan A+B. (Pardo-Iguzquiza dkk., 2013)



Gambar 2. 7 Grafik model variogram *spherical* (Negreiros dkk., 2010)

2.4.3 Kriging

Kriging adalah salah satu metode interpolasi geostatistika yang paling umum digunakan. Metode interpolasi yang optimal berdasarkan regresi terhadap nilai z observasi dari seluruh data yang dibobotkan menurut nilai varians spasial. Interpolasi dimaksudkan sebagai estimasi dari sebuah variabel pada lokasi yang tidak diukur di lokasi pengambilan nilai. Hal ini akan diaplikasikan pada penelitian ini, yaitu menginterpolasi data resistivitas pada lokasi timbunan *limestone* yang tidak dilalui oleh lintasan resistivitas. Seluruh algoritma interpolasi mengestimasi nilai pada lokasi yang ditentukan sebagai penjumlahan berbobot dari data di sekitarnya. Jika lokasi pencarian data memiliki kepadatan data yang baik dan tidak terdistribusi dengan baik pada daerah penelitian, maka hasil estimasi akan baik. Menurut Bohling (2005), terdapat beberapa keuntungan dalam menggunakan Kriging sebagai algoritma interpolasi, yaitu:

1. Membantu menghilangkan efek dari data yang terkluster, sehingga titik yang berada pada kluster tertentu memiliki bobot lebih kecil dibandingkan dengan data yang terisolasi atau memperlakukan kluster sebagai satu titik data.
2. Memberikan estimasi eror (kriging varians) bersama dengan estimasi dari variabel z itu sendiri.

Berdasarkan keuntungan dari metode Kriging tersebut, maka Kriging adalah salah satu metode interpolasi yang paling baik. Menurut Negreiros (2010), Kriging merupakan metode *Best Linier Unbiased Estimation* (BLUE) didukung dengan data yang sudah memenuhi syarat untuk dilakukan Kriging. Syarat tersebut adalah sebagai berikut:

1. Data harus stasioner, yaitu rata-rata dan varians tidak memiliki perbedaan yang signifikan.
2. Populasi data terdistribusi normal.
3. Data yang digunakan merupakan data spasial.

Ketika seluruh syarat sudah terpenuhi, maka dapat dilakukan estimasi menggunakan sebuah persamaan estimator Kriging. Sebuah estimator adalah

sebuah persamaan yang menggunakan data untuk menemukan nilai yang representatif pada nilai yang tidak diketahui. Persamaan estimator Kriging sebagai berikut:

$$\hat{z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2.13)$$

dengan \hat{z}_0 adalah nilai estimasi, $z(x_i)$ adalah nilai asli pada titik i , dan λ_i adalah bobot pada titik i . Sehingga, persamaan diatas dikurangi untuk menentukan koefisien dari $\lambda_i, \dots, \lambda_n$. (Kitanidis, 1999)

Perbedaan antara nilai estimasi dengan nilai asli merupakan eror estimasi yang dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$\hat{z}_0 - z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) - z(x_0) \quad (2.14)$$

dengan nilai $z(x_0)$ adalah nilai asli pada titik tersebut. Bobot harus ditentukan untuk meminimalisir varians estimator. Bobot didapatkan dari fungsi varians atau variogram. Menurut Kitanidis (1999), saat menentukan sebuah koefisien untuk estimator, seperti bobot, koefisien tersebut harus memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. *Unbiasedness* (ketidakbiasan). Untuk membuat estimator menjadi tidak bias untuk setiap nilai *mean* (rata-rata), dibutuhkan

$$\sum_{i=1}^n \lambda(i) = 1 \quad (2.15)$$

2. Varians minimum. Hal ini mengharuskan kuadrat dari rata-rata estimator harus pada nilai minimum.

2.4.4 Ordinary Kriging

Pada penelitian ini, program pemodelanmemanfaatkan algoritma geostatistika Kriging dengan spesifikasi *ordinary Kriging* untuk menginterpolasi data resistivitas di lokasi timbunan *limestone*. *Ordinary Kriging* tidak mengasumsikan nilai rata-rata konstan untuk setiap domainnya layaknya *simple Kriging*. Pada *ordinary Kriging* diasumsikan bahwa nilai rata-rata konstan pada daerah sekitarnya (*local neighborhood*) untuk setiap titik estimasi. Sehingga dengan menggunakan estimasi *ordinary Kriging* nilai yang didapatkan lebih teliti daripada *simple Kriging* dengan nilai eror yang lebih rendah (Bohling, 2005). Prosedur ini mengeliminasi kebutuhan untuk mengetahui *mean* populasi. Prosedur ini juga lebih mudah mengadaptasi variasi lokal. Estimasi Kriging dapat dituliskan sebagai berikut

$$Z_{OK}^*(i) = \sum_{\alpha=1}^{n(i)} \lambda_{\alpha}^{OK}(i) Z(i_{\alpha}) \quad (2.16)$$

dengan $Z_{OK}^*(i)$ adalah estimasi *ordinary Kriging*, $\lambda_{\alpha}^{OK}(i)$ adalah pembobotan Kriging untuk datum pada lokasi estimasi i dengan datum yang sama akan mendapatkan bobot yang berbeda dengan lokasi yang berbeda, i, i_{α} adalah posisi dari titik estimasi dan titik disekitarnya (α), dan $Z(i_{\alpha})$ adalah nilai yang digunakan untuk mengestimasi $Z(i)$. (Bohling, 2005)

Ordinary Kriging memiliki model probabilitas yang digunakan untuk menghitung nilai varians eror Kriging. Persamaan nilai varians eror metode Kriging dapat dilihat pada persamaan 2.17 berikut ini

$$\sigma_{OK}^2 = C(0) - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) C(u_{\alpha} - u) - \mu_{OK} \quad (2.17)$$

dengan $C(0)$ adalah nilai kovarians dan $\mu_{OK}(u)$ adalah parameter *Lagrange*.

2.5 Metode Faust

Faust (1953) menemukan persamaan empiris untuk menentukan nilai gelombang kompresional berdasarkan kedalaman litologinya (Z) dan nilai resistivitas formasi (R) sebagai berikut

$$V_p = a(RZ)^{1/6} \quad (2.18)$$

dengan V_p adalah kecepatan gelombang-P, a adalah konstanta Faust berdasarkan litologi lokasi penelitian, R adalah nilai resistivitas, dan Z adalah kedalaman dari litologi. Metode ini digunakan dalam penelitian ini karena metode ini sangat berguna untuk mengkonversi nilai resistivitas ke kecepatan gelombang pada batuan klastik. Metode ini terbukti telah menunjukkan respon log resistivitas dan *log sonic* gelombang P memiliki *trend* jalur yang sama. Pada penelitian ini, metode ini digunakan untuk mengonversi nilai resistivitas pada lokasi timbunan *limestone* guna mendapatkan parameter elastik batuan.

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai rekonstruksi 3D dari penampang 2D dengan menggunakan metode geostatistika telah dilakukan oleh Aisha (2018). Target dari penelitian yang dilakukan oleh Aisha adalah untuk memodelkan persebaran *limestone* serta rekonstruksi kejadian geologi di Kecamatan Jenu. Dalam penelitiannya terdapat 43 lintasan geolistrik 2D dengan panjang lintasan sebesar 705 m, jumlah elektroda 48 buah, dan spasi elektroda 15 m menggunakan konfigurasi *Wenner*. Penampang resistivitas 2D yang didapatkan menghasilkan 4 litologi batuan, yaitu dolomit, batugamping, batupasir, dan batulempung yang terdapat pada tabel 2.1. Nilai resistivitas hasil pengukuran ini sesuai dengan referensi, nilai resistivitas dolomit dan *limestone* diatas 10 Ω m. Namun, nilai resistivitas batupasir dan batulempung menunjukkan rentang nilai yang jauh dibawah referensi. Hal ini bisa dikarenakan oleh faktor kehadiran fluida dalam

pori-pori batuan yang menyebabkan nilai resistivitas turun. Kemudian hasil pengukuran resistivitas 2D dianalisis geostatistika dari mulai perhitungan parameter histogram, pembuatan variogram, fitting variogram menggunakan model variogram *spherical* pada 21 lintasan, dan dilakukan interpolasi geostatistika. Simulasi metode geostatistika yang digunakan dalam penelitian ini untuk menjadikan penampang 2D menjadi 3D adalah metode *Sequential Gaussian Simulation* (SGS). Penampang resistivitas 2D juga dikorelasikan dengan N-SPT.

Tabel 2. 1 Nilai resistivitas litologi batuan (Aisha, 2018)

No	<i>Range Resistivitas (Ωm)</i>	Litologi
1	>100	Dolomit
2	75-100	Batugamping
3	3.2-1	Batupasir
4	<0.32	Batulempung

Berdasarkan penelitian mengenai perhitungan volume batuan dengan metode geolistrik, terdapat persamaan dengan penelitian tugas akhir ini, yaitu metode yang digunakan adalah metode geostatistika untuk perhitungan volume dan mengubah penampang resistivitas 2D menjadi penampang resistivitas 3D. Dengan samanya metode yang digunakan ini, pada penelitian ini dilakukan peningkatan guna memberikan manfaat kepada pembaca. Pada penelitian ini dapat dibuktikan bahwa dengan melakukan interpolasi menggunakan metode geostatistika, khususnya Kriging, menghasilkan interpolasi yang lebih halus dan lebih sesuai dengan kondisi sebenarnya di bawah permukaan bumi dibandingkan dengan metode konvensional. Sedangkan perbedaan dari penelitian oleh Aisha adalah lokasi penelitian, dengan target *limestone* masih berupa batuan kompak di bawah permukaan bumi, sedangkan pada penelitian Tugas Akhir ini batuan yang diteliti berupa batuan yang sudah terdeformasi menjadi lapisan timbunan *limestone* dan tidak pada lokasi aslinya. Hal ini mengakibatkan nilai hasil pengukuran penelitian sebelumnya masih mirip dengan tabel referensi pada gambar 2.4. Metode interpolasi yang digunakan pada penelitian terdahulu ini juga berbeda, yaitu metode interpolasi SGS, sedangkan pada penelitian tugas akhir ini digunakan metode Kriging. Pada penelitian tugas akhir ini digunakan Kriging, karena Kriging merupakan metode yang banyak digunakan dan terbukti lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

Penelitian yang dilakukan pada lokasi timbunan *limestone* membutuhkan beberapa alat dan bahan yang dapat dilihat pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3. 1 Alat akuisisi data resistivitas

No	Uraian	Jumlah
Alat Utama		
1	Resistivimeter MAE X612-EM	1 Set
2	Elektroda	48 buah
3	Kabel <i>roll multichannel</i>	2 buah
Alat Pendukung		
5	Meteran 100 m	1 buah
6	Palu Elektroda	4 buah
7	GPS Garmin Etrex	1 buah
8	Kompas	1 buah
9	<i>Multimeter</i>	1 buah
10	<i>Toolkit</i>	1 set

Tabel 3. 2 Bahan pendukung yang digunakan dalam penelitian

No	Uraian	Jumlah
1	Peta Geologi Lembar Surabaya-Waru	1 buah
2	Peta Kontur MC 0	1 lembar
3	Peta Kontur MC 100	1 lembar

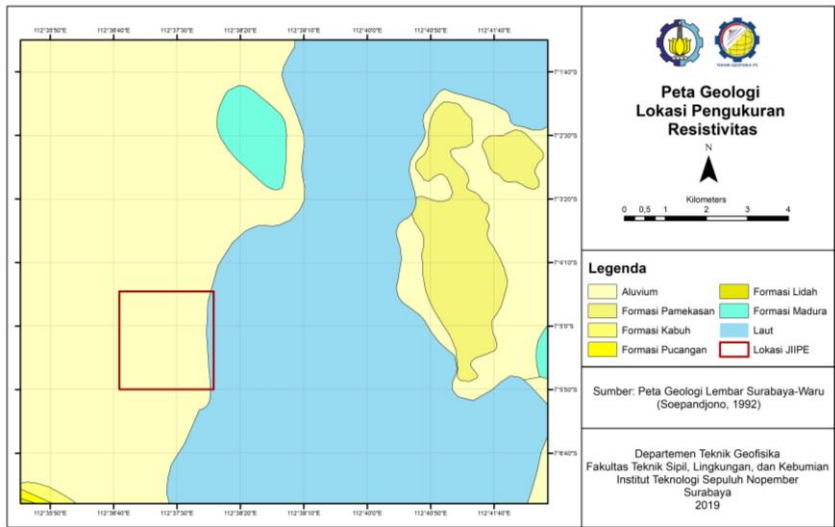
Sedangkan dalam proses pengolahan dan penyelesaian penelitian ini diperlukan beberapa perangkat lunak sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Perangkat lunak yang digunakan untuk penelitian

No	Nama
1	<i>Microsoft Office</i>
2	<i>Microsoft Excel</i>
3	Matlab 2015
4	Res2Dinv
5	Perangkat lunak geostatistika
6	Perangkat lunak pemodelan 3D
7	ArcGis 10.3

3.2 Lokasi Penelitian

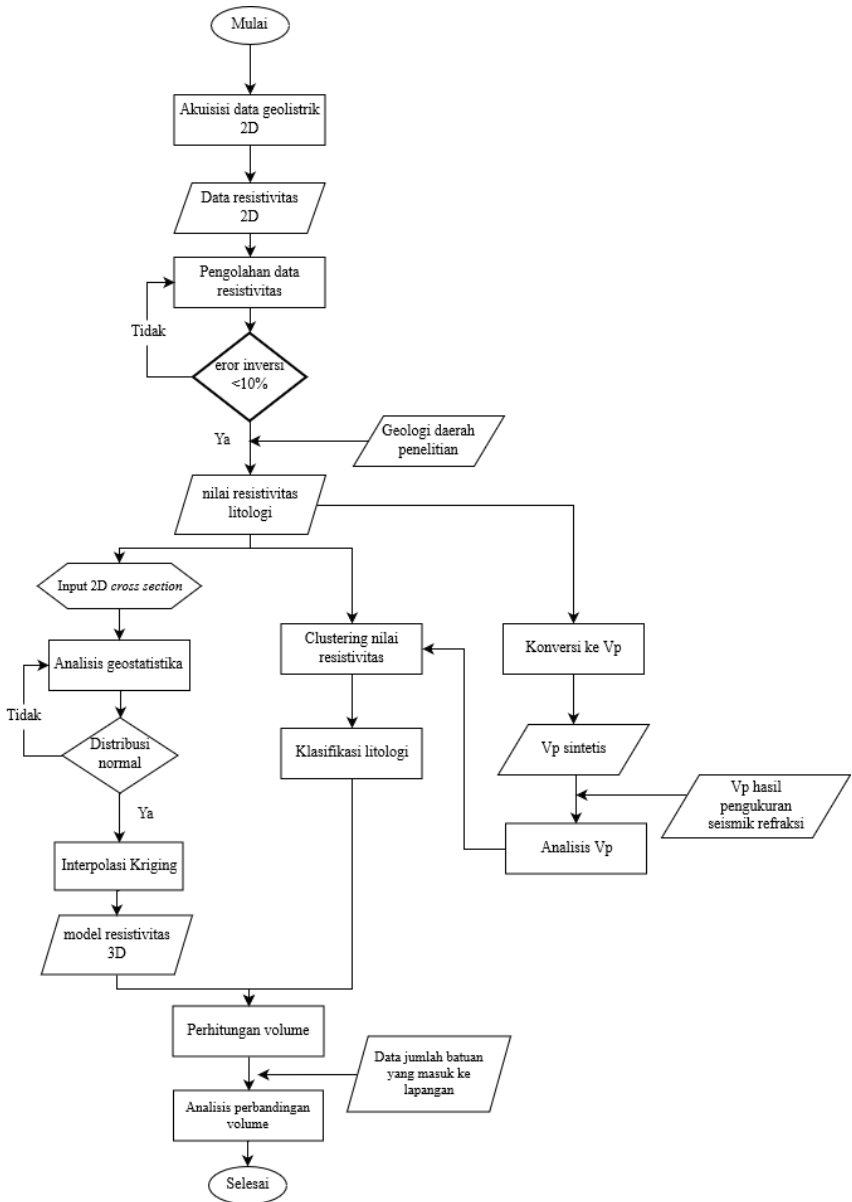
Pengukuran resistivitas pada penelitian ini berlokasi pada *Java Integrated Industrial and Port Estate* (JIPE) di Kecamatan Manyar, Kabupaten Gresik, Jawa Timur yang ditandai dengan kotak merah pada gambar 3.1 dibawah ini. Lokasi penelitian berada pada pesisir pantai dengan endapan aluvium (Qa) yang sudah mengalami proses stabilisasi tanah dengan timbunan *limestone* atau pedel.



Gambar 3. 1 Peta Geologi Lokasi Pengukuran Resistivitas pada PT. JIPE

3.3 Skema Kerja

Penelitian ini diawali dengan akuisisi data resistivitas dan dilanjutkan dengan tahapan pengolahan. Dimulai dari tahap pengolahan *raw data* resistivitas untuk mendapatkan penampang resistivitas 2D. Dilanjutkan dengan pengolahan lebih lanjut guna memodelkan dengan metode geostatistika guna mendapatkan model 3D dan jumlah timbunan *limestone*. Tahapan-tahapan pengerjaan ini dapat dilihat lebih lanjut melalui gambar 3.2 dan akan dijelaskan lebih lanjut pada sub-bab selanjutnya.



Gambar 3. 2 Skema kerja penelitian perhitungan volume timbunan

3.4 Tahapan Penelitian

3.4.1. Akuisisi Data

Desain akuisisi dilakukan pada perangkat lunak *Google Earth Pro*. Lokasi penelitian terletak pada wilayah reklamasi dengan timbunan *limestone* pada PT. *Java Integrated Industrial and Port Estate (JIPE)* dengan ukuran wilayah yang dihitung kurang lebih 1 Ha. Pada gambar 3.3 dapat dilihat jumlah lintasan yang dilakukan adalah 6 lintasan yang saling berpotongan membentuk *mesh*. Masing-masing lintasan memiliki panjang ± 96 m dengan koordinat lintasan yang dapat dilihat pada tabel 3.4. Terdapat tiga lintasan pengukuran memiliki orientasi timur laut-barat daya dan sebanyak tiga lintasan berorientasi barat laut-tenggara yang dapat dilihat pada peta lintasan akuisisi lapangan. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi *Wenner-Schlumberger* dengan spasi antar elektroda (*a*) sebesar 2 m. Konfigurasi ini digunakan karena memiliki resolusi vertikal maupun horizontal yang baik (Loke, 2000), sehingga dapat menemukan batas antara lempung, pasir, dan batugamping yang jelas pada kedalaman kurang lebih 2 m hingga 3 m.

Tabel 3. 4 Koordinat Lintasan Resistivitas 2D

No	Nama	Orientasi	Longitude	Latitude
1	Lintasan 1	Tenggara	112.6361	7.0726
2	Lintasan 1	Barat laut	112.6389	7.0724
3	Lintasan 2	Timur laut	112.6358	7.0721
4	Lintasan 2	Barat daya	112.6356	7.0730
5	Lintasan 2	Tengah	112.6356	7.0725
6	Lintasan 3	Tenggara	112.6361	7.0722
7	Lintasan 3	Barat laut	112.6353	7.0722
8	Lintasan 4	Timur laut	112.6361	7.072194
9	Lintasan 4	Barat daya	112.6361	7.073083
10	Lintasan 5	Barat laut	112.6353	7.072833
11	Lintasan 5	Tenggara	112.6361	7.073056
12	Lintasan 6	Timur laut	112.6356	7.072
13	Lintasan 6	Barat daya	112.6353	7.072889

Menurut Loke (2000), panjang lintasan mempengaruhi kedalaman maksimum datum. Hal ini dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini

$$faktor\ kedalaman = \frac{ze}{a} \tag{3.1}$$

atau

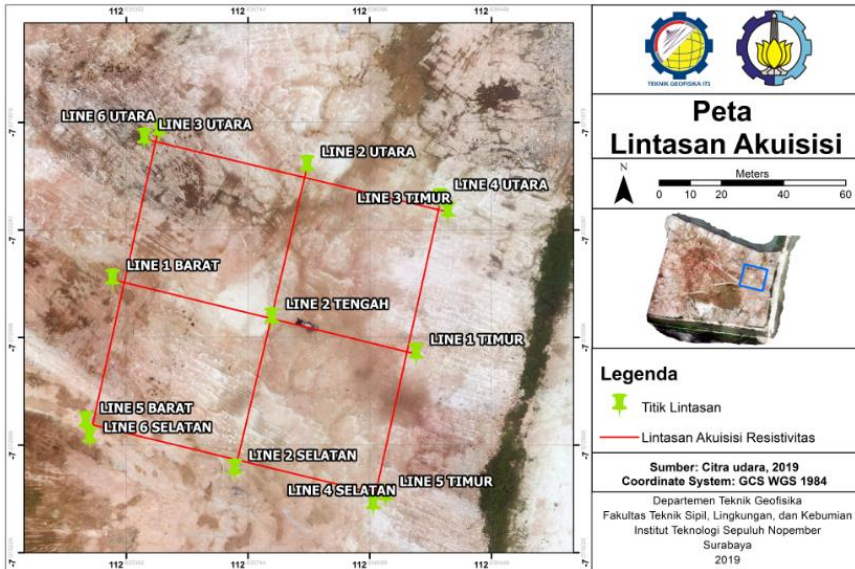
$$\text{faktor kedalaman} = \frac{Z_e}{L} \quad (3.2)$$

dengan faktor kedalaman untuk konfigurasi *Wenner-Schlumberger* diketahui dalam tabel 3.5, Z_e adalah median kedalaman target yang dicari, a adalah spasi elektroda, dan L adalah panjang lintasan.

Tabel 3. 5 Koefisien kedalaman datum berdasarkan spasi elektroda, panjang lintasan, dan nilai n yang digunakan.

Nilai n	Z_e/a	Z_e/L
<i>Wenner-Schlumberger</i>		
$n=1$	0.519	0.173
$n=2$	0.925	0.186
$n=3$	1.318	0.189
$n=4$	1.706	0.190
$n=5$	2.093	0.190
$n=6$	2.478	0.191
$n=7$	2.863	0.191

Persamaan 3.1 digunakan untuk mengetahui kedalaman datum pada n tertentu berdasarkan spasi elektroda yang digunakan. Sedangkan persamaan 3.2 digunakan untuk mengetahui kedalaman maksimum datum berdasarkan panjang lintasan yang digunakan dengan asumsi spasi elektroda yang digunakan. Berdasarkan persamaan tersebut, didapatkan nilai datum dengan target kedalaman 5 m adalah $n=7$ dan kedalaman maksimum dengan lintasan sepanjang 96 m adalah ± 17 m.



Gambar 3. 3 Peta Lintasan Akuisisi Geolistrik 2D

3.4.2. Pengolahan Data Resistivitas 2D

Data awal atau *raw data* yang didapatkan setelah akuisisi di lokasi timbunan *limestone* berupa potensial (V) dan arus (I), seperti pada gambar 3.4. Kemudian dihitung nilai tahanan jenisnya (R) dari nilai V dan I sebelumnya. Berdasarkan konfigurasi pengukuran yang dilakukan, terdapat faktor geometri yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7 dari nilai spasi elektroda (a), panjang lintasan (L), dan nilai n . Lalu dihitung nilai resistivitas semu dengan mengalikan nilai R dengan nilai faktor geometri (K). Data resistivitas semu inilah yang digunakan untuk diolah lebih lanjut guna mendapatkan penampang resistivitas 2D.

mis	A	B	M	N	I(mA)	V(mV)	PS(mV)	r(O ² m)	var	M(ms)
1	1	4	2	3	403	89	72	2.78	0	0
2	25	28	26	27	525	63	-4	1.50	0	0
3	2	5	3	4	619	120	-333	2.44	0	0
4	26	29	27	28	370	44	-183	1.51	0	0
5	3	6	4	5	383	85	-27	2.78	0	0
6	27	30	28	29	583	78	-44	1.69	0	0
7	4	7	5	6	687	116	-124	2.13	0	0
8	28	31	29	30	313	41	-98	1.64	0	0
9	5	8	6	7	330	56	-55	2.11	0	0
10	29	32	30	31	215	30	-58	1.73	0	0
11	6	9	7	8	315	39	-153	1.58	0	0
12	30	33	31	32	236	39	-191	2.08	0	0
13	7	10	8	9	243	39	-30	2.04	0	0
14	31	34	32	33	412	54	-118	1.66	0	0
15	8	11	9	10	364	49	-132	1.69	0	0
16	32	35	33	34	243	51	15	2.63	0	0
17	9	12	10	11	255	31	-173	1.53	0	0
18	33	36	34	35	434	65	-100	1.89	0	0
19	10	13	11	12	978	152	-42	1.95	0	0

Gambar 3. 4 Raw data pengukuran resistivitas

Pengolahan data dilanjutkan menggunakan Res2DInv dengan menyesuaikan input data dengan format yang ditentukan (gambar 3.5). Pada baris pertama diisi dengan nama lintasan, baris kedua diisi dengan spasi lintasan, baris ketiga merupakan nilai n, baris keempat merupakan jumlah datum yang diukur, baris kelima dan keenam merupakan ketentuan dari program. Dilanjutkan dengan data resistivitas semu hasil perhitungan.

```

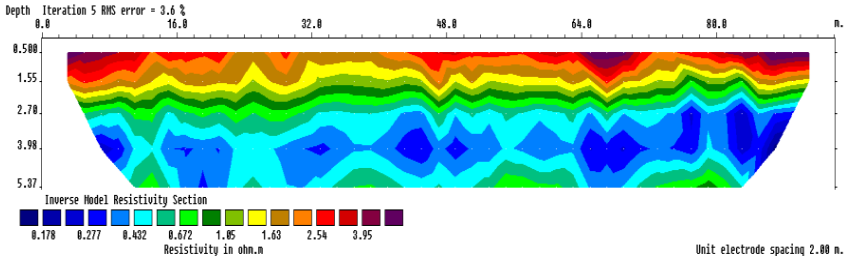
line 1 timbunan - Notepad
-
2,00
7
576
1
0
3,00 2,00 1,00000 2,78
51,00 2,00 1,00000 1,50
5,00 2,00 1,00000 2,44
53,00 2,00 1,00000 1,51
7,00 2,00 1,00000 2,78
55,00 2,00 1,00000 1,69
9,00 2,00 1,00000 2,13
57,00 2,00 1,00000 1,64
11,00 2,00 1,00000 2,11
59,00 2,00 1,00000 1,73
13,00 2,00 1,00000 1,58
61,00 2,00 1,00000 2,08
15,00 2,00 1,00000 2,04
63,00 2,00 1,00000 1,66
17,00 2,00 1,00000 1,69
65,00 2,00 1,00000 2,63
19,00 2,00 1,00000 1,53
67,00 2,00 1,00000 1,89
21,00 2,00 1,00000 1,95
69,00 2,00 1,00000 2,21
23,00 2,00 1,00000 1,38
71,00 2,00 1,00000 1,82
25,00 2,00 1,00000 1,63
73,00 2,00 1,00000 1,57
27,00 2,00 1,00000 1,38
75,00 2,00 1,00000 1,49
29,00 2,00 1,00000 1,67

```

Gambar 3. 5 Input data ke Res2DInv

Pada Res2DInv ditampilkan penampang resistivitas dua dimensi. Pada proses ini dilakukan *quality control* data untuk mengeliminasi data *outliers* sehingga penampang yang dihasilkan lebih representatif dan nilai eror lebih

kecil. Kemudian dilakukan inversi *least square* terhadap resistivitas semu guna mendapatkan nilai resistivitas yang sesungguhnya. Kedalaman investigasi hasil inversi sebesar ± 11 m. Namun, karena berdasarkan data dari perusahaan mengatakan bahwa litologi dibawah 5 m sudah homogen, yaitu lempung, maka kedalaman penampang dipotong hingga kedalaman 5.37 m saja. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 3.6



Gambar 3. 6 penampang resistivitas 2D dengan kedalaman 5.37 m

3.4.3. Pengelompokan (*Clustering*) Data

Pengelompokan atau *clustering* data resistivitas dilakukan agar dapat lebih mudah menginterpretasi lapisan bawah permukaan dan juga agar visualisasi penampang lebih mudah dilihat oleh masyarakat umum. Pada penelitian ini *clustering* dilakukan untuk membedakan lapisan limestone yang merupakan batu timbunan di lokasi pengukuran dengan lapisan pasir dan lempung yang merupakan tanah hasil reklamasi. Pengelompokan data nilai resistivitas dilakukan pada hasil interpolasi kriging dan dibantu dengan melakukan dengan mengonversi nilai resistivitas pada tiap kedalaman menjadi nilai kecepatan gelombang primer (*P-wave velocity* atau V_p). Konversi ini menggunakan metode Faust pada persamaan 2.30. Hal ini guna memberikan validasi ketebalan lapisan yang akan dikelompokkan.

3.4.4. Konversi Nilai Resistivitas ke Kecepatan Gelombang

Parameter yang digunakan dalam perhitungan metode Faust ini adalah nilai resistivitas, nilai kedalaman, dan konstanta Faust. Parameter kedalaman yang digunakan adalah nilai kedalaman datum resistivitas, yaitu 0,5 m, 1,55 m, 2,7 m, 3,98 m, dan 5,37 m. Sedangkan nilai konstanta Faust yang digunakan sebesar 2000. Nilai ini didasarkan pada jurnal terdahulu dengan studi kasus litologi batuan reservoir, salah satunya adalah *limestone*.

Metode Faust ini diterapkan pada seluruh lintasan untuk melihat persebaran kepadatan dan jenis batuan. Setiap nilai V_p pada tiap kedalaman kemudian dirata-ratakan dan diplot terhadap kedalaman. Berdasarkan hasil

plotting tiap kedalaman dapat diidentifikasi jenis litologi dan efek kedalaman terhadap nilai fisis batuan (resistivitas dan Vp).

Pengelompokkan data dilakukan dengan mengkorelasikan antara nilai resistivitas dan nilai Vp yang didapatkan. Korelasi kedua nilai dilakukan pada *Microsoft Excel* berdasarkan *trend* grafik nilai Vp dan resistivitas. Data dapat dikelompokkan menjadi klasifikasi nilai resistivitas tinggi dengan nilai Vp tinggi, nilai resistivitas rendah dengan nilai Vp rendah sampai menengah, dan nilai resistivitas tengah dengan nilai Vp menengah. Sehingga didapatkan 3 lapisan litologi berdasarkan rentang nilai resistivitasnya.

3.4.5. Pemodelan 3D

Pemodelan tiga dimensi timbunan *limestone* dilakukan pada program pemodelan. Dalam pemodelan dibutuhkan beberapa tahap, seperti persiapan, analisis parameter geostatistika, dan interpolasi geostatistika. Penjelasan tahap-tahap ini dapat dilihat pada subbab selanjutnya.

3.4.5.1 *Persiapan Data*

Dalam mempersiapkan data resistivitas guna menjadikannya sebagai model tiga dimensi perlu dilakukan beberapa hal sebagai berikut

1. *Input* data resistivitas

Pada tahap ini, data resistivitas hasil inversi dari Res2Dinv diekstrak dalam format *.xyz* kemudian diambil beberapa parameter, seperti kedalaman, koordinat, dan nilai resistivitas lapisan pada lokasi timbunan *limestone*. Hasil format pada program ini dapat dilihat pada gambar 3.7 dibawah ini. Namun, data dari hasil inversi hanya ada koordinat X dan koordinat Y dianggap sama untuk setiap lintasan. Maka, terlebih dahulu mendefinisikan koordinat Y berdasarkan lokasi nya pada rentang 96 m panjang lintasan.

```

File Edit Format View Help
/
/ The following section gives the relative sensitivity and
/ percentage uncertainty of the model resistivity values.
/ The x and z coordinates of the centres of the model blocks
/ and their resistivity values are also given.
/
/                               Relative
/                               Resistivity Sensitivity
/
/   X           Depth   Resistivity   Sensitivity
/   3.00        -0.50     6.33         0.4476
/   5.00        -0.50     4.94         0.9158
/   7.00        -0.50     4.52         1.2305
/   9.00        -0.50     3.93         1.5038
/   11.00       -0.50     3.79         1.9170
/   13.00       -0.50     2.39         2.0074
/   15.00       -0.50     3.20         2.2116
/   17.00       -0.50     3.02         2.3818
/   19.00       -0.50     2.67         2.4710
/   21.00       -0.50     3.24         2.6199
/   23.00       -0.50     1.97         2.6201
/   25.00       -0.50     1.82         2.5813
/   27.00       -0.50     2.14         2.6830
/   29.00       -0.50     2.78         2.7470
/   31.00       -0.50     1.81         2.4469
/   33.00       -0.50     2.04         2.5076
/   35.00       -0.50     1.98         2.4969
/   37.00       -0.50     1.90         2.5598
/   39.00       -0.50     1.86         2.5691
/   41.00       -0.50     2.24         2.5259
/   43.00       -0.50     2.44         2.3425
/   45.00       -0.50     2.98         2.3961
/   47.00       -0.50     3.21         2.6049
/   49.00       -0.50     3.39         2.4433
/   51.00       -0.50     2.79         2.4889
/   53.00       -0.50     2.86         2.4868

```

(a)

```

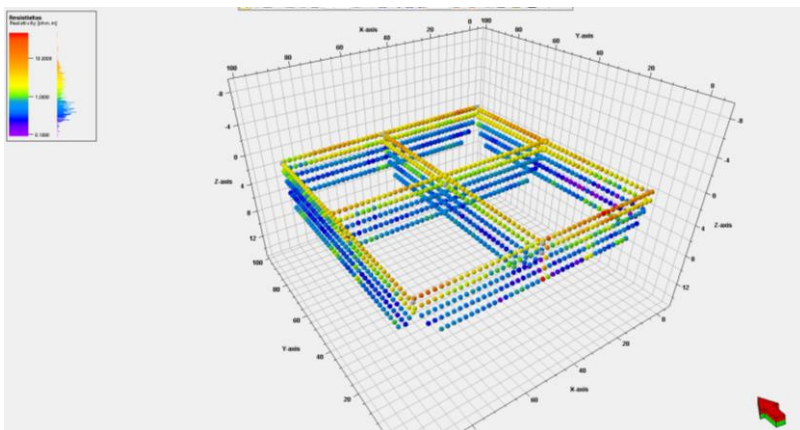
File Edit Format View Help
X   y   Depth   Resistivity
3   50   -0.5    6.33
5   50   -0.5    4.94
7   50   -0.5    4.52
9   50   -0.5    3.93
11  50   -0.5    3.79
13  50   -0.5    2.39
15  50   -0.5    3.2
17  50   -0.5    3.02
19  50   -0.5    2.67
21  50   -0.5    3.24
23  50   -0.5    1.97
25  50   -0.5    1.82
27  50   -0.5    2.14
29  50   -0.5    2.78
31  50   -0.5    1.81
33  50   -0.5    2.04
35  50   -0.5    1.98
37  50   -0.5    1.9
39  50   -0.5    1.86
41  50   -0.5    2.24
43  50   -0.5    2.44
45  50   -0.5    2.98
47  50   -0.5    3.21
49  50   -0.5    3.39
51  50   -0.5    2.79
53  50   -0.5    2.86
55  50   -0.5    2.71
57  50   -0.5    2.62
59  50   -0.5    3.25
61  50   -0.5    3.57
63  50   -0.5    3.05
65  50   -0.5    5.76

```

(b)

Gambar 3. 7 (a) hasil ekspor format .xyz dari Res2Dinv dan (b) format input data ke Petrelprogram pemodelan

Saat *input* data ke Petrel, pastikan semua data dimasukkan secara bersamaan dan di-*merge* agar semua proses dilakukan secara bersamaan untuk semua nilai resistivitas yang dimasukkan. Hasil input seluruh data tampak seperti pada gambar 3.8. Atribut diatur sesuai dengan jenis data yang dimasukkan, yaitu resistivitas. Kemudian *color bar* pada data disesuaikan dengan rentang nilai resistivitas data yang ada.



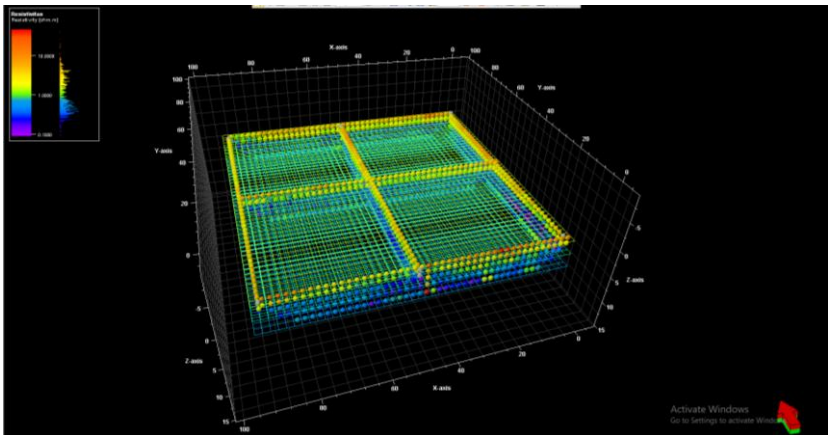
Gambar 3. 8 *Input* data resistivitas untuk pemodelan 3D

2. Pembuatan *Surface*

Data resistivitas yang sudah masuk harus memiliki batas pengerjaan. Batas ini berguna agar data memiliki wilayah pemodelan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Batas ini disebut dengan *boundary*. Dari *boundary* dibuatlah *surface* yang sesuai dengan ukuran *boundary*. *Surface* ini akan menjadi batas atas dan batas bawah dari model yang dibuat.

3. *Simple Grid*

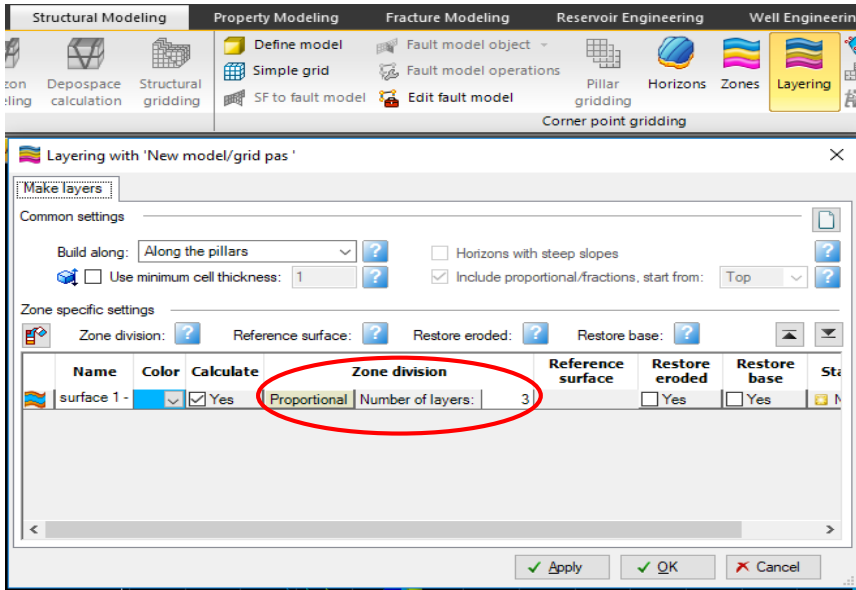
Simple grid dilakukan untuk membuat kerangka pemodelan. Dengan adanya *simple grid* ini ukuran kotak untuk pemodelan 3D dapat disesuaikan. Semakin kecil ukuran *grid* maka model semakin halus. Pada penelitian ini, *increment grid* atau pencacahan kotak yang digunakan adalah 0.1. Sehingga, kotak-kotak kerangka yang dihasilkan lebih kecil (gambar 3.9). Kotak-kotak ini menentukan resolusi pemodelan yang dilakukan, semakin kecil ukuran kotak maka semakin akurat pemodelan, tapi juga akan memakan waktu lama dalam pemrosesan.



Gambar 3. 9 *Grid* model resistivitas

4. *Layering*

Selain menghasilkan kerangka, *simple grid* ini juga menghasilkan *edges* atau sisi-sisi kerangka. Pada *edges* menunjukkan jumlah pembagian lapisan. Untuk menentukan jumlah lapisan yang diinginkan dapat diatur pada menu *layering* seperti pada gambar 3.10 yang ditunjukkan pada lingkaran merah (O). Lapisan yang dimasukkan sejumlah kedalaman datum yang ada, yaitu 5. Namun, jika dirasa hasil interpolasi masih terlalu kasar, maka jumlah *layering* dapat ditambah untuk mendapatkan hasil interpolasi yang lebih baik.



Gambar 3. 10 Input jumlah lapisan data pada window layering

5. Upscaling

Upscaling adalah proses pemecahan data menjadi bagian-bagian dengan rentang yang lebih besar. Proses ini dilakukan supaya data dapat dianalisis parameter geostatistika berdasarkan *grid* yang sudah disiapkan. Hasil dari *upscalling* ini berupa data-data yang sudah dalam bentuk matriks dan menyesuaikan dengan *grid* yang sudah dibuat sebelumnya.

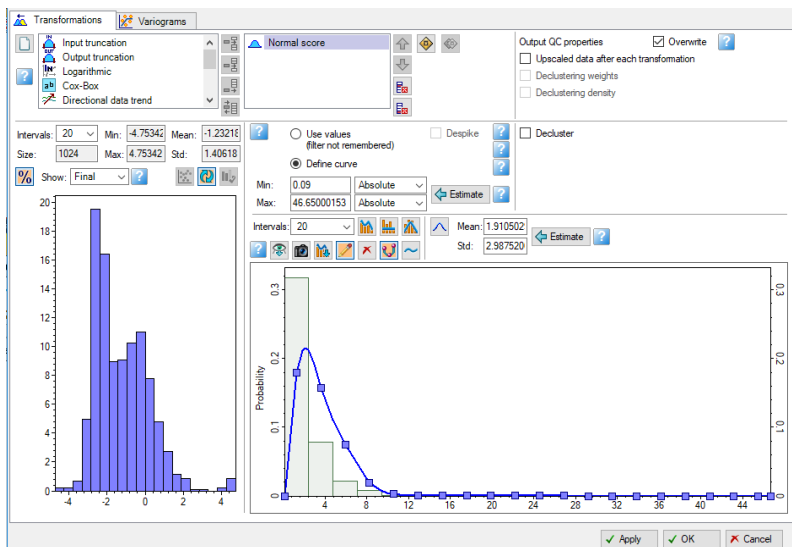
3.4.5.2 Analisis Data Geostatistika

Dari hasil penampang resistivitas 2D kemudian diinterpolasi dengan metode geostatistika. Interpolasi yang digunakan adalah Kriging. Namun, sebelum itu dilakukan analisis terhadap parameter statistiknya, yaitu histogram dan variogram. Pada tahap analisis data ini dilakukan pada data yang sudah di-*upscale*. Proses ini merupakan inti dari pemodelan 3D karena dalam pemodelan dilakukan interpolasi yang menggunakan parameter-parameter geostatistika, seperti histogram dan variogram. Proses ini membantu pemetaan lapisan bawah permukaan pada lokasi timbunan menjadi lebih sesuai dengan kondisi di lapangan.

1. Histogram

Dalam analisis histogram hal yang harus diperhatikan adalah parameter statistik data, yaitu varians, standar deviasi, *mean*, median, dan lain-lain. Nilai-nilai ini yang digunakan sebagai penentu baik atau tidaknya persebaran suatu populasi data.

Pembuatan histogram pada penelitian ini menggunakan interval 20 data. Jadi, nilai resistivitas ini dipecah menjadi 20 kelompok berdasarkan *range* nilainya. Dari yang paling kecil ($0.09 \Omega\text{m}$) hingga paling besar ($46 \Omega\text{m}$). Penggunaan interval data ini berpengaruh kepada bentuk distribusi data, seperti pada gambar 3.10. Distribusi data pada histogram harus dipastikan sudah terdistribusi normal agar data memenuhi syarat untuk melakukan interpolasi Kriging. Jika data tidak terdistribusi normal, maka dapat dilakukan transformasi menjadi distribusi normal dengan memiliki “*normal score*” pada tabel transformasi. Namun, pada penelitian ini tidak diperlukan transformasi karena data resistivitas hasil pengukuran sudah terdistribusi normal.

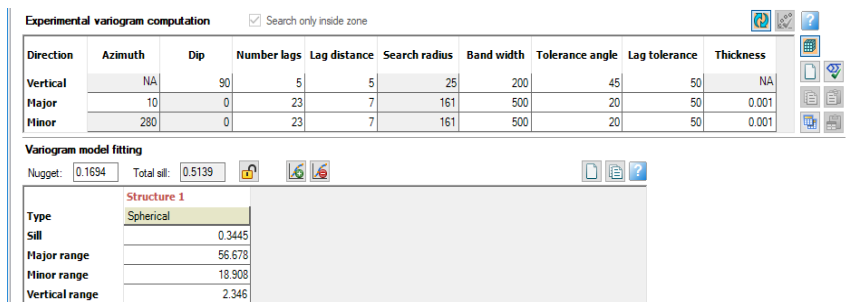


Gambar 3. 11 Hasil histogram data resistivitas

2. Variogram

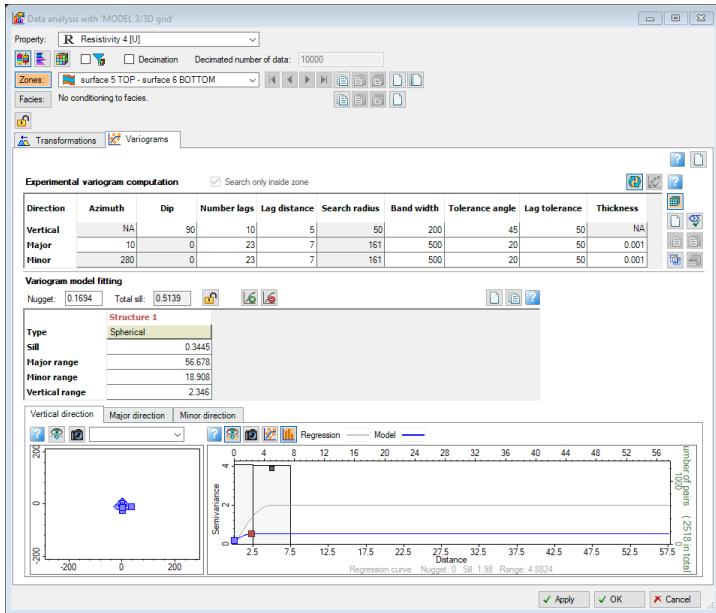
Dalam perhitungan variogram eksperimental perlu didefinisikan parameter variogramnya, yaitu *azimuth*, *lag*, *bandwidth*, *tolerance angle*, *lag tolerance*, dan *search radius*, seperti pada gambar 3.11. Parameter ini digunakan untuk menampilkan hasil perhitungan variogram serta menentukan seberapa banyak pasangan data yang akan dihitung dalam eksperimental variogram.

Perhitungan variogram eksperimental menggunakan persamaan 2.20 yang dilakukan dalam program Petrel.

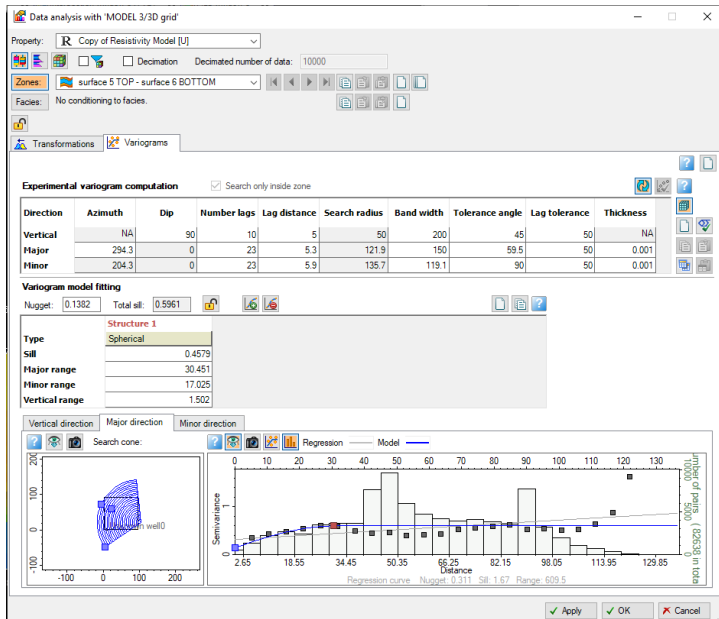


Gambar 3. 12 Parameter yang dimasukkan ke variogram

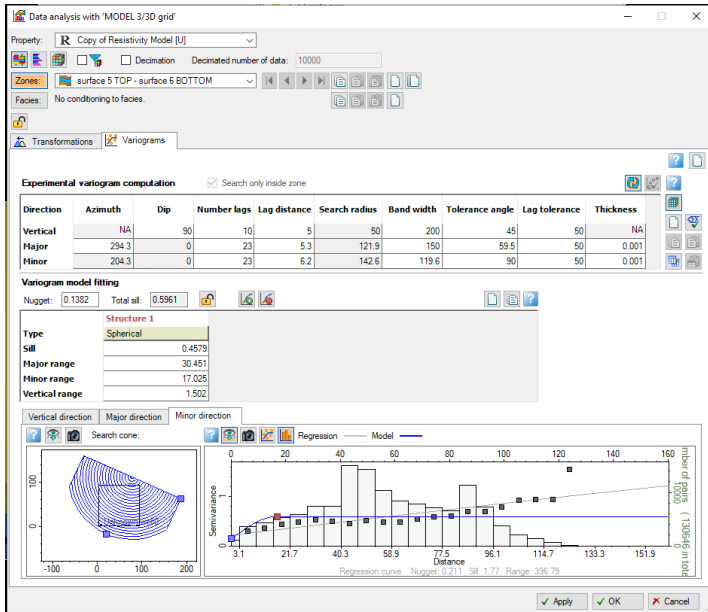
Setelah dilakukan perhitungan variogram eksperimental, kemudian dilakukan *fitting* kurva variogram atau perhitungan variogram model dengan parameter *sill* dan *range* seperti pada gambar 3.12. Pada analisis variogram dilakukan *variogram fitting curve* yang terdiri dari 3 komponen, yaitu *vertical range*, *major range*, dan *minor range* yang terdapat pada gambar 3.13. Variogram dengan *vertical range* pada gambar 3.13a menunjukkan data yang sedikit. Hal ini disebabkan oleh variasi kedalaman yang tidak terlalu besar, hanya sampai 5 m sehingga data yang tersaji juga sedikit. Variogram dengan *major range* pada gambar 3.13b menunjukkan *trend* dari varians pada arah mayor atau arah kemenerusan nilai varians rendah. Hal ini menunjukkan tingkat persebaran data tersebut rendah. Pada variogram ini nilai varians atau $\gamma(h)$ membentuk suatu *trend* yang dapat disesuaikan dengan model teoritis. Hal ini juga terjadi pada variogram untuk *minor range* pada gambar 3.13c. Dalam membentuk variogram *minor range* digunakan *azimuth* yang berbeda 90 derajat dari *major range*, yaitu 204.3°. Variogram ini menunjukkan *trend* data pada nilai varians yang memiliki arah tegak lurus terhadap *major range*. Variogram ini dihitung guna melihat *trend* data pada setiap arah variogram. Terlihat pada gambar 3.13(c) memiliki varians yang lebih tinggi dibandingkan variogram pada gambar 3.13(b) karena pada variogram ini data yang dipilih cenderung memiliki nilai varians yang besar.



(a)



(b)



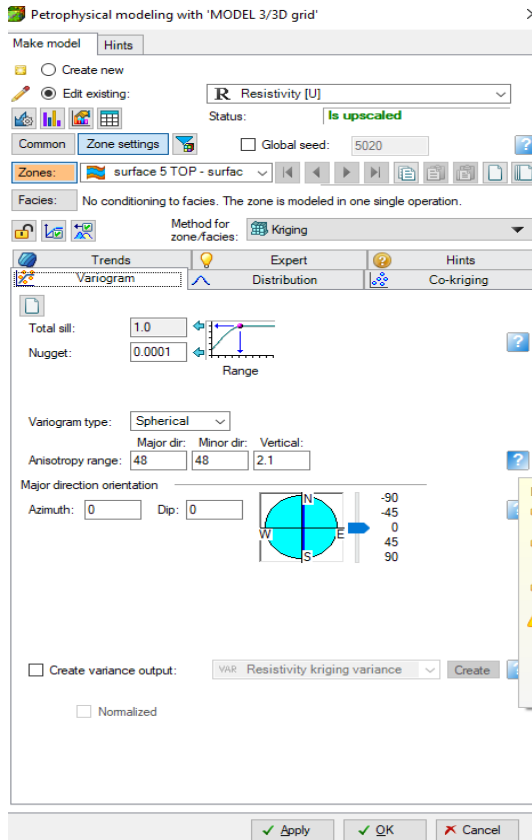
(c)

Gambar 3. 13 Hasil perhitungan variogram pada (a) *vertical range*, (b) *major range*, dan (c) *minor range* yang menghasilkan nilai *nugget* dan *sill*

Dari ketiga kurva variogram ini akan dihasilkan nilai *total sill* dan *nugget* berdasarkan nilai varians dari 3 variogram yang ada pada gambar 3.13. Pada proses ini dapat juga dipilih tipe model kurva untuk proses *fitting variogram*. Model kurva yang dipilih pada penelitian ini adalah *spherical*, karena model ini memiliki tingkat keakurasian yang tinggi dan nilai eror yang kecil pada hasil pemodelan untuk data spasial, seperti data geofisika.

3.4.5.3 Pemodelan

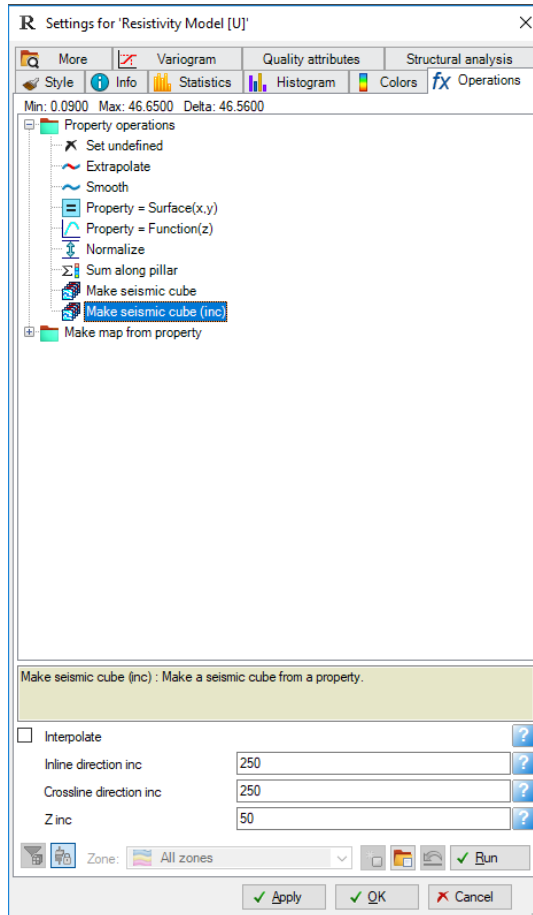
Pemodelan dilakukan pada data resistivitas 2D dengan 6 lintasan yang saling berpotongan. Pada menu *petrophysical modelling* di gambar 3.14, nilai-nilai yang sudah didefinisikan pada analisis data sebelumnya dimasukkan sebagai parameter pemodelan statistiknya. Pemodelan ini menggunakan interpolasi Kriging dengan spesifikasi khusus *ordinary Kriging*. Pada pemodelan ini juga dilakukan *quality control* untuk melihat apakah model sudah sesuai dengan kondisi timbunan *limestone* di lapangan. Jika belum sesuai maka parameter variogramnya diubah lagi, terutama pada *range* variogramnya.



Gambar 3. 14 Petrophysical modelling

3.4.5.4 Pembuatan Seismic Cube

Pembuatan *seismic cube* ini dilakukan untuk membuat *intersection* dari model 3D yang sudah dibuat. Fungsi lain dari proses ini adalah agar penampang resistivitas dapat di-*picking* sehingga dapat dibuat horizon batas lapisan timbunan *limestone*. Pada gambar 3.15 dapat dilihat parameter yang digunakan dalam pembuatan *seismic cube* adalah nilai *increment* pada sumbu x (*xline*) dan pada sumbu y (*inline*) serta *increment* untuk faktor kedalaman (Z). Pada proses pembuatan *seismic cube* ini juga dilakukan interpolasi data-data yang ada agar penampang tampak lebih halus. Pada penelitian ini seluruh *increment* diisi dengan nilai 1 karena wilayah pengukuran yang cenderung kecil sehingga tidak memerlukan *increment* yang besar.

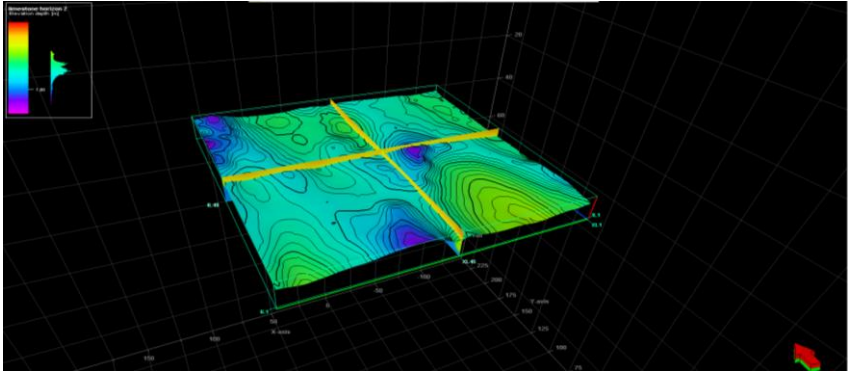


Gambar 3. 15 Parameter seismic cube

3.4.5.5 Pembuatan Batas Lapisan Timbunan Limestone

Perhitungan volume pada timbunan *limestone* didapatkan dari data resistivitas yang terdeliniasi menjadi nilai resistivitas dengan rentang yang tinggi. Dalam perhitungan volume, terlebih dahulu didefinisikan batas lapisan timbunan *limestone*. Hal ini dilakukan dengan *picking horizon* pada intersectoin hasil interpolasi geostatistika sehingga menghasilkan sebuah *surface horizon* yang menunjukkan batas lapisan. Pada gambar 3.16 menunjukkan hasil *surface horizon* sesuai dengan *picking* yang telah dilakukan sebelumnya. Horizon pada gambar 3.15 menunjukkan kedalaman lapisan timbunan *limestone* yang berbatasan dengan lapisan pasir. Pada tahap ini hasil *clustering* data resistivitas

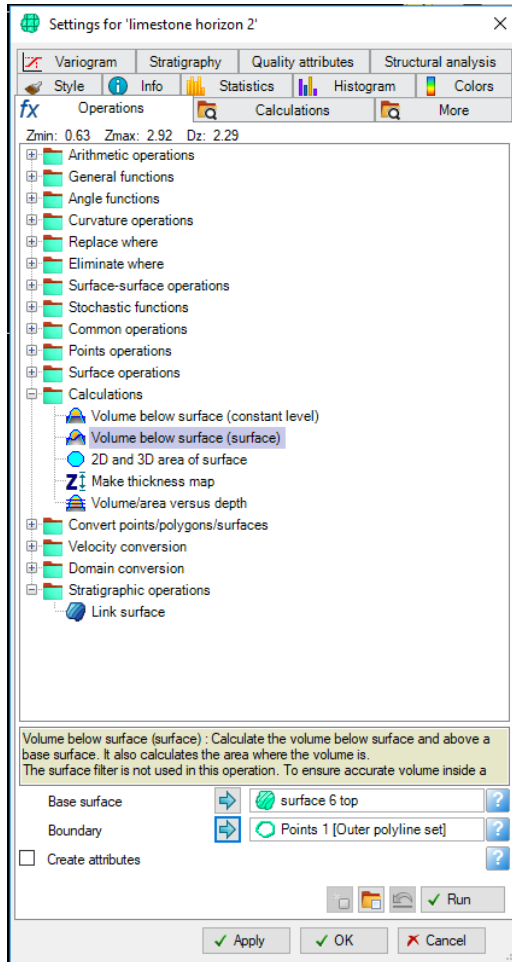
diaplikasikan ke *color scheme* penampang guna mempermudah mendeliniasikan lapisan timbunan *limestone* dengan pasir dan lempung.



Gambar 3. 16 Penampang (*surface*) horizon hasil picking batas bawah *limestone* dari *intersection* 2D

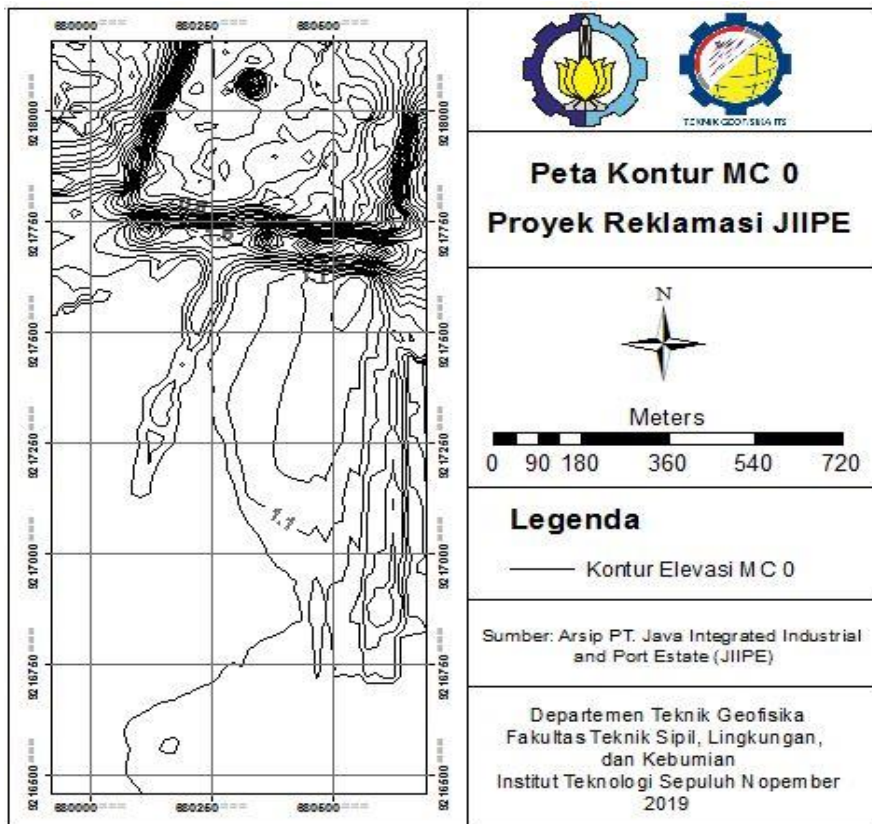
3.4.6. Perhitungan Volume

Berdasarkan horizon yang sudah dibuat berdasarkan nilai resistivitas batuan, dilanjutkan ke perhitungan volume *limestone* dengan menggunakan *tool bar calculation* pada *setting horizon* (gambar 3.17). Pada menu ini dapat juga dibuat peta ketebalan lapisan timbunan *limestone* dalam bentuk peta kontur, seperti yang terlihat pada gambar 3.17 dalam perhitungan volume ini diperlukan dua *surface* sebagai batas atas dan batas bawah. Batas atas menggunakan *surface* yang dibuat pada saat membuat grid dan batas bawah menggunakan *surface* pada gambar 3.16. Sehingga perhitungan volume hanya terbatas pada lapisan timbunan *limestone* yang telah didefinisikan.

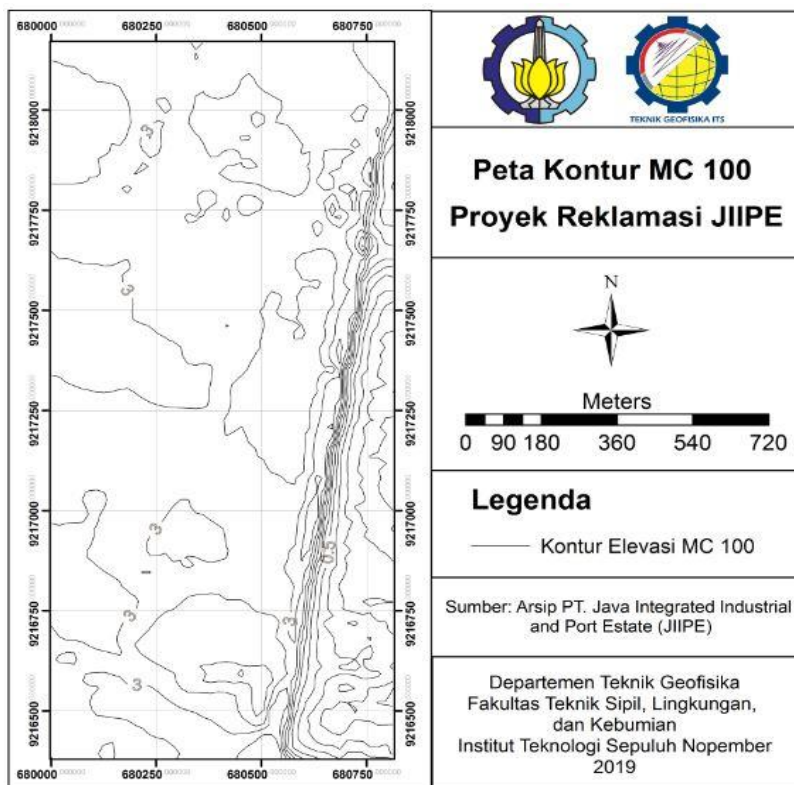


Gambar 3. 17 Menu perhitungan volume dan peta ketebalan

Volume yang didapatkan dari perhitungan ini dibandingkan dengan volume yang disediakan oleh pihak perusahaan. Volume ini berdasarkan data MC 0, yaitu data elevasi permukaan sebelum dilakukan reklamasi dan data MC 100, yaitu data elevasi permukaan setelah dilakukan reklamasi. Peta kontur MC 0 dan MC 100 dapat dilihat pada gambar 3.18 dan gambar 3.19 berikut ini. Berdasarkan kedua peta kontur ini dapat diketahui ketebalan hasil reklamasi yang kemudian dapat dihitung volume batuan reklamasinya.



Gambar 3. 18 Peta MC 0 Reklamasi (sumber: PT. JIPE, 2019)



Gambar 3. 19 Peta Kontur MC 100 Reklamasi (sumber: PT. JIPE, 2019)

3.5 Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Januari hingga Juli. Jadwal perencanaan dan realisasi penelitian dapat dilihat pada tabel 3.6 dibawah ini. Terlihat pada tabel kegiatan bahwa terdapat kurva yang cenderung stagnan pada minggu ke-4 hingga minggu ke-9 jadwal penelitian yang diakibatkan oleh mundurnya jadwal akuisisi data resistivitas di lokasi timbunan *limestone*. Pada minggu ke-10 mulai dilakukan akuisisi data dan terjadi kenaikan drastis terhadap pekerjaan dalam penelitian ini. Kenaikan yang drastis ini karena setelah mengakuisisi data, dilakukan proses-proses pengolahan data untuk mengejar ketertinggalan pada jadwal penelitian hingga pada minggu ke-14. Setelah itu pengerjaan dilakukan sesuai dengan yang telah dijadwalkan dan karena proses pengolahan setelah itu sudah lancar dan tidak ada hambatan, maka proses pengolahan data dapat dipercepat pada minggu ke-18 hingga minggu terakhir dalam proses tugas akhir.

Tabel 3. 6 Jadwal penelitian tugas akhir

No	Agenda	Alokasi dan bobot	Output	Bobot	Minggu Pengumpulan																						
					Januari	Februari	Maret	April	Mei	Jun	Juli																
					3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	Studi literatur		Membaca konsep interpretasi metode resistivitas 2D, konsep geostatistika, cara perhitungan volume timbunan dan pemampang resistitas	14	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	
2	Pembuatan Proposal	Ms. Word dan Ms. Excel	Proposal Tugas Akhir	9	4	5																					
3	Pembuatan Presentasi	Ms. Power Point	Presentasi Proposal / Presentasi Progres, dan Presentasi Akhir	6		2						1															
4	Simulasi Akuisisi dan Akuisisi Data	Res2DMod dan satu set resistivimeter	Desain akuisisi yang paling baik, data resistivitas 2D, memahami cara akuisisi resistivitas yang baik dan benar	11		2	3	3																			
5	Pengalihan Data Resistivitas 2D		Mengalihkan penyebaran resistivitas bawah permukaan, batas antara timbunan dengan lempung	13			2	3	4																		
6	Clustering data resistivity	MATLAB, Ms. Excel, Geocal	Kelompokan resistivitas berdasarkan lingkungannya	5						1	2	2															
6	Pengalihan Geostatistika	Petrel/SCENES	Pemampang resistivitas 3D, penyebaran batuan karbonat	20						1	1	3	3	3	3	4	2										
7	Perhitungan Volume Petrel/SCENES		Jumlah timbunan batuan karbonat, perbandingan volume pasir dan dengan rencan awal	15													2	4	3	3	3						
8	Laporan Akhir	Ms. Word	Laporan Akhir Penelitian Tugas Akhir	7																							
	Total			100	5	6	4.5	3.5	3.5	5.5	3.5	4.5	5.5	3.5	3.5	4.5	3.5	3.5	4.5	4.5	4.5	3.5	4.5	6	5	4	
	Akumulasi			0	5	11	15.5	19	22.5	28	31.5	36	41.5	45	48.5	52	56.5	60	63.5	68	72.5	77	80.5	85	91	96	100
	Total Realisasi			0	5	11	15.5	19	19.5	20	20.5	21	22.5	26	30.5	39	48.5	60	63.5	68	76.5	84	88.5	91	95	98	100

*) Keterangan:

- : Realisasi
- : Perencanaan

Halaman ini sengaja dikosongkan

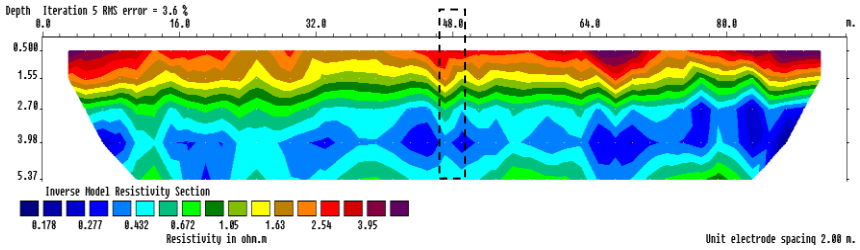
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Akuisisi Resistivitas

Berdasarkan akuisisi yang dilakukan di lokasi timbunan, diperoleh nilai resistivitas semu lapisan bawah permukaan. Resistivitas semu ini diolah pada Res2Dinv guna menghasilkan model resistivitas 2D pada setiap lintasan. Data resistivitas ini merupakan hasil inversi metode *least-square*. Metode ini mengasumsikan model estimasi dengan nilai eror kuadrat terkecil. Berdasarkan hasil inversi, didapatkan nilai litologi bawah permukaan bervariasi antara 0,1 Ωm sampai 46 Ωm . Kedalaman yang ditargetkan dari pengukuran ini sebesar 5.37 m.

Secara umum, lapisan timbunan *limestone* atau pedel dapat terdeferensiasi berdasarkan nilai resistivitas yang cenderung lebih tinggi. Berdasarkan data dari JIPE (2018), ketebalan timbunan yang diketahui adalah berkisar 2 hingga 3 m. Lapisan timbunan *limestone* ini berasal dari bongkahan *limestone* yang kemudian dihancurkan menjadi pedel dan ditimbun di atas lapisan lempung. Lokasi penelitian ini dapat dilihat pada lapiran 19 dan lampiran 20. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Maulana (2019) di lokasi penelitian yang sama, *limestone* yang digunakan untuk timbunan memiliki tiga warna yang berbeda yaitu *limestone* dengan warna putih (P), warna kuning (K), dan *limestone* karang (Kr). Berdasarkan parameter sampel yang diambil membuktikan bahwa porositas *limestone* yang digunakan memiliki klasifikasi yang baik (20-25%) untuk tipe *limestone* karang dan klasifikasi sangat baik (> 25%) (Schon, 2011). Berdasarkan penelitian ini didapatkan hubungan antara densitas dengan porositas yang berbanding terbalik, densitas dengan resistivitas yang cenderung berbanding lurus, dan porositas dengan resistivitas yang berbanding terbalik.

Namun, hasil pengukuran 6 lintasan resistivitas 2D menunjukkan bahwa lapisan timbunan *limestone* (nilai resistivitas >1.6 Ωm) tidak mencapai kedalaman dari referensi yang diperoleh. Kurang lebih hanya mencapai 2 m untuk ketebalan maksimumnya. Nilai resistivitas yang didapatkan untuk lapisan timbunan dengan batuan berupa karbonat memiliki nilai yang sangat berbeda dengan hasil penelitian terdahulu pada tabel 4.1. Hal ini dikarenakan nilai resistivitas penelitian tugas akhir ini didapatkan dari lapisan timbunan yang batumannya sudah hancur dan berubah bentuk.

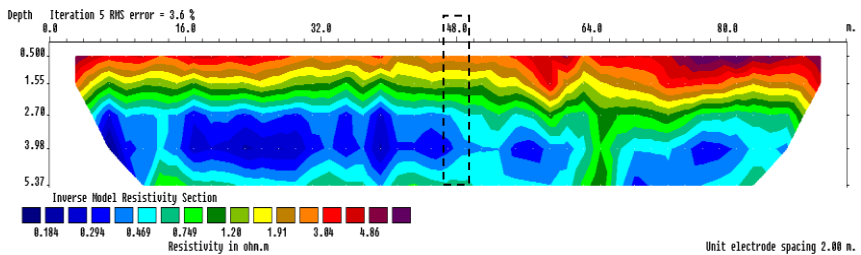


Gambar 4. 1 Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 1

Hasil inversi pengolahan data merupakan nilai resistivitas yang sebenarnya dari batuan di bawah permukaan, bukan nilai resistivitas semu. Persentase kesalahan atau perbedaan antara nilai resistivitas semu dengan model inversi dengan nilai resistivitas sebenarnya ditampilkan dengan nilai RMS error. Pada model inversi lintasan 1 (gambar 4.1), didapatkan RMS error yang kecil, yaitu 3.6%. Nilai ini menunjukkan bahwa variasi resistivitas pada model sesuai dengan perkiraan kondisi geologi bawah permukaan di lokasi penelitian.

Pada lintasan 1, diduga ketebalan lapisan timbunan *limestone* mencapai 2 m dengan nilai resistivitas berkisar antara 1,63 Ω m hingga 6,87 Ω m. Dibawahnya terdapat lapisan pasir dari proyek reklamasi dengan nilai resistivitas berkisar dari 1 Ω m hingga 1,6 Ω m dengan ketebalan kurang dari 1 meter. Lapisan dasarnya berupa lempung dengan nilai resistivitas yang sangat rendah, yaitu 0.1 hingga 1 Ω m dimulai pada kedalaman $\pm 2,6$ m. Lapisan lempung ini merupakan dasar dari laut Selat Madura yang direklamasi oleh PT. JIPE.

Lintasan 1 sejajar dengan 2 lintasan resistivitas lainnya, yaitu lintasan 3 serta lintasan 5 dengan orientasi arah lintasan adalah tenggara - barat laut. Sedangkan lintasan 2, 4, dan 6 saling sejajar dengan orientasi arah lintasan berupa timur laut - barat daya. Lintasan 1 dan lintasan 2 saling berpotongan di titik tengah area pengukuran, yaitu di meter ke-48. Titik perpotongan ditandai dengan kotak hitam (□) dan lintasan lainnya berada di tepi area pengukuran. Hasil pemodelan untuk lintasan lainnya dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4. 2 Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 2

Pada lintasan 2 ini, terlihat lapisan *limestone* yang menebal ke utara dengan ketebalan berkisar antar 1,4 m hingga 2,6 m. Penebalan yang terjadi pada lokasi ini dapat diakibatkan oleh kondisi lokasi penelitian yang merupakan daerah reklamasi laut. Jadi, pada lokasi tersebut dapat diindikasikan kondisi *slope* dasar laut pada wilayah penelitian sudah menurun menuju ke zona laut yang lebih dalam. Nilai resistivitas pada lintasan ini cenderung lebih besar dibandingkan lintasan 1. Lapisan timbunan *limestone* memiliki resistivitas diantara 1,91 Ωm hingga 8,71 Ωm . Pada lapisan pasir memiliki nilai resistivitas sekitar 1 Ωm hingga 1.91 Ωm dengan ketebalan kurang lebih 0.5 m. Diikuti dengan lapisan lempung dengan nilai resistivitas <1 Ωm . Hasil model inversi lintasan 2 (meter ke-48) yang berpotongan dengan titik tengah pada lintasan 1 memiliki model yang sedikit berbeda antara satu dengan yang lainnya. Ditunjukkan dengan perbedaan tebal lapisan timbunan *limestone* dengan pada lintasan 1 yang mencapai 1,55 m, sedangkan pada lintasan 2 ketebalan timbunan *limestone* hanya berkisar 1,5 m saja (gambar 4.2).

Berdasarkan hasil pengolahan, nilai resistivitas pada lokasi penelitian berbeda jauh dengan nilai resistivitas referensi. Hal ini disebabkan oleh nilai resistivitas pada referensi yang ada merupakan hasil percobaan pada batuan yang masih kompak dan dalam keadaan ideal untuk melakukan pengukuran geolistrik, dengan kondisi batuan tersebut dalam keadaan kering. Sedangkan di lapangan terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai resistivitas itu sendiri, seperti kehadiran fluida, susunan material pembentuk batuan, dan pelapukan batuan atau bahkan proses pemadatan yang dilakukan pada lapisan timbunan *limestone* di lokasi penelitian ini. Pada penelitian yang dilakukan oleh Maulana, didapati bahwa *limestone* yang sudah dihancurkan dengan kandungan air laut mengalami penurunan dari $\pm 10.000 \Omega\text{m}$ menjadi $\pm 9.000 \Omega\text{m}$ walaupun hanya dengan 10 tetesan air laut ada *limestone*. Hal ini menunjukkan bahwa air laut sangat mempengaruhi nilai resistivitas dengan menurunkan nilai resistivitas dengan drastis. Sedangkan pada lumpur, air laut lebih berpengaruh dengan mengurangi nilai resistivitas dari $\pm 1.000 \Omega\text{m}$ menjadi $\pm 100 \Omega\text{m}$ dengan jumlah kandungan air laut yang sama, yaitu 10 tetes air laut.

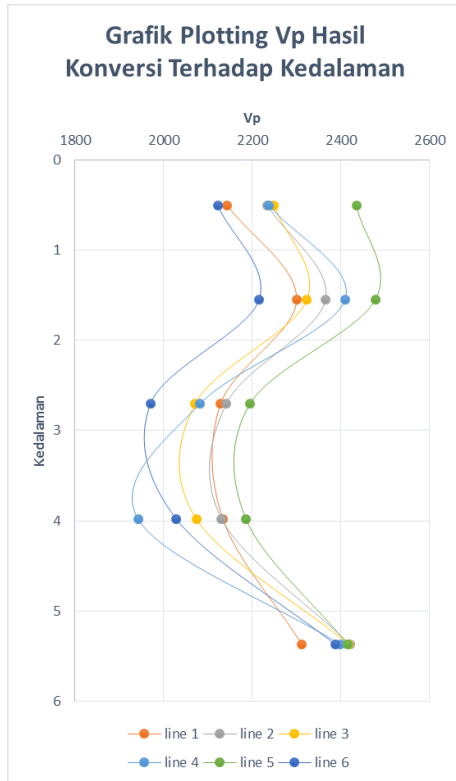
Interpretasi nilai resistivitas batuan bawah permukaan juga perlu menganalisis faktor-faktor yang dapat mempengaruhi nilai resistivitas batuan, salah satu contohnya adalah pada batu karbonat yang memiliki pori-pori atau rongga yang beragam. *Limestone* akan lebih mudah dimasuki oleh air atau fluida lainnya. Air yang masuk akan mempengaruhi nilai fisis dari batuan tersebut. Jumlah air yang mengisi pori-porinya juga akan semakin banyak. Ketika semakin tinggi jumlah air dalam batuan, maka semakin rendah nilai resistivitasnya dan begitupun sebaliknya. (Aditya dan Warnana, 2015)

4.2 Konversi Data Resistivitas ke Kecepatan Gelombang P (V_p)

Data resistivitas mampu menginterpretasikan struktur litologi bawah permukaan. Namun, data resistivitas tidak dapat memberikan info mengenai sifat mekanika tanah lokasi penelitian. Parameter fisis yang digunakan untuk menjelaskan mekanika tanah adalah kecepatan gelombang primer atau V_p . Nilai V_p ini dapat digunakan sebagai referensi dalam pengaplikasian parameter mekanik tanah dalam pembangunan gedung.

Pada penelitian ini, dilakukan konversi nilai resistivitas ke kecepatan gelombang primer atau V_p menggunakan metode Faust dengan persamaan 2.31 guna mengetahui sifat mekanik daerah penelitian. Menurut (Guntoro dkk., 2013), metode Faust terbukti bahwa pada batuan klastik yang tersaturasi, \log resistivitas dan \log *sonic* gelombang P memiliki *trend* jalur yang sama. Sehingga, transformasi Faust dapat digunakan untuk mengesitmasi nilai kecepatan gelombang P yang hilang pada titik tertentu.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Meju dan Gallardo (2003), pada kasus bawah permukaan dangkal yang bersifat heterogen resistivitas dan kecepatan gelombang primer dapat dikorelasikan saat kedua parameter diketahui. Namun, jika salah satu parameter dalam persamaan tidak ada, maka persamaan dapat digunakan untuk mencari parameter yang hilang tersebut. Maka dari itu persamaan ini digunakan untuk mencari parameter V_p batuan berdasarkan data resistivitas yang ada. Pada proses konversi, nilai resistivitas dipengaruhi oleh lokasi kedalaman titik serta koefisien Faust yang disesuaikan dengan kondisi geologi lokasi penelitian. Pada penelitian ini nilai konstanta yang digunakan adalah 2000 dengan nilai konstanta ini digunakan untuk batuan sedimen dalam penelitian terdahulu. (Telford dkk., 1991)



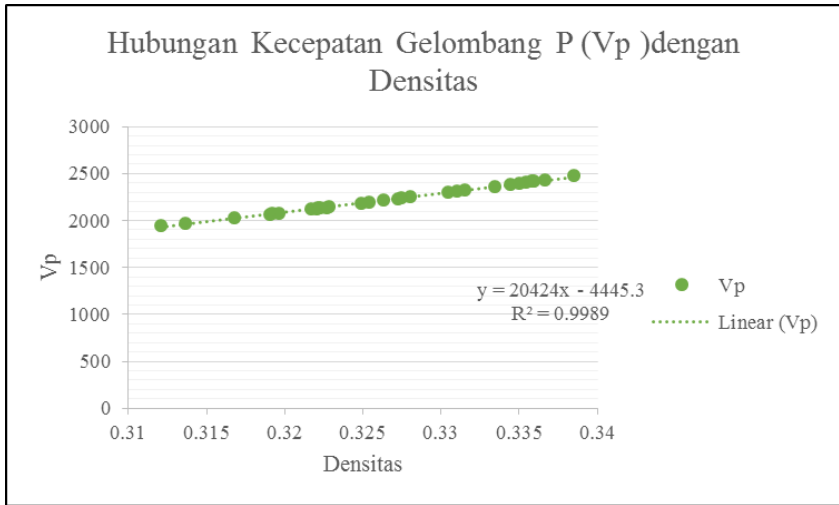
Gambar 4. 3 Plot nilai Vp hasil konversi terhadap kedalaman

Berdasarkan data hasil konversi, nilai Vp linier terhadap resistivitas. Namun juga terpengaruhi oleh kedalaman data. Hasil konversi ini dapat dilihat pada gambar 4.3 dengan dilakukan plotting nilai Vp terhadap kedalaman. Pada grafik penggambaran nilai Vp terdapat lintasan dengan nilai yang memotong lintasan lain, seperti grafik nilai Vp lintasan 4 yang memotong lintasan lain. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi bawah permukaan setiap lintasan tidak memiliki kondisi bawah permukaan yang sama. Berdasarkan hasil *plotting*, lintasan 1 menunjukkan nilai Vp yang memiliki trend yang lebih rendah dibanding Vp pada lintasan lain. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh nilai resistivitas yang dikonversi pada kedalaman 5.37 m lebih rendah dibandingkan lintasan lainnya sehingga karena persamaan konversi resistivitas ke kecepatan ini linier, maka saat nilai resistivitas rendah, nilai Vp pun akan rendah. Namun tidak semata merta dipengaruhi oleh nilai resistivitas aja, namun juga kedalaman karena sifat kecepatan gelombang bertambah seiring dengan kedalaman maka nilai Vp akan meningkat, maka pada persamaan konversi nilai Vp dan kedalaman ditempatkan secara linier. Persamaan konversi Faust ini dapat dilihat pada persamaan 2.30.

Perbedaan nilai parameter fisis resistivitas dan V_p pada lintasan 1 ini dapat dikarenakan kadar fluida pengisi pori batuan pada titik pengukuran yang cenderung lebih berbeda dibandingkan sekitarnya. Menurut Telford (1976), nilai kecepatan gelombang P dapat dipengaruhi oleh sedimentasi batuan, rongga-rongga antar butir akan mempengaruhi nilai V_p . Sehingga diduga pada lintasan satu ini memiliki karakteristik rongga antar butir yang lebih renggang dibandingkan daerah lainnya menyebabkan kandungan air pada lapisan di lintasan 1 ini lebih banyak dan menurunkan nilai resistivitas.

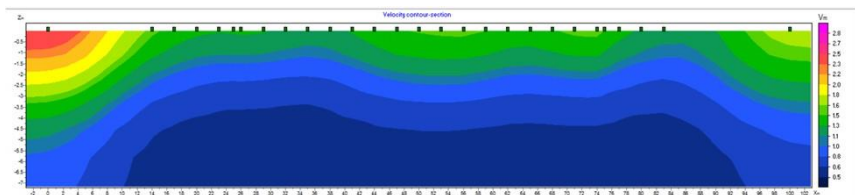
Terlihat pada hasil plotting, nilai V_p pada kedalaman 0.5 m dengan litologi *limestone* bervariasi dari 2100 m/s hingga 2450 m/s. Nilai V_p naik pada kedalaman 1,55 m menjadi 2200 m/s hingga 2500 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan timbunan *limestone* pada kedalaman tersebut sudah memiliki kandungan air yang lebih tinggi dibandingkan permukaan sehingga nilai V_p meningkat. Diantara kedalaman 2 hingga 3 meter terdapat perbedaan nilai V_p yang menunjukkan litologi yang berbeda, yaitu pasir dengan V_p sebesar 2100-2350 m/s pada kedalaman ± 2 m. Nilai V_p menurun drastis hingga ± 1900 m/s pada kedalaman 2.6 m mengikuti nilai resistivitas yang juga menurun drastis. Hal ini menunjukkan bahwa pada kedalaman ± 2.6 m sudah berubah litologi. Pada kedalaman sekitar 5 m, didapati bahwa nilai V_p sudah meningkat drastis menjadi 2400 m/s ± 100 m/s meskipun berdasarkan data litologi dari referensi litologinya tidak berubah. Berdasarkan nilai V_p yang meningkat drastis pada kedalaman 5 m ini menunjukkan bahwa efek *overburden* dari proses pemadatan dengan alat berat sudah mempengaruhi sifat fisis batuan meskipun masih termasuk dalam kategori bawah permukaan yang dangkal. Berdasarkan teori substitusi fluida dengan fluida dapat mempengaruhi nilai kecepatan gelombang P pada suatu batuan, dapat diindikasikan bahwa kecepatan gelombang pada kedalaman 5 m ini juga dipengaruhi oleh saturasi air dalam litologi. Hal ini disebabkan oleh air yang mengisi pori-pori batuan dapat mempercepat perambatan gelombang P pada suatu batuan.

Nilai kecepatan gelombang P hasil konversi dari nilai resistivitas dihubungkan dengan nilai densitas yang didapatkan dari nilai V_p . Dihasilkan bentuk grafik yang linier pada gambar 4.4 dan menghasilkan nilai regresi (R^2) sebesar 0.99 dengan nilai ini menunjukkan bahwa antara nilai V_p dengan densitas memiliki hubungan yang linier, dengan saat nilai V_p naik maka densitas juga naik, begitupun sebaliknya. Menurut Telford dkk. (1991), rentang nilai hubungan antara kecepatan gelombang dengan bervariasi untuk jenis batuan yang berbeda. Penelitian yang dilakukan oleh Gardner dalam Telford menunjukkan bahwa kecepatan gelombang akan naik dengan bertambahnya densitas pada batuan.

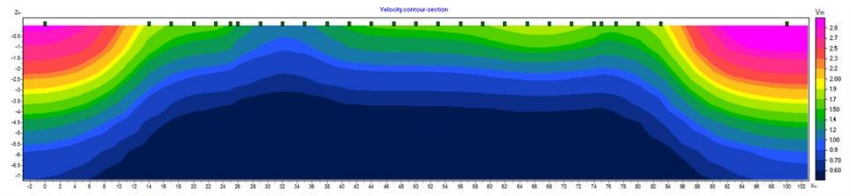


Gambar 4. 4 Grafik hubungan kecepatan gelombang P sintesis dengan densitas

Nilai kecepatan gelombang P hasil konversi kemudian dicocokkan dengan nilai kecepatan gelombang P hasil akuisisi seismik refraksi di lapangan. Berdasarkan hasil pengukuran seismik refraksi di lokasi pada lintasan 1 dan lintasan 4 pada gambar 4.4, nilai Vp batuan di lokasi penelitian berkisar dari 500 m/s hingga 3000 m/s. Lintasan seismik ini bertumpukkan dengan lintasan resistivitas, yaitu lintasan 1 seismik yang *overlap* dengan lintasan 1 resistivitas dan lintasan 4 seismik yang *overlap* dengan lintasan 2 resistivitas. Berdasarkan hasil pengukuran di lapangan pada gambar 4.5, penampang hasil inversi tidak menunjukkan lapisan timbunan *limestone* yang menerus, hanya berada pada ujung-ujung lintasan pengukuran, dengan nilai kecepatan gelombang berkisar antara 1400 m/s hingga 3000 m/s pada kedalaman 0 m hingga 2,5 m. Rentang nilai kecepatan gelombang ini lebih tinggi dibandingkan dengan Vp hasil konversi dari nilai resistivitas. Pada hasil pengukuran seismik, lapisan pasir memiliki kecepatan gelombang antara 1200 m/s hingga 2100 m/s pada kedalaman 2 hingga 3 m. Lapisan lempung memiliki nilai Vp paling rendah dengan nilai Vp berkisar dari 500 m/s hingga 1200 m/s di kedalaman 3 m dan seterusnya.



(a)

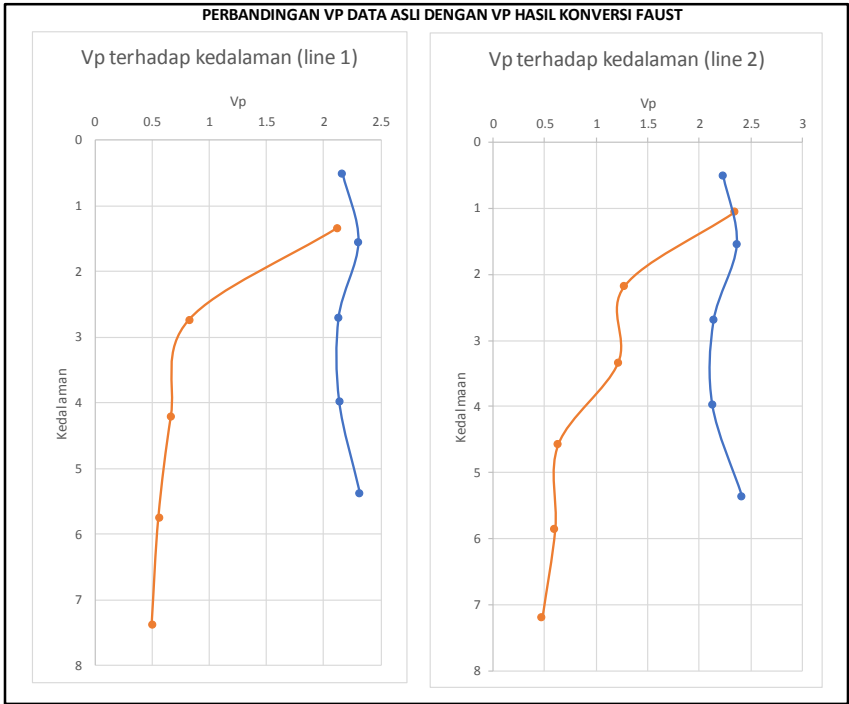


(b)

Gambar 4. 5 Penampang model inversi kecepatan gelombang P pada (a) lintasan seismik 1 yang *overlap* dengan lintasan 1 resistivitas dan (b) lintasan seismik 4 yang *overlap* dengan lintasan 2 resistivitas

Nilai kecepatan gelombang P ini memiliki hasil yang sangat berbeda dengan resistivitas, meskipun berada pada lokasi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa V_p dan resistivitas memiliki karakter fisis yang berbeda. Pada kasus pembacaan nilai V_p dari alat akuisisi menunjukkan adanya lapisan yang tidak terbaca oleh pengukuran seismik refraksi. Lapisan yang tidak terbaca ini bisa diakibatkan oleh empat hal, yaitu inversi seismik, kurang terdapat kontras kecepatan gelombang, adanya lapisan tipis, dan spasi geofon yang kurang sesuai (Reynolds, 1997). Pada penelitian ini, tidak munculnya lapisan timbunan *limestone* di hasil pengolahan dapat diakibatkan lapisan timbunan *limestone* yang terlalu tipis, kurang dari panjang gelombang datang, sehingga lapisan tipis tersebut tidak terbaca.

Dengan membandingkan kurva nilai V_p dari hasil konversi dan pengukuran pada gambar 4.6, dapat dilihat bahwa kedua nilai tersebut memiliki *trend* yang sama, yaitu turun dengan bertambahnya kedalaman. Walaupun pada satu titik dengan nilai V_p hasil konversi mengalami peningkatan, namun hal ini tidak terlalu signifikan dan masih menunjukkan bahwa nilai V_p masih cenderung turun. Nilai naik ini bisa diakibatkan oleh efek *overburden* dari batuan yang ada di atasnya. Sedangkan nilai yang turun secara terus menerus dari hasil pengukuran menunjukkan bahwa litologi di bawah *limestone* memiliki kondisi batuan yang lebih *ductile* dibandingkan *limestone* yang ada di permukaan.



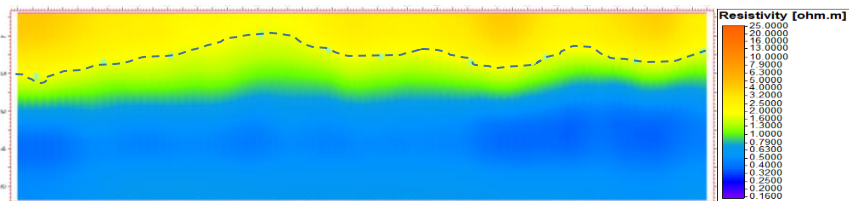
Gambar 4. 6 Kurva *trend* kecepatan gelombang P berdasarkan perhitungan sintetis (garis biru) dan pengukuran lapangan (garis merah) pada (a) lintasan seismik 1 dan (b) lintasan seismik 4

Berdasarkan data V_p yang didapatkan, karakter V_p sudah sesuai dengan kondisi ideal lapisan geologi dengan semakin dalam lapisan semakin mengalami overburden akibat beban di atasnya. Pada kasus ini beban *limestone* adalah batuan itu sendiri yang berada di permukaan serta ada pengaruh dari pemadatan yang dilakukan. Sedangkan nilai V_p yang naik pada lapisan lempung ini disebabkan adanya *overburden* akibat lapisan timbunan *limestone* serta lempung. Peningkatan nilai V_p juga dipengaruhi oleh fluida yang tersaturasi pada batuan, terutama pada lapisan lempung yang membuat nilai V_p hampir sama dengan nilai V_p pada lapisan pedel. Menurut Linzai dkk (2016), perubahan sifat batuan akibat fluida yang mengisi pori berpengaruh pada kecepatan gelombang-P pada batuan. Hal ini dibuktikan oleh penelitiannya mengenai fluida substitusi yang menunjukkan bahwa dengan saturasi air 80-100% pada batuan mengakibatkan nilai V_p meningkat secara signifikan berkisar ± 400 m/s dari kecepatan batuan sekitar. Hal ini berkebalikan dengan nilai resistivitas yang akan turun drastis jika

batuan tersaturasi dengan air. Sehingga dapat dipastikan bahwa fluida sangat mempengaruhi sifat fisis suatu batuan, baik kecepatan gelombang maupun resistivitas.

4.3 Pengelompokkan Data Resistivitas

Pengelompokkan atau *clustering* data ini berfungsi agar penampang yang dihasilkan lebih mudah dibaca dan dapat mengetahui batas lapisan lebih jelas. Pengelompokkan ini dilakukan berdasarkan hasil interpolasi Kriging. Kriging merupakan metode interpolasi yang sudah terbukti lebih akurat dalam melakukan interpolasi titik-titik yang tidak diketahui nilainya dibandingkan dengan metode konvensional, seperti *polynomial interpolation* yang digunakan oleh Res2Dinv. Metode interpolasi ini digunakan pada program Res2Dinv untuk menentukan perubahan pada parameter model pada tahap inversi. Tahap inversi ini dilakukan untuk mencoba menemukan amplitudo optimum pada perubahan vektor menggunakan interpolasi *polynomial* (kuadratik) (Loke, 2015). Konsep dasar dari metode deterministik atau konvensional ini adalah melakukan interpolasi yang tidak memanfaatkan metode bobot rata-rata dari nilai di sekitarnya dan tidak memberikan perhitungan error dari nilai hasil prediksi. Sedangkan untuk metode geostatistika, seperti Kriging adalah sebaliknya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Setiyoko dan Kumar (2012) yang melakukan interpolasi menggunakan interpolasi polinomial global pada data DEM menunjukkan bahwa hasil interpolasinya memiliki kontur yang lebih baik dibandingkan interpolasi *ordinary Kriging*, namun tidak merepresentasikan kondisi asli di lapangan. Pada penelitian tersebut juga dapat diketahui bahwa nilai error hasil interpolasi polinomial global ini sangat tinggi, yaitu $> 3\%$, sedangkan nilai error hasil interpolasi kriging memiliki nilai yang sangat rendah, yaitu $< 1\%$. Kriging adalah metode interpolasi yang baik berdasarkan regresi terhadap titik-titik observasi dan keseluruhan data yang dibobotkan berdasarkan varians spasial populasi. Varian pada Kriging ini tidak bergantung pada nilai data, melainkan ditentukan oleh variogram dan pola spasial dari persebaran data serta kedekatan secara spasial dari lokasi interpolasi terhadap tiap lokasi data.



Gambar 4. 7 Penampang resistivitas 2D lintasan 1 dengan metode Kriging

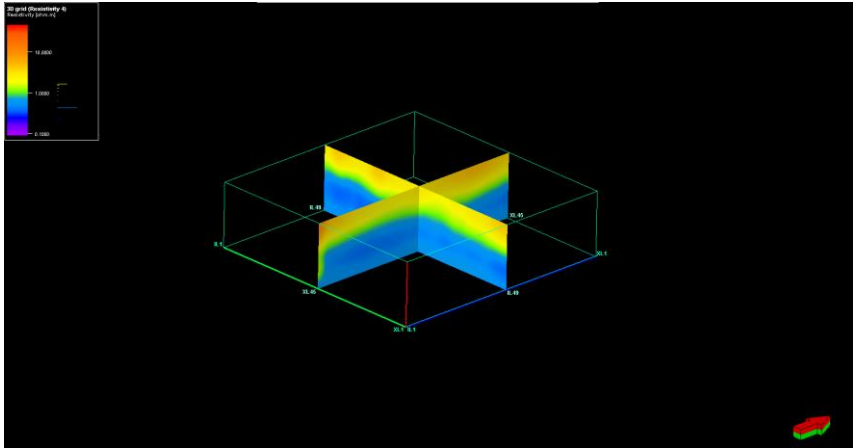
Pada gambar 4.7 merupakan salah satu hasil interpolasi Kriging yang dilakukan pada setiap lintasan resistivitas. Pada gambar tersebut dideliniasi

lapisan timbunan *limestone* dengan memberikan garis putus-putus sebagai batas lapisannya (----) pada batas antara warna kuning dan hijau. Setelah dilakukan pembatasan lapisan ini dapat lebih terlihat ketebalan lapisan timbunan *limestone*. Pada lintasan ini didapatkan ketebalan *limestone* berkisar antara 1 m hingga 2 m. Berdasarkan gambar di atas dapat dilakukan pengelompokkan nilai resistivitas berdasarkan litologinya pada tabel 4.2.

Tabel 4. 1 Hasil clustering data resistivitas

Litologi	Resistivitas (Ωm)	Indikator Warna
<i>Limestone</i> atau pedel	> 1,6	Kuning – oranye
Pasir	0,9 – 1,6	Hijau
Lempung	< 0,9	Biru

Terlihat pada gambar 4.7 penampang resistivitas 2D hasil interpolasi Kriging pada lintasan 1 lebih halus dibandingkan dengan penampang yang dihasilkan Res2Dinv. Hal ini dikarenakan pada program pemodelan geostatistika, nilai-nilai *pixel* pada Res2Dinv diinterpolasi lagi menggunakan metode Kriging. Pada metode Kriging ini, efek lokal data tidak dipedulikan, sehingga data ini memiliki bobot yang lebih kecil. Sedangkan dengan metode konvensional, seperti yang digunakan dalam Res2Dinv, tidak mementingkan korelasi spasial lokasi data melainkan hanya mementingkan *pixel* tiap data yang dimasukkan dan memiliki efek lokal yang sangat tinggi. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Wijemannage, dkk. (2018) dengan membandingkan metode konvensional dan metode geostatistika berdasarkan nilai eror parameternya menunjukkan bahwa hasil interpolasi menggunakan metode geostatistika menghasilkan estimasi paling baik. Hal ini disebabkan nilai metode interpolasi konvensional menggunakan nilai berdasarkan nilai disekitarnya dan menggunakan rumus matematis yang spesifik untuk menentukan kehalusan dari penampang yang dihasilkan. Sedangkan ntuk metode interpolasi geostatistika berdasarkan model statistik yang mengikutsertakan autokorelasi atau korelasi statistik antar titik yang diukur. Maka dari itu, metode geostatistika tidak hanya memiliki kapabilitas untuk menghasilkan penampang prediksi tapi juga menyediakan pengukuran dari “kepastian” atau *certainty* dari prediksi yang dilakukan. Menurut Shahbeik, dkk. (2013) hasil interpolasi metode geostatistika memiliki kemiripan yang tinggi dengan data kondisi sebenarnya di lapangan karena ada perhitungan untuk mendapatkan histogram, varians, standar deviasi, *mean*, dan median yang dengan parameter-parameter tersebut merupakan parameter yang menyatakan kondisi spasial data. Sehingga interpolasi dengan metode geostatistika memiliki tingkat akurasi yang tinggi terhadap data asli untuk estimasi suatu cadangan. Setelah diinterpolasi menggunakan metode Kriging, menghasilkan penampang yang lebih merepresentasikan kondisi bawah permukaan pada lokasi penelitian seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4. 8 Lintasan 1 (barat-timur) dan lintasan 2 (utara-selatan) pengukuran resistivitas yang saling berpotongan dengan hasil interpolasi Kriging

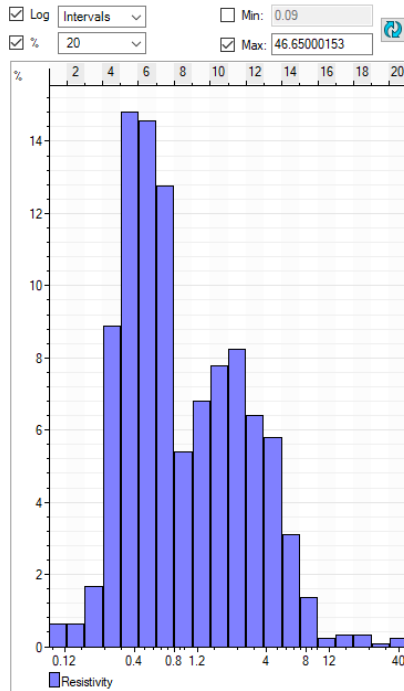
Pada proses ini baru dapat ditampilkan *cross-section* antar lintasan 1 dan lintasan 2 (gambar 4.8). Hal ini karena saat masih dalam penampang 2D dari Res2Dinv, program pemodelan ini hanya menampilkan nilai per datum bukan hasil interpolasinya. Berdasarkan hasil interpolasi Kriging ini, terlihat bahwa antara dua lintasan yang berpotongan ini lapisannya saling berkorelasi secara lateral. Ketebalan *limestone* antara kedua lintasan juga menjadi lebih terlihat korelasinya.

4.4 Analisis Geostatistika

4.4.1 Histogram

Dalam melakukan analisis geostatistika data resistivitas, pertama perlu menganalisis parameter statistik berdasarkan histogram dari data yang digunakan. Histogram dibuat berdasarkan data resistivitas enam lintasan yang dilakukan pada timbunan *limestone*. Histogram yang dibuat harus dipastikan terdistribusi normal. Data yang terdistribusi normal diperlukan dalam proses pemodelan geostatistika karena pada operasi Kriging diperlukan sebuah asumsi dengan data adalah stasioner. Dengan distribusi normal dapat meningkatkan kondisi untuk asumsi stasioner. Jika data tidak terdistribusi normal, interpolasi yang dilakukan tidak akan seteliti seharusnya (Negreiros dkk., 2010). Grafik histogram dibuat dengan rentang nilai logaritmik karena data resistivitas bersifat logaritmik. Berdasarkan histogram yang telah dibuat pada gambar 4.9 menunjukkan bahwa distribusi data terdiri dari satu populasi dan bersifat unimodal, yaitu hanya terdapat satu modus data, yang ditunjukkan pada grafik

batang paling tinggi dengan frekuensi jumlah data sebanyak 14,8% pada nilai resistivitas sebesar 0.2 Ω m.



Gambar 4. 9 Histogram data resistivitas pada lokasi timbunan *limestone* dengan distribusi normal

Berdasarkan histogram yang ada dapat diketahui beberapa parameter statistik, seperti *mean*, varians, standar deviasi, median, nilai minimum, dan nilai maksimum data. Parameter yang dapat diambil dari histogram dapat dilihat pada tabel 4.3 dibawah ini. Dari parameter histogram, nilai *mean* dapat merepresentasikan ukuran butir dari sedimen. Semakin rendah nilai *mean* mengindikasikan ukuran butir yang semakin halus, begitupun sebaliknya. Klasifikasi nilai *mean* ini diasosiasikan dengan ukuran butir pada Skala Wentworth. Selain *mean*, parameter histogram yang digunakan dalam analisis ukuran butir sedimen adalah standar deviasi. Sortasi batuan dapat ditentukan berdasarkan nilai standar deviasinya. Semakin kecil standar deviasi, maka semakin baik sortasi sedimen tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa butiran sedimen memiliki tingkat keseragaman yang tinggi. (Bunte dan Abt, 2001)

Tabel 4. 2 Parameter histogram data resistivitas

Parameter	Nilai
Jumlah Data	21.160
<i>Mean</i>	1,23
Varians	2,475
Standar Deviasi	1,573
Median	0,602
Maksimum	46,65
Minimum	0,09

Berdasarkan tabel 4.3 diatas, dapat didefinisikan sifat persebaran populasi datanya. Terlihat dari nilai varians dan standar deviasi yang rendah, mendekati nol, menunjukkan bahwa rentang data yang digunakan tidak tersebar jauh. Nilai yang rendah ini juga akan menghasilkan eror pemodelan yang lebih rendah dibandingkan jika nilai varians dan standar deviasinya besar atau jauh dari nol. Berdasarkan data pada tabel 4.3 nilai rata-rata dan standar deviasi yang hampir sama juga menunjukkan distribusi data populasi adalah normal.


Nilai standar deviasi dapat dikorelasikan dengan jenis sedimentasi daerah penelitian. Nilai standar deviasi sebesar 1.573 menunjukkan bahwa sortasi batuan pada lokasi pengukur memiliki keseragaman yang tinggi. Nilai standar deviasi yang rendah ini karena sebagian besar lapisan pada daerah pengukuran didominasi dengan lapisan lempung yang ukuran butirnya seragam. Parameter geostatistik ini menunjukkan respon yang sesuai dengan kondisi sedimentasi pada lingkungan pesisir di lokasi penelitian.

Sedimentasi yang ada di lingkungan pesisir laut dipengaruhi oleh faktor arus laut yang membantu proses sedimentasi. Proses sedimentasi ini menentukan jenis sedimen yang ada di sekitar muara sungai. Menurut Fajar dkk. (2014), jenis sedimen yang berada di kawasan muara Sungai Manyar, yang berdekatan dengan lokasi penelitian, merupakan endapan pasir. Semakin ke arah lepas pantai ukuran butir sedimen semakin halus menuju ukuran butir lempung. Hal ini mengindikasikan sedimen dari daratan semakin ke arah laut semakin berkurang. Berkurangnya sedimen daratan ini diakibatkan oleh lemahnya arus Laut Selat Madura sehingga tidak mampu membawa sedimen dengan ukuran besar dan menumpukan sedimen pasir di beberapa titik daerah perairan.

4.4.2 Variogram

Setelah membuat histogram dari data resistivitas timbunan limestone dan reklamasi, kemudian dilakukan perhitungan variogram eksperimental. Perhitungan ini memiliki peran penting dalam proses interpolasi metode

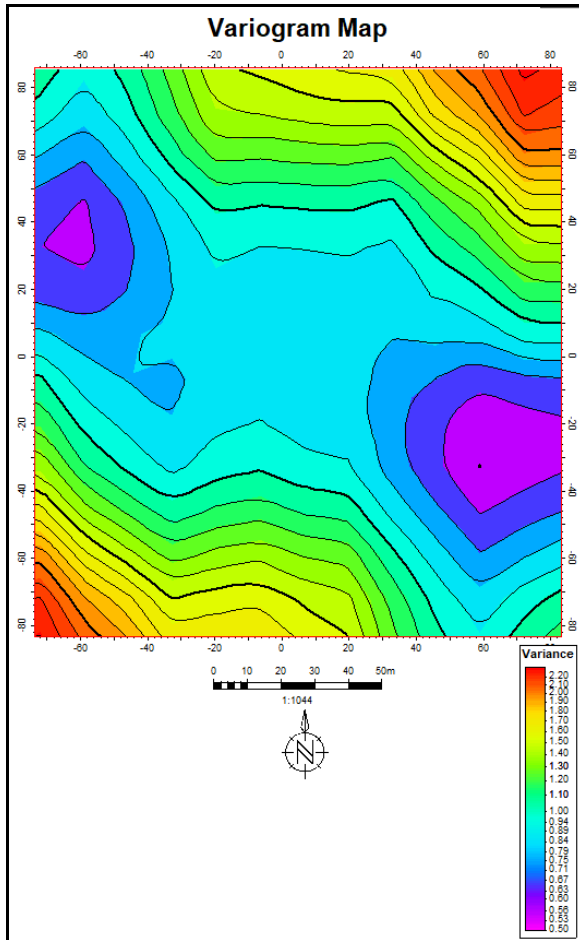
geostatistika. Perhitungan ini dilakukan dengan persamaan 2.20 sehingga menghasilkan nilai yang menunjukkan arah *trend* data hasil pengukuran di lokasi timbunan *limestone*. Variogram dihitung untuk arah horizontal dan vertikal. Perhitungan horizontal berfungsi untuk mengetahui sifat kesamaan data pada arah horizontal (*dip* 0°). Sedangkan perhitungan vertikal berfungsi untuk mengetahui arah *trend* data pada arah sumbu z (*dip* 90°). Hasil perhitungan variogram eksperimental ini tersebar pada jarak (*lag*) yang berbeda-beda. Maka dari itu, untuk mencari lokasi data-data tersebut perlu mendefinisikan beberapa parameter, seperti azimuth, *number of lags*, jarak lag, *search radius*, *bandwidth*, *tolerance angle*, dan *lag tolerance*. Parameter tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10. Proses penentuan parameter variogram ini dilakukan dengan trial and error sampai mendapatkan persebaran varians yang sesuai.

Experimental variogram computation Search only inside zone 

Direction	Azimuth	Dip	Number lags	Lag distance	Search radius	Band width	Tolerance angle	Lag tolerance	Thickness
Vertical	NA	90	10	5	50	200	45	50	NA
Major	294.3	0	23	5.3	121.9	150	59.5	50	0.001
Minor	204.3	0	23	5.9	135.7	119.1	90	50	0.001

Gambar 4. 10 Parameter variogram eksperimental

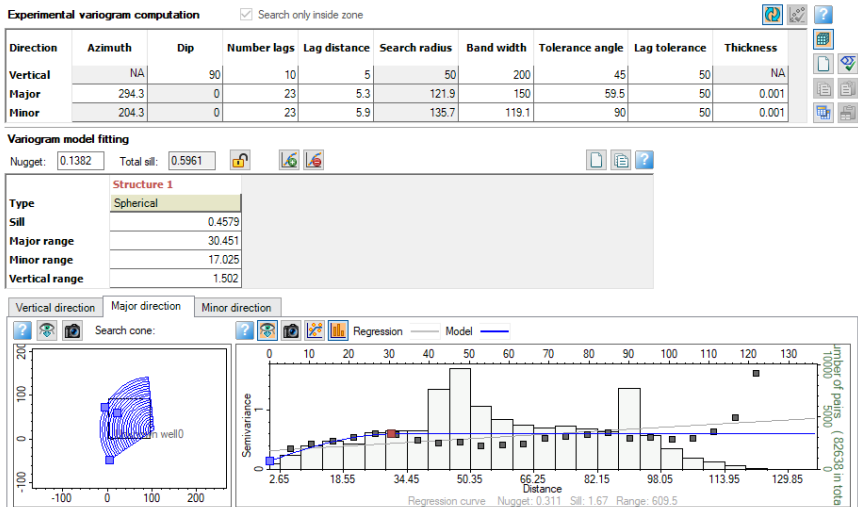
Salah satu parameter penentu dalam perhitungan variogram ekperimental adalah *azimuth*. *Azimuth* ini berfungsi untuk mengetahui arah persebaran data terbaik. Pada penelitian ini, penentuan *azimuth* variogram dilakukan analisis arah dari variogram map pada gambar 4.11. Pemilihan arah ini berdasarkan persebaran nilai varians yang rendah dengan nilai varians kurang dari 1 untuk mendapatkan tingkat keseragaman data yang tinggi. Berdasarkan analisis ini didapatkan nilai *azimuth* sebesar 294.3°.



Gambar 4. 11 Variogram map

Pada variogram eksperimental ini, nilai-nilai varians akan dihitung sesuai dengan kriteria yang didefinisikan. Penentuan nilai *bandwidth* berdasarkan pada seberapa besar area perhitungan variogram yang diinginkan berdasarkan arah variogram yang ditentukan. Semakin besar nilai *bandwidth* yang dimasukkan maka semakin banyak data yang akan dihitung untuk variogram. *Bandwidth* ini hampir sama dengan *search radius*, hanya saja pada *search radius* ini mendefinisikan jarak perhitungan variogram tanpa mementingkan arah.

Number of lags menentukan jumlah pencacahan jarak h pada tampilan variogram. Semakin besar nilai yang diinput semakin jauh jarak yang akan ditampilkan, begitu pula sebaliknya. *Lag distance* berguna untuk menentukan jarak pencacahan dalam perhitungannya. Parameter ini sangat berpengaruh terhadap tampilan data pada grafik variogram. Pada penelitian ini digunakan nilai lag distance setengah dari ukuran *cell* data, yaitu 23, dengan tujuan untuk mendapatkan seluruh data yang ada. Setelah seluruh parameter terdefinisi didapatkan grafik variogram seperti yang ada di gambar 4.12.



Gambar 4.12 Fitting Variogram

Variogram eksperimental menghasilkan nilai varians tiap-tiap pasangan data yang ada pada populasi data resistivitas. Nilai varians yang dihasilkan kemudian dilakukan proses *fitting* variogram menggunakan model variogram teoritis. Prinsip dilakukannya *fitting variogram* ini adalah menyesuaikan garis model dengan titik-titik data sehingga garis tersebut melewati banyak data. Pada gambar 4.12 dapat dilihat model variogram yang dipilih ada *spherical*. Model ini dipilih karena model yang ideal dalam pemodelan variogram untuk interpolasi Kriging dan menghasilkan eror model yang paling kecil, yaitu sekitar 6% jika dibandingkan dengan model teoritis lainnya (Bodaghabadi, 2018). *Range* pada model variogram terdapat dua jenis, yaitu *range* untuk arah mayor dan *range* untuk arah minor. Pada *range* mayor menunjukkan data yang berada pada *azimuth* 294.3° (arah mayor) dan *range* minor menunjukkan persebaran data pada *azimuth* 204.3° (arah minor). Adanya perbedaan antara arah mayor dan arah minor ini menunjukkan bahwa pada data terjadi sebuah fenomena anisotropi. Efek adanya anisotropi ini adalah adanya variasi data pada arah spasial.

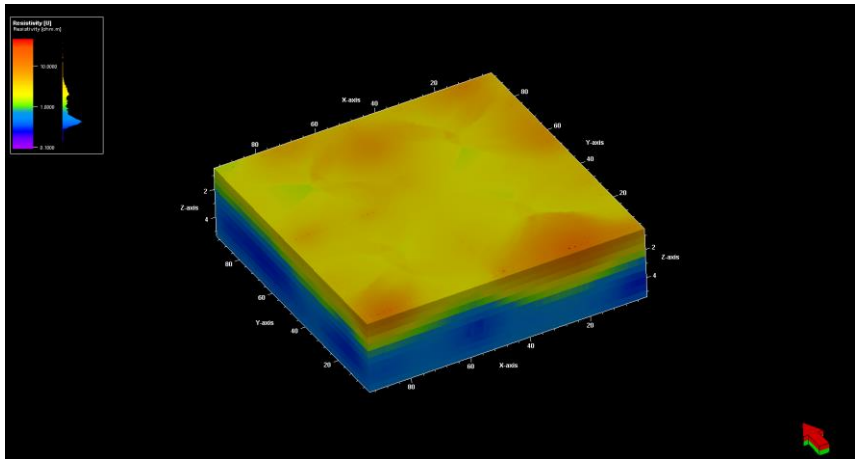
Anisotropi ini umum terjadi pada kasus persebaran data geofisika maupun geologi.

Nilai *sill* yang didapatkan pada proses ini adalah 0,458. Nilai ini lebih rendah dibandingkan nilai varians data, yaitu 2,475. Seharusnya nilai *sill* harus sama dengan varians untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Dengan adanya kondisi seperti ini, anisotropi yang terjadi pada data resistivitas ini adalah anisotropi geometri dengan anisotropi zonal seperti yang ada pada gambar 2.6. Anisotropi zonal akan terjadi pada kondisi-kondisi tertentu, seperti terdapat variasi vertikal data, terdapat kecenderungan data dengan nilai yang sama terlokalisasi pada lokasi tertentu sedangkan di daerah lain terdapat persebaran data yang berbeda dan lebih menyeluruh, serta terjadi pada varians yang berbeda dengan jarak yang berbeda. Pada model hasil interpolasi, zonal anisotropi terlihat pada adanya perbedaan nilai resistivitas lapisan antara *limestone* (pedel) dengan lapisan lainnya, yaitu pasir dan lempung.

4.4.3 Interpolasi Kriging

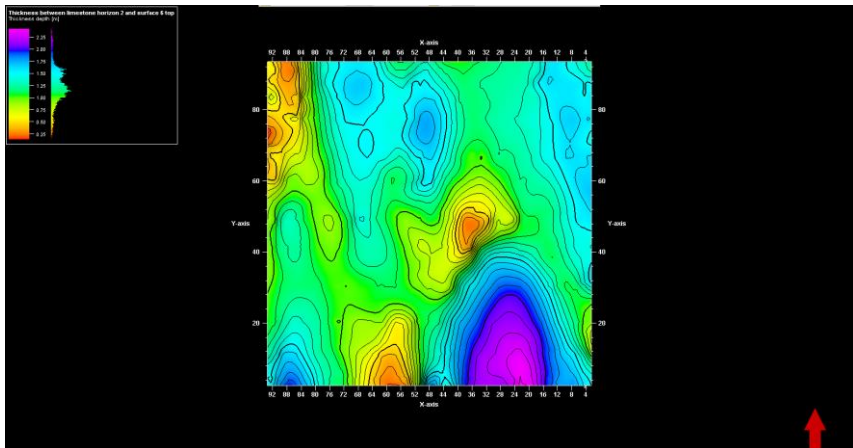
Hasil variogram yang tepat akan menghasilkan model yang sesuai dengan kondisi lapangan. Data parameter variogram digunakan dalam *petrophysical modelling* untuk mendapatkan model 3D dari wilayah pengukuran. Tipe interpolasi yang digunakan adalah Kriging. Menurut Negreiros (2010), Kriging merupakan metode estimasi geostatistika linier paling baik atau *Best Linier Unbiased Estimation* (BLUE) didukung dengan data yang sudah memenuhi syarat untuk dilakukan Kriging, yaitu data harus stasioner, yaitu rata-rata dan varians tidak memiliki perbedaan yang signifikan, populasi data terdistribusi normal, data yang digunakan merupakan data spasial. Pada penelitian ini distribusi data terlihat sudah distribusi normal pada perhitungan histogram gambar 4.9. Berdasarkan kasus-kasus pemodelan data spasial pada penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa Kriging menghasilkan model dengan data-data interpolasi yang mirip dengan *raw data* dengan nilai eror yang sangat kecil. Hal ini terjadi akibat efek dari pembuatan histogram, variogram, dan parameter-parameter statistik di dalamnya.

Pada kasus interpolasi permukaan tanah, Kriging menghasilkan model dengan struktur permukaan yang sangat mirip dengan kondisi lapangan dibandingkan dengan interpolasi konvensional. Interpolasi data ini terlihat pada gambar 4.13 dengan hasil interpolasinya jauh lebih halus dibandingkan data resistivitas 2D hasil interpolasi kuadrat atau polinomial yang ada pada gambar 4.1.



Gambar 4. 13 Model 3D data resistivitas hasil interpolasi Kriging

Berdasarkan model yang dihasilkan dari *petrophysical modelling* diekstrak batas bawah lapisan timbunan *limestone* sehingga dapat diketahui persebaran ketebalan *limestone*. Dapat dilihat pada gambar 4.14 ketebalan dari *limestone* sangat bervariasi dan cenderung dangkal. Ketebalan *limestone* tersebar di beberapa daerah pengukuran. Terlihat pada daerah selatan memiliki ketebalan *limestone* yang berbeda-beda mulai dari yang paling tipis, yaitu 0.25 m, hingga paling tebal, yaitu 2.25 m. Rata-rata ketebalan lapisan timbunan *limestone* sebesar 1 m hingga 1.25 m yang ditandai dengan warna hijau yang tersebar di seluruh daerah pengukuran. Perbedaan ketebalan *limestone* ini menunjukkan adanya pengaruh beban terhadap kemampuan menahan beban dari lempung sebagai tanah dasarnya sehingga menimbulkan undulasi pada batas antar lapisannya. Undulasi ini dapat terlihat jelas pada proses *picking* yang telah dilakukan pada gambar 4.7, dengan dari hasil *picking* tiap 2 m menghasilkan penampang lapisan timbunan *limestone* seperti yang ada pada lampiran 15. Dengan ditemukannya perbedaan ketebalan *limestone*, maka perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui daya dukung lempung terhadap beban yang diberikan. Hal ini akan memberikan efek langsung kepada kualitas bangunan di atasnya.



Gambar 4. 14 Peta ketebalan *limestone*

4.5 Perbandingan Volume *Limestone*

Penelitian ini dilakukan pada wilayah timbunan seluas 9125 m². Pada kondisi awal, *limestone* dibawa dari quarry menggunakan ritase truk dengan jumlah tertentu. Diketahui bahwa jumlah *limestone* awal yang dibawa sebanyak 10962,33 m³ pada wilayah pengukuran. Kemudian dilakukan proses pemadatan batuan untuk memperkuat lapisan serta meratakan permukaan.

Berdasarkan model yang didapatkan dari proses interpolasi metode geostatistika pada gambar 4.13 dapat dihitung volume timbunan *limestone* berdasarkan *surface top* dan *surface bottom* (gambar 3.15) model *limestone*. Hasil perhitungan volume ini menghasilkan jumlah *limestone* sebanyak 10344,8 m³. Volume hasil pemodelan ini lebih sedikit dibandingkan dengan volume yang diketahui pada awal proses penimbunan. Selisih volume ini sebanyak 517,529 m³. Volume mengalami penyusutan sebanyak 5,6% dari kondisi awal penimbunan. Penyusutan volume dari hasil perhitungan model resistivitas dapat dikarenakan oleh proses pemadatan yang dilakukan. Pada proses pemadatan ini bongkah batuan karbonat dihancurkan menjadi partikel yang lebih kecil yang biasa disebut dengan pedel sehingga lebih padat dan lebih mengisi ruang antar batuan.

Volume hasil pengukuran ini dapat berubah tergantung pada hasil *picking horizon* untuk membuat *surface* batas bawah. Maka dari itu dilakukan perhitungan eror atau deviasi dari perhitungan berdasarkan ketebalan dari *limestone* yang di-*picking* dan juga memperhitungkan pengaruh dari volume yang didapatkan. Deviasi ini didapatkan dari perkiraan kedalaman titik batas lapisan dari permukaan dan juga batas lapisan terhadap kedalaman lapisan pasir

dibawahnya kemudian dirata-ratakan. Pada penelitian ini, diambil deviasi kedalaman limestoninya $\pm 1\text{m}$ dari kedalaman horizon saat ini. Berdasarkan analisis ini, dihasilkan deviasi volume sebesar $100,33 \text{ m}^3$.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu

1. Volume timbunan *limestone* atau pedel hasil pengukuran resistivitas mengalami deviasi dari volume ritase sebesar 5,6% $\pm 0.0097\%$.
2. Interpolasi Kriging menghasilkan penampang yang lebih halus dan akurat dibandingkan metode konvensional yang dilakukan pada software Res2Dinv karena pada metode Kriging digunakan fungsi spasial dalam melakukan interpolasinya, seperti varians, standar deviasi, dan lain-lain.
3. Nilai kecepatan gelombang p (V_p) dipengaruhi oleh fluida pengisi batuan dengan saat batuan tersaturasi oleh air maka V_p akan meningkat. Nilai V_p ini juga dipengaruhi oleh efek penimbunan pada kedalaman, hal ini akan menimbulkan efek *overburden*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang didapatkan, penulis menyarankan kepada pembaca ataupun kepada penelitian selanjutnya beberapa hal:

1. Pengukuran in-situ pada lokasi timbunan sebaiknya dilakukan pada musim kemarau, sehingga data tidak terpengaruhi oleh kehadiran genangan air hujan di sekitar lintasan resistivitas.
2. Melakukan penelitian lebih lanjut mengenai perbandingan metode interpolasi konvensional dan interpolasi geostatistika dengan menggunakan memvalidasi indeks perbedaannya, seperti *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolut Error* (MAE), dll.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai efek beban pada daya dukung lempung untuk mengetahui efek undulasi pada lempung untuk kedepannya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

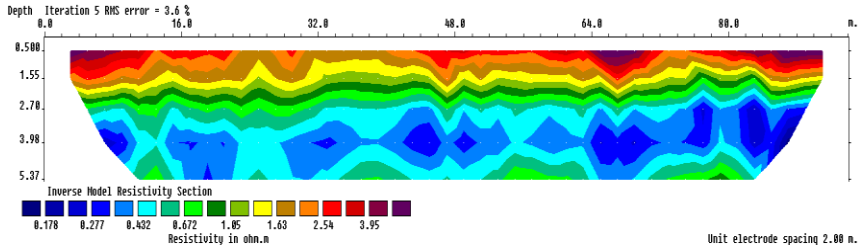
- Aisha, F.Y. (2018), "Pemodelan Geostatistik 3D Pada Sebaran Batuan Karbonat Berdasarkan Data Resistivitas 2D (Studi Kasus : Kecamatan Jenu , Kabupaten Tuban)", *Jurnal Geosaintek*, Vol.4, No.3, hal. 95–102. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.12962/j25023659.v4i3.4522>.
- Bahri, S. dan Madlazim (2012), "Pemetaan Topografi, Geofisika Dan Geologi Kota Surabaya", *Jurnal Penelitian fisika dan Aplikasinya*, Vol.2, No.2, hal. 23–28.
- Bodaghabadi, M.B. (2018), "Is it necessarily a normally distributed data for kriging ? A case study : soil salinity map of Ghahab area , central Iran", *Desert*, Vol.2, No.23, hal. 285–294.
- Bohling, G. (2005), *KRIGING*, Kansas Geological Survey, Kansas.
- Bunte, K. dan Abt, S.R. (2001), *Sampling SURface and SUBsurface Particle-Size Distribution in Wadable Gravel and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring*, United State Department Of Agriculture (USDA), Fort Collins.
- Darwis (2017), *Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah*, 1 Ed., Pustaka AQ, Yogyakarta.
- Fajar, E., Muslim, Suseno, H. dan Makmur, M. (2014), "KAJIAN SEBARAN UKURAN BUTIR SEDIMEN DI PERAIRAN GRESIK ,", *Jurnal Oseanografi*, Vol.3, No.4, hal. 596–600.
- Hardiyatmo, H.C. (2002), *Mekanika Tanah II*, 3 Ed., Universitas Gajah Mada Press, Yogyakarta.
- Kitanidis, P.K. (1999), *Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology*, Cambridge University Press, New York.
- Linzai, N., Syaifuddin, F. dan Widodo, A. (2016), "Analisis Perbandingan Antara respon Seismik Sintetik PP dan PS Berdasarkan Pemodelan Substitusi Fluida pada Sumur", *Jurnal Geosaintek*, Vol.02, No.02.
- Loke, M.H. (2013), "Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys", *Geotomo Software Malaysia*, No.July, hal. 127. [http://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00392-2](http://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00392-2).
- Loke, M.H. (2000), "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies", *A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, No.1999, hal. 1–67. <http://doi.org/10.3390/su8111117>.
- Lugra, I.W. (2017), *Lingkungan pengendapan sedimen di perairan gresik, jawa timur, berdasarkan analisis mikrofauna dari contoh pemboran inti*, hal. 1–16.
- Negreiros, J., Painho, M., Aguilar, F. dan Aguilar, M. (2010), "Geographical Informational Systems Principles of Ordinary Kriging Interpolator", *Jurnal of Applied Sciences*2, Vol.10, No.11, hal. 852–867.
- Pardo-Iguzquiza, E., Dowd, P.A., Baltuille, J.M. dan Chica-Olmo, M. (2013), "Geostatistical modelling of a coal seam for resource risk assessment", *Interntional Journal of Coal Geology*, No.October, hal. 134–140.

<http://doi.org/10.1016/j.coal.2012.11.004>.

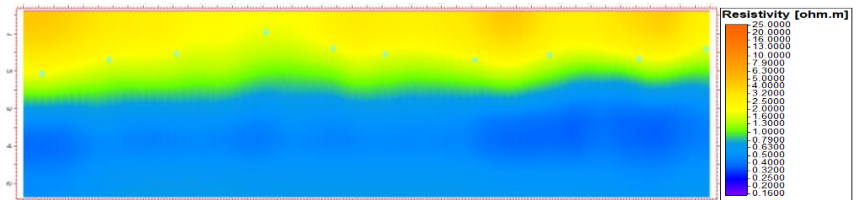
- Prastiawan, A., Achmad, D.S. dan Sujito (2013), "Pencitraan Data Geolistrik Resistivitas Dengan Surfer 10 Berdasarkan Hasil Inversi Res2dinv 3.56 Untuk Identifikasi Lapisan Aspal Di Dusun Lagunturu Desa Suandala Kecamatan Lasalimu Kabupaten Buton", *Tidak dipublikasikan*.
- Reynolds, J.M. (1997), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Ltd., West Sussex.
- Schon, J.H. (2011), *Physical Properties of Rocks*, Elsevier B.V., Amsterdam.
- Setiyoko, A. dan Kumar, A. (2012), "Comparison Analysis of Interpolation Techniques for DEM Generation Using CARTOSAT-1 Stereo Data", *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, Vol.9, No.2, hal. 78–87.
- Shahbeik, S., Afzal, P. dan Moarefvand, P. (2013), "Comparison between ordinary kriging (OK) and inverse distance weighted (IDW) based on estimation error. Case study: Dardevey iron ore deposit, NE Iran", *Arabian Journal of Geoscience*, No.August. <http://doi.org/10.1007/s12517-013-0978-2>.
- Supandjono, J., Hasan, K., Panggabean, H., Satria, D. dan Sukardi (1992), *Peta Geologi Lembar Surabaya-Sapulu*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. dan Sheriff, R.E. (1991), *Applied geophysics (second edition)*. [http://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90163-C](http://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90163-C).
- Wijemannage, A.L.K., Ranagalage, M. dan Perera, E.N.C. (2018), *Comparison of Spatial Interpolation Methods for Rainfall Data Over Sri Lanka*,.

LAMPIRAN

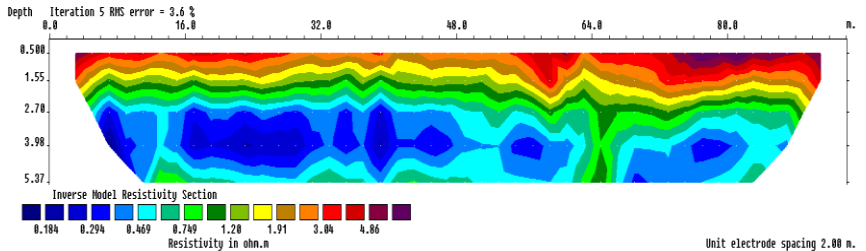
1. Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 1



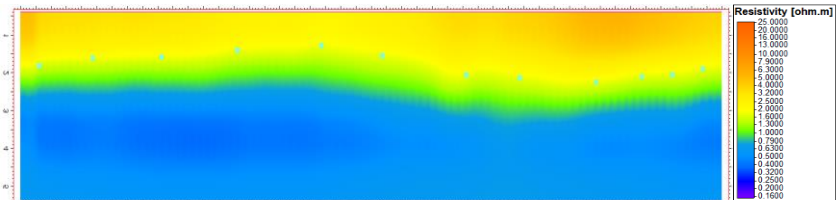
2. Hasil pemodelan pada Petrel menggunakan interpolasi Kriging pada lintasan 2



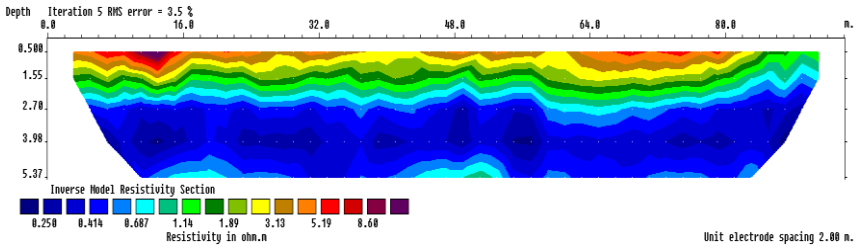
3. Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 2



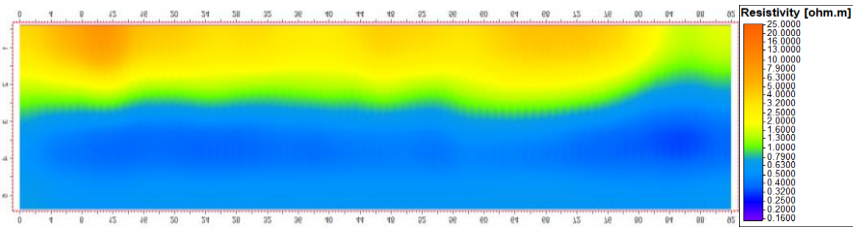
4. Hasil pemodelan pada **Petrel** menggunakan interpolasi Kriging pada lintasan 2



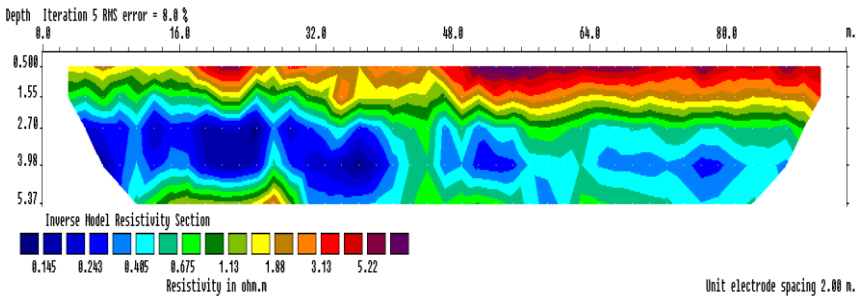
5. Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 3



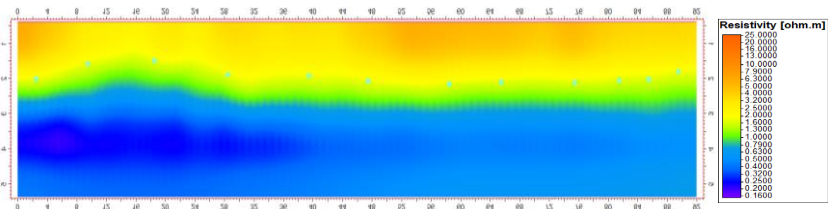
6. Hasil pemodelan pada Petrel menggunakan interpolasi Kriging pada lintasan 3



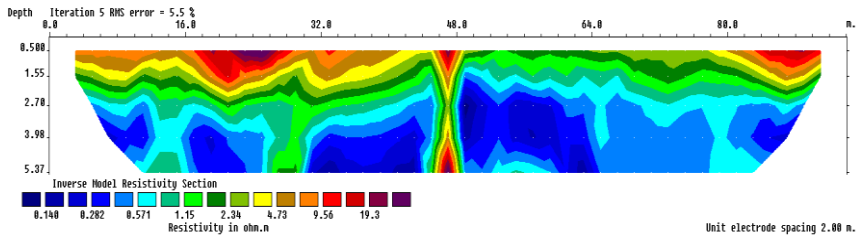
7. Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 4



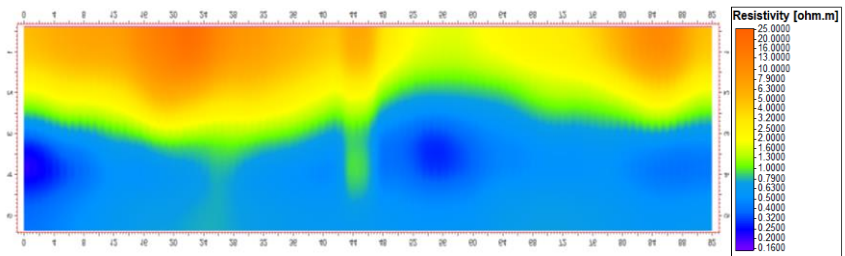
8. Hasil pemodelan pada Petrel menggunakan interpolasi Kriging pada lintasan 4



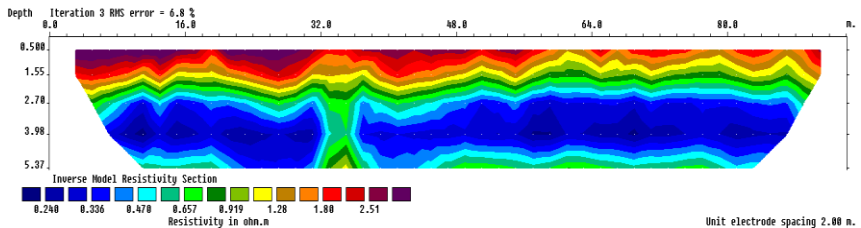
9. Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 5



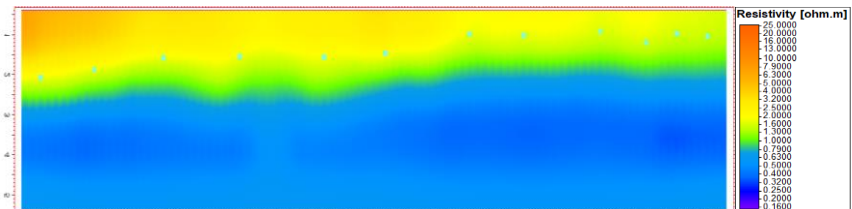
10. Hasil pemodelan pada Petrel menggunakan interpolasi Kriging pada lintasan 5



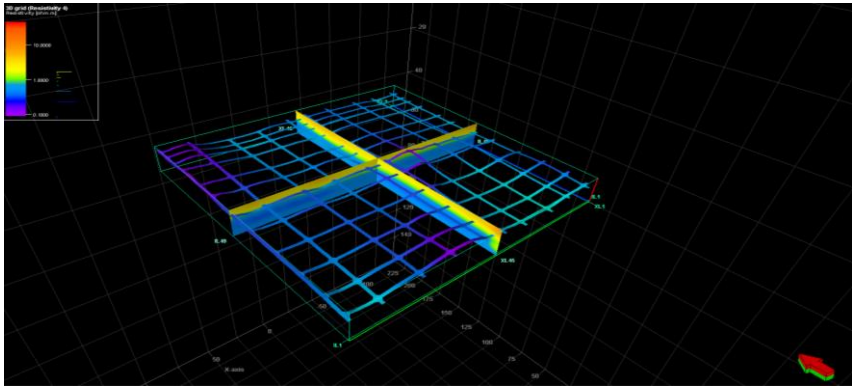
11. Hasil pemodelan pada Res2Dinv lintasan 6



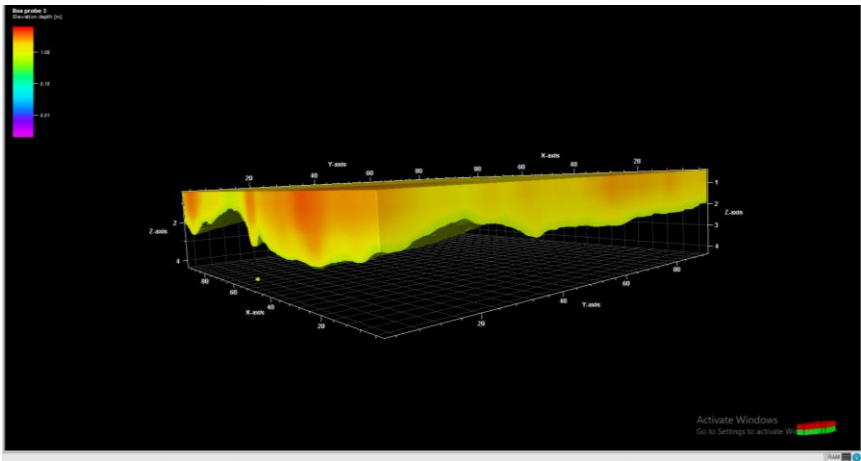
12. Hasil pemodelan pada Petrel menggunakan interpolasi Kriging pada lintasan 6



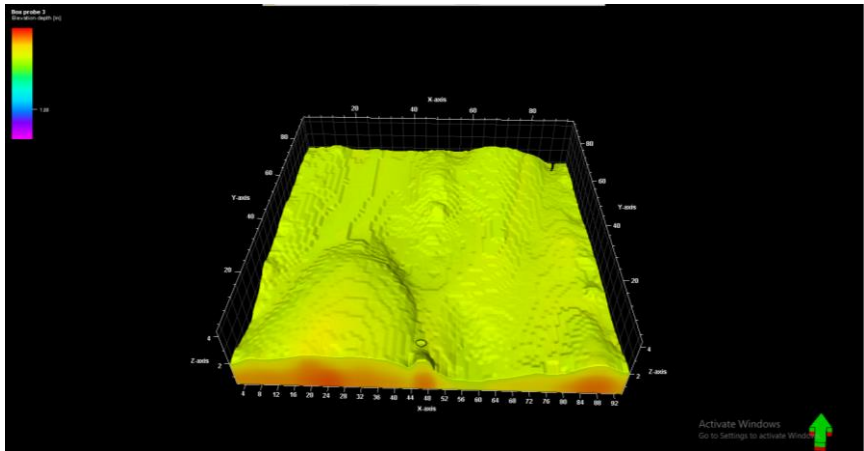
13. Hasil picking horizon batas bawah lapisan *limestone*



14. Hasil deliniasi nilai resistivitas untuk mendapatkan persebaran *limestone*



15. Hasil deliniasi nilai resistivitas untuk mendapatkan persebaran *limestone* dilihat dari bawah



16. Dokumentasi lapangan lintasan resistivitas 5



17. Genangan air dekat lintasan 5



18. Kondisi *limestone* di lokasi penelitian



19. Alat berat penghancur *limestone* dalam proses perataan timbunan



20. Kondisi air bawah permukaan, dengan setelah dikeduk 10 cm terdapat muka air yang rasanya asin



21. Kondisi batas lapisan timbunan *limestone* dan lempung



PROFIL PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Aisyah Fairuz Salsabila atau akrab disapa Sasa. Penulis lahir di Malang pada 8 Maret 1997 dan memiliki satu kakak laki-laki. Penulis telah menempuh jenjang pendidikan di SDN Polisi 4 Bogor (2003-2009), SMPN 4 Bogor (2009-2012), dan SMAN 3 Bogor (2012-2015). Pada tahun 2015 penulis diterima di Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama berkuliah penulis aktif dalam organisasi keprofesian, kepanitiaan, dan mengikuti lomba. Pengalaman penulis dalam kegiatan organisasi adalah sebagai bendahara selama dua periode (2016-2018) di Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HMTG) ITS dan juga bendahara pada acara *Geoscience Atmosphere* (GEOSPHERE) pada tahun 2017, staf divisi *Research and Development Society of Exploration Geophysicists ITS Student Chapter* (SEG ITS SC) pada tahun 2017, dan staf divisi internal *Society of Exploration Geophysicists ITS Student Chapter* (SEG ITS SC) pada tahun 2018. Penulis pernah mengikuti acara *Engineers in Action 2018* (KKN internasional) yang diselenggarakan oleh ITS *International Office* bekerjasama dengan *National Taiwan University of Science and Technology* (NTUST) dengan proyek “Pembuatan *Paving Block* Menggunakan Campuran Limbah Kulit Kerang dan Aplikasinya pada Tempat Penjemuran Ikan” di Kecamatan Bulak, Surabaya. Penulis pernah mengikuti beberapa pelatihan software, diantaranya *Petrophysics Training* dengan tema “*Geology & Geophysics Integrated Study for Reservoir Characterization in Oil and Gas Industry*” yang diselenggarakan bersama Tritium Energi Nusantara, pelatihan singkat software dengan tema “*Petrel Workshop*” yang diselenggarakan oleh Schlumberger Jakarta Learning Center, dan pelatihan software “*Paradigm Seisearch Software*” yang diselenggarakan oleh Paradigm. Penulis juga pernah berpartisipasi dalam lomba *Outcrop Modelling* yang diselenggarakan oleh *Asia Geoscience Student Conference and Exhibiton 2018* di Universitas Teknologi Petronas, Malaysia. Penulis telah melaksanakan Kerja Praktik di PT. Adaro Indonesia dengan judul “Analisis Geostatistika dalam Optimalisasi Spasi Lubang Pemboran”. Selama masa perkuliahan penulis menjadi asisten Laboratorium Geofisika Teknik dan Lingkungan Departemen Teknik Geofisika untuk mata kuliah Geologi Struktur (2017-2019). Selama menjadi asisten laboratorium, penulis juga menjadi asisten kuliah lapangan Karangasambung (2018 dan 2019) serta asisten Kuliah Lapangan Terpadu Bojonegoro untuk metode magnetik dan geologi(2019). Apabila ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir atau lain hal, dapat menghubungi penulis melalui email aisyahfairuz97@gmail.com. Sekian dan terima kasih.