



TUGAS AKHIR - RF184838

ANALISIS SIFAT FISIS BATUAN KARBONAT UNTUK EVALUASI BAHAN TIMBUNAN

MAULANA HUTAMA RAHMA PUTRA
NRP. 0341154000039

Dosen Pembimbing :
Dr. Widya Utama, DEA
NIP. 19611024 198803 1 001

Firman Syaifuddin, S. Si., M. T.
NIP. 19840911 201404 1 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2019



TUGAS AKHIR - RF184838

**ANALISIS SIFAT BATUAN KARBONAT UNTUK EVALUASI
BAHAN TIMBUNAN**

**MAULANA HUTAMA RAHMA PUTRA
NRP. 0341154000039**

**Dosen Pembimbing :
Dr. Widya Utama, DEA
NIP. 19611024 198803 1 001**

**Firman Syaifuddin, S. Si., M. T.
NIP. 19840911 201404 1 001**

**DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**



UNDERGRADUATE THESIS - RF184838

**ANALYSIS OF THE CARBONATE ROCK PROPERTIES FOR
EMBANKMENT MATERIAL EVALUATION**

**MAULANA HUTAMA RAHMA PUTRA
NRP. 0341154000039**

Supervisor:
**Dr. Widya Utama, DEA
NIP. 19611024 198803 1 001**

**Firman Syaifuddin, S. Si., M. T.
NIP. 19840911 201404 1 001**

**GEOPHYSICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil, Environment and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**

TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan “*Analisis Sifat Batuan Karbonat untuk Evaluasi Bahan Timbunan*” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan 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, 18 Januari 2019

Maulana Hutama Rahma Putra
NRP 0341154000039

(Halaman ini sengaja dikosongkan)


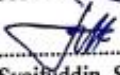
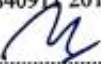

ANALISIS SIFAT BATUAN KARBONAT UNTUK EVALUASI BAHAN TIMBUNAN

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Departemen Teknik Geofisika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 18 Januari 2019

Menyetujui :

1. 
Dr. Widya Utama, DEA (Pembimbing I)
NIP. 19611024 198803 1 001
2. 
Firman Syaifuddin, S. Si., M. T. (Pembimbing II)
NIP. 19840911 201404 1 001
3. 
Anik Hilyah, S. Si., M. T. (Penguji I)
NIP. 19790813 200812 2 002
4. 
Juan Pandu Gya Nur Rochman, S. Si., M. T. (Penguji II)
NIP. 19890612 201504 1 003

Mengetahui :

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


Wien Lestari, S. T., M. T.

DEPNIP: 19811002 201212 2 003

TEKNIK GEOFISIKA



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS SIFAT BATUAN KARBONAT UNTUK EVALUASI BAHAN TIMBUNAN

Nama : Maulana Utama Rahma Putra
NRP : 0341154000039
Departemen : Teknik Geofisika
Pembimbing : Dr. Widya Utama, DEA
Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.

ABSTRAK

Faktor yang memengaruhi strategi dan proses pembangunan infrastruktur adalah jenis lapisan tanah pada wilayah pembangunan. Lapisan tanah yang didominasi lempung, yang memiliki nilai faktor keamanan kecil, tidak aman untuk dibangun infrastruktur. Faktor keamanan pada tanah itu dapat ditingkatkan dengan cara konsolidasi berupa penimbunan bahan timbunan. Tetapi dengan adanya perlakuan tersebut akan menyebabkan penurunan tanah (*Settlement*). Sehingga penelitian ini bertujuan untuk klasifikasi parameter fisis batuan Karbonat yang digunakan sebagai bahan penimbun tersebut serta pengaruhnya terhadap penurunan tanah. Dengan mengetahui distribusi setiap parameter fisisnya seperti densitas, porositas, kompresibilitas dan resistivitas, jenis batuan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelas. Metode klasifikasi yang digunakan adalah *Gaussian Mean Mixture* dimana pada hasilnya memberikan klasifikasi optimal dengan jumlah 2 jenis. Hasil klasifikasi berdasarkan nilai kompresibilitasnya adalah 1.0526×10^{-7} per pascal dan 2.484×10^{-7} per pascal. Sedangkan dari pemodelan menggunakan batuan yang diklasifikasikan, didapatkan bahwa pencampuran kedua jenis batuan memberikan kualitas timbunan yang baik dimana memberikan konsolidasi 100% dengan penurunan tanah sebesar 138.4 mm.

Kata Kunci : Batuan Karbonat, *Gaussian Mean Mixture*, Parameter fisis, *Settlement*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALYSIS OF THE CARBONATE ROCK PROPERTIES FOR EMBANKMENT MATERIAL EVALUATION

Name : Maulana Hutama Rahma Putra
NRP : 0341154000039
Departement : Geophysical Engineering
Supervisor : Dr. Widya Utama, DEA
Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.

ABSTRACT

Factors that influence the strategy and process of infrastructure development are the types of soil layers in the development area. Clay-dominated soil layer, which has a small safety factor, is not safe to build infrastructure. The safety factor for the soil can be improved by consolidating in the form of stockpiling. But with this treatment will cause an elevation decrease in land (*Settlement*). So that this study aims to classify physical parameters rock carbonate which is used as the stockpiling material and its effect on soil *Settlement*. By knowing the physical parameters such as density, porosity, compressibility and resistivity, rock types can be classified into several classes. The classification method used is the *Gaussian Mean Mixture* wherein the results provide an optimal classification with the number 2 types. The classification results based on compressibility values are 1.0526×10^{-7} per pascal and 2.484×10^{-7} per pascal. Whereas from modeling using classified rocks, it was found that *Mixing* the two rock types provided good embankment quality which provided 100% consolidation with overall *Settlement* of 138.4 mm.

Keywords: Carbonate Rock, *Gaussian Mean Mixture*, Physical Parameters, *Settlement*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirahim, Alhamdulillah telah diselesaikan penulisan dan penelitian tugas akhir saya dengan judul *Analisis Sifat Batuan Karbonat untuk Evaluasi Bahan Timbunan*. Penelitian ini tentunya dapat terselesaikan dengan bantuan orang – orang terdekat saya, sehingga saya ingin mengucapkan terimakasih kepada,

1. Ir. Eddie Rahmawan dan Syukriyah sebagai orang tua serta keluarga penulis yang telah memberikan dukungan dan doa pada pengerjaan tugas akhir,
2. Dr. Widya Utama, DEA selaku dosen pembimbing serta acuan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir,
3. Bpk. Firman Syaifudin selaku dosen pembimbing dan telah memberikan motivasi banyak,
4. Seluruh dosen, tendik dan mahasiswa Teknik Geofisika ITS yang telah memberi dukungan,
5. Nur Annisa Kusuma Dewi yang telah memberikan dukungan,
6. Teman khusus yang selalu membantu yaitu, Kharis Aulia Alam, Faiz Eka Putra, M. Zofran Hilmy, Ahmad Dwi Cahya, Arya, Sumitha
7. Anggota CEKI Teknik Geofisika
8. Kontrakan Mulyosari,
9. Tim Fisika Batuan Kelas A,
10. Dan khususnya rekan rekan TG04 yang telah memberikan dukungan dan cerita selama masa perkuliahan,

Sehingga pengerjaan Tugas Akhir ini dapat berjalan dengan lancar. Semoga, dengan adanya penelitian ini dapat memberikan pandangan yang lebih luas terkait metode Geofisika dan meningkatkan kontribusi Teknik Geofisika ITS pada dunia keilmiah.

Penulis,

Maulana Hutama Rahma Putra
0341154000039

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Tujuan Penelitian	1
1.5 Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Karakteristik Batuan Karbonat.....	3
2.2 Parameter Fisis Batuan.....	5
2.2.1 Resistivitas	5
2.2.2 Kompresibilitas	7
2.2.3 Saturasi	8
2.4 <i>Gaussian Mean Mixture</i>	9
2.5 Penurunan Tanah (<i>Settlement</i>).....	10
BAB III METODOLOGI.....	11
3.1 Alat dan Bahan	11
3.2 Skema Kerja	11
3.3 Alur Kerja.....	14
3.4 Jadwal Kegiatan	16
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	17
4.1 Analisis Data	17
4.2 Pembahasan	19
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN	49
Lampiran 1: <i>Gaussian Mean Mixture</i>	49
Lampiran 2. Plot AIC dan BIC.....	50
Lampiran 3. <i>Gaussian Mean Mixture 3D</i>	51
BIODATA PENULIS	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenjang Resistivitas Batuan	3
Gambar 2. 2 Contoh sayatan tipis batu karbonat terhadap kondisi pelapukan ...	4
Gambar 2. 3 Hubungan CRW terhadap densitas dan porositas	5
Gambar 2. 4 Hubungan antara Resistivitas dengan Batuan yang tersaturasi.....	6
Gambar 2. 5 Uji Laboratorium Resistivitas Sampel	6
Gambar 2. 6 Contoh Kurva hubungan antara Resistivitas-Water Content	7
Gambar 2. 7 Uji Laboratorium Kompresibilitas	7
Gambar 2. 8 Ilustrasi Keadaan Batuan Tersaturasi dan Tidak Tersaturasi	8
Gambar 2. 9 Lempung (Kiri), Lempung yang Longsor (Kanan).....	9
Gambar 2. 10 Distribusi normal	10
Gambar 3. 1 Skema Kerja Output Akhir Penelitian	11
Gambar 3. 2 Skema kerja pengukuran resistivitas campuran (A)	12
Gambar 3. 3 Skema kerja akuisisi data sifat fisis batuan (B)	12
Gambar 3. 4 Skema kerja pengukuran Kompresibilitas	13
Gambar 3. 5 Algoritma <i>Gaussian Mean Mixture</i>	13
Gambar 4. 1 Histogram dan distribusi densitas	20
Gambar 4. 2 Histogram dan distribusi porositas	21
Gambar 4. 3 Histogram dan distribusi kompresibilitas	22
Gambar 4. 4 Histogram dan distribusi Resistivitas	23
Gambar 4. 5 Crossplot data (A) Porositas – Densitas, (B) Densitas – Resistivitas dan (C) Porositas – Resistivitas	25
Gambar 4. 6 Plot 3 Dimensi (A) Porositas-Densitas-Kompresibilitas (B) Porositas-Densitas-Resistivitas	26
Gambar 4. 7 Plot AIC - BIC pada Clustering Porositas dan Densitas	27
Gambar 4. 8 Plot AIC - BIC pada Clustering Densitas dan Resistivitas	28
Gambar 4. 9 Plot AIC - BIC pada Clustering Porositas dan Resistivitas	29
Gambar 4. 10 Plot AIC - BIC pada Clustering Densitas dan Kompresibilitas .	30
Gambar 4. 11 Plot AIC - BIC pada Clustering Porositas dan Kompresibilitas	31
Gambar 4. 12 Hasil klasifikasi GMM pada Porositas-Densitas	33
Gambar 4. 13 Hasil klasifikasi GMM pada Porositas – Resistivitas	33
Gambar 4. 14 Hasil klasifikasi GMM pada Densitas-Resistivitas.....	34
Gambar 4. 15 Hasil klasifikasi GMM pada Densitas-Kompresibilitas.....	34
Gambar 4. 16 Hasil klasifikasi GMM Porositas-Kompresibilitas	34
Gambar 4. 17 Klasifikasi Gassian Mixture Model 3 Parameter	35
Gambar 4. 18 Parameter fisis tanah dan batuan	37
Gambar 4. 19 Model timbunan (A) 1 jenis tanah timbunan (B) 2 jenis tanah..	38
Gambar 4. 20 Hasil analisis Settlement studi kasus tanah homogen.....	39
Gambar 4. 21 Hasil analisis Settlement studi kasus memiliki lapisan incompressible.....	40

Gambar 4. 22 Model timbunan tanpa tanah lunak	40
Gambar 4. 23 Analisis Settlement pada timbunan dengan model.....	41
Gambar 4. 24 Perbandingan bahan timbunan berdasarkan biaya dengan penurunan	42
Gambar 4. 25 Grafik resistivitas campuran terhadap jumlah tetesan.....	44
Lampiran 1 Proses pengeringan batuan	61
Lampiran 2 Proses akuisisi data resistivitas batu.....	62
Lampiran 3 Proses pembebanan batuan.....	62
Lampiran 4 Proses pengukuran bereat jenis tanah.....	63
Lampiran 5 Proses coring batuan.....	63
Lampiran 6 Sampel batuan	64

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Timeline Pengerjaan Tugas Akhir.....	16
Tabel 4. 1 Dimensi core penelitian.....	17
Tabel 4. 2 Hasil pengukuran core keadaan basah.....	18
Tabel 4. 3 Profil statistik setiap paraeter	23
Tabel 4. 4 Covairance setiap parameter	25
Tabel 4. 5 Korelasi setiap parameter	25
Tabel 4. 6 Perbandingan nilai segmen pada setiap cluster per setiap 2 parameter	32
Tabel 4. 7 Hasil klasifikasi batuan Karbonat menggunakan metode GMM	35
Tabel 4. 8 Klasifikasi parameter geoteknik batuan	36
Tabel 4. 9 Rincian perilaku serta data pendukung model.....	36
Tabel 4. 10 <i>Settlement</i> dan konsolidasi dari model homogen (dalam mm)	42
Tabel 4. 11 <i>Settlement</i> dan konsolidasi dari model dengan batas (dalam mm)	43
Tabel 4. 12 <i>Settlement</i> setiap bahan timbunan (dalam mm)	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Proses pengeringan batuan	61
Lampiran 2 Proses akuisisi data resistivitas batu	62
Lampiran 3 Proses pembebanan batuan.....	62
Lampiran 4 Proses pengukuran bereat jenis tanah	63
Lampiran 5 Proses coring batuan.....	63
Lampiran 6 Sampel batuan	64

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Faktor yang memengaruhi strategi dan proses pembangunan infrastruktur adalah jenis lapisan tanah pada wilayah pembangunan. Wilayah, seperti Surabaya atau Gresik, merupakan target pembangunan infrastruktur dimana secara geologi memiliki lapisan dangkal yang didominasi oleh Lempung (*Shale*) (Supandjono, 1992). Lapisan yang didominasi oleh lempung tidak aman apabila dilakukan pembangunan langsung di atasnya dikarenakan kecilnya faktor keamanan dari lempung (Feld, 2017). Solusi yang dapat dilakukan adalah menimbun lapisan lempung dengan batuan karbonat sampai dengan elevasi yang ditentukan. Dengan dilakukannya penimbunan maka diharapkan pembangunan infrastruktur dapat meningkatkan faktor keamanan pada wilayah tersebut.

Proses penimbunan lapisan lunak oleh karbonat tidak serta merta hanya menimbun di atasnya, tetapi juga dilakukan pengompakan lapisan agar menjadi lebih padat. Setelah dilakukan pengompaksian, tentu terjadi perubahan ukuran yang mengakibatkan perubahan volume (Hardiyatmo, 2002). Perubahan volume awal hingga setelah pemadatan dapat dihitung dengan mengetahui parameter fisik batuan. Dari parameter fisis yang telah didapatkan, maka batuan dapat dikelompokkan berdasarkan parameternya. Pengelompokan ini bertujuan untuk menentukan batuan mana yang lebih baik digunakan dalam melakukan proses timbunan. Oleh karena itu, penelitian yang dilakukan adalah analisis parameter fisis pada batuan karbonat yang bertujuan untuk mengetahui bagaimana karakteristik dari batuan serta melakukan pengklasifikasiannya menggunakan *Gaussian Mean Mixture* untuk bahan timbunan yang akan digunakan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa nilai porositas, densitas, resistivitas dan kompresibilitas pada batuan Karbonat yang digunakan sebagai bahan timbunan?
2. Berapa penurunan tanah (*Settlement*) pada lokasi penelitian ketika ditimbun menggunakan batuan yang terklasifikasi?

1.3 Batasan Masalah

1. Tidak dilakukan uji N-SPT dan CPT
2. Nilai koefisien konsolidasi dan jenis tanah didapatkan dari referensi literatur
3. Batuan karbonat didapatkan dari Quarry yang sama

1.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk menentukan nilai porositas, densitas, resistivitas dan kompresibilitas pada batuan Karbonat dalam skala laboratorium.
2. Untuk mengetahui penurunan tanah (*Settlement*) pada lokasi penelitian ketika ditimbunan menggunakan batuan yang terklasifikasi

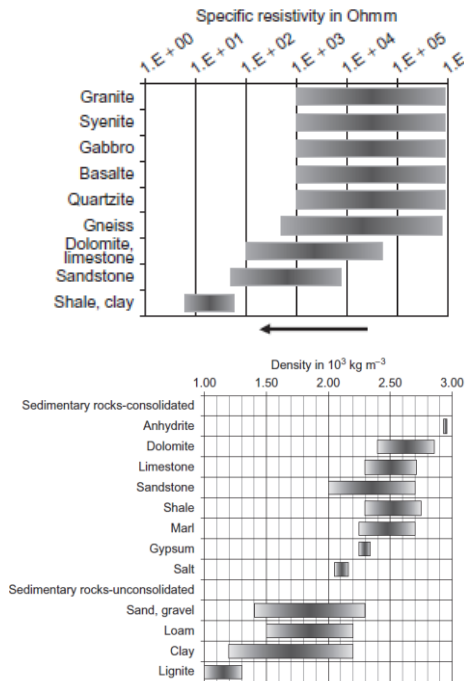
1.5 Manfaat

1. Memberi acuan pada banyaknya volume batuan karbonat yang diperlukan agar mendapatkan elevasi yang diinginkan setelah dilakukan pemadatan
2. Memberi acuan nilai resistivitas batuan karbonat ketika akan dilakukan evaluasi menggunakan metode geolistrik

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Batuan Karbonat

Klasifikasi batuan sedimen dibagi beberapa jenis, salah satunya adalah batuan karbonat yang memiliki ciri khusus. Dibagi menjadi dua yaitu gamping (kaya akan kalsit) dan dolomit (gamping yang terjadi dolomisasi). Pada dasarnya, pembentukan sedimen melalui proses sedimentasi seperti erosi, transportasi dan deposit. Sedangkan untuk batuan karbonat, terbentuk disebabkan oleh proses biologi dimana yang memengaruhi besarnya butir akibat dari kecepatan arus laut yang membawa bahan kalsit dan proses tersebut yang menjadi penentu karakteristik dari batuan karbonat tersebut. Secara sifat fisis, batuan karbonat memiliki nilai resistivitas yang sangat beragam. Hal ini dikarenakan pengisi rongga serta mineral sebagai butir dalam batuan karbonat sendiri bergantung pada proses biologi. Pada gambar 2.1 merupakan jenjang nilai resistivitas yang dimiliki oleh batuan dimana memiliki jenjang yang sangat besar diakibatkan dari material pengisi fluida serta beragam mineral pembentuk.



Gambar 2. 1 Jenjang Resistivitas Batuan
(Tanda panah menandakan pori dan retakan diisi oleh air)
(Schoen, 2011)

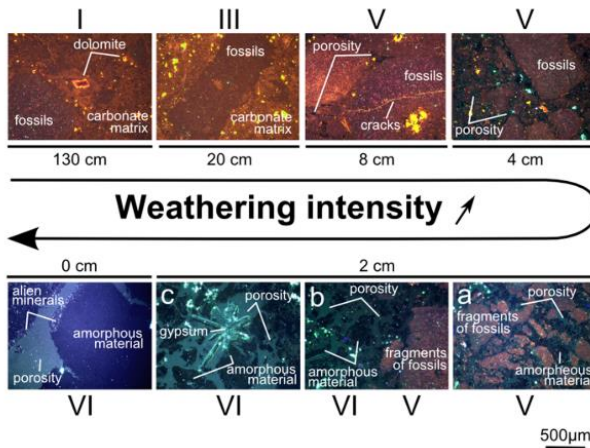
Adapun karakter selain resistivitas adalah densitas batuan. Dimana densitas batuan karbonat memiliki jenjang densitas 2.3 – 2.7 gram/cm³. Densitas suatu batuan sangat bergantung terhadap beberapa aspek seperti butiran pembentuk batuan, besarnya porositas dan fluida pengisi. Sehingga untuk densitas batuan (*bulk density*) dinyatakan dengan densitas matriks (ρ_{ma}), densitas fluida (ρ_{fl}) dan persentase pori pada batuan (ϕ) (Schoen, 2011).

$$\rho_{bulk} = \rho_{ma} * \phi + \rho_{fl} * (1 - \phi) \tag{1}$$

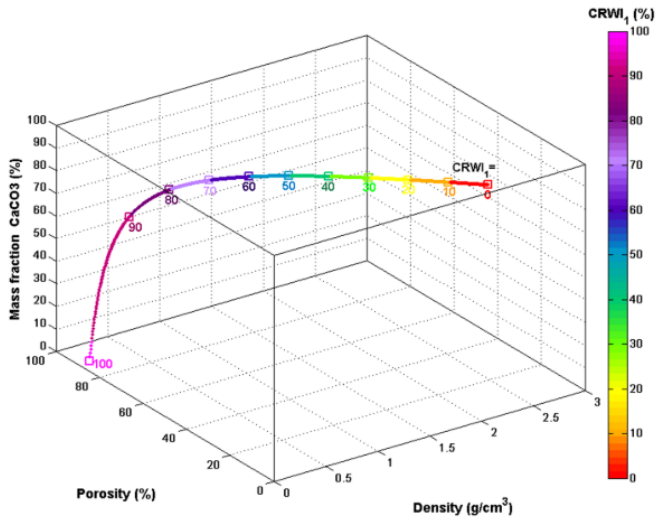
Klasifikasi dari batu gamping tidak hanya dari jenisnya saja yaitu, dolomite dan *Limestone*. Tetapi ada klasifikasi terkait tingkat kelapukan dari batuan karbonat berdasarkan analisa sayatan tipis (Dubois, Deceuster, Kaufmann, & Rowberry, 2015). Batu karbonat yang memiliki kelapukan yang tinggi ditandai oleh persentase *Carbonate Rock Weathering* (CRW) yang berkaitan dengan densitas dan porositasnya serta dihitung berdasarkan berkurangnya kandungan Kalsit pada batuan Karbonat,

$$CRW = 1 - \frac{M_1^i}{M_1^f} \tag{2}$$

Dimana M_1 menandakan jumlah massa dari Kalsit dari batuan karbonat, sedangkan i menandakan kondisi lapukan saat ke – i dan f merupakan kondisi saat segar (*fresh*). Sehingga semakin tinggi persentase dari CRW akan memberikan kondisi porositas yang semakin besar dan densitas yang semakin kecil. Berikut contoh dari sayatan tipis terhadap klasifikasi CRW,



Gambar 2. 2 Contoh sayatan tipis batu karbonat terhadap kondisi pelapukan



Gambar 2. 3 Hubungan CRW terhadap densitas dan porositas (Dubois et al., 2015)

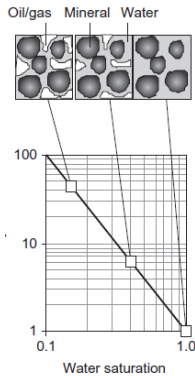
2.2 Parameter Fisis Batuan

Fisika batuan merupakan studi yang bertujuan mengkarakterisasi sifat batuan. Fisika batuan menyediakan koneksi antara sifat elastik yang diukur pada lapisan bumi. Dalam lingkungan lubang bor dan laboratorium, hal yang dapat dipelajari melalui fisika batuan ada mineralogi, porositas, bentuk pori, fluida pori, tekanan pori, permeabilitas, viskositas, tegangan, laminsi, dan rekahan. Fisika batuan menyediakan pemahaman serta alat bantu untuk mendapat gambaran dan solusi karakterisasi berdasarkan data elastic (Schön, 2011).

2.2.1 Resistivitas

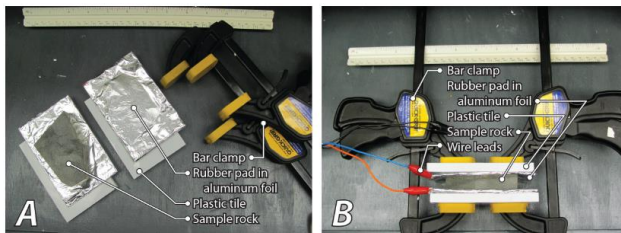
Bahan yang memiliki geometri tertentu dapat dialiri listrik. Namun, kemudahan aliran listrik tersebut pada setiap bahan ialah berbeda beda. Parameter fisis dari penahan aliran listrik adalah resistivitas. Dimana resistivitas (ρ) yang dikalikan dengan geometri bahan sama dengan resistansi (R).

$$\rho = R * \frac{A}{l} \tag{3}$$

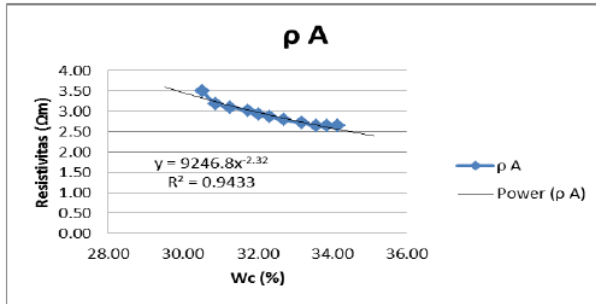


Gambar 2. 4 Hubungan antara Resistivitas dengan Batuan yang tersaturasi
Schoen (2011)

Uji resistivitas dapat dilakukan dalam skala lab seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Arsyadi (2017). Penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh fluida pada resistivitas sampel tanah memberikan gambaran bagaimana cara melakukan uji resistivitas dalam skala laboratorium. Sedangkan untuk alat pengujian yang digunakan dalam pengukuran resistivitas dalam skala lab adalah mengacu pada (Bloss, Bedrosian, Jewell, 2013) dimana menggunakan LCR meter. Namun, untuk pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan multimeter.



Gambar 2. 5 Uji Laboratorium Resistivitas Sampel
(Bloss et al., 2013)



Gambar 2. 6 Contoh Kurva hubungan antara Resistivitas-Water Content (Arsyadi, Warnana, Sutra, Aryani, 2017)

2.2.2 Kompresibilitas

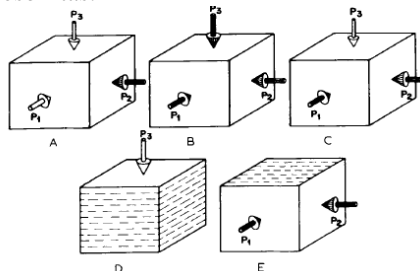
Ketika tekanan hidrostatik diberikan ke suatu batuan atau bahan, maka akan terjadi suatu perbedaan volume (*volumetric strain*). Sama halnya ketika suatu timbunan diberikan suatu beban di atasnya, maka dapat terjadi perubahan volume tersebut. Perbandingan antara perubahan volume dengan tekanan hidrostatik yang terjadi pada suatu bahan disebut dengan kompresibilitas,

$$K = \frac{PV_0}{\Delta V} \quad (4)$$

$$\text{Compressibility} = \frac{1}{k} \quad (5)$$

(Gallaher Corporation, 2015)

Uji kompresibilitas yang biasa dilakukan ada beberapa jenis bergantung terhadap kebutuhan. Hal ini disebabkan oleh tekanan yang diberikan di bumi ialah beragam, tidak hanya disebabkan oleh 1 arah saja. Oleh karena itu, pada Chiligrain (1992) menjelaskan lebih rinci beberapa jenis dan metodologi untuk mendapatkan kompresibilitas.



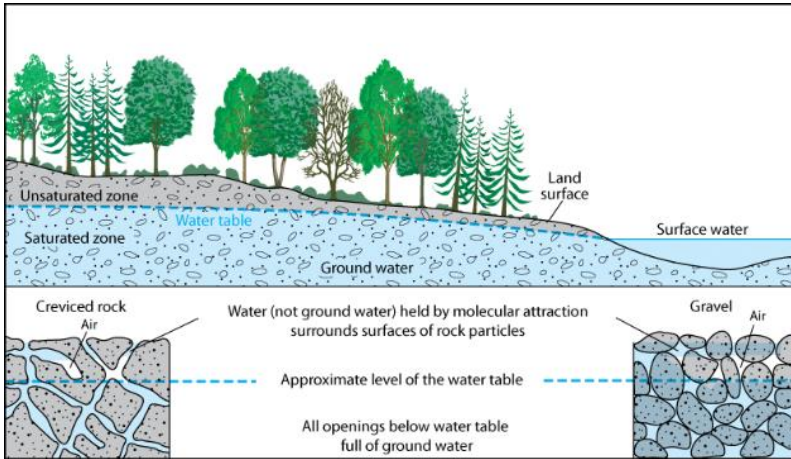
Gambar 2. 7 Uji Laboratorium Kompresibilitas (A) Polyaxial Loading, (B) Hydrostatic Loading, (C) Triaxial Loading, (D) Uniaxial Loading, (E) Biaxial Loading.

(Chiligrain,1992)

2.2.3 Saturasi

Komponen pada suatu batuan ialah matriks, butiran dan semen yang menyatu. Tetapi, dalam proses pengompaknya tidak secara utuh menyatu atau terdapat rongga antar material. Rongga atau yang disebut pori bisa menjadi ruang untuk suatu fluida mengisinya. Dalam Schoen (2011), pengisi pori bisa jadi lebih dari 1 jenis fluida. Seberapa banyak persentase fluida yang mengisi pori disebut dengan saturasi.

$$S_i = \frac{\text{Volume Fluida } i}{\text{Volume Pori}} \quad (6)$$



Gambar 2. 8 Ilustrasi Keadaan Batuan Tersaturasi dan Tidak Tersaturasi (Science Education Resource Center, 2017)

2.3 Karakteristik Lempung

Pembeda batuan sedimen adalah ukuran butir yang menjadi komponen pada batuan tersebut. Lempung merupakan batuan yang memiliki komponen *fine-grained* dimana memiliki bentuk dan ukuran *silt* dan *clay*. Batuan ini terbentuk akibat dari sedimentasi yang panjang dimana proses transportasi yang dilalui ialah sangat banyak. Karena proses tersebut menghasilkan butiran yang sangat halus. Hasilnya, letak deposit dari lempung adalah wilayah muara seperti rawa, danau, delta dan lain sebagainya (Geology, 2018).

Berdasarkan Geology (2018), dikarenakan ukuran butir dari lempung yang sangat kecil dan halus, membuat pori yang bisa diisi oleh fluida sangat sedikit. Sehingga, secara geologi, biasanya lempung menjadi pembatas atau penghambat suatu fluida untuk dilewati yang dianggap sebagai *caprock*. Sedangkan untuk pembangun infrastruktur, wilayah lempung sangat dihindari karena kesensitifannya terhadap suatu gaya yang mengenainya. Selain itu

lempung memiliki daya tahan geser yang kecil, sehingga dengan banyaknya gaya yang diberikannya dapat mengakibatkan longsoran.



USGS



Gambar 2. 9 Lempung (Kiri), Lempung yang Longsor (Kanan)
(Avion Tech, 2018)

2.4 Gaussian Mean Mixture

Ketika mendapati suatu distribusi data (eg. Histogram), proses interpretasi yang dapat dilakukan adalah mengetahui bentuk dari distribusi itu sendiri. Tetapi, didalam 1 bentuk distribusi (Uniform) terdapat beberapa bentuk distribusi lainnya yang disebut dengan *multimodal*. Hal ini dapat diselesaikan menggunakan metode *Gaussian Mean Mixture* dimana mendekati sub-distribusi menggunakan bentuk distribusi normal atau Gaussian. Dengan mendapatkan nilai rata rata (*mean*/ μ) dan *covariance* (Σ) pada data maka akan didapatkan bentuk distribusi menggunakan persamaan berikut,

$$g(x|\mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2}|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu)'\Sigma^{-1}(x - \mu)\right\} \quad (7)$$

Penyelesaian dalam *Clustering* data menggunakan GMM biasanya dilakukan dengan cara Expectation-Maximization (EM) dimana menggunakan inisial model dari parameter GMM dimana digunakan untuk mengestimasi model baru dengan nilai probabilitas yang lebih tinggi. Dari model baru tersebut kemudian dijadikan model inisial untuk iterasi selanjutnya sampai mendapatkan nilai akhir yang konvergen.

Expectation Step:

$$G = \frac{w * g(x|\mu, \Sigma)}{\sum w * g(x|\mu, \Sigma)} \quad (8)$$

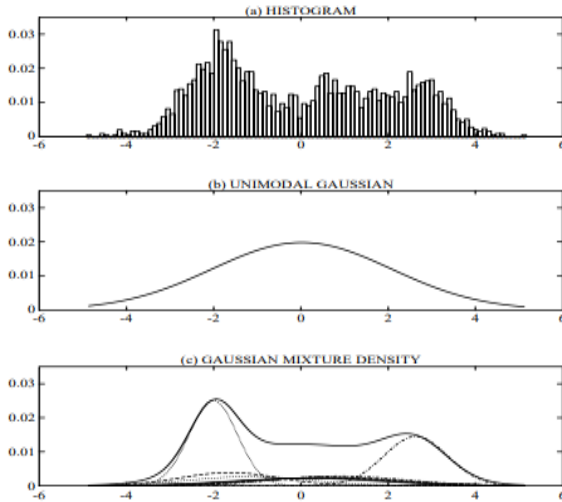
Maximization Step:

$$w' = \frac{\sum G}{N} \quad (9)$$

$$\mu' = \frac{\sum G x}{\sum G} \quad (10)$$

$$\Sigma = \frac{\sum G (x - \mu')^2}{\sum G} \quad (11)$$

(McGonagle et al, 2018)



Gambar 2. 10 Distribusi normal (A) Histogram data, (B) Distribusi Gaussian dan (C) Gaussian Mixture Density
(Douglas Reynolds, 2015)

2.5 Penurunan Tanah (*Settlement*)

Secara umum, penurunan (*Settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

1. Penurunan konsolidasi (*consolidation Settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah. Penurunan konsolidasi dibagi menjadi dua, yaitu penurunan konsolidasi primer dan penurunan konsolidasi sekunder.
2. Penurunan segera (*immediate Settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air.

Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas. Besarnya penurunan konsolidasi primer untuk lempung yang terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$S = \frac{Cc H}{1+e_0} \log\left(\frac{P_0+\Delta P}{P_0}\right) \quad (12)$$

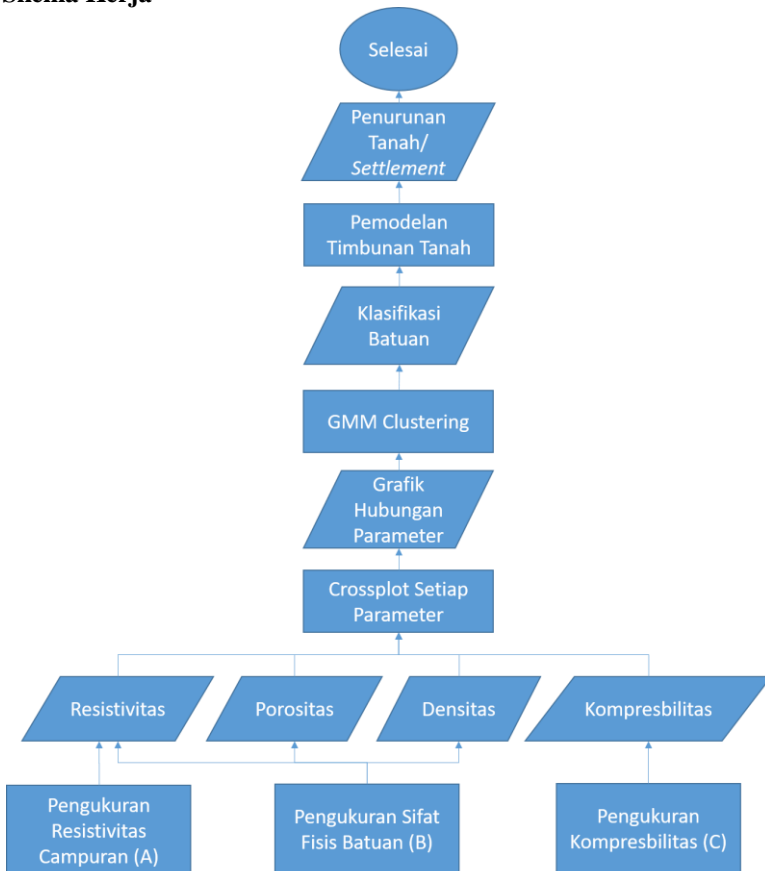
Dimana *Settlement* (S) dipengaruhi oleh Koefisien pemampatan C_c , angka pori awal e_0 , tegangan *overburden* efektif awal P_0 dan perbedaan tegangan di muka tanah ΔP (Craig, 1994).

BAB III METODOLOGI

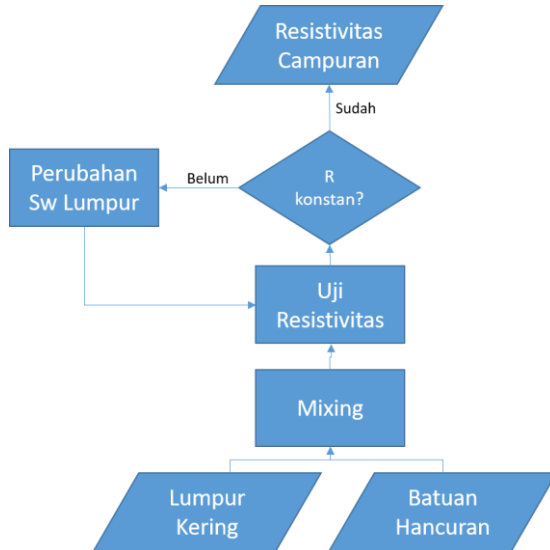
3.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 set pengukuran skala laboratorium untuk mendapatkan nilai Resistivitas berupa aluminium foil, paralon, multimeter, kabel buaya dan Kompresibilitas berupa *Universal Compression and Tension* (UCT), neraca digital dan jangka sorong. Sedangkan untuk pembuatan core diperlukan 1 set alat *Core* dan palu. Untuk pengolahan data digunakan perangkat lunak Minitab, Matlab 2015, Microsoft Word, Excel dan Power Point.

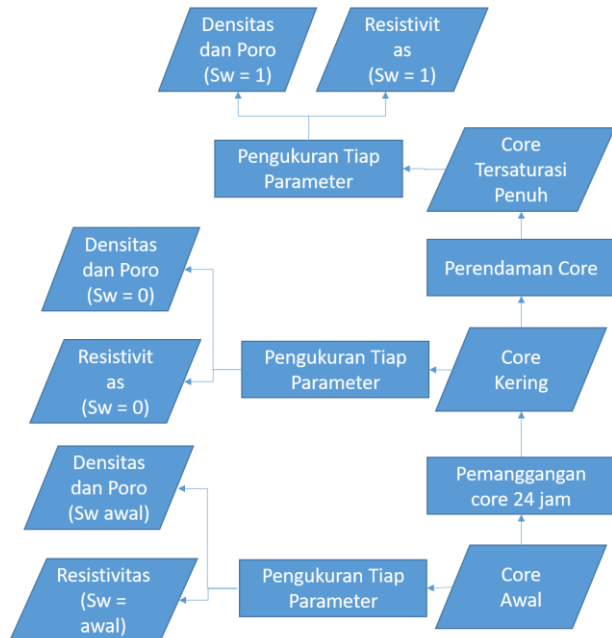
3.2 Skema Kerja



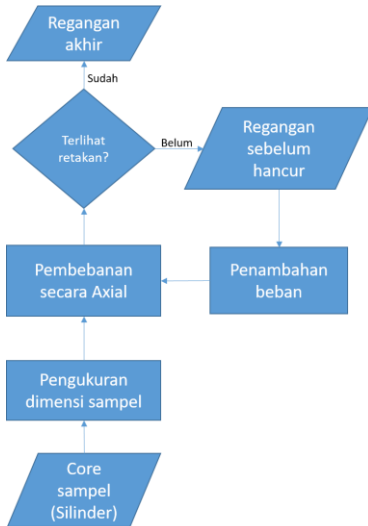
Gambar 3. 1 Skema Kerja Output Akhir Penelitian



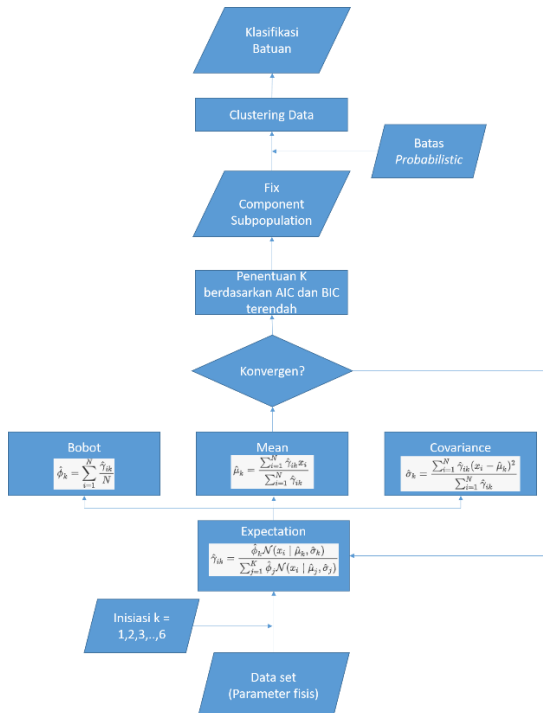
Gambar 3. 2 Skema kerja pengukuran resistivitas campuran (A)



Gambar 3. 3 Skema kerja akuisisi data sifat fisis batuan (B)



Gambar 3. 4 Skema kerja pengukuran Kompresibilitas



Gambar 3. 5 Algoritma *Gaussian Mean Mixture*

3.3 Alur Kerja

Alur Kerja dari penelitian dimulai dengan pengambilan sampel di Kuori dimana sumber batuan untuk timbunan berada. Sampel yang diambil adalah batuan karbonat dengan dimensi lebih dari 15 cm x 15 cm x 15 cm agar dapat dilakukan *coring*. Setelah itu, *coring* dari batuan karbonat sehingga mendapatkan sampel *core* kurang lebih dengan dimensi 8 cm x 8 cm x 10 cm dengan bentuk silinder dan ditimbang beratnya. Kemudian, setiap *core* dikeringkan dengan cara dimasukan ke dalam oven. Setelah dilakukan pengeringan, dilakukan pemisahan antara *core* yang kering dengan *core* yang akan diberikan fluida dan keduanya di timbang beratnya. Pemberian fluida pada *core* dilakukan dengan menempatkannya di dalam suatu wadah dengan isi fluida dan direndam dengan waktu yang berbeda – beda. Setelah direndam dengan waktu yang berbeda, sampel *core* diambil dan ditimbang beratnya.

Setelah *core* disiapkan, maka pengukuran parameter fisis batuan dapat dilakukan dengan metodologi seperti berikut,

- a. Pengukuran resistivitas campuran batuan
 1. Sisa dari *core* dilakukan penghancuran batuan sampel yang masih berbentuk bongkah
 2. Hancuran setiap sampel diayak sampai pada ukuran saringan nomor 200/ukuran 0.074 milimeter.
 3. Setiap hancuran sampel dicampur dengan lumpur kering dengan perbandingan 4:1, 3:2, 2:3, 1:4 pada paralon dengan panjang 12 sentimeter dan diameter 6.7 sentimeter.
 4. Campuran dilakukan pengukuran Resistansi dengan rangkaian seperti gambar 2.3 menggunakan multimeter (Lampiran 2)
 5. Pengukuran Resistansi dilakukan variasi pada jenis fluida berupa air asin (*Salin Water*) dan air tawar (*Fresh Water*) setiap 10 tetesan
 6. Resistivitas dihitung dengan perkalian antara Resistansi dengan faktor geometri sampel (persamaan 3)
 7. Hasil akhir dari pengukuran resistivitas campuran adalah hubungan antara resistivitas campuran dengan jumlah tetesan yang dilakukan
- b. Akuisisi data sifat fisis batuan
 1. Core dilakukan pengukuran dimensi menggunakan jangka sorong dan massa menggunakan neraca digital
 2. Core dilakukan pengeringan dengan oven pada suhu 80°C pada 1 jam pertama dan meningkat menjadi 100°C selama 24 jam
 3. Core yang telah dikeringkan dilakukan pengukuran massa kering dan resistivitas
 4. Setelah dilakukan pekerjaan langkah ke – 3, *core* direndam pada fluida selama 3-5 hari

5. Kemudian, *core* dilakukan pengukuran massa basah dan resistivitas saat jenuh
 6. Perhitungan densitas *core* dilakukan dengan perbandingan massa dengan volume *core*
 7. Perhitungan porositas *core* dilakukan dengan perbandingan massa basah yang telah dikurangi oleh massa kering dengan volume *core*
- c. Akuisisi data kompresibilitas
1. Sampel *core* dilakukan pengukuran dimensi menggunakan jangka sorong dan massa menggunakan neraca digital
 2. Sampel batuan diletakkan diantara plat baja dan diatur agar tepat
 3. Mesin dinyalakan sehingga batuan berada di tengah – tengah apitan plat baja dan kedua sisi menyentuh plat baja
 4. Skala pengukuran beban harus ditetapkan pada keadaan netral (nol)
 5. Pada alat kuat tekan dipasang tiga buah *dial gauge* berupa *dial gauge* deformasi lateral, kiri dan kanan (aksial)
 6. Selama pembebanan berlangsung dilihat deformasi lateral dan aksial secara periodik dengan selang waktu per 30 detik
 7. Pembebanan dilakukan sedikit demi sedikit hingga batuan pecah (terlihat retakan)

Setelah didapatkan parameter fisis dilakukan perhitungan data statistik untuk mendapatkan distribusi menggunakan Minitab dan Excel. Kemudian, syarat klasifikasi menggunakan GMM adalah histogram memiliki bentuk distribusi ***multimodal*** dan memiliki **korelasi yang baik** (mendekati nilai 1 atau -1) (McGonagle et al, 2018),

1. Dilakukan pemilihan parameter fisis yang akan dilakukan *clustering* dengan mendapatkan nilai korelasi parameter fisis dan memiliki histogram yang multimodal
2. Inisiasi jumlah segmen dari 1 sampai dengan 6
3. Perhitungan *Expectation* dan *Maximization* sampai mendapatkan nilai yang tetap (konvergen)
4. Dari klasifikasi menggunakan semua segmen k, ditentukan segmen terbaik berdasarkan koefisien AIC dan BIC terendah
5. Menentukan anggota dari segmen berdasarkan *probabilistic*
6. Didapatkan klasifikasi batuan berdasarkan parameter fisisnya berjumlah k yang optimal

Dari klasifikasi yang telah didapatkan kemudian dijadikan masukan atau *input* ke dalam software GEOP5-*Settlement* dan dilakukan analisis *Settlement* setiap model yang telah direncanakan.

3.4 Jadwal Kegiatan

Tabel 3. 1 Timeline Pengerjaan Tugas Akhir

Kegiatan	Bobot	September				Oktober				November				Desember				Alat dan Bahan	Output
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
		Minggu Pengerjaan Ke-																	
Peracian Literatur Kompresibilitas dan Resistivitas skala Laboratorium	6	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	Paper, Jurnal dan Buku	Rangkuman
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Pembuatan Proposal	2	1	1															Ms. Word	Proposal Awal
Pembuatan Presentasi	6		1									2						Ms. Presentation	Presentasi
Pengambilan Sampel	5				3				2										Sampel dalam Botongkahan
Melakukan Coring Sampel	10			2	3				2									1 set alat Core	Core berbentuk silinder
Persiapan Core (Pengerjaan dan Penunhulan)	20			2					8			6	2					Wadah, Label Lempuung	Core basah dan Core Kering
Pengukuran Resistivitas	18								2			2	2					1 set alat Resistivitas laboratorium	Grafik resistivitas Core
Pengukuran Kompresibilitas	18											2						1 set alat Kompresibilitas	Grafik Kompresibilitas Core
Analisis Pengaruh Saturasi terhadap Setiap Parameter	6																	Ms. Excel	Grafik Hubungan saturasi terhadap setiap parameter fisik
Pembuatan Laporan Akhir	9																	Ms. Word	Laporan Akhir
Total	100	2	2	2	4	7	8	11	11	4	5	7	7	10	11	11	6	3	2
Akumulasi	0	2	4	8	15	23	34	45	49	54	61	68	78	89	95	98	100		
Total Realisasi		2	4	8	15	22	33	42	47	52	54	63	75	87	95	98	100		

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Tabel 4. 1 Dimensi core penelitian

No	Diameter (cm)	Tinggi (cm)
1	6.7	8.7
2		7.5
3		7.5
4		7.3
5		9.3
6		6.2
7		9.4
8		7.8
9		4.7
10		3.8
11		5.3
12		9.5
13		6.4
14		5.1
15		6
16		6.1
17		8.1
18		5.6
19		6.3
20		6.5
21		4.3
22		2.5
23		4.5
24		4.1
25		5.5
26		5

Tabel 4. 2 Hasil pengukuran core keadaan basah

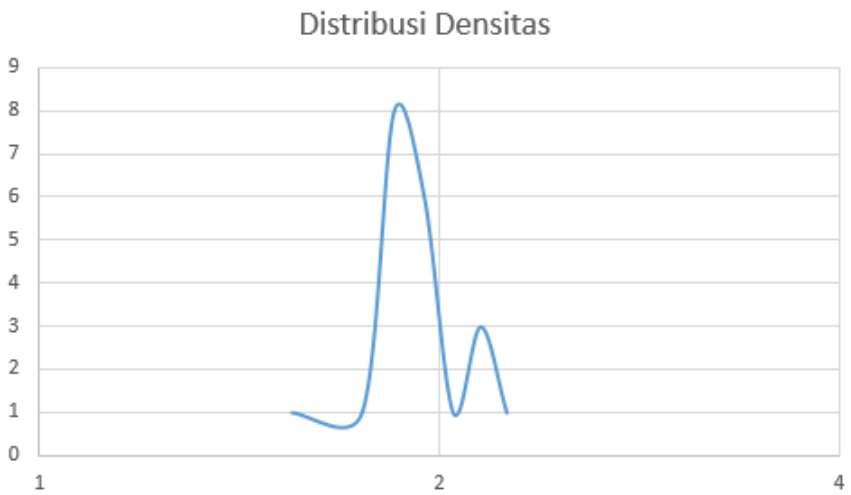
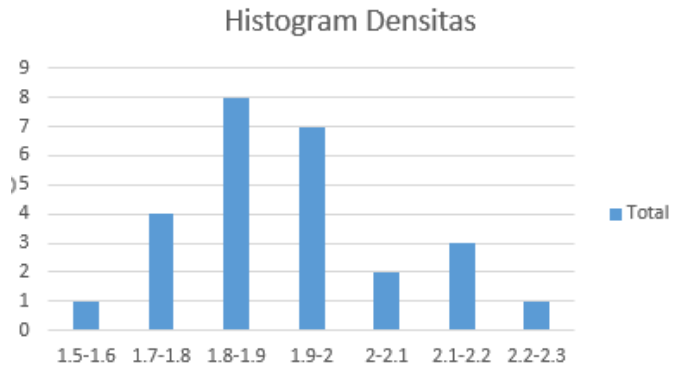
No Sampel	Densitas basah (gram/cc)	Porositas (Frictionless)	Kompresibilitas	Resistivitas (Ohm-meter)
1	1.78158	0.43770513		1032.856983
2	1.77048	0.44065252		1151.129233
3	1.861025	0.39986398	1.32364E-08	1292.553682
4	1.761531	0.33058347		1267.143236
5	1.839317	0.29415404	4.06276E-09	1117.785134
6	2.052503	0.24560642	7.80868E-08	1498.779356
7	1.906152	0.38968334	1.37316E-08	958.3788162
8	1.935375	0.38270188	6.64033E-09	1091.494595
9	1.809606	0.41388308	3.09366E-08	755.0068202
10	1.906325	0.41917192	1.65114E-07	1032.121512
11	1.73266	0.49399018	2.84232E-08	1269.92116
12	1.919185	0.38259426	7.58214E-08	819.0204126
13	1.931695	0.38962013	1.49926E-07	1299.425219
14	1.874557	0.41131308	3.01166E-07	1477.259484
15	1.862822	0.37033201	2.96086E-07	1243.924345
16	1.804976	0.41441084	3.13426E-07	1338.491017
17	1.868249	0.42023863	2.08163E-07	924.4707562
18	1.859211	0.42207106	2.22813E-07	1413.32157
19	2.122759	0.33400375	2.67868E-07	1316.13561
20	2.101408	0.34263078	1.31964E-07	891.8089115
21	2.007706	0.39346332		852.2836279
22	1.589164	0.49014363	1.14986E-06	1005.006298
23	1.929825	0.38732724		529.3628311
24	2.104189	0.21989436	5.27234E-10	1853.037302
25	1.929287	0.25813599	2.66314E-10	1389.684215
26	2.218246	0.13700865	3.2772E-12	1196.704554

4.2 Pembahasan

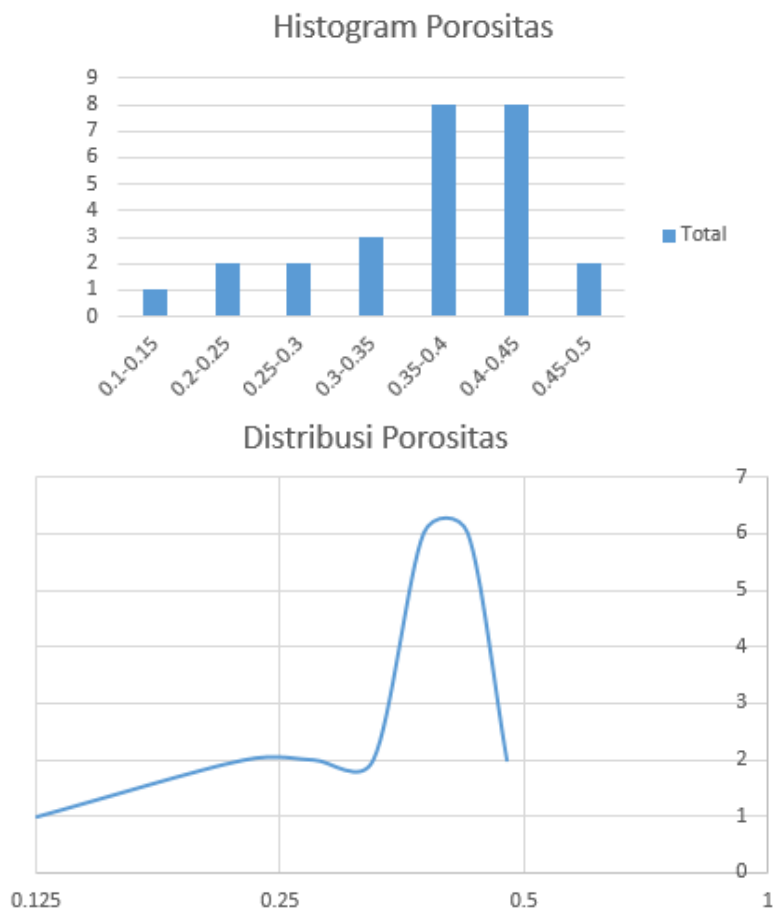
Saat proses pembentukan sampel menjadi silinder terdapat beberapa anomali dimana saat *coring* batuan nomor 24 sampai 26 selalu didapati sangat keras dan sulit untuk dilakukan penetrasi dibandingkan dengan kode batu lainnya. Setelah itu, *core* batuan langsung dilakukan pengukuran berat (berat awal) dan resistansinya menggunakan alur kerja yang telah dijelaskan pada subbab 3.3a. Tetapi setiap batuan yang dilakukan pengukuran resistansinya memberikan respons berupa *overload* atau melebihi muatan pengukuran alat sehingga untuk resistansi setelah dilakukan *coring* tidak dapat didapatkan. Setelah itu, *core* dilakukan pengeringan menggunakan oven selama 1 hari dimana pada satu jam pertama digunakan suhu 80°C dan kemudian ditingkatkan menjadi 100°C pada sisa waktu pemanggangan. Hal ini dilakukan agar mengurangi kemungkinan terjadinya pembentukan *mikrofracture* pada batuan (Verwaal & Mulder, 2000).

Setelah dilakukan pengeringan selama 1 hari, maka *core* batuan dikeluarkan dan diukur berat kering serta resistansinya. Pada saat keadaan *core* batuan kering menunjukkan resistansi yang diberikan juga *overload*. Sehingga untuk asumsi yang pertama adalah semua sampel batuan merupakan batuan yang resistiv atau non-konduktif karena memiliki nilai resistansi yang sangat besar. Kemudian, *core* batuan direndam pada aquades selama 7 hari yang dianggap membuat keadaan semua *core* dalam jenuh akan air ($S_w = 1$). Setelah 7 hari, *core* dilakukan penimbangan kembali untuk mendapatkan berat jenuh dan resistansi *core* saat jenuh. Dari akuisisi data berupa berat kering, berat basah didapati persentase porositas setiap *core*. Kemudian, dari porositas yang telah didapatkan, menggunakan persamaan (7) akan mendapatkan densitas matriks karbonat dari densitas jenuh (*bulk density*) dengan fluida pengisi berupa aquades. Kemudian, dari *core* yang telah jenuh dilakukan tahap selanjutnya yaitu uji Kompresibilitas secara *Uniaxial Stress* dengan prosedur sesuai pada subbab 3.3c. Pada saat uji Kompresibilitas, regangan yang dihasilkan tidak hanya secara axial tetapi juga didapatkan perubahan secara lateral dengan kondisi beban yang menekan mengarah secara axial. Sehingga, dengan adanya perubahan volume dan tekanan yang diberikan, maka Kompresibilitas bahan didapatkan dari perbandingan terbalik *Bulk Modulus* menggunakan persamaan (4) dan (5).

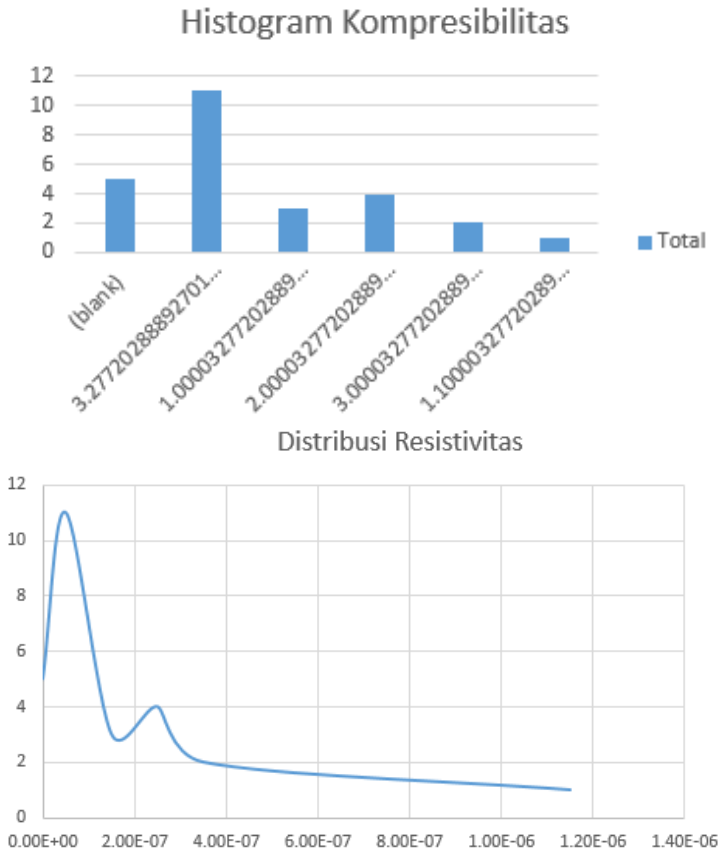
Akuisisi data hubungan resistivitas dengan keadaan saturasi dihitung setiap 10 tetesan fluida (aquades dan air laut). Metodologi yang digunakan sama dengan cara pengukuran resistivitas batuan tetapi menggunakan wadah berupa paralon dengan panjang 12 sentimeter dan diameter 6.7 sentimeter. Selain itu, dilakukan pula pengukuran berat jenis lumpur dari lokasi penelitian menggunakan piknometer.



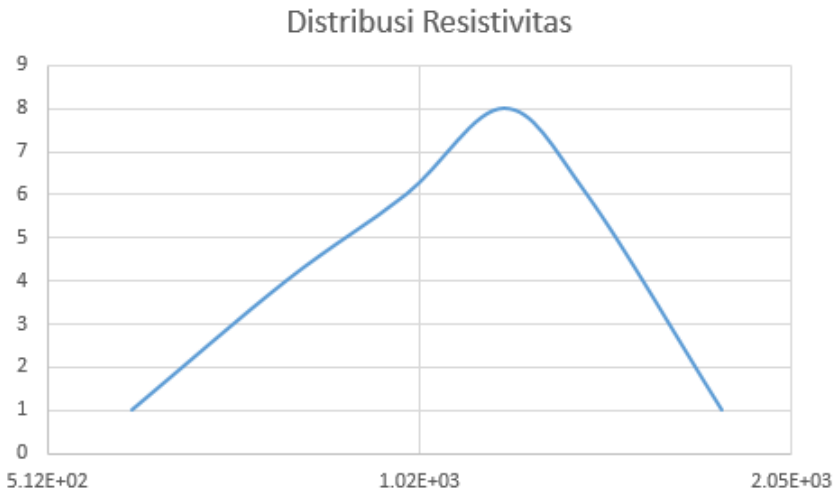
Gambar 4. 1 Histogram dan distribusi densitas



Gambar 4. 2 Histogram dan distribusi porositas



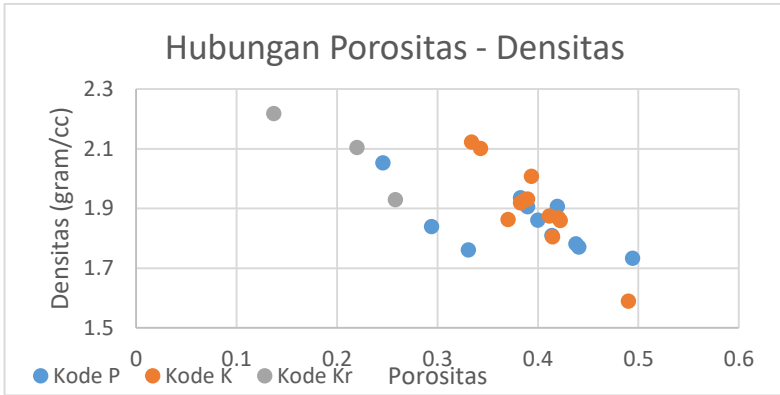
Gambar 4. 3 Histogram dan distribusi kompresibilitas



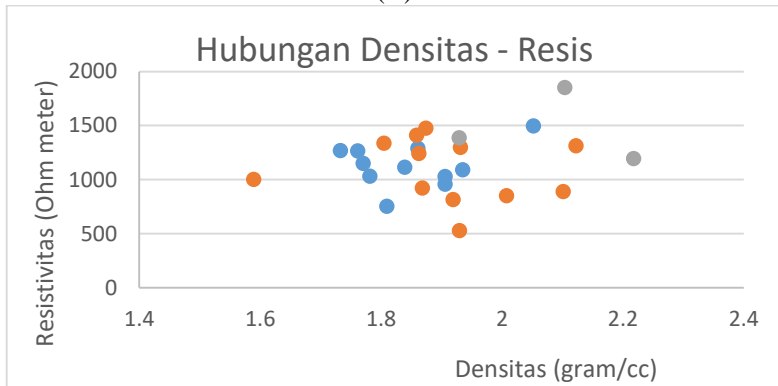
Gambar 4. 4 Histogram dan distribusi Resistivitas

Tabel 4. 3 Profil statistik setiap parameter

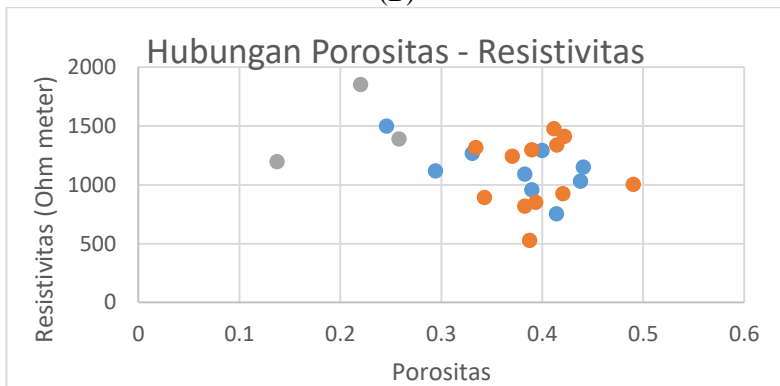
Parameter	Jumlah data	Standar Deviasi	Mean
Densitas	28	0.138	1.903
Porositas	28	0.082	0.370
Kompresibilitas	23	2.52512E-07	1.64672E-07
Resistivitas	28	278.632	1154.504



(A)



(B)



(C)

Gambar 4. 5 Crossplot data (A) Porositas – Densitas, (B) Densitas – Resistivitas dan (C) Porositas – Resistivitas

Tabel 4. 4 Covairance setiap parameter

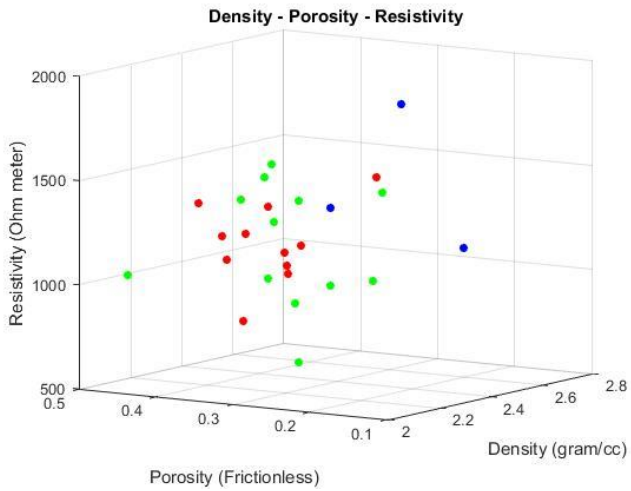
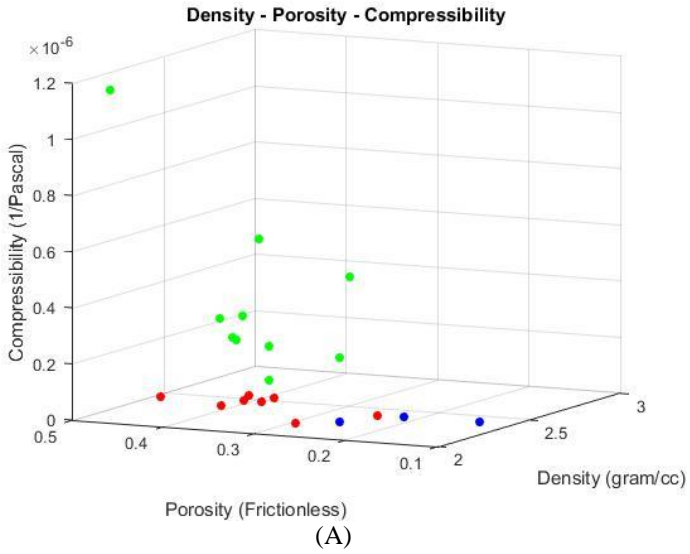
Variance	Density	Porosity	Resistivity	Compresibility
Density	1.896E-02	-8.605E-03	6.736E+00	-1.891E-08
Porosity	-8.605E-03	6.785E-03	-8.647E+00	1.019E-08
Resistivity	6.736E+00	-8.647E+00	7.764E+04	1.019E-04
Compresibility	-1.891E-08	1.019E-08	1.019E-04	6.400E-14

Tabel 4. 5 Korelasi setiap parameter

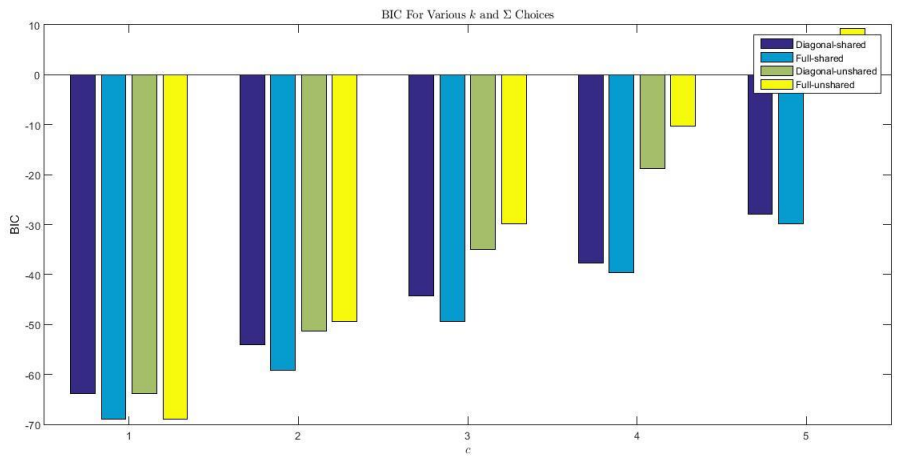
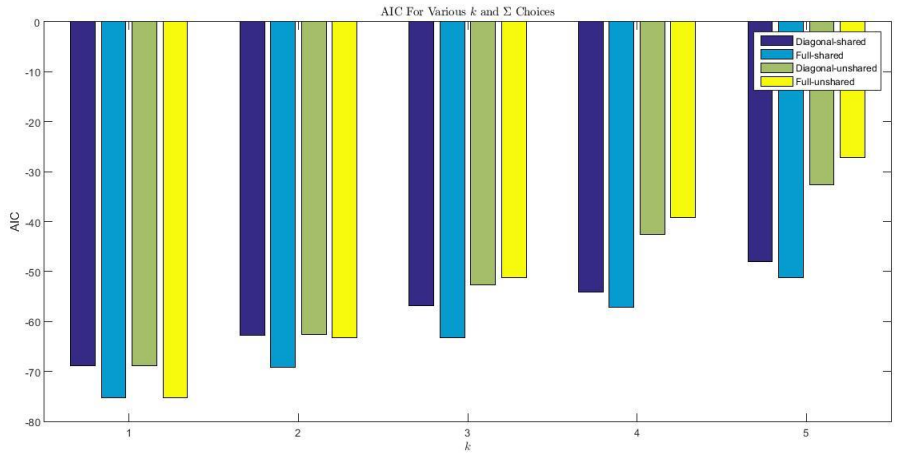
Korelasi	Density	Porosity	Resistivity	Kompresibilitas
Density	1	-0.759	0.176	-0.544
Porosity	-0.759	1	-0.377	0.490
Resistivity	0.176	-0.377	1	-0.095
Kompresibilitas	-0.544	0.490	-0.095	1

Setelah dilakukan perhitungan data statistik (tabel 4.3) serta histogram dengan distribusinya (gambar 4.1 sampai gambar 4.4) maka dapat dilihat distribusi pada histogram. Contohnya adalah pada gambar 4.1, dimana nilai mean densitas adalah 1.903. Pada histogram seharusnya posisi mean terletak pada puncak tertinggi pada histogram parameter tersebut. Tetapi setelah digambar kembali distribusi dari densitas, didapatkan adanya *double peak* atau yang disebut dengan *multimodal* yaitu puncak kedua pada nilai kisaran 2.1 – 2.2 gram per sentimeter kubik. Bentuk distribusi tersebut juga didapatkan pada distribusi porositas dan kompresibilitas (gambar 4.2 dan 4.3). Sedangkan pada resistivitas (gambar 4.4) didapati bahwa bentuk distribusinya cenderung hanya satu puncak.

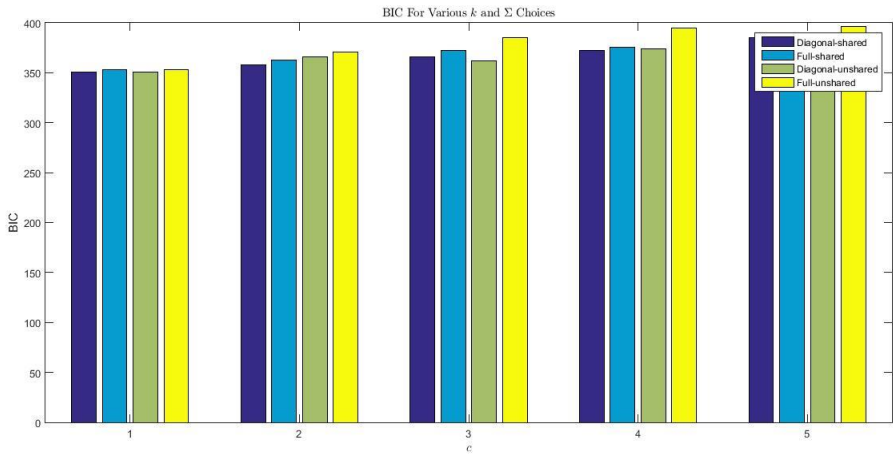
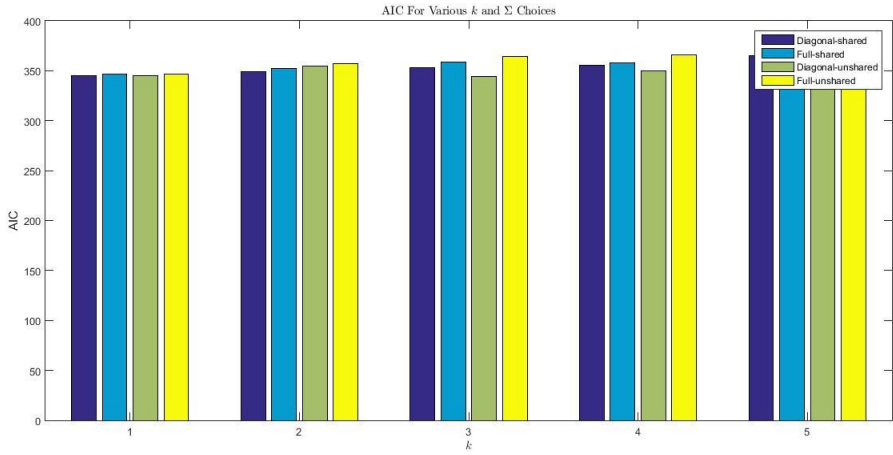
Selain syarat pengklasifikasian GMM adalah bentuk yang multimodal, syarat selanjutnya adalah memiliki korelasi yang baik (mendekati 1 atau -1). Nilai nilai korelasi (tabel 4.6) yang didapatkan dari perhitungan *covariance* (tabel 4.5). Pada penelitian kali ini, pengklasifikasian berdasarkan korelasi yang baik adalah diatas 0.6 dan korelasi yang menengah adalah pada nilai 0.4 sampai 0.59 (Soto, 2009). Sehingga klasifikasi yang dilakukan adalah terhadap setiap parameter namun parameter resistivitas memiliki korelasi yang rendah terhadap setiap parameter yang lainnya.



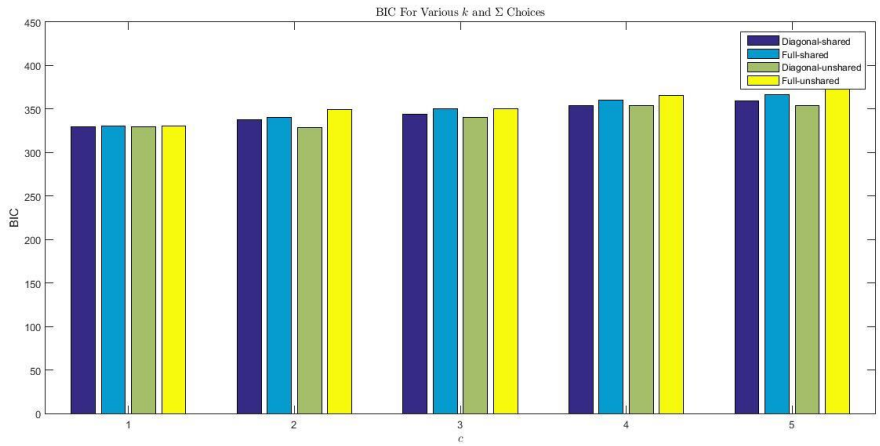
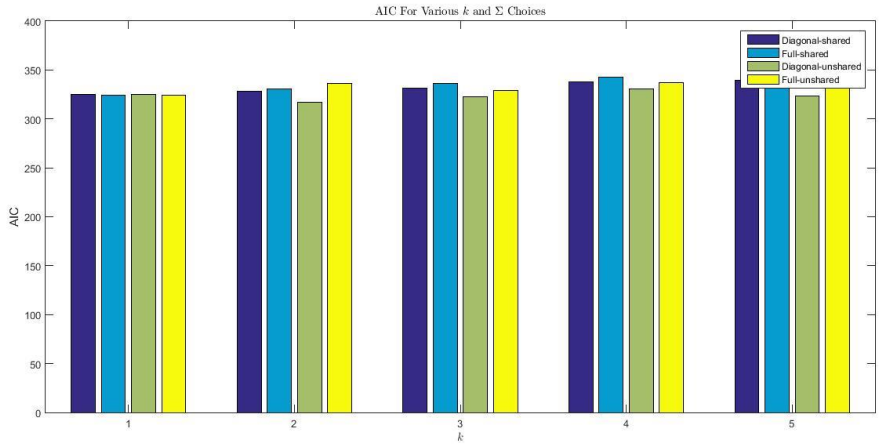
Gambar 4. 6 Plot 3 Dimensi (A) Porositas-Densitas-Kompresibilitas
(B) Porositas-Densitas-Resistivitas



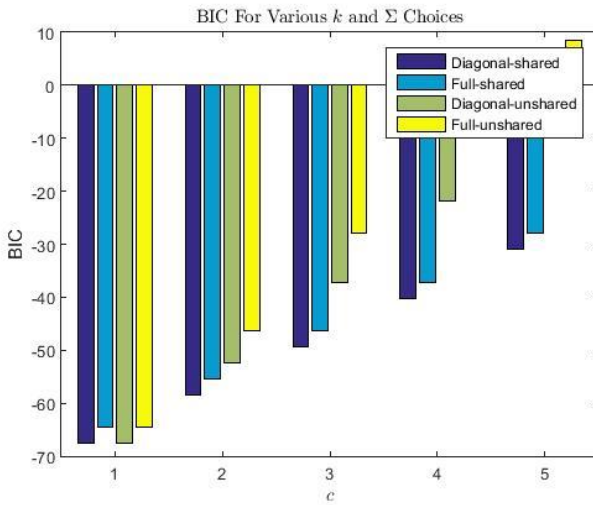
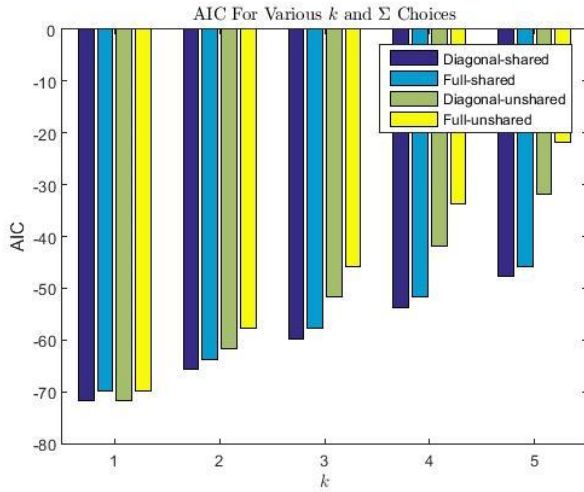
Gambar 4. 7 Plot AIC - BIC pada *Clustering* Porositas dan Densitas



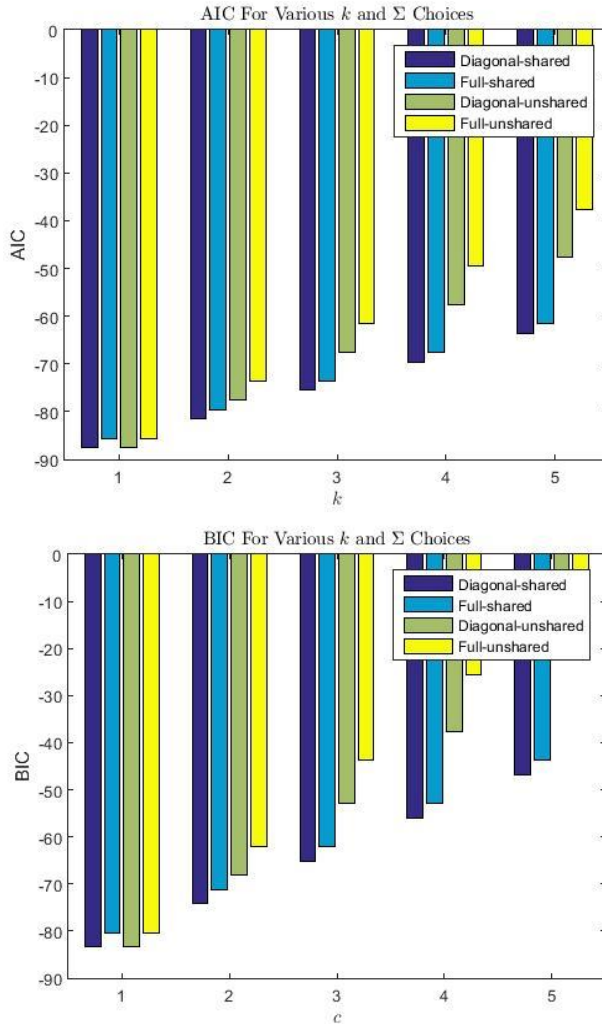
Gambar 4. 8 Plot AIC - BIC pada *Clustering* Densitas dan Resistivitas



Gambar 4. 9 Plot AIC - BIC pada *Clustering* Porositas dan Resistivitas



Gambar 4. 10 Plot AIC - BIC pada *Clustering* Densitas dan Kompresibilitas



Gambar 4. 11 Plot AIC - BIC pada *Clustering* Porositas dan Kompresibilitas

Penentuan jumlah segmen pada metode GMM dapat mengacu pada nilai minimum dari AIC (Akaik Information Criterion) dan BIC (Bayesian Information Criterion). AIC dan BIC memiliki fungsi sebagai penentu jumlah model optimal berdasarkan nilai *likelihood* (jarak dari segmen ke setiap sampelnya) dan jumlah segmennya. Untuk mendapatkan model optimal dilakukan pengelompokan/ *clustering* dengan jumlah yang bertambah (1, 2, 3,...) dan diambil jumlah segmen dengan nilai minimum pada AIC dan BIC (Dziak et

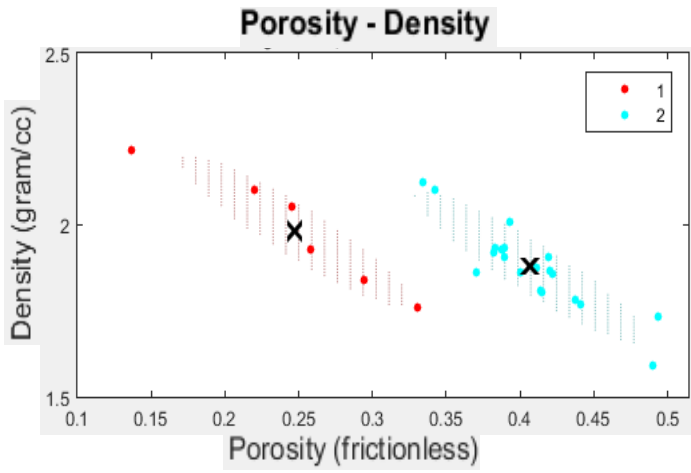
al, 2012). Pada penelitian kali ini dilakukan percobaan jumlah segmen dari 1 sampai dengan 6. Dari segmen - segmen yang telah dilakukan percobaan didapatkan bahwa nilai AIC dan BIC minimum ketika segmen berjumlah 1. Tetapi, hal ini memberikan permasalahan karena pada gambar 4.5 (A) menunjukkan adanya dua *trend* yang terpisah. Sehingga, dari segmen memungkinkan adalah 2 sampai dengan 6. Sehingga jumlah segmen optimum berdasarkan nilai AIC dan BIC minimum adalah 2.

Tabel 4. 6 Perbandingan nilai segmen pada setiap cluster per setiap 2 parameter

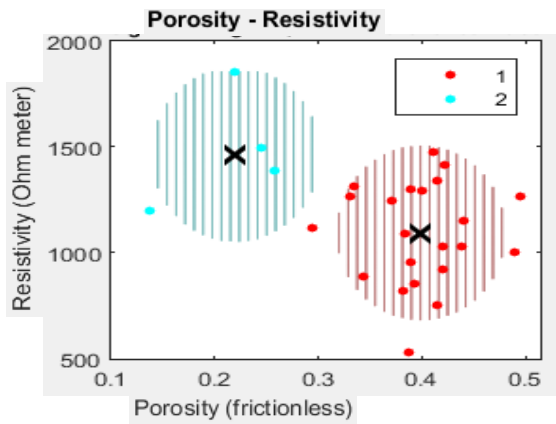
Jumlah Cluster	Cluster -	Densitas (gram/cc)	Porositas	Resistivitas (Ohm-meter)	Jenis Covariance
Cluster 2	1	1.984	0.248		Full-Shared
	2	1.879	0.407		
	1	1.855		1296.281	Diagonal-Shared
	2	1.977		935.099	
	1		0.400	1094.290	Diagonal-Unshared
	2		0.220	1465.369	

Jenis *covariance* pada tabel 4.6 menyatakan bagaimana arah pengklasifikasian tiap segmen. Full menyatakan perhitungannya meliputi *covariance* dan *variance* tiap parameter. Sedangkan, Diagonal menyatakan perhitungan hanya melibatkan *variance* pada masing masing parameter. Ketika nilai *covariance* positif akan cenderung mengarah berbanding lurus, sedangkan ketika nilainya negatif akan cenderung mengarah berbanding terbalik. Dari klasifikasi yang dilakukan, dapat dilihat bahwa pembagian kluster yang baik adalah ketika nilai korelasi yang tinggi. Tetapi, ketika dilakukan klastering menggunakan parameter resistivitas cenderung memiliki keambiguan yang tinggi. Sehingga, untuk mendapatkan klasifikasi batuan terhadap kompresibilitasnya, parameter yang digunakan adalah porositas dan densitas untuk mendapati klasifikasi yang lebih baik. Schoon (2011) menjelaskan bahwa nilai resistivitas sangat dipengaruhi oleh fluida serta mineral pembentuk batuan, sehingga untuk klasifikasi batuan dengan jenis yang cukup sulit untuk dibedakan. Selain itu, distribusi resistivitas hanya memberikan bentuk unimodal yang mengartikan hanya ada 1 jenis batuan.

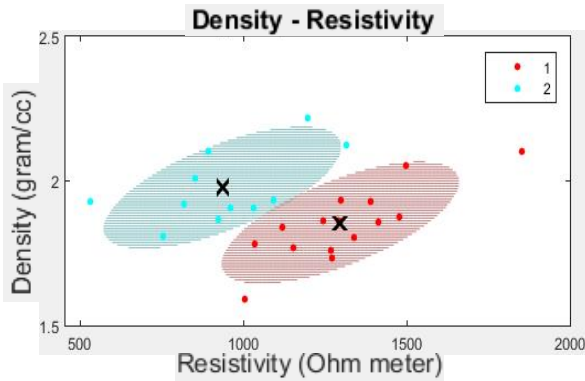
Metode klasifikasi GMM untuk mendapatkan klasifikasi 3 parameter menggunakan kode Matlab dari Traa (2013). Untuk penentuan parameter pada sumbu x dan y adalah parameter yang terkorelasi dengan baik. Pada sumbu z merupakan parameter yang digunakan sebagai pengklasifikasian lanjutannya. Sehingga, pada penelitian ini sumbu x dan y adalah parameter densitas dan porositas, sedangkan sumbu z adalah parameter kompresibilitas.



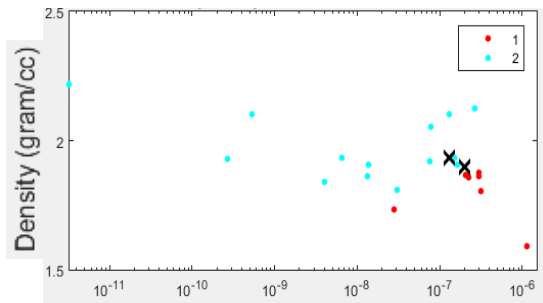
Gambar 4. 12 Hasil klasifikasi GMM pada Porositas-Densitas



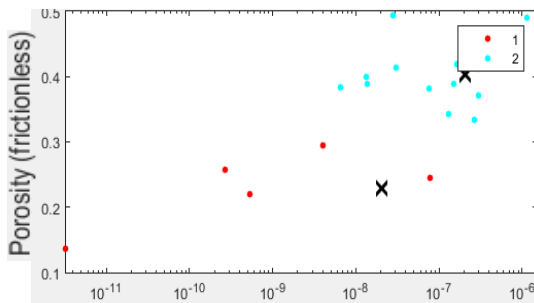
Gambar 4. 13 Hasil klasifikasi GMM pada Porositas – Resistivitas



Gambar 4. 14 Hasil klasifikasi GMM pada Densitas-Resistivitas



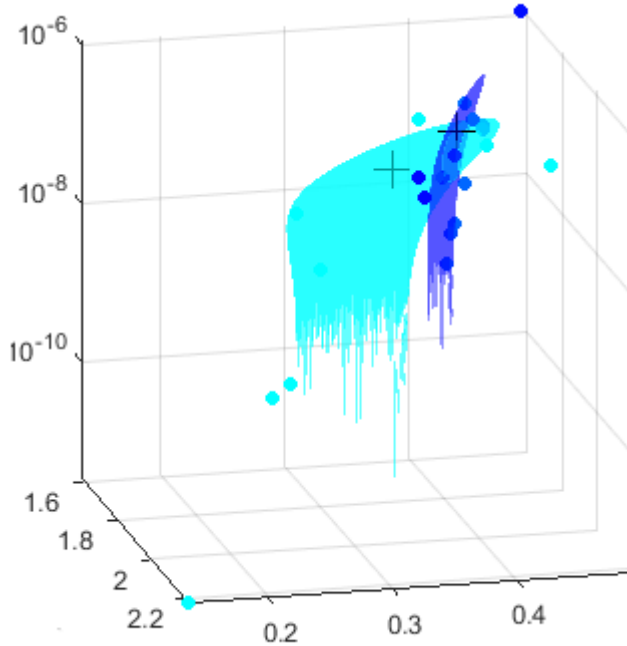
Gambar 4. 15 Hasil klasifikasi GMM pada Densitas-Kompresibilitas



Gambar 4. 16 Hasil klasifikasi GMM Porositas-Kompresibilitas

Tabel 4. 7 Hasil klasifikasi batuan Karbonat menggunakan metode GMM

Klasifikasi-	Densitas (gram/cc)	Porositas	Kompresibilitas (1/Pascal)
1	1.921	0.346	1.0526×10^{-7}
2	1.906	0.394	2.4846×10^{-7}



Gambar 4. 17 Klasifikasi Gassian Mixture Model 3 Parameter. X-axis Porosity, Y-axis Density, z-Axis Kompresibilitas

Dari hasil klasifikasi dengan 3 parameter (gambar 4.17) menunjukkan bahwa batuan dengan nilai kompresibilitas relatif jatuh pada 10^{-7} sampai 10^{-8} . Mengacu pada kondisi pelapukan karbonat (Dubios, et al. 2015), kondisi batuan memiliki keadaan pelapukan yang berbeda. Berdasarkan populasi batuan yang lebih keras (kompresibilitas dibawah 10^{-10}) sangat sedikit (tabel 4.2), hal ini akan berpengaruh pada perhitungan klasifikasi atau posisi segmen yang cenderung mengikuti populasi terbanyak. Sehingga pada pengklasifikasian GMM **dipengaruhi oleh proses akuisisi dan jumlah sampel** yang digunakan.

Semakin banyak sampel yang digunakan dengan kualitas akusisi data yang baik, akan memberikan pengklasifikasian batuan yang baik dengan korelasi yang tinggi. Sehingga dengan metode *Gaussian Mean Mixture* dapat mengklasifikasikan batuan untuk kebutuhan geoteknik diklasifikasikan menjadi **2 jenis batuan**. Kemudian, dari tabel 4.7 dilakukan konversi menjadi parameter geoteknik yang akan digunakan sebagai *input* pada analisis penurunan tanah (*Settlement*),

Tabel 4. 8 Klasifikasi parameter geoteknik batuan

Klasifikasi-	Specific Weight (kN/m ³)	Edef (Mpa)	Poisson Ratio	Beta	Eoed (Mpa)
1	18.838	6.932	0.243	0.844	8.210
2	18.687	3.396	0.344	0.638	5.322

Parameter dari tabel 4.9 adalah input yang digunakan dalam pemodelan penurunan tanah. *Specific Weight* merupakan besaran geoteknik yang didapatkan dari densitas batuan. Sedangkan *Deformation Modulus* (Edef) merupakan gradien kekuatan batuan. Nilai Odef memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan nilai kompresibilitas. Dengan menggunakan nilai poisson ratio yang didapatkan dari uji tekan, maka nilai *Oedometric Modulus* (Eoed) yang merupakan perbandingan tekanan yang diberikan terhadap perubahan volumenya dapat ditentukan (Vanicek, 2000). Pada pemodelan penurunan tanah menggunakan model dengan spesifikasi seperti berikut (untuk koefisien konsolidasi didapatkan dari penelitian tanah di Gresik oleh Rahmasari (2013)),

Tabel 4. 9 Rincian perilaku serta data pendukung model

Jenis timbunan	Perilaku	Keterangan	Jenis/Nilai
<i>Limestone</i> Klasifikasi 1	tanpa batas	Tanah	Clay
	batas	Berat jenis tanah	20.5 kN
	Pembebanan	Koefisien Konsolidasi	
<i>Limestone</i> Klasifikasi 2	tanpa batas	Tanah	6.700E-03 m/day
	batas	Timbunan	4.320E-03 m/day
	Pembebanan	Ketebalan Timbunan	5 meter
	tanpa batas	Batas Incompressible	11 meter dari permukaan

Limestone Mixing urutan 1 2	batas	Muka air tanah	2 meter dari permukaan
	Pembebanan	Muatan	1000 kN
Limestone Mixing urutan 2 1	tanpa batas		
	batas		
	Pembebanan		

Clay with high or very high plasticity (CH, CV, CE), firm consistency

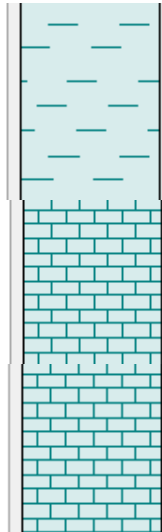
Unit weight :	γ =	20.50 kN/m ³
Oedometric modulus :	E_{oed} =	7.50 MPa
Saturated unit weight :	γ_{sat} =	20.50 kN/m ³
Soil :		consolidating, input cv
Coefficient of consolidation :	c_v =	6.700E-03 m ² /day

Limestone Klasifikasi 1

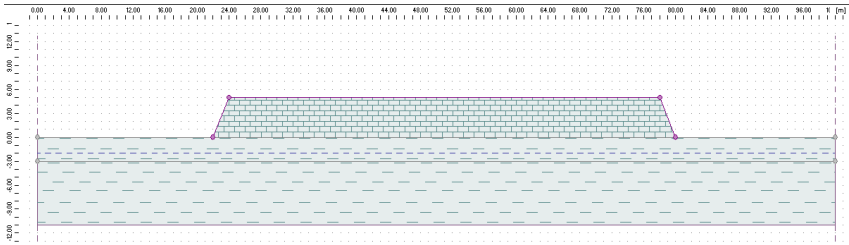
Unit weight :	γ =	18.84 kN/m ³
Oedometric modulus :	E_{oed} =	8.21 MPa
Saturated unit weight :	γ_{sat} =	18.84 kN/m ³
Soil :		consolidating, input cv
Coefficient of consolidation :	c_v =	4.320E-03 m ² /day

Limestone Klasifikasi 2

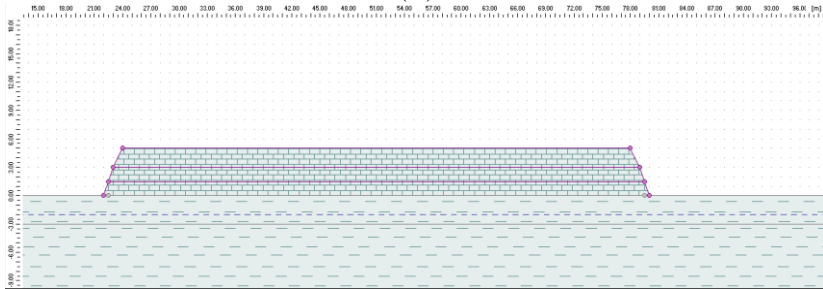
Unit weight :	γ =	18.69 kN/m ³
Oedometric modulus :	E_{oed} =	5.32 MPa
Saturated unit weight :	γ_{sat} =	18.69 kN/m ³
Soil :		consolidating, input cv
Coefficient of consolidation :	c_v =	4.320E-03 m ² /day



Gambar 4. 18 Parameter fisis tanah dan batuan

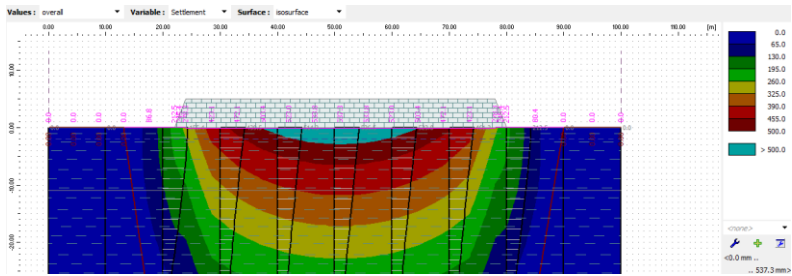


(A)

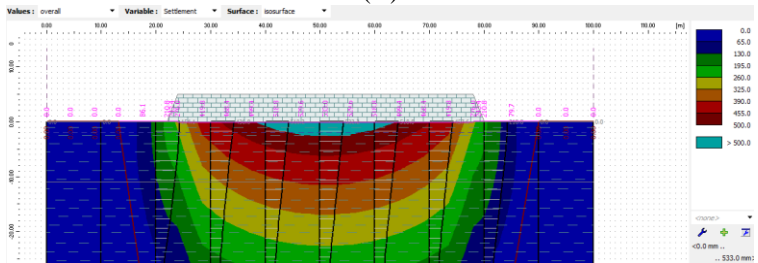


(B)

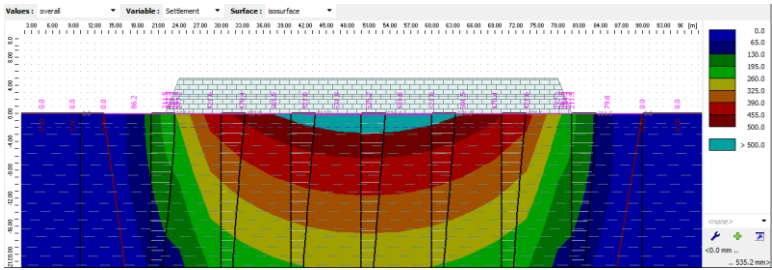
Gambar 4. 19 Model timbunan (A) 1 jenis tanah timbunan (B) 2 jenis tanah



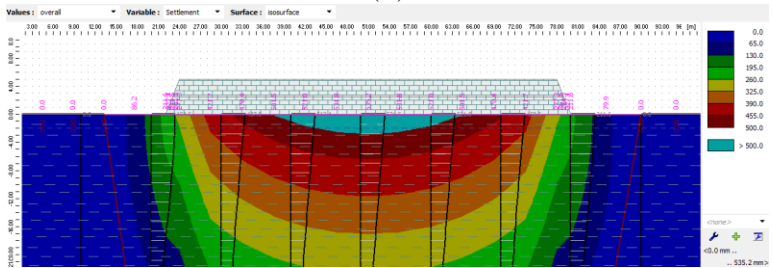
(A)



(B)

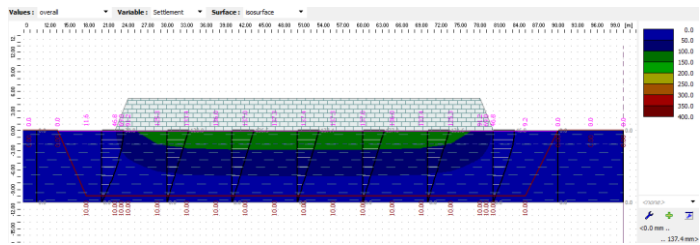


(C)

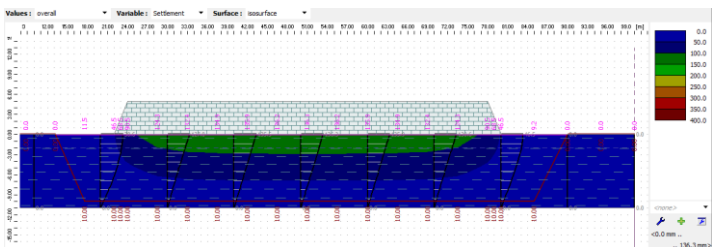


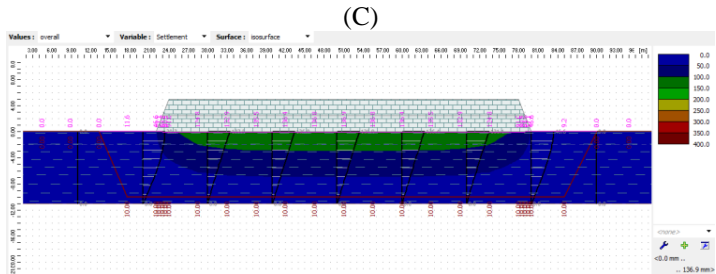
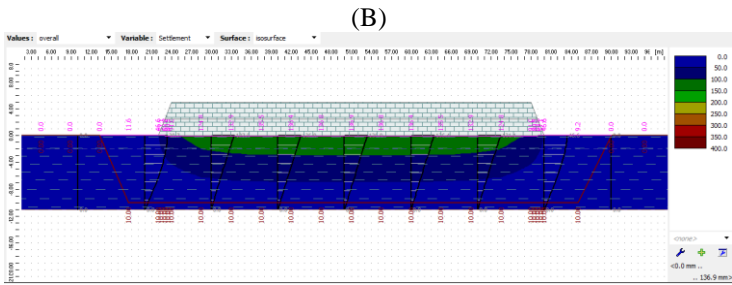
(D)

Gambar 4. 20 Hasil analisis *Settlement* studi kasus tanah homogen (tanpa batas)
 (A) *Limestone* Klasifikasi -1 (B) *Limestone* Klasifikasi - 2
 (D) *Mixing* dengan urutan Klasifikasi 1 - 2 (E) *Mixing* dengan urutan
 Klasifikasi 2 - 1



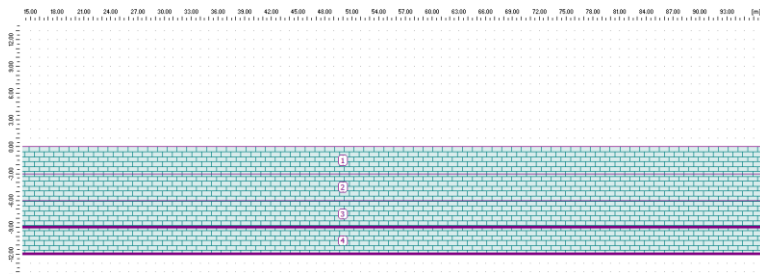
(A)



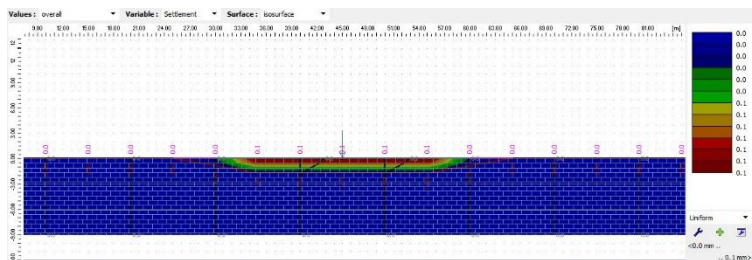


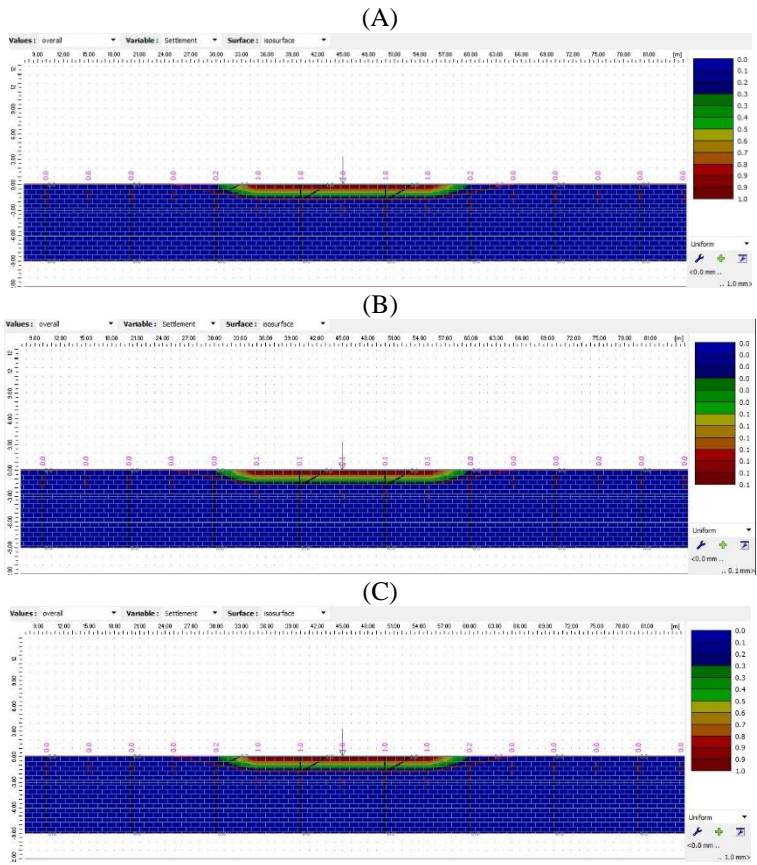
(D)

Gambar 4. 21 Hasil analisis *Settlement* studi kasus memiliki lapisan *incompressible* (ada batas) (A) *Limestone* Klasifikasi -1 (B) *Limestone* Klasifikasi -2 (C) *Mixing* dengan urutan Klasifikasi 1 - 2 (D) *Mixing* dengan urutan Klasifikasi 2 - 1



Gambar 4. 22 Model timbunan tanpa tanah lunak



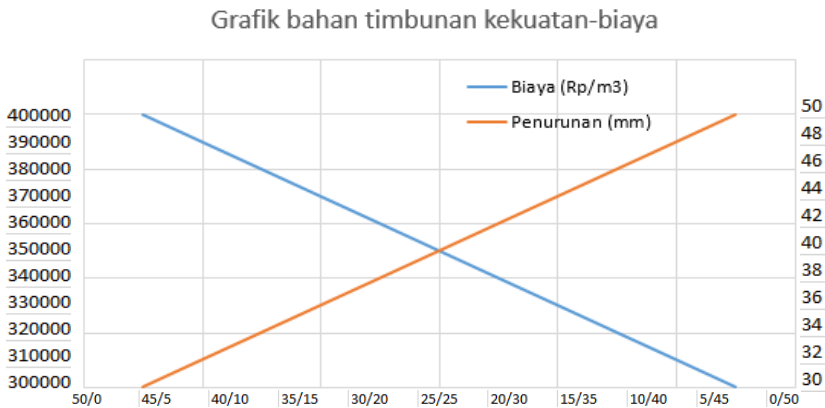


(D)
 Gambar 4. 23 Analisis *Settlement* pada timbunan dengan model (A) *Limestone* Klasifikasi -1 (B) *Limestone* Klasifikasi -2 (D) *Mixing* dengan urutan Klasifikasi 1-2 (E) *Mixing* dengan urutan Klasifikasi 2-1

Dari analisis yang dilakukan, ketika pemodelan penurunan tanah tidak menggunakan batas/*bedrock* menghasilkan penurunan tanah sampai dengan 500 mm. Tetapi, pada pemodelan *Settlement* menggunakan batas (11 meter dari permukaan), memberikan penurunan tanah sampai dengan 100 mm. Hal ini dikarenakan pada *bedrock*/batas lapisan lunak tidak mengalami penurunan tanah dan menopang perubahan volume lapisan lunak di atasnya (Hadiyatmo, 2002). Oleh karena itu, ketebalan sedimen lunak yang mengalami penurunan tanah dan batas *bedrock* sangatlah penting pada analisis *Settlement*.

Dari analisis timbunan yang dilakukan, maksimal penurunan dan proses konsolidasi dapat dilihat pada tabel 4.10 dan 4.11. Dari semua analisis yang

dilakukan, model paling baik adalah model *Mixing Limestone* klasifikasi 1 dan 2. Sedangkan untuk analiis kekuatan timbunan menghasilkan perubahan yang tidak signifikan yaitu kisaran 0.6 – 1 mm. Berdasarkan Ishihara dan Yoshimine (1992), perubahan timbunan yang signifikan dimulai dari 1 cm yang dihitung sebagai kerusakan sangat ringan. Untuk penentuan model terbaik tidak dapat didasari penurunan atau kekuatan bahan karena perbedaan yang kecil satu dengan lainnya. Tetapi penentuan model terbaik dapat dilakukan asumsi perbedaan harga setiap bahan timbunan berbeda. Contoh harga *Limestone* klasifikasi 1 (Rp. 80,000 per m³) lebih mahal dibandingkan *Limestone* klasifikasi 2 (Rp. 60,000 per m³). Hardiyatmo (2002) menyatakan bahwa penentuan pemodelan terbaik juga bergantung terhadap biayanya. Contoh studi kasus ketika ingin dilakukan penimbunan sebanyak 50 meter kubik, untuk mendapatkan harga terbaik dengan penurunan paling minimal adalah ketika dilakukan pencampuran dengan urutan timbunan dari paling atas yaitu *Limestone* klasifikasi 1 dan kemudian diikuti *Limestone* klasifikasi 2 (gambar 4.24).



Gambar 4. 24 Perbandingan bahan timbunan berdasarkan biaya dengan penurunan.

x-axis menyatakan ***Limestone* klasifikasi 1:*Limestone* klasifikasi 2**

Tabel 4. 10 *Settlement* dan konsolidasi dari model homogen (dalam mm)

Waktu	Terhadap Tanah (Homogen)				Consolidation
	Model 1	Model 2	Model 1-2	Model 2-1	
1 Minggu	501.8	495.1	500.1	500.1	25%
1 Bulan	509.1	502.3	508.9	508.9	60%

1 Tahun	531.1	524	530.1	530.1	80%
2 Tahun	532.9	525.8	531.1	531.1	90%
3 Tahun	533.1	525.9	532.2	532.2	95%
Overall	533.1	525.9	535.2	532.2	100%

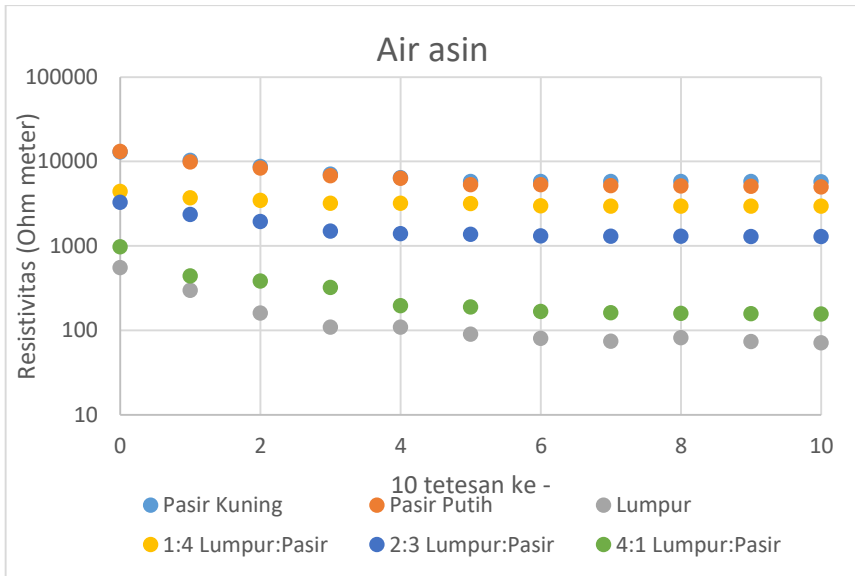
Tabel 4. 11 *Settlement* dan konsolidasi dari model dengan batas (dalam mm)

Waktu	Terhadap Tanah (Ada batas)				Consolidation
	Model 1	Model 2	Model 1-2	Model 2-1	
1 Minggu	97.2	91.6	94.2	93.8	25%
1 Bulan	104.9	98.8	101.7	101.2	60%
1 Tahun	127.9	120.5	123.9	123.3	80%
2 Tahun	129.9	122.3	125.8	125.2	90%
3 Tahun	130	122.4	126	125.4	95%
Overall	141.5	137.5	138.4	137.8	100%

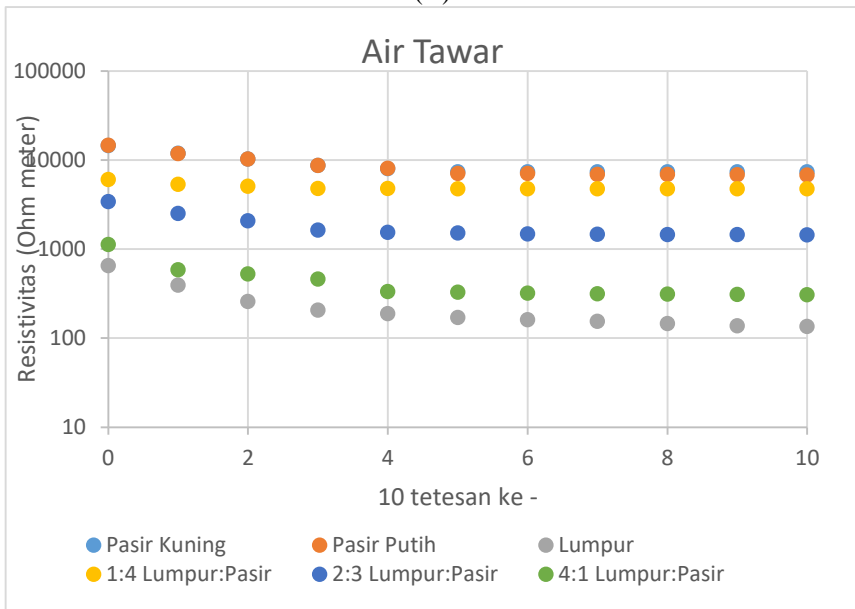
Tabel 4. 12 *Settlement* setiap bahan timbunan (dalam mm)

Waktu	Perbandingan Kekuatan			
	Model 1	Model 2	Model (urutan 1 – 2)	Model (urutan 2 – 1)
Overall	0.6 mm	1 mm	0.6 mm	1 mm

Selain itu, pada penelitian ini telah dilakukan pengukuran resistivitas ketika bahan timbunan bertemu dengan lapisan lumpur. Pengukuran resistivitas yang dilakukan bertujuan untuk memberikan perkiraan resistivitas (skala lab) yang akan dikorelasikan terhadap nilai resistivitas pada pengukuran di lapangan. Variasi resistivitas yang dilakukan adalah volume campuran dari bahan timbunan dengan lumpur, perubahan *water content* berdasarkan banyaknya tetesan yang diberikan dan jenis fluida yang digunakan. Pengukuran resistivitas dimulai dari kondisi kering atau *water content* sama dengan 0. Gambar 4.13 menunjukkan bahwa semakin banyaknya tetesan air yang diberikan, resistivitas pada campuran akan semakin kecil. Untuk nilai resistivitas menggunakan air asin memiliki perubahan resistivitas lebih besar dibandingkan air tawar dimana pada tetesan ke 100 didapatkan lumpur memiliki resistivitas di bawah 100 Ohm meter. Metode ini dapat diaplikasikan sebagai pembantu dalam interpretasi data geolistrik saat melakukan moniroting timbunan.



(A)



(B)

Gambar 4. 25 Grafik resistivitas campuran terhadap jumlah tetesan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian analisis sifat batuan Karbonat dengan untuk mendapatkan nilai parameter fisisnya serta pengaruhnya terhadap penurunan tanah, maka dapat diambil beberapa kesimpulan berupa,

1. Pengklasifikasian batuan karbonat menggunakan *Gaussian Mean Mixture* menghasilkan 2 kelas dengan kompresibilitas 1.0526×10^{-7} per pascal dan 2.484×10^{-7} per pascal
2. Pemodelan Penurunan akhir (*Overall Settlement*) yang optimal adalah model *Mixing* dengan urutan *Limestone* klasifikasi 1-klasifikasi 2, yang mengalami penurunan total sebesar 138.4 mm pada saat konsolidasi 100%.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang diperlukan untuk meningkatkan kualitas distribusi data dan pengukuran sampel yaitu berupa,

1. Jumlah sampel pengukuran perlu diperbanyak agar mendapatkan distribusi data yang lebih jelas dan lebih baik
2. Pengukuran pada resistivitas tanah dilakukan pada sampel in-situ agar memberikan keadaan riil dengan kondisi kepadatan yang sesuai di lapangan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyadi, Ahmad Qomarudin, Dwa Desa Wardana dan Ria Asih Aryani Soemitro. 2017. Analisis Respon Resistivitas Sampel Tanah TPA Ngipik Kabupaten Gresik Berdasarkan Uji Resistivitas Skala Laboratorium. *Jurnal Teknik ITS* Vol. 6, No. 2
- Avion Tech. 2018. *Clay*. <https://buildingmaterials.com.my/materials/clay> diakses pada tanggal 16 September 2018.
- Bloss, B. B. R., Bedrosian, P. A., Jewell, S., & Survey, U. S. G. 2013. Laboratory Electrical Resistivity Analysis of Geologic Samples from Fort Irwin , California. *Geology and Geophysics Applied to Groundwater Hydrology at Fort Irwin, California*.
- Craig, R. F., 1991. Mekanika Tanah: Edisi Keempat. *Erlangga*.
- Chiligrain, G. V., dkk. 1992. *Development in Petroleum Science: Chapter 9, Compressibility*. New York: Elsevier B. V.
- Dubois, C., Deceuster, J., Kaufmann, O., & Rowberry, M. D. 2015. A New Method to Quantify Carbonate Rock Weathering. *Mathematical Geosciences*, 47(8), 889–935. <https://doi.org/10.1007/s11004-014-9581-7>
- Douglas Reynolds. 2015. *Gaussian Mean Mixtures*. *Encyclopedia of Biometrics*, (2), 827–832. https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_196
- Dziak, J. J., Coffman, D. L., Lanza, S. T., & Li, R. (2012). Sensitivity and specificity of information criteria. <https://doi.org/10.7287/PEERJ.PREPRINTS.1103V2>
- Feld, J. 2017. The Factor of Safety in Soil and Rock Mechanics. New York: Consulting Engineer.
- Gallagher Corp. 2015. Bulk Modulus Measurement. <https://GallagherCorp.com> diakses pada tanggal 16 Agustus 2018
- Geology. 2018. Shale. <https://geology.com/rocks/shale.shtml> diakses pada tanggal 16 September 2018.
- Hardiyatmo, Hary Christandy. 2002. Mekanika Tanah I dan II: Edisi ke-3. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- McGonagle, John, Geoff Pilling dan Vincent Tembo. 2015. *Gaussian Mean Mixture*. <https://brilliant.org/wiki/gaussian-mixture-model/> diakses pada tanggal 10 Januari 2019.
- Rahmasari, D. A. 2013. Perencanaan Perbaikan Tanah pada Proyek Reklamasi Pantai PT. Wilmar Nabari Gresik - Jawa Timur Dengan Metode Preloading dan Pemasangan Micropile, 1–14. Retrieved from <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-20411-Paper-1644836.pdf>
- Schoen, J. H. 2011. Physical Properties of Rocks. *Elsevier B. V.*
- Science Education Resource Center, 2017. Cross Sectional Diagram of Water Table Aquifer. <https://serc.carleton.edu/download/images/>

150608/cross_sectional_diagram_water.png diakses pada tanggal 14 September 2018.

- Soto, M. (2009). System GMM Estimation With a Small Sample. *Barcelona Economics Working Paper Series*, (1). <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0123>
- Supandjono, J. B., dkk. 1992. Peta Geologi Lembar Surabaya & Sapulu, Jawa. *Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*.
- Traa, Johanness. 2013. 3D Visualization of GMM learning via the EM Algorithm. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34527-3d-visualization-of-gmm-learning-via-the-em-algorithm> diakses pada tanggal 1 Desember 2018.
- Vanicek, I. 2000. Geomechanika 10: mekanika zemin. 3th edition, Prague, CTU 229 s., ISBN 80-01-01437-1.

LAMPIRAN

Lampiran 1: *Gaussian Mean Mixture*

```
function [X,GMMfit] = Maul(filename,dataA,dataB)
data1 = xlsread(filename);
X = [data1(:,dataA) data1(:,dataB)];
[n,p] = size(X);
rng(3); % For reproducibility

figure;
plot(X(:,1),X(:,2),'','MarkerSize',15);
title('Porosity - Density');
xlabel('Porosity (frictionless)');
ylabel('Density (gram/cc)');

%% Cluster
k = 2;

Sigma = {'diagonal','full'};
nSigma = numel(Sigma);
SharedCovariance = {true,false};
SCtext = {'true','false'};
nSC = numel(SharedCovariance);
d = 500;
x1 = linspace(min(X(:,1)) - 2,max(X(:,1)) + 2,d);
x2 = linspace(min(X(:,2)) - 2,max(X(:,2)) + 2,d);
[x1grid,x2grid] = meshgrid(x1,x2);
X0 = [x1grid(:) x2grid(:)];
threshold = sqrt(chi2inv(0.99,2));
options = statset('MaxIter',1000); % Increase number of EM iterations

figure;
title('Resistivity - Density')
c = 1;
for i = 1:nSigma;
    for j = 1:nSC;
        gmfit = fitgmdist(X,k,'CovarianceType',Sigma{i},...
            'SharedCovariance',SharedCovariance{j},'Options',options);
        clusterX = cluster(gmfit,X);
        mahalDist = mahal(gmfit,X0);
        subplot(2,2,c);
        h1 = gscatter(X(:,1),X(:,2),clusterX);
```

```

hold on;
for m = 1:k;
    idx = mahalDist(:,m)<=threshold;
    Color = h1(m).Color*0.75 + -0.5*(h1(m).Color - 1);
    h2 = plot(X0(idx,1),X0(idx,2),'.','Color',Color,'MarkerSize',1);
    uistack(h2,'bottom');
end
plot(gmfit.mu(:,1),gmfit.mu(:,2),'kx','LineWidth',2,'MarkerSize',10)
title(sprintf('Sigma is %s, SharedCovariance = %s',...
    Sigma{i},SCtext{j}),'FontSize',8)
legend(h1,{'1','2','3'});
hold off
GMMfit{c} = gmfit;
    c = c + 1;
end
end

```

Lampiran 2. Plot AIC dan BIC

```

A = xlsread('input matlab.xlsx');
X = A(:,[2 4]);
[n,p] = size(X);
rng(1); % For reproducibility

% figure;
% plot(X(:,1),X(:,2),'.','MarkerSize',15);
% title('Fisher"s Iris Data Set');
% xlabel('Petal length (cm)');
% ylabel('Petal width (cm)');
k = 1:5;
nK = numel(k);
Sigma = {'diagonal','full'};
nSigma = numel(Sigma);
SharedCovariance = {true,false};
SCtext = {'true','false'};
nSC = numel(SharedCovariance);
RegularizationValue = 0.01;
options = statset('MaxIter',10000);
% Preallocation
gm = cell(nK,nSigma,nSC);
aic = zeros(nK,nSigma,nSC);
bic = zeros(nK,nSigma,nSC);
converged = false(nK,nSigma,nSC);

```



```

% Fit all models
for m = 1:nSC;
    for j = 1:nSigma;
        for i = 1:nK;
            gm{i,j,m} = fitgmdist(X,k(i),...
                'CovarianceType',Sigma{j},...
                'SharedCovariance',SharedCovariance{m},...
                'RegularizationValue',RegularizationValue,...
                'Options',options);
            aic(i,j,m) = gm{i,j,m}.AIC;
            bic(i,j,m) = gm{i,j,m}.BIC;
            converged(i,j,m) = gm{i,j,m}.Converged;
        end
    end
end

allConverge = (sum(converged(:)) == nK*nSigma*nSC)

figure;
bar(reshape(aic,nK,nSigma*nSC));
title('AIC For Various $k$ and $\Sigma$ Choices','Interpreter','latex');
xlabel('$k$', 'Interpreter', 'Latex');
ylabel('AIC');
legend({'Diagonal-shared','Full-shared','Diagonal-unshared',...
    'Full-unshared'});

figure;
bar(reshape(bic,nK,nSigma*nSC));
title('BIC For Various $k$ and $\Sigma$ Choices','Interpreter','latex');
xlabel('$c$', 'Interpreter', 'Latex');
ylabel('BIC');
legend({'Diagonal-shared','Full-shared','Diagonal-unshared',...
    'Full-unshared'});

```

Lampiran 3. *Gaussian Mean Mixture 3D*

```

function [X,mmh] = EM_GMM_3d(c,wk,N,movie,Y,D,Cv)
%% 3D visualization of EM for GMMs
% function X = EM_GMM_3d(c,wk,N,movie,Y,D,Cv)
%
% Inputs: c    - # clusters (default: 5)
%         wk   - array of # gaussians to fit (default: 1:10)

```

```

%      N      - # GMM samples (default: 200)
%      movie  - string: writes .avi for each k (default: [])
%      Y      - NxD data matrix (default: generate new data)
%      D      - data dimensionality (default: 3)
%      Cv     - covariance type (0: diag, 1: full) (default: full)
% Output: X    - NxD data matrix
%
% How it works:
% For each value of k in 'wk':
% - Fit GMM with EM
% - Interpolate model params between EM iterations
% - Coloring: Gaussians - transparency = GMM Mixing weights
%           data    - color blend = posterior probs
% - Play movie of EM learning
% - (optional) Save movie to .avi file
%
% Author: Johannes Traa, UIUC, Nov-Dec '11
%
% Revised Mar '13 (cleaned up code, added full covariance capability)

```

```

%% check input args
if nargin < 1 || isempty(c); c = 5; end
if nargin < 2 || isempty(wk); wk = 1:10; end
if nargin < 3 || isempty(N); N = 200; end
if nargin < 4 || isempty(movie)
    m_val = 0;
    set(0,'DefaultFigureWindowStyle','docked')
else
    m_val = 1;
    set(0,'DefaultFigureWindowStyle','normal')
    if ~ischar(movie)
        movie = 'EM_k';
    end
end
if nargin < 6 || isempty(D); D = 3; end
if nargin < 7 || isempty(Cv); Cv = 1; end

```

```

%% get data
if ~(nargin<5 || isempty(Y))
    X = Y;
    [N,D] = size(X);

```

```

else
% GMM params
m = 10*randn(c,D); % means
C = zeros(D,D,c); % covariance matrices
for j=1:c
    Cj = randn(D,10);
    C(:, :,j) = Cj*Cj';
end
w = dirrand(3*ones(1,c),1); % Mixing weights

% sample from GMM
X = zeros(N,D);
for i=1:N
    j = find(mnrand(1,w));
    X(i,:) = m(j,:) + randn(1,D)*sqrtm(C(:, :,j));
end
end

%% get GMM and show movie for different k
% initialize figure window
fh = figure;

for k=wk
    % ----- fit k-gaussian GMM -----
    [M,C,P,ii] = EM_GMM_movie(X,k,Cv);

    % ----- interpolate params between iterations -----
    fps = 35; % frames per second
    f = fps*ii+1; % # frames

    m = zeros(k,D,f); % interpolated means
    Cm = zeros(D,D,k,f); % interpolated covars
    Pi = zeros(N,k,f); % interpolated posteriors

    % set anchor frames (true values of model at each iteration)
    for i=1:ii
        m(:, :,(i-1)*fps+1) = M{i};
        Cm(:, :,(i-1)*fps+1) = C{i};
        Pi(:, :,(i-1)*fps+1) = P{i};
    end

    % correct last frame

```

```

m(:, :, ii*fps+1) = m(:, :, (ii-1)*fps+1);
Cm(:, :, ii*fps+1) = Cm(:, :, (ii-1)*fps+1);
Pi(:, :, ii*fps+1) = Pi(:, :, (ii-1)*fps+1);

% interpolate missing frames for continuity
mix = linspace(0,1,fps); % Mixing weights for interpolation
for i=1:ii
    % get anchor values
    m1 = m(:, :, (i-1)*fps+1);
    m2 = m(:, :, i*fps+1);
    c1 = Cm(:, :, (i-1)*fps+1);
    c2 = Cm(:, :, i*fps+1);
    p1 = Pi(:, :, (i-1)*fps+1);
    p2 = Pi(:, :, i*fps+1);

    % interpolate
    for j=2:fps
        m(:, :, (i-1)*fps+j) = m1*mix(fps-j+1) + m2*mix(j);
        Cm(:, :, (i-1)*fps+j) = c1*mix(fps-j+1) + c2*mix(j);
        Pi(:, :, (i-1)*fps+j) = p1*mix(fps-j+1) + p2*mix(j);
    end
end

% fills (2D) or ellipsoids (3D)
rr = 100; % resolution
theta = linspace(0,2*pi,rr);
if D == 2
    E = zeros(rr,D,k,f); % fill boundaries
    v = [cos(theta); sin(theta)];
else
    E = zeros(rr,rr,D,k,f); % surf contours
    phi = linspace(0,pi,rr);
    v = [kron(cos(theta),sin(phi)); ...
        kron(sin(theta),sin(phi)); ...
        repmat(cos(phi),[1,rr])];
end
for i=1:f
    for j=1:k
        E_ij = bsxfun(@plus,m(j,:,i),v*sqrtm(Cm(:, :, j,i)));
        if D == 2
            E(:, :, j,i) = E_ij;
        else

```

```

    for d=1:3
        E(:,d,j,i) = reshape(E_ij(:,d),[rr,rr]);
    end
end
end
end

% ----- coloring -----
% posterior = color
cc = jet(k);
C = zeros(N,3,f);
for i=1:f
    C(:,i) = Pi(:,i)*cc;
end

% Mixing weight = transparency
w = sum(Pi,1)/N; % Mixing weights
w = reshape(w,[k,f]); % (frames x Gaussians)
w = bsxfun(@rdivide,w,max(w,[],2)); % normalize rows
w = bsxfun(@times,w,linspace(0.2,0.6,f)); % fade in ellipsoids

% ----- set up for movie -----
% set up to write frames to avi object/set frame skip rate
if ~m_val % don't write movie, skip frames for speed
    fi = 5;
else % write frames for movie
    aviobj = VideoWriter([movie num2str(k)]);
    fi = 1;
end

% axis handles (means, fills/ellipsoids, data)
hold on
eh = zeros(k,1); % fills/ellipsoids
if D == 2
    mmh = scatter(m(:,1,1),m(:,2,1),200,'+k'); % means
    for g=1:k % fills
        eh(g) = fill(E(:,1,g,1),E(:,2,g,1),cc(g,:),...
            'FaceAlpha',w(1,g),'EdgeColor','none');
    end
    Xh = scatter(X(:,1),X(:,2),30,C(:,1),'filled'); % data
else

```

```

mmh = scatter3(m(:,1,1),m(:,2,1),m(:,3,1),200,'+k'); % means
for g=1:k % ellipsoids
    eh(g) = surf(E(:,1,g,1),E(:,2,g,1),E(:,3,g,1),...
        'FaceColor',cc(g,:), 'FaceAlpha',w(1,g), 'EdgeColor', 'none');
    end
Xh = scatter3(X(:,1),X(:,2),X(:,3),30,C(:,1), 'filled'); % data
end

% figure details
% axis tight square
xlim([min(Y(:,1)) max(Y(:,1))])
ylim([min(Y(:,2)) max(Y(:,2))])
zlim([min(Y(:,3)) max(Y(:,3))])
if D == 3
    axis vis3d

end
grid on
rot = 0;
set(gcf, 'Color', 'w')

% ----- play movie showing evolution of GMM -----
for i=[1:fi:f-1 f]
    it = 1+floor((i-1)/fps); % iteration #

    % update data coloring
    set(Xh, 'CData', C(:, :, i));

    % update interpolated means ('+')
    set(mmh, 'XData', m(:, 1, i));
    set(mmh, 'YData', m(:, 2, i));
    if D == 3
        set(mmh, 'ZData', m(:, 3, i));
    end

    % update ellipsoids
    for g=1:k
        if D == 2
            set(eh(g), 'XData', E(:, 1, g, i))
            set(eh(g), 'YData', E(:, 2, g, i))
        else

```

```

        set(eh(g),'XData',E(:,1,g,i))
        set(eh(g),'YData',E(:,2,g,i))
        set(eh(g),'ZData',E(:,3,g,i))
    end
    set(eh(g),'FaceAlpha',w(i,g))
end

% figure details
xlabel(['iteration: ' num2str(it) ' '])
if D == 3
    view(-50+rot,30)
    rot = rot + 0.4;
end

% add frame to .avi object
if m_val
    F = getframe(fh);
    aviobj = addframe(aviobj,F);
end

pause(1/fps);
end

% ----- clean up for next k -----
xlabel(['iteration: ' num2str(ii) ' '])

% write out video
if m_val
    for i=1:fps
        aviobj = addframe(aviobj,F);
    end
    aviobj = close(aviobj);
    clf
elseif k ~= wk(end)
    pause
end

% new figure
if k < wk(end) && ~m_val

```

```

figure
end
end

```

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dirrand

```

```

function X = dirrand(a,N)
%% Sample from Dirichlet distribution
% function X = dirrand(a,N)
%
% Inputs: a - parameters of Dirichlet distribution
%         N - number of samples
% Output: X - Nxd matrix of Dirichlet samples

```

```

%%
X = gamrnd(repmat(a,N,1),1);
X = bsxfun(@rdivide,X,sum(X,2));

```

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% EM_GMM_movie

```

```

function [M,C,P,i] = EM_GMM_movie(X,k,Cv)
%% EM for GMMs
% [M,C,P,itors] = EM_GMM(X,k)
%
% Inputs: X - data (points x dims)
%         k - # clusters
% Outputs: M - cell array of means at each iteration
%         C - cell array of covars at each iteration
%         P - cell array of posteriors at each iteration
%         i - iterations to convergence

```



```

[N,d] = size(X);
A = zeros(N,k); % posteriors

% initialize
Cx = sqrtm(cov(X));
m = bsxfun(@plus,sum(X,1)/N,randn(k,d)*Cx);
w = ones(1,k)/k; % Mixing weights
if Cv; Ca = repmat(Cx,[1,1,k]); % full cov
else Ca = ones(k,d); % diagonal cov
end

% save params from each iteration
M = cell(1,50);
C = cell(1,50);
P = cell(1,50);

M{1} = m;
if Cv
    C{1} = Ca;
else
    C{1} = zeros(d,d,k);
    for j=1:k
        C{1}(:,j) = diag(Ca(j,:));
    end
end
P{1} = ones(N,k)/k;

% iterate
ll = -Inf;
for i=2:50
    ll_old = ll;

    % -- E step --
    if Cv
        for j=1:k
            v = bsxfun(@minus,X,m(j,:));
            A(:,j) = -1/2*log(det(2*pi*Ca(:,j))) ...
                - 1/2*sum((v/(Ca(:,j)+10^-3)).*v,2) + log(w(j)));
        end
    else
        for j=1:k

```

```

v = bsxfun(@minus,X,m(j,:));
A(:,j) = sum(bsxfun(@minus,-1/2*log(2*pi*Ca(j,:)), ...
    bsxfun(@rdivide,v.^2,2*Ca(j,:)+10^-3)),2) ...
    + log(w(j));
end
end
As = logsum(A,2);
p = exp(bsxfun(@minus,A,As)); % Nxk posteriors

% -- M step --
ps = sum(p,1) + eps;
m = bsxfun(@rdivide,p*X,ps);
if Cv
    for j=1:k
        Xm = bsxfun(@minus,X,m(j,:));
        Ca(:,j) = bsxfun(@times,p(:,j),Xm)*Xm/ps(j);
    end
else
    for j=1:k
        Ca(j,:) = p(:,j)*bsxfun(@minus,X,m(j,:)).^2/ps(j);
    end
end
w = ps/N;

% -- save means, covars, posteriors --
M{i} = m;
if Cv
    C{i} = Ca;
else
    C{i} = zeros(d,d,k);
    for j=1:k
        C{i}(:,j) = diag(Ca(j,:));
    end
end
P{i} = p;

% -- convergence --
ll = sum(As);
if abs((ll-ll_old)/ll_old) < 10^-4
    break
end
end
end

```

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% logsum

function y = logsum(x,d)
%% Log-sum-exp for summation in the log domain
%% function y = logsum(x,d)
%
% Inputs: x - matrix or vector
%         d - dimension to sum over
% Output: y - logsum output

m = max(x,[],d);
y = log(sum(exp(bsxfun(@minus,x,m)),d)) + m;

```



Lampiran 1 Proses pengeringan batuan



Lampiran 2 Proses akuisisi data resistivitas batu



Lampiran 3 Proses pembebanan batuan



Lampiran 4 Proses pengukuran berat jenis tanah



Lampiran 5 Proses coring batuan



Lampiran 6 Sampel batuan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Maulana Hutama Rahma Putra, lahir pada 14 April 1997 di Tangerang. Penulis merupakan putra pertama dari Bapak Eddie Rahmawan dan Ibu Syukriyah. Penulis memiliki riwayat pendidikan yang merupakan lulusan Madrasah Ibtidaiyah Pembangunan UIN Jakarta, SMP Islam Pekalongan dan SMAN 1 Pekalongan. Setelah itu, terhitung tahun 2015, penulis resmi menjadi mahasiswa Teknik Geofisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama perkuliahan penulis aktif pada organisasi kemahasiswaan yaitu *Society of Exploration Geophysics – ITS student chapter* dan kegiatan Keluarga Mahasiswa Kota Batik (KMKB) Pekalongan. Selain itu, penulis memiliki minat yang lebih terutama pada bidang numerik dan *coding*. Sehingga pada kegiatan saat perkuliahan mengikuti serta berkontribusi dalam menjadi asisten dosen pada perkuliahan Komputasi Geofisika. Penulis mendapatkan rekan yang sangat baik serta membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir terutama rekan – rekan TG04. Untuk informasi lebih lanjut terkait biodata diri penulis dapat menghubungi melalui email maulanahutama14@gmail.com atau maulana.hutama14@outlook.com.