

**APLIKASI METODE *SELF POTENTIAL* UNTUK INTERPRETASI
BAWAH PERMUKAAN LOKASI SEMBURAN LUMPUR BUJHEL
TASEK, KABUPATEN BANGKALAN**

SKRIPSI

Oleh:

AATINAA ZULFAA

NIM. 12640071



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2018**

**APLIKASI METODE *SELF POTENTIAL* UNTUK INTERPRETASI
BAWAH PERMUKAAN LOKASI SEMBURAN LUMPUR BUJHEL
TASEK, KABUPATEN BANGKALAN**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**AATINAA ZULFAA
12640071**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2018**

HALAMAN PERSETUJUAN

**APLIKASI METODE *SELF POTENTIAL* UNTUK INTERPRETASI
BAWAH PERMUKAAN LOKASI SEMBURAN LUMPUR BUJHEL
TASEK, KABUPATEN BANGKALAN**

SKRIPSI

Oleh:
Aatinaa Zulfaa
NIM. 12640071

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Pada tanggal: 03 Mei 2018

Pembimbing I,



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

Pembimbing II,



Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

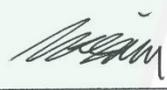
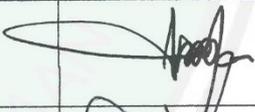
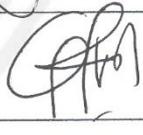
HALAMAN PENGESAHAN

APLIKASI METODE *SELF POTENTIAL* UNTUK INTERPRETASI BAWAH
PERMUKAAN LOKASI SEMBURAN LUMPUR BUJHEL TASEK,
KABUPATEN BANGKALAN

SKRIPSI

Oleh:
Aatinaa Zulfaa
NIM.12640071

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: 14 Mei 2018

Penguji Utama	: <u>Irjan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Ketua Penguji	: <u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji	: <u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Anggota Penguji	: <u>Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	



Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika

Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aatinaa Zulfaa
NIM : 12640071
Jurusan : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Aplikasi Metode *Self Potential* untuk Interpretasi Bawah Permukaan Lokasi Semburan Lumpur Bujhel Tasek, Kabupaten Bangkalan

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggung jawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 03 Mei 2018
Yang Membuat Pernyataan,



METERAI
TEMPEL
56618AFF122840628
6000
ENAM RIBURUPIAH
Aatinaa Zulfaa
NIM. 12640071

MOTTO

قل إنما أنا بشر مثلكم يوحى إلي أنما إلهكم إله واحد فمن كان يرجوا لقاء ربه فليعمل عملا صالحا ولا يشرك بعبادة ربه أحدا

“Katakanlah: Sesungguhnya aku ini manusia biasa seperti kamu, yang diwahyukan kepadaku: "Bahwa sesungguhnya Tuhan kamu itu adalah Tuhan yang Esa."
Barangsiapa mengharap perjumpaan dengan Tuhannya, maka hendaklah ia mengerjakan amal yang saleh dan janganlah ia mempersekutukan seorangpun dalam beribadat kepada Tuhannya."
(Q.S. al-Kahfi [18]:110)

**“SIAPAPUN ORANGNYA, SELAMA DIA MENGANGGUR DI RUMAHNYA, DIA TIDAK AKAN PERNAH TERLEPAS DARI KEMUNGKARAN”
(IMAM AL-GHAZALY)**

HALAMAN PERSEMBAHAN

Yang utama dari segalanya...

Alhamdulillah... segala puji bagi Allah atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Shalawat dan salam selalu terlimpahkan kepada baginda Rasulullah SAW.

Saya persembahkan karya kecilku ini untuk

Masyayikhinaa wa Murobbi Ruuchinaa fii Ma'had Al-Ihya 'Ulumaddin

Abah dan Ibu

Adek-adekku dan Segenap Keluarga Besar



KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Wr. Wb

Alhamdulillah puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya. Sholawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada junjungan kita Baginda Rasulullah, Nabi besar Muhammad SAW serta para keluarga, sahabat, dan pengikut-pengikutny. Atas Ridho dan Kehendak Allah SWT, Penulis Dapat Menyelesaikan Skripsi Yang Berjudul **Aplikasi Metode Self Potential untuk Interpretasi Bawah Permukaan Lokasi Semburan Lumpur Bujhel Tasek, Kabupaten Bangkalan** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) di jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Selanjutnya penulis haturkan ucapan terima kasih seiring do'a dan harapan *jazakumullah ahsanal jaza'* kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini. Ucapan terima kasih ini penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. H. Abdul Haris, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah banyak memberikan pengetahuan dan pengalaman yang berharga.
2. Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Ketua Jurusan yang telah banyak meluangkan waktu, nasehat dan Inspirasinya sehingga dapat melancarkan dalam proses penulisan Skripsi.
4. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang telah banyak meluangkan waktu dan pikirannya dan memberikan bimbingan, bantuan serta pengarahan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen Pembimbing Agama, yang bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan pengarahan bidang integrasi Sains dan al-Qur'an serta Hadits.

6. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah bersedia mengamalkan ilmunya, membimbing dan memberikan pengarahan serta membantu selama proses perkuliahan.
7. Kedua orang tua, Bapak Maslahuddin dan Ibu Siti Munfaridah dan segenap keluarga besar yang telah memberikan dukungan, restu, serta selalu mendoakan disetiap langkah penulis.
8. Sahabat dan Teman-teman dari CSSMoRA dan fisika 2012 terima kasih atas kebersamaan dan persahabatan serta pengalaman berharga selama ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat, tambahan ilmu dan dapat menjadikan inspirasi kepada para pembaca *Amin Ya Rabbal Alamin*.

Wassalamu 'alaikum Wr. Wb.

Malang, 03 Mei 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
مستخلص البحث	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Gunung Lumpur	7
2.1.1 Deskripsi Gunung Lumpur	8
2.1.2 Material Gunung Lumpur	10
2.2 Vulkanisme Lumpur dan Morfologi Gunung Lumpur	12
2.2.1 Ukuran Gunung Lumpur	16
2.2.2 Mekanisme Pembentukan Gunung Lumpur	17
2.2.3 Pemicu Letusan pada Gunung Lumpur	22
2.3 Klasifikasi Gunung Lumpur	23
2.4 Persebaran Gunung Lumpur	26
2.4.1 Gunung Lumpur di Indonesia	29
2.4.2 Persebaran Gunung Lumpur di Pulau Jawa-Madura	30
2.5 Potensial Diri	33
2.5.1 Potensial Elektrokinetik	34
2.5.2 Potensial Difusi (<i>Liquid Junction</i>)	36
2.5.3 Potensial Lempung (<i>Nerts Potential</i>)	37
2.5.4 Potensial Mineralisasi	38
2.6 Mekanisme Terbentuknya Potensial Diri	40
2.7 Metode Geolistrik <i>Self Potential</i> (SP)	43
2.7.1 Prosedur Lapangan	45
2.7.2 Data Potensial Diri	48
2.7.3 Penafsiran Anomali	49
2.8 Geologi Regional Daerah Penelitian	51
2.8.1 Cekungan Jawa Timur bagian Utara	51

2.8.2 Fisiografi	54
2.8.3 Stratigrafi Regional Daerah Penelitian.....	56
BAB III METODE PENELITIAN	60
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	60
3.2 Alat dan Bahan.....	60
3.3 Metode Penelitian.....	61
3.4 Prosedur Penelitian.....	61
3.4.1 Kalibrasi Alat	62
3.4.2 Akuisisi Data di Lapangan	62
3.4.3 Pengolahan Data.....	63
3.4.4 Interpretasi Data	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	65
4.1 Akuisisi Data.....	65
4.2 Hasil dan Pengolahan Data	66
4.2.1 Sebaran Nilai Potensial Diri.....	67
4.2.2 Penampang Melintang Peta Kontur Isopotensial	70
4.3 <i>Mud Volcano</i> Perspektif al-Qur'an	81
BAB V PENUTUP	86
5.1 Kesimpulan	86
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sketsa emisi gas gunung lumpur	12
Gambar 2.2	Struktur dasar dan elemen utama gunung lumpur kerucut	13
Gambar 2.3	Diagram skematis gunung lumpur kerucut dan <i>pie-shaped</i>	14
Gambar 2.4	Macam-macam morfologi dasar gunung lumpur	15
Gambar 2.5	Proses pembentukan <i>mud diapir</i> menjadi gunung lumpur	20
Gambar 2.6	Persebaran gunung lumpur di dunia	28
Gambar 2.7	Keberadaan gunung lumpur di Pulau Jawa dan Madura	30
Gambar 2.8	Bagan jenis-jenis potensial listrik.....	34
Gambar 2.9	Potensial Elektrokinetik (PE)	36
Gambar 2.10	Ilustrasi kejadian potensial difusi	37
Gambar 2.11	Mekanisme <i>Self potential</i> pada pirit.....	41
Gambar 2.12	Model skematis sumber anomali <i>self-potential</i> tubuh bijih	44
Gambar 2.13	Teknik lapangan metode potensial diri.....	47
Gambar 2.14	Penampang lintang model lempeng dua dimensi	49
Gambar 2.15	Tiga struktur utama Cekungan Jawa Timur	54
Gambar 2.16	Peta fisiografi regional Jawa Tengah dan Jawa Timur.....	55
Gambar 2.17	Peta geologi daerah Sapuluh Madura	58
Gambar 3.1	Lokasi penelitian.....	60
Gambar 3.2	Pengukuran potensial diri metode gradien potensial	62
Gambar 3.3	Diagram alir penelitian	64
Gambar 4.1	Peta kontur isopotential daerah Bujhel Tasek	68
Gambar 4.2	Peta kontur ketinggian daerah penelitian.....	69
Gambar 4.3	Peta kontur isopotensial 3D.....	70
Gambar 4.4	Peta isopotensial dengan sayatan A-B.....	72
Gambar 4.5	Kurva profil sayatan pada lintasan A-B	72
Gambar 4.6	Peta kontur isopotensial dengan sayatan C-D	73
Gambar 4.7	Kurva profil sayatan pada lintasan C-D	73
Gambar 4.8	Bujhel Tasek Bini	76
Gambar 4.9	Peta kontur isopotensial dengan sayatan E-F	77
Gambar 4.10	Kurva profil sayatan pada lintasan E-F	77
Gambar 4.11	Ekspresi eksternal Bujhel Tasek Laki.....	78
Gambar 4.12	Titik semburan Bujhel Tasek Laki (puncak kerucut)	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sumber geologi dan jenis-jenis anomalnya	39
Tabel 3.1	Alat dan bahan	61
Tabel 4.1	Hasil perhitungan nilai h , H dan θ pada setiap slice	79



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran Data Observasi *Self Potential*



ABSTRAK

Aatinaa Zulfaa. 2018. **Aplikasi Metode *Self Potential* untuk Interpretasi Bawah Permukaan Daerah Semburan Lumpur Bujhel Tasek, Kabupaten Bangkalan.** Skripsi. Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Drs. Abdul Basid, M.Si, (II) Erna Hastuti, M.Si

Kata Kunci: gunung lumpur, *self potential*, anomaly SP

Semburan lumpur Bujhel Tasek adalah salah satu semburan lumpur yang berada di Indonesia tepatnya di Desa Katal Barat Kecamatan Geger Kabupaten Bangkalan Pulau Madura. Bujhel Tasek memiliki 2 titik semburan (Bujhel Tasek Bini dan Bujhel Tasek Laki) yang masih aktif sampai saat ini dengan intensitas semburan yang relatif kecil. Penelitian ini dilakukan dengan metode survei geolistrik *self potential* (potensial diri, SP) yang mengukur potensial diri yang secara alami terdapat di lokasi penelitian. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola sebaran anomali SP, struktur geologi setempat, dan identifikasi sebaran dan tipe semburan lumpur Bujhel Tasek. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan konfigurasi elektroda *gradient potential* (*leap frog*). Pengolahan data dilakukan dengan *software* Surfer 11 dan Ms. excel. Berdasarkan hasil analisa dari semua data diketahui bahwa daerah setempat termasuk daerah konduktif dengan sumber anomali berasal dari *background potential* berupa aliran fluida, reaksi geokimia serta topografi dengan nilai potensial tertinggi 42.629 mV dan terendah -42.6211mV. Semburan lumpur Bujhel Tasek termasuk semburan lumpur yang tidak berbahaya dengan struktur bawah permukaan daerah setempat didominasi oleh lempung dan batu kapur.

ABSTRACT

Aatinaa Zulfaa. 2018. **Application of Self Potential Method for Interpretation Subsurface Area of Bujhel Tasek Mud Volcanoes, Bangkalan Regency.** Final Project. Department of Physics, Faculty of Science and Technology of the State Islamic University of Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisor: (I) Drs. Abdul Basid, M.Si, (II) Erna Hastuti, M.Si

Keyword: Mud volcano, self potential, SP anomaly

Bujhel Tasek mud volcano is one of the mud volcanoes in Indonesia, precisely in the Village Katal Barat, Geger, Bangkalan, Madura Island. Bujhel Tasek has two active burst spots (Bujhel Tasek Bini and Bujhel Tasek Laki) with relative small intensity bursts. Bujhel Tasek is located in residential areas and farming areas. Therefore, it is necessary to do research to assess the existence of Bujhel Tasek for the safety and usefulness in the future. This research was conducted by using self potential (SP) method that measures naturally self potential in the study sites. This study aims to determine the distribution pattern of the SP anomaly, local geological structure, and identification of the distribution and type of mud eruption of Bujhel Tasek. The data were collected by using gradient potential (leap frog) electrode. Data processing was assisted by Surfer 11 and Ms. excel software. Based on the analysis of the data, it is known that the local area including the conductive area with the source of anomaly comes from the background potential in the form of fluid flow, geochemical reaction and topography with the highest potential value is 42,629 mV and the lowest is -42,621 mV. Bujhel Tasek mud volcanoes includes a harmless mud flow with sub-surface structures dominated by clay and limestone.

مستخلص البحث

أنا زلفى. ٢٠١٨، تطبيق طريقة الإمكانات النفس (*Self Potential*) للتفسير تحت السطح على رشقة الطين بوجيل تاسيك، بانجكالان، البحث الجامعي، قسم الفيزياء، كلية العلوم و التكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. الإشراف: (I) الدكتور عبد الباسط الماجستير، (II) إيرنا هاستوتي الماجستير.

الكلمات الرئيسية: بركان الطين، الإمكانات النفس (*self potential*)، الشذوذ للإمكانات النفس

رشقة الطين بوجيل تاسيك هي واحدة من رشقات الطين في إندونيسيا في قرية كاتل الغربية جيحر بانجكالان مادورا. بوجيل تاسيك له موقعين متقولين (بوجيل تاسيك بيني و بوجيل تاسك لآكي) الناشطان حتى الآن مع كثافة الانفجارات صغيرة نسبيا. وقد أجري البحث بطريقة مسح الكهروإتائية والجغرافية الإمكانات النفس (الإمكانات النفس ، SP)، الذي يقيس طبيعيا في موقع البحث. يهدف هذا البحث إلى تحديد نمط التوزيع الشذوذ الإمكانات النفس ، والبنية الجيولوجية المحلية، وتحديد التوزيع ونوع رشقة الطين بوجيل تاسيك. جمعت البيانات باستخدام التكوين الكهروإتائي (*gradient potential (leap frog)*). عالجت البيانات باستخدام برنامج 11 Surfer و Microsoft excel. واستنادا إلى تحليل جميع البيانات وجدت أن المنطقة المحلية هي المنطقة الموصلة بموارد تأتي من التشوهات الإمكانات الخلفية اي تدفق السوائل، التفاعل الكيمياء للجغرافية و الطبوغرافيا مع قيمة الأعلى فهي ٤٢،٦٢٩- م ف وأدنى هي ٤٢،٦٢١ م ف. تحتوي رشقة الطين بوجيل تاسك على غير ضار مع هيكل تحت السطح الذي يتحكم على الطين والحجر الجيري.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gunung lumpur (*mud volcano*) merupakan fenomena geologi yang telah terbentuk jutaan tahun lalu di bawah permukaan bumi. Gunung lumpur muncul ke permukaan bumi melalui rekahan-rekahan yang terbentuk di sekitar dapur lumpur, sehingga terbentuk semburan lumpur dari dalam bumi. Rekahan-rekahan ini dapat terbentuk akibat adanya gempa bumi atau aktivitas pengeboran dari industri pengeboran.

Fenomena gunung lumpur banyak terjadi di Indonesia. Menurut Rakhman (2014) rentetan gunung lumpur yang muncul di Jawa Timur yaitu mulai dari Porong di Sidoarjo, Karang Anyar di Sedati Sidoarjo, Gunung Anyar di Rungkut Surabaya dan Katal Barat di Bangkalan Madura, semua terletak dalam satu lipatan. Semburan lumpur yang terjadi di Madura berada pada satu garis patahan dengan lumpur panas yang menyembur di Sidoarjo. Dalam penelitian ini objek yang akan diteliti adalah semburan lumpur yang muncul di Pulau Madura, tepatnya di Desa Katal Barat Kecamatan Geger Kabupaten Bangkalan. Para warga akrab menyebutnya dengan sebutan Bujhel Tasek. Semburan lumpur Bujhel Tasek secara regional masih terletak di Lajur Rembang-Madura, dimana telah banyak semburan lumpur ditemukan di sepanjang lajur ini.

Ada dua titik semburan lumpur di lokasi penelitian, Bujhel Tasek Laki dan Bujhel Tasek Bini. Semburan lumpur pada Bujhel Tasek Laki membentuk gunung lumpur dengan ketinggian ± 15 m. Titik pusat semburan berada pada puncak

gunung lumpur tersebut. Bujhel Tasek Bini berjarak sekitar 400 meter dari Bujhel Tasek Laki. Semburan lumpur pada Bujhel Tasek Bini memiliki komposisi air yang cukup banyak sehingga tidak terbentuk gunung lumpur namun sebuah kubangan lumpur dengan banyak gelembung-gelembung gas yang muncul di permukaan. Lumpur yang menyembur di Kecamatan Geger ini tidak disertai dengan aroma menyengat dan suhu yang panas serta memiliki volume semburan yang relatif kecil. Meskipun begitu para warga masih khawatir jika semburan lumpur menjadi bencana seperti yang terjadi di Sidoarjo. Oleh karena itu perlu adanya studi tentang semburan lumpur yang ada di Desa Katal Barat ini.

Semburan lumpur merupakan salah satu fenomena alam yang lazim dan dapat dijelaskan perspektif sains atau ilmu pengetahuan. Allah telah mengabarkan hal tersebut dalam al-Qur'an surat az-Zalzalah ayat 2, sebagai berikut:

وَأَخْرَجَتِ الْأَرْضُ أَثْقَالَهَا ﴿٢﴾

“Dan bumi telah mengeluarkan beban-beban berat (yang dikandung) nya.” (Q.S. az-Zalzalah [99]:2).

Ayat ini menjelaskan bahwa bumi dapat mengeluarkan apa yang ada di dalamnya, beban-beban berat atau material-material berat yang dikandung bumi. Dalam penelitian ini material tersebut adalah lumpur. Komposisi lumpur yang dikeluarkan adalah semua material yang terkandung dari dalam perut bumi, dapat berupa massa padat, plastis, cair, dan gas.

Peristiwa atau fenomena gunung lumpur menarik untuk dikaji agar dapat diperoleh informasi yang dapat membantu dalam pemanfaatan lahan/potensi

daerah hingga mitigasi bencana alam. Mempelajari dan memahami apa yang ada di langit dan di bumi telah Allah perintahkan dalam Q.S. Yunus ayat 101:

﴿قُلْ انظُرُوا مَاذَا فِي السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ ۚ.....﴾ ١٠١ ﴿﴾

“Katakanlah, ”Perhatikanlah apa yang ada di langit dan di bumi!”.....” (Q.S. Yunus [10]:101).

Dalam ayat di atas Allah memberi petunjuk kepada hamba-hamba-Nya untuk berfikir tentang nikmat-nikmat Allah dan dalam apa yang telah Allah ciptakan di langit dan di bumi dari ayat-ayat yang agung bagi orang-orang mempunyai akal (Ghoffar, 2003). Berfikir tentang nikmat-nikmat Allah berarti mempelajarinya untuk mendapatkan pengetahuan (informasi). Ada berbagai cara dan metode yang dapat dilakukan untuk mendapatkan pengetahuan (informasi). Salah satu metode yang dapat digunakan dalam survei geofisika adalah metode potensial diri (*self potential*). Dengan metode ini maka dapat diketahui bagaimana distribusi potensial diri serta geologi bawah permukaan daerah setempat.

Survei geofisika metode geolistrik potensial diri (*Self Potential, SP*) merupakan salah satu metode survei geofisika yang memanfaatkan potensial alami yang terjadi di bawah permukaan bumi. Metode SP didasarkan pada pengukuran potensial diri massa endapan batuan dalam kerak bumi tanpa harus menginjeksikan/mengalirkan arus listrik ke dalam tanah (Sehah, 2011). Proses mekanik yang terjadi di bawah permukaan menghasilkan potensial elektrolisis, terdiri dari tiga potensial elektrokimia yaitu potensial *liquid-junction*, potensial *shale* dan potensial mineralisasi (Reynolds, 1997).

Potensial diri merupakan tegangan statis alam yang terdapat di permukaan bumi sebagai akibat dari proses mekanik dan elektrokimia yang terjadi di bawah permukaan, oleh sebab itu yang tercipta adalah tegangan listrik searah (DC) yang bervariasi secara lambat. Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa anomali potensial diri terjadi karena adanya pergerakan air dalam media berpori. Kemunculan potensial diri terkait dengan pelapukan batuan/mineral, variasi mineral di dalam batuan, aktivitas biolistrik bahan organik, gradien tekanan dan temperatur pada permukaan cairan, serta gejala alam lainnya (Sehah, 2011).

Metode *self potential* selama ini dimanfaatkan sebagai *secondary tool* dalam eksplorasi logam dasar khususnya untuk mendeteksi adanya bijih sulfida. Pada dekade terakhir metode ini banyak digunakan untuk mendeteksi reservoir panas bumi (Ishido, 2010), air bawah tanah serta untuk membantu pendeteksian patahan dekat permukaan (Sehah, 2011). Selain itu metode ini juga dapat digunakan untuk mendeteksi rembesan limbah cair bawah permukaan dan analisa geokimia (Naudet *et. al.*, 2004; Kartini, 2005).

Salah satu penelitian terdahulu dilakukan oleh Indriana dkk. (2007). Dalam penelitian ini, Indriana dkk. menginterpretasi bawah permukaan daerah Bledug Kuwu menggunakan metode potensial diri dengan konfigurasi elektroda tetap. Interpretasi dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi kualitatif dilakukan dengan menggunakan *software* surfer 8 dan hasilnya berupa peta kontur isopotensial. Dari interpretasi kualitatif diketahui bahwa penyebaran distribusi nilai potensial semakin kecil ke arah Bledug Kuwu. Nilai potensial yang sangat

kecil (bernilai minus) mengindikasikan daerah Bledug adalah daerah yang konduktif. Interpretasi kuantitatif dilakukan pada 3 penampang lintang yang dipilih. Dengan bantuan *curve matching* diperoleh nilai kedalaman dari permukaan ke pusat bola benda sumber anomali dan sudut polarisasi dari sumber anomali potensial diri dari tiap penampang yang dipilih.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah maka rumusan masalahnya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pola persebaran aliran lumpur Bujhel Tasek berdasarkan metode *self potential*?
2. Berapa kedalaman sumber anomali di daerah Bujhel Tasek?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang diambil dapat ditarik beberapa tujuan penelitian diantaranya sebagai berikut:

1. Mengetahui pola persebaran aliran lumpur Bujhel Tasek berdasarkan data *self potential*.
2. Mengetahui kedalaman sumber anomali di daerah Bujhel Tasek.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Memberikan informasi geologi bawah permukaan pada daerah semburan lumpur Bujhel Tasek berdasarkan metode potensial diri (*self potential*, SP).

2. Menambah pemahaman secara ilmiah terkait fenomena semburan lumpur Bujhel Tasek, sehingga dapat dilaksanakan pengolahan sumber daya alam dengan baik dan benar.

1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini berlokasi di 2 titik semburan lumpur Bujhel Tasek dan sekitarnya yakni di Desa Katal Barat Kecamatan Geger Kabupaten Bangkalan Madura.
 2. Metode yang digunakan adalah potensial diri (*self potential*, SP) dengan formasi elektroda berjalan (gradien potensial atau *leap frog*).
 3. Pengolahan data SP dilakukan menggunakan software Ms. Excel dan Surfer
- 11.

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Gunung Lumpur

Gunung lumpur (*mud volcano*) merupakan fenomena alam yang lazim dijumpai di jalur tumbukan lempeng tektonik. Gunung lumpur tersebar luas di seluruh dunia. Gunung lumpur pertama kali ditemukan di daerah yang memiliki aktivitas vulkanisme yang besar, yaitu di Lapangan Flegrei, di Sisialia dan di Islandia. Pada waktu itu keberadaan gunung lumpur diduga berhubungan dengan proses endogenik, yaitu suatu proses yang terjadi karena adanya gaya dari dalam bumi. Rembesan minyak dan gas dan bagian yang memproduksi minyak dan gas merupakan tempat yang sama dalam produksi *mud diapir* dan gunung lumpur, seperti pada Zona Bogor, Serayu Utara, Kendeng-Madura (Satyana dan Asnidar, 2008).

Gunung lumpur adalah salah satu bagian dari alam yang paling dinamis dan memiliki struktur sedimen dan ciri geomorfologi permukaan yang tidak stabil, dapat berubah-ubah secara signifikan. Secara gomorfologi gunung lumpur dapat terjadi di belahan bumi manapun, di darat dan lepas pantai (*offshore*). Ciri dan dan morfologi paling sederhana dari gunung lumpur adalah ditunjukkan dengan adanya kerucut yang memiliki puncak kawah. Ukuran dan bentuknya banyak dipengaruhi oleh kandungan produk emisi (viskositas, densitas, ukuran butiran), kandungan dan frekuensi emisi (lambat, deras atau eksplosif), dan volume material dan produk fluida (Perez-garcia, 2012).

Keberadaan diapir lumpur dan semburan lumpur menyiratkan petroleum sistem, terutama pada pendewasaan batuan sumber generasi minyak bumi, pembentukan struktur yang menekuk dan patahan/sesar untuk migrasi minyak bumi dan pembangkit struktur trap diapirik pada daerah yang dangkal. Kasus di seluruh dunia menunjukkan diapirisme lumpur dan semburan lumpur mempunyai hubungan dekat dengan minyak, keberadaannya dapat di temukan di Jawa hingga Madura (Satyana dan Asnidar, 2008).

2.1.1 Deskripsi Gunung Lumpur

Gunung lumpur didefinisikan sebagai pengusiran berkala bagian dalam bumi yang terdiri dari campuran sedimen dan air, berbagai gas dan material padat. Namun saat ini istilah gunung lumpur mengacu pada bangunan konstruksi, baik terkubur atau tersingkap (Milkov, 2000). Di sisi lain, istilah sistem gunung lumpur digunakan untuk menggambarkan struktur 3D penuh dari sumber lumpur (kantong lumpur) hingga ekstrusi di permukaan. Gunung lumpur di seluruh dunia yang sudah didokumentasikan memiliki bentuk kerucut yang khas dengan sudut kemiringan permukaan atas biasanya berkisar antara 2° sampai 20° . Dengan menggunakan pencitraan seismik, dasar dan tepi lateral bangunan gunung lumpur dapat diungkapkan dalam berbagai morfologi dan struktur internal (Basul, 2012).

Gunung lumpur (gunung lumpur) menunjukkan banyak kemiripan dengan vulkanisme magma, dan banyak terminologi yang dipakai untuk menjelaskan proses semburan dan deposit yang dapat diterapkan pada proses terbentuknya

gunung lumpur. Akan tetapi, terminologi yang berkaitan tetap terpisah untuk gunung lumpur (Planke *et al.*, 2003).

Semburan lumpur dan diapirisme lumpur adalah fenomena terkenal yang terjadi dimana sedimen kaya cairan padat naik dalam suksesi litologis dengan daya apung karena kontras kepadatan bulk antara massa berlumpur yang terlalu banyak dan overburden yang memiliki kepadatan lebih tinggi. Tekanan berlebih semacam itu juga merupakan efek dari produksi gas (terutama metana) pada kedalaman yang diinduksi oleh aktivitas organogenik di dalam sedimen jenuh air yang terkubur selama subduksi atau fenomena penurunan cepat. Struktur ini telah dipelajari secara ekstensif pada tahun-tahun terakhir karena dapat menjadi penanda reservoir hidrokarbon dan untuk bahaya yang disebabkan oleh ekstrusi lumpur yang dahsyat selama pengeboran (Albarello, 2012).

Gunung lumpur merupakan struktur geologi yang terbentuk sebagai akibat dari pengeluaran material yang mengandung tanah liat ke permukaan bumi atau dasar laut. Air dan gas tercampur sehingga tanah liat menjadi semiliquid dan mendorong tanah liat naik melalui celah sempit yang panjang atau celah-celah atau rekahan pada kerak untuk membuat sebuah tempat keluarnya massa lumpur menuju permukaan (Dimitrov, 2002). Rekahan-rekahan pada lapisan bumi sebagai jalan keluar bagi massa lumpur yang berada di bawah permukaan bumi, sebagaimana firman Allah SWT. dalam Surat ath-Thariq ayat 12:

وَالْأَرْضِ ذَاتِ الصَّدْعِ (١٢)

“Dan bumi yang mempunyai ‘rekahan’.” (Q.S. at-Thariq [86]:21).

Lafadz (الصَّدْع) berarti belahan atau rekahan. Shihab (2003) dalam tafsirnya menjelaskan bahwa makna “belahan” pada riwayat ini ada yang memahaminya sebagai belahan-belahan di bumi yang kemudian memancarkan air (mata air). Sebagaimana air yang ditahan di dalam perut bumi kemudian dikeluarkan melalui rekahan-rekahan yang terbentuk, begitu juga dengan massa lumpur yang keluar/menyembur ke permukaan bumi melalui rekahan-rekahan sehingga terbentuklah gunung lumpur (*mud volcano*).

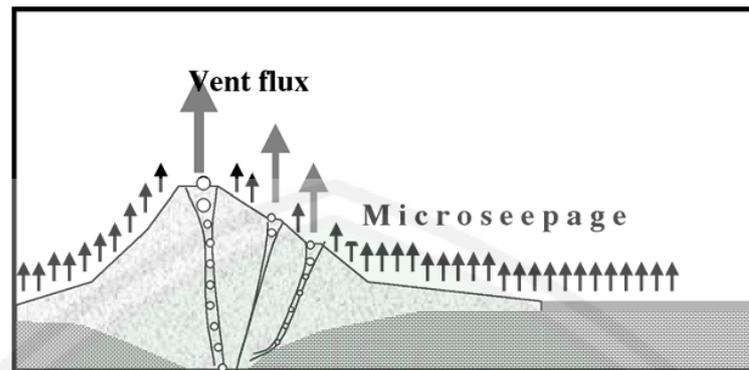
2.1.2 Material Gunung Lumpur

Gunung lumpur terdiri dari tiga komposisi utama, yaitu: breksi lumpur, air dan gas. Jumlah relatif dan sifat kualitatif yang tepat dari komponen ini bervariasi bergantung pada geologi dan proses lokal di tempat terjadinya semburan. Breksi lumpur pada dasarnya memenuhi syarat dalam matriks yang kaya mineral tanah liat dan inilah yang membentuk sebagian besar fitur gunung lumpur. Sedangkan lumpur biasanya berasal dari satu dasar pembawa tertentu dan dengan demikian memiliki tanda geokimia berbeda yang mencerminkan kondisi dan proses pengeringan tanah liat/perubahan bentuk. Fragmen klastik berasal dari unit yang dilalui lumpur ketika naik ke permukaan dan merupakan akibat dari berubah-ubahnya lithology, ukuran dan bentuk. Lumpur muda dan kuat (memiliki tipe letusan eksplosif) dapat melempar breksi lumpur dengan rasio matriks klastik yang sangat tinggi. Sedangkan breksi lumpur yang lebih tua dari gunung lumpur dapat bebas dari kandungan lumpur hingga 99% dalam aktivitas semburanya (Kopf, 2002).

Air dalam ekstrusi gunung lumpur biasanya berasal dari sumber dangkal serta dalam dan secara tidak langsung diturunkan melalui berbagai proses (Kopf, 2002). Air dari breksi lumpur dan gunung lumpur biasanya bercampur dimana aliran gunung lumpur dari viskositas yang berbeda dapat terbentuk. Letusan gunung lumpur yang dahsyat dapat mengeluarkan hingga 5 juta meter kubik aliran material semburan (Graue, 2000).

Gas yang dihasilkan dan dipancarkan melalui vulkanisme lumpur hampir selalu didominasi oleh metana (70-99%). Karena sebagian besar gunung lumpur berakar sangat dalam maka gas metana lebih mendominasi daripada gas biogenik (Etiopie, 2005). Temperatur material erupsi gunung lumpur lebih dingin dari magma vulkanik. Akan tetapi gunung lumpur yang terjadi di area vulkanik dapat memiliki temperatur lebih tinggi dari rata-rata. Material yang dikeluarkan seringkali menyatu pada benda-benda halus yang berada dalam liquid yang dapat dimasuki air (sering kali keasam-asaman atau asin) dan fluida hidrokarbon. Sekitar 86% gas metana dilepaskan, dengan jumlah karbon dioksida, hidrogen sulfida, dan nitrogen lebih sedikit (Satyana dan Asnidar, 2008).

Gas dilepaskan dari lubang vent (gryphons atau kolam mendidih) dan dari tanah di area yang luas, selain itu gas juga keluar dari tutup yang berlumpur. Rembesan mikro dapat mewakili 50% sampai 90% dari total produksi gas. Estimasi total pelepasan gas hidrokarbon melebihi 27 miliar meter kubik setiap tahunnya, rata-rata 85,5% adalah metana, karbon dioksida 9,5%, nitrogen 4,5% dan hidrokarbon lebih dari 0,5%. (Akesson, 2008).



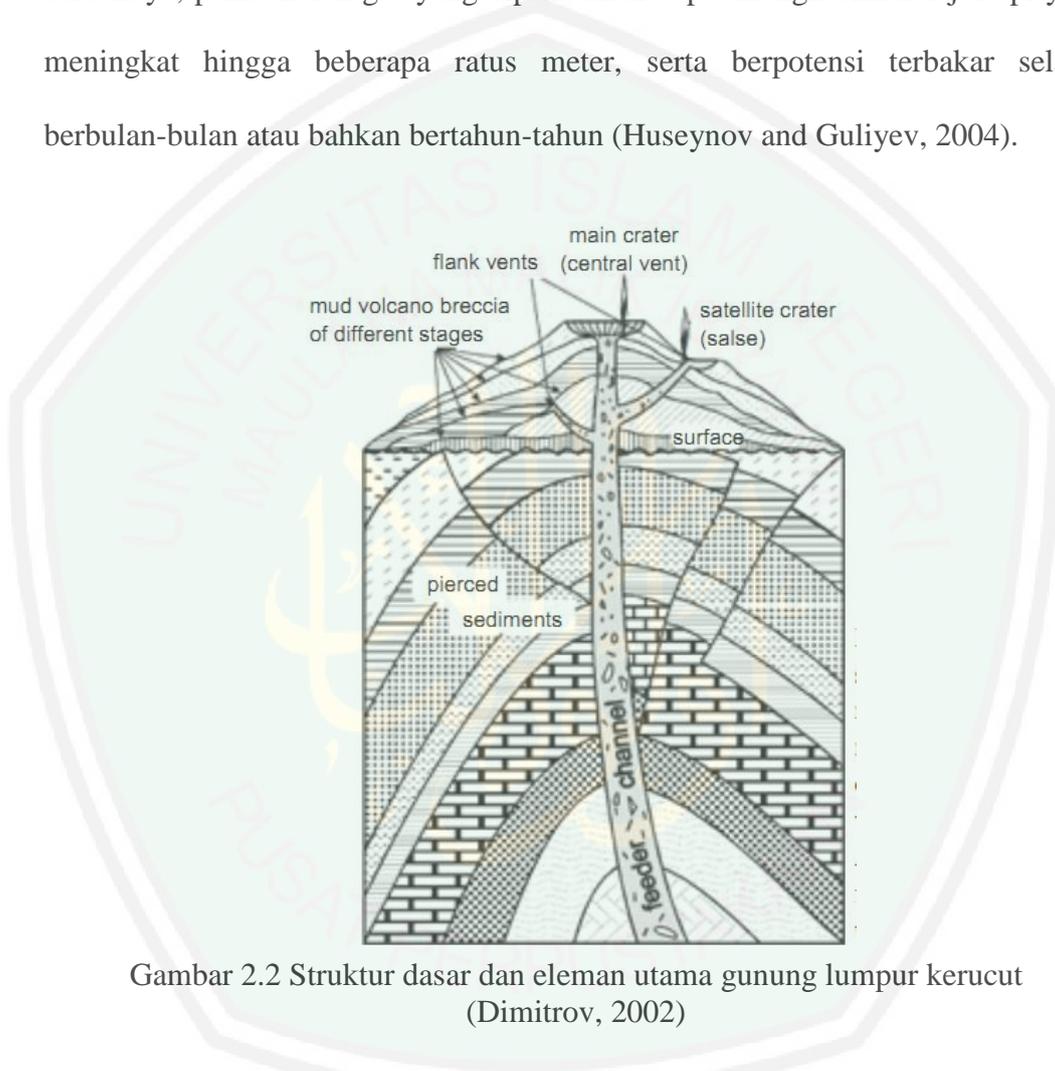
Gambar 2.1 Sketsa emisi gas pada gunung lumpur

2.2 Vulkanisme Lumpur dan Morfologi Gunung Lumpur

Sebuah gunung lumpur terdiri dari dua elemen morfologi utama, yaitu: sistem pengumpan internal dan bangunan luar (gambar 2.2). Karakteristik unsur-unsur ini sangat bergantung pada proses pemberlakuan gunung lumpur yang ada dan dalam beberapa kasus dapat berlaku sebaliknya (Akesson, 2008). Struktur geologi gunung lumpur terbentuk dari hasil emisi material yang mengandung tanah liat pada permukaan bumi atau dasar laut. Karakteristik isometrik bentuk-bentuk materi ekstrusi memiliki fitur morfologi memanjang yang sebagian besar bervariasi dalam bentuk dan ukuran, memiliki morfologi yang disusun oleh breksi lumpur yang secara jelas berbeda dengan sedimen asal disekitarnya (Dimitrov, 2002).

Menurut Akesson (2008) beberapa gunung lumpur yang berbahaya dapat mengeluarkan banyak aliran lumpur dengan viskositas rendah melalui letusan berkali-kali, pendek namun dahsyat, freatik dan eksplosif. Jenis gunung lumpur ini biasanya berkembang menjadi bentang daratan dengan skala-kilometer, dan kompleks gunung lumpur yang terdiri dari kumpulan morfologi berbentuk kerucut yang terbentang ratusan meter di atas permukaan tanah sampai gundukan, jurang,

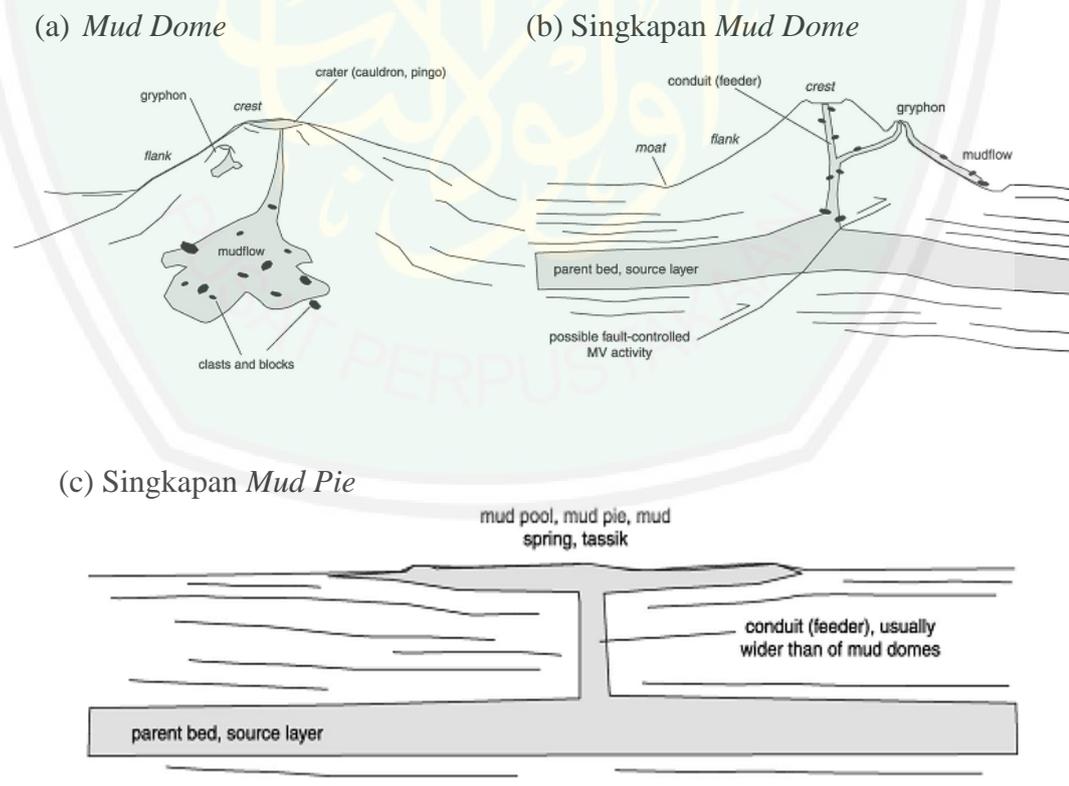
genangan dengan gelembung lumpur dan/atau air (*salses*), retakan lumpur dan lobus klastik (Evans *et al.*, 2006). Untuk jenis vulkanisme lumpur aktif dan berbahaya, pembakaran gas yang dipancarkan dapat menghasilkan lajur api yang meningkat hingga beberapa ratus meter, serta berpotensi terbakar selama berbulan-bulan atau bahkan bertahun-tahun (Huseynov and Guliyev, 2004).



Gambar 2.2 Struktur dasar dan elemen utama gunung lumpur kerucut (Dimitrov, 2002)

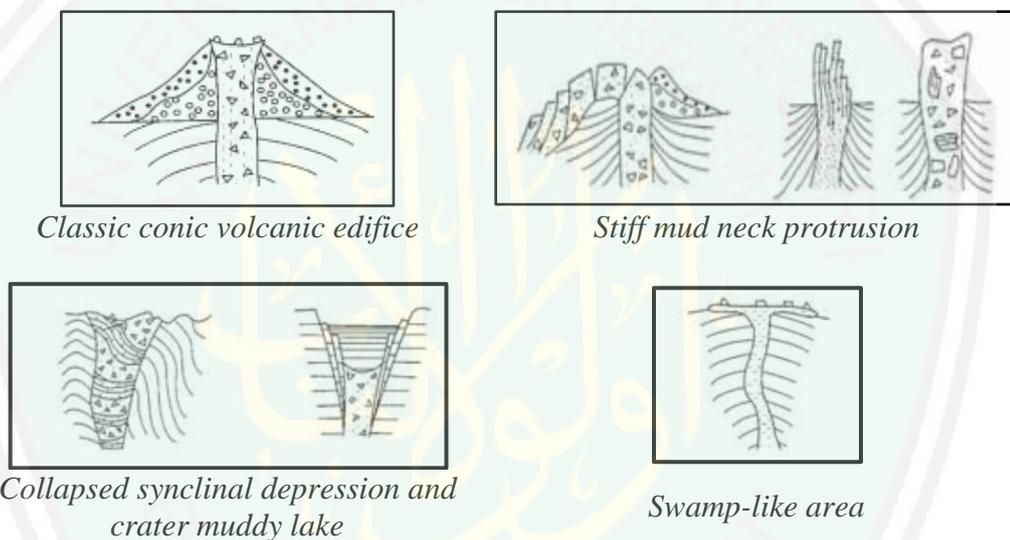
Sebuah gunung lumpur umumnya terdiri dari kawah utama (*main crater*) dan beberapa gryphon yang berada di sekitar kawah utama (Gambar 2.2). *Feeder* atau *conduit* merupakan bentuk utama yang memudahkan dalam ekstrusi lumpur. Di dekat permukaan, *feeder* cenderung tipis dan terbagi menjadi pipa pengapit/lateral yang lebih kecil. Diameter saluran vulkanik dapat memiliki dampak besar pada aktivitas gunung lumpur. Umumnya, semakin lebar

salurannya, semakin banyak pengeluarannya. *Feeder* atau *conduit* dapat berbentuk silinder, bentuk yang tidak menentu, atau hanya sebuah celah (seperti rekahan, sesar dan sebagainya). Daerah dimana *central conduit* memotong keluar pada permukaan disebut *crest*. Jika daerah *crest* menunjukkan sebuah penurunan, maka ini menunjukkan sebuah kawah (*crater*). Jika kawah terisi dengan lumpur pekat, bentuk ini disebut sebagai *mud pool* (kolam lumpur). Jika *main conduit* gunung lumpur terputus dari *crater*, maka *main conduit* disebut sebagai *pingo* atau *cauldron* (dalam bahasa portugis disebut *caldera*). Kemiringan dari *main conduit* dapat berakibat pada *small crater* yang dapat mematikan semburan pada *main conduit* dan membentuk sebuah *gryphon* baru (Kopf, 2002).



Gambar 2.3 Diagram skematis gunung lumpur kerucut dan *pie-shaped* (a) *mud dome*, (b) singkapan *mud dome*, (c) singkapan *mud pie* (Kopf, 2002)

Morfologi eksternal dan ekspresi gunung lumpur bervariasi. Singkapan (lubang *vent*/ kawah) *feeder channel* dapat diambil variasi bentuk dari plano-convex (datar), busung hingga struktur cekung runtuh (*concave collapse*) tipe kaldera (Dimitrov, 2002). Sedangkan menurut Satyana dan Asnidar (2008) variasi morfologi permukaan gunung lumpur adalah area yang menyerupai rawa, danau kawah yang berlumpur, bentuk kerucut klasik, dan depresi synclinal yang roboh.



Gambar 2.4 Macam-macam morfologi dasar gunung lumpur dalam studi lapangan di Caucasus, Crimea, Turkmenistan (Akhmanov and Mazzini, 2007)

Akhmanov dan Mazzini (2007) mengusulkan variasi morfologi bangunan gunung lumpur (Gambar 2.4). Perbedaan morfologi gunung lumpur berkaitan dengan perbedaan pada tahap pembentukannya. Tipe yang dimaksud adalah:

- 1) *Classic*, dengan bentuk kerucut besar gunung dengan kawah utama dan stratifikasi aliran lumpur yang mencerminkan periode erupsi
- 2) Lumpur lembab dan panas dengan lajur tonjolan keluar (*sticky mud neck protrusion*)

- 3) Depresi *synclinal* roboh
- 4) Kawah danau yang berlumpur (*swamp like area*)

Gunung lumpur pada jalur seismik memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda. Beberapa bentuk fitur berbeda berada di dasar laut, sementara yang lain tergabung dalam relief sekitarnya dan membentuk kolam gas tidak terkonsolidasi yang mengandung lumpur. Berdasarkan bentuk dan penampilannya di dasar laut empat jenis gunung lumpur diidentifikasi, yaitu: cekung, konveks (cembung), rata dan terkubur. Tubuh gunung lumpur tertutup oleh sedimen dan tidak memiliki hubungan dengan permukaan. Lumpur semacam itu biasanya memiliki kumpulan baji bertumpuk seperti fitur yang diartikan sebagai aliran paleo yang mengungkapkan aktivitas mereka di masa lalu (Akhmanov and Mazzini, 2007).

2.2.1 Ukuran Gunung lumpur

Bentuk dan ukuran gunung lumpur tergantung pada skala mobilisasi atau pergerakannya yang dimulai dengan tekanan fluida berpori, frekuensi dan karakter aktifitas fluida tersebut serta viskositas lumpur yang mengalir keluar. Walaupun berbagai faktor mempengaruhi hubungan antara bentuk dan ukuran gunung lumpur, aktifitas dasar terlihat lebih simple, yaitu: tekanan terbesar dari fluida berpori, erupsi yang lebih kasar, aktifitas yang lebih sering, struktur yang lebih besar; viskositas yang lebih rendah, tubuh yang lebih besar dan lebih datar (Dimitrov, 2002).

Tinggi relatif gunung lumpur bervariasi dari hanya beberapa meter hingga 300-400 m, dan bahkan lebih dari 500 m. Pada daerah daratan, gunung lumpur

sedikit memanjang dengan diameter kawah hingga 500 m. Beberapa lokasi gunung lumpur sangat tertutup satu sama lain, pembentukan tubuh daratan dan aliran breksi lumpur dapat menutup area 100 km² atau lebih, sebagaimana yang terjadi di Irian Jaya, New Guinea dan submarine daratan tinggi lumpur Gelendzhik di puncak Mediterranean Ridge (Dimitrov, 2002).

2.2.2 Mekanisme Pembentukan Gunung lumpur

Banyak hipotesis diajukan untuk menjelaskan mekanisme pembentukan gunung lumpur. Salah satu teori menjelaskan bahwa gunung lumpur terbentuk karena meningkatnya diapir lumpur dimana suplai gas dan cairan merupakan formasi kekuatan pendorong dalam vulkanisme lumpur. Hipotesis lain yang diajukan oleh Lorenz (1975), menjelaskan gunung lumpur terbentuk karena adanya aliran cepat fluida berpori menuju serpihan plastik dan kemudian lolos dari massa yang sangat fluidized melalui patahan atau saluran struktural lainnya. Teori ini tidak mengaitkan pembentukan gunung lumpur dengan diapirisme lumpur. Namun, kedua konsep tersebut menunjukkan peran penting gas dan cairan dalam mekanisme pembentukan gunung lumpur (Yusivof, 2004).

Vulkanisme lumpur biasanya melibatkan formasi thermogenik dan pengusiran gas (proses alami yang sampai batas tertentu secara independen akan dapat memaksa material yang terkubur pada kedalaman menuju permukaan) (Akesson, 2008). Menurut Graue (2000), berdasarkan perbedaan besar yang diamati dalam bentuk, ukuran dan gaya letusan gunung lumpur, jelas bahwa tidak ada model khusus yang bisa menjelaskan semuanya.

Gunung lumpur dapat terbentuk sebagai diapir tanah liat yang mencapai dan menembus permukaan tanah atau sebagai sedimen mengandung tanah liat (argillaceous) yang terfluidisasi, bersama dengan air dan sejumlah gas hidrokarbon, yang diekstrusi sepanjang struktural patahan atau retakan (saluran, *conduit*) di dalam endapan/batuan bawah permukaan (Milkov, 2000). Syarat mendasar dalam vulkanisme lumpur adalah adanya domain sumber lumpur; berhubungan dengan lapisan pembawa argillaceous dalam migrasi fluida dan gas. Namun, untuk proses vulkanik aktual yang akan dimulai dan berlanjut yakni agar gas terbentuk dan/atau bahan sumber bergerak, naik dan bahkan diekstrusi dari bawah permukaan maka dibutuhkan kekuatan tambahan (Akesson, 2008).

Karena sebagian besar gunung lumpur yang diketahui saat ini ada di sepanjang batas lempeng yang aktif dan, lebih spesifik lagi, di sepanjang puncak anticlinal prisma akseptor (pusat pengendapan utama), kompresi melalui tektonik konvergen dan tingkat akumulasi sedimen tinggi yang terkait umumnya dianggap sebagai mekanisme utama inisiasi dan sustenance. Sedimen dan batuan argillaceous biasanya sangat lemah dan oleh karena itu, di bawah pengaruh gaya tekan, rentan terhadap berbagai perubahan mineral tanah liat dan proses dehidrasi dan melalui deformasi rapuh contohnya patahan (Hensen *et al.*, 2007). Selain itu, di bawah kondisi ini, pembentukan gas hidrokarbon termal dan/atau biogenik meningkat secara normal. Bersamaan dengan ini, terbentuklah sumber semburan, likuifaksi, fluidisasi, gasifikasi, inversi kerapatan, peningkatan tekanan pori dan migrasi bahan gunung lumpur yang disebarkan

baik melalui diapirisme atau sepanjang saluran patahan yang baru. Tekanan berlebih juga merupakan efek dari produksi gas (terutama metana) pada kedalaman yang diinduksi oleh aktivitas organogenik di dalam sedimen jenuh air yang terkubur selama subduksi atau fenomena penurunan cepat (Akesson, 2008).

Gaya/tenaga pengendali utama dalam pembentukan gunung lumpur dan diapir lumpur adalah (Dimitrov, 2002):

- 1) Gaya buoyancy internal yang disebabkan oleh pembalikan densitas api, *gasified*, ringan/bisa mengapung, lempung plastis di bawah *overburden* lebih padat
- 2) Tingginya tekanan pori-fluida, dengan syarat berkembang, gas yang terperangkap di dalam lempung plastis dan proses internal lainnya
- 3) Secara struktur atau tektonik terimbas tinggi tekanan pori-fluida

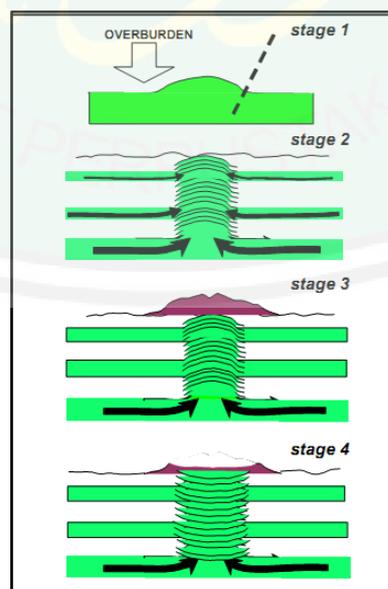
Kekuatan dan proses yang sama dapat menghasilkan ledakan gunung lumpur yang jelas di sepanjang batas benua pasif. Meskipun kekuatan tektonik kurang dalam pengaturan, kompresi, fluidisasi, gasifikasi, tekanan berlebih dan vulkanisme lumpur dapat terjadi karena pemuatan melalui kecepatan pengendapan sejumlah besar sedimen argilaceous (Milkov, 2000). Karakteristik umum untuk daerah vulkanisme lumpur yang berada di luar batas lempeng konvergen adalah ukuran mereka sangat besar pada bagian vertikal (paling tidak 2 km) dan mereka adalah campuran dari rangkaian sedimentasi (Dimitrov, 2003).

Walaupun lokal setting berbeda, mekanisme utama pembentukan gunung lumpur dan vulkanisme lumpur adalah kompresi, baik melalui kekuatan tonik

atau melalui tingkat akumulasi sedimen tinggi, yang akhirnya menyebabkan tekanan berlebih melalui pembangkit gas in situ, fluidisasi dan pencairan (Akesson, 2008).

Beberapa kondisi penting yang dibutuhkan dalam pembentukan gunung lumpur adalah (Milkov, 2000):

- 1) Kecepatan laju sedimentasi
- 2) Tebal pelindung/penutup sedimen
- 3) Adanya lapisan plastis pada *subsurface* (bawah permukaan)
- 4) Suplai gas yang cukup dan potensial tinggi hidrokarbon
- 5) Formasi tekanan tinggi secara tidak normal
- 6) Keadaan kompressional
- 7) Tingkat keempaan yang tinggi
- 8) Terjadinya/adanya patahan (*fault*)



Gambar 2.5 Proses pembentukan *mud diapir* menjadi gunung lumpur (Akhmanov and Mazzini, 2007)

Keterkaitan antara diapir dan gunung lumpur dapat terlihat dalam tahapan pembentukan diapir menjadi gunung lumpur. Berikut tahapannya (Gambar 2.6):

- a) Tahap 1 : embrionik, tahap awal deformasi serpih pada zona lemah
- b) Tahap 2 : serpih bergerak naik mendekati permukaan (fase diapirisme serpih)
- c) Tahap 3 : serpih mengalir keluar di permukaan (fase gunung lumpur)
- d) Tahap 4 : akhir dari periode aliran serpih sesuai dengan berkurangnya tekanan di bawah permukaan, diindikasikan dengan sebagian amblesan di bawah semburan gunung lumpur

Berdasarkan studi tentang gunung lumpur lepas pantai di Azerbaijan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Formasi gunung lumpur dimulai di Miosen Tengah dan menjadi lebih intensif di Pliosen
2. Akar dari banyaknya gunung lumpur di daratan adalah *Lower Cretaceous* (kapur bawah) dan *Jurassic*. Sampel batuan ini memiliki kadar aspal 0,469% sampai 2,5%
3. Gas gunung lumpur didominasi oleh metana dengan sedikit kandungan CO₂ dan hidrokarbon berat
4. Mineralisasi perairan gunung lumpur sama dengan perairan ladang minyak
5. Tinggi dan bentuk gunung lumpur bergantung pada aktivitasnya (frekuensi erupsi) dan sifat bahan letusan
6. Gunung lumpur sedikit mempengaruhi distribusi minyak dan gas dalam segi struktur

2.2.3 Pemicu Letusan pada Gunung Lumpur

Beberapa gunung lumpur mengalami aktivitas yang cukup kontinu, umumnya vulkanisme lumpur bervariasi dalam volume dan intensitas. Kebanyakan gunung lumpur memiliki beberapa jenis frekuensi letusan yang aktif (Akesson, 2008).

Setelah mempelajari vulkanisme lumpur di Cekungan Caspian selatan, Gorin and Buniatzadeh (1971) dalam Huseynov and Guliyev (2004) menyimpulkan bahwa sebanyak 60% dari semua letusan terjadi pada bulan baru atau bulan purnama. Selain itu, Mekhtiev and Khalilov (1988) dalam Huseynov and Guliyev (2004) mengemukakan sebuah hubungan antara siklus 11 tahun aktivitas matahari dan inisiasi letusan gunung lumpur (Akesson, 2008).

Meskipun siklus astronomi dapat menjelaskan sebagian besar variasi stabil pada letusan gunung lumpur, mereka tidak menjelaskan letusan yang jarang dan tidak beraturan. Ini merupakan hasil dari aktivitas seismik yang sering terjadi dan tiba-tiba. Jika letak hipersentris gempa berkaitan dengan lapisan pembawa massa lumpur, perguncangan sedimen dapat menyebabkan pencairan dan patahan serta peningkatan formasi dan disosiasi gas yang signifikan. Akibatnya, secara tiba-tiba, erupsi lumpur dapat dihasilkan di daerah gunung lumpur yang tidak mengeluarkan gas atau bahkan tidak aktif (Dimitrov, 2002). Proses yang sama juga dapat diinduksi secara antropogenik melalui proyek pengeboran skala besar. Ini kemungkinan besar yang terjadi pada erupsi gunung lumpur LUSI di Jawa pada tahun 2006 (Akesson, 2008).

Potensi bahaya dari letusan gunung lumpur diantaranya adalah *expulsion* (pengusiran) lumpur, emisi gas beracun dan pembakaran spontan gas. Fenomena berbahaya ini bisa terjadi secara tiba-tiba dan tanpa peringatan. Mereka hanya mempengaruhi daerah yang berada tepat di dekat gunung lumpur dan oleh karena itu hanya menimbulkan ancaman lokal. Namun tidak semua letusan gunung lumpur berbahaya. Adapun menurut Perusahaan Minyak Negara Republik Azerbaijan, tipe letusan gunung lumpur dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok dasar (Yusifov, 2004), yaitu:

1. *Explosive*, memiliki aliran lumpur dan gas yang kuat dan secara spontan dapat menyala
2. *Effusive*, dengan semburan sejumlah besar breksi lumpur dengan emisi gas yang tidak dinyalakan
3. *Effusive*, dengan aliran kental lumpur rendah tanpa emisi gas yang kuat
4. *Extrusive*, ekstrusi lambat lumpur kental dengan jumlah gas yang sangat tidak mencukupi (minim)

Diantara jenis letusan gunung lumpur tersebut, dua yang pertama bisa sangat berbahaya. Sedangkan yang lain memiliki kekuatan yang kurang merusak dan mungkin bisa diprediksi dengan cukup baik.

2.3 Klasifikasi Gunung Lumpur

Gunung lumpur dapat diklasifikasikan menjadi gunung lumpur aktif, mati, atau terkubur, dan semburan lumpur yang dapat menunjukkan mayoritas proses *land-building* (membangun daratan). Erupsi gunung lumpur dapat terjadi secara eksplosif atau effusive, dan keduanya bisa terjadi pada lingkungan *subaerial* dan

subaqueous. Gas hidrokarbon biasanya terpancar dan dapat menyala sendiri. Awan panas yang tingginya diatas 1 km dapat teramati selama erupsi gunung lumpur di Azerbaijan (Planke *et al.*, 2003).

Gunung lumpur aktif ditunjukkan dengan sedikitnya aktivitas tidur (*dormant*). Gunung lumpur *dormant* merupakan gunung lumpur dengan lebih banyak fase diam atau dapat dikatakan tidur, tidak ada aktifitas rembesan ataupun deformasi pada permukaan. Aktifitas rembesan lazim terjadi pada banyak gunung lumpur, penghalauan lumpur, cairan, dan gas. Aktivitas rembesan mempengaruhi pembetukan *gryphons*, kerucut lumpur, *salse* (didominasi air yang menggenang dengan rembesan gas), mata air, nyala api, dan deposit hidrokarbon. Aktifitas rembesan secara dominan adalah effusif, tetapi peristiwa eksplosif kecil juga dapat terjadi (Planke *et al.*, 2003).

Ada beberapa pola klasifikasi gunung lumpur dalam Dimitrov (2002). Diantaranya klasifikasi berdasarkan bentuk dan ukuran kontruksi gunung lumpur yang dikemukakan oleh Gubkin dan Feodorov (1940), Jakubov *et al.* (1971) dan Ivanov *et al.* (1996) serta klasifikasi gunung lumpur berdasarkan korelasinya dengan struktur patahan geologi lokal, tipe lipatan menurut Arhangelski (1932).

Kalinko (1964) dalam Dimitrov (2002) menyamaratakan data pada banyak gunung lumpur untuk mengkonsep sistem dasar klasifikasi berdasarkan karakter aktifitas gunung lumpur yang berakibat pada ekspresi morfologinya, sehingga diperoleh 3 tipe gunung lumpur, sebagai berikut:

1. Kelas I – *Lokbatan Type*.

Gunung lumpur tipe ini memiliki karakter aktivitas yang eksplosif. Pada tipe ini biasanya terjadi pembakaran pada saat gas dipancarkan. Periode pendek aktifitas disebabkan oleh periode passif yang panjang. Gunung lumpur jenis ini terdapat di Apsheron Peninsula, Azerbaijan, Laut Caspia dan Dzhuhai-Tepe. Gunung lumpur terbesar dari Kerch Peninsula, Ukraine, adalah contoh khususnya. Biasanya, pelepasan breksi lumpur dicirikan dengan rendahnya viskositas. Hal ini yang menentukan terbentuknya bentuk kerucut yang curam pada tipe ini.

2. Kelas II – *Chikishlyar Type*

Tipe ini ditandai dengan suasana tenang, relative seminggu dan aktifitas yang terus menerus. Gas dilepaskan secara terus menerus kira-kira dengan kuantitas yang sama. Lubang *vent* meludahkan sedikit lumpur dan banyak gas dan air. Ada banyak bentuk pada kelas ini. Gunung lumpur tipe ini sangat terpengaruh oleh keberadaan lapisan jenuh air pada bagian atas rentetan sedimentasi. Bentuk mereka sangat rendah (landau), membengkak atau kubah datar, yang digabungkan dengan bidang yang melingkupi, atau depresi piringan yang terbentuk sering kali menggembung ke atas dengan genangan air. Gunung lumpur tipe ini sangat banyak dijumpai di Kerch Peninsula, Ukraine.

3. Kelas III – *Schugin Type*

Kelas ini menunjukkan tipe transisi dari aktivitas gunung lumpur. Periode erupsi digantikan dengan aktifitas mingguan. Gunung lumpur tipe ini memiliki distribusi terbesar di seluruh dunia. Tipe ini dikarakteristikan dengan variasi

bentuk yang besar, tetapi kebanyakan dari mereka membentuk gabungan kawah-kawah.

Tidak ada kaitan antara tipe gunung lumpur dengan persebarannya. Ketiga tipe di atas dapat diamati pada setiap lajur gunung lumpur, tergantung pada litologi lokal dan susunan kerja tektonik dari sedimen muasalanya. Menurut Ivanov *et al.* (1996) dalam Dimitrov (2002) Gunung lumpur dasar laut sulit untuk diklasifikasikan tetapi beberapa asumsi dapat dibuat dengan mempelajari morfologinya, yakni: bentuk tubuh, struktur kawah, lelehan lumpur (aliran lumpur pada permukaan), dan sebagainya. Aktivitas gunung lumpur dasar laut dapat diprediksi dengan beberapa keanehan yang tampak pada puncaknya, yakni: emisi fluida (tampak sebagai gelembung gas dan pelepasan air atau fluks yang menyebar), indikator biologi, besar gradien geothermal, dan perbedaan antara breksi lumpur fluida berpori dan air laut (Dimitrov, 2002).

2.4 Persebaran Gunung Lumpur

Meskipun gunung lumpur paling umum terjadi sepanjang batas lempeng konvergen yang aktif, gunung lumpur juga dapat terjadi di sepanjang batas lempeng pasif, di dalam interior kontinental dan sepanjang laut dalam (Gambar 2.7). Sekitar 2000 gunung lumpur telah dikonfirmasi, namun, karena eksplorasi laut dalam berlanjut, jumlah ini diperkirakan meningkat secara substansial dengan estimasi total sekitar 7000 hingga 1 juta (Judd, 2005).

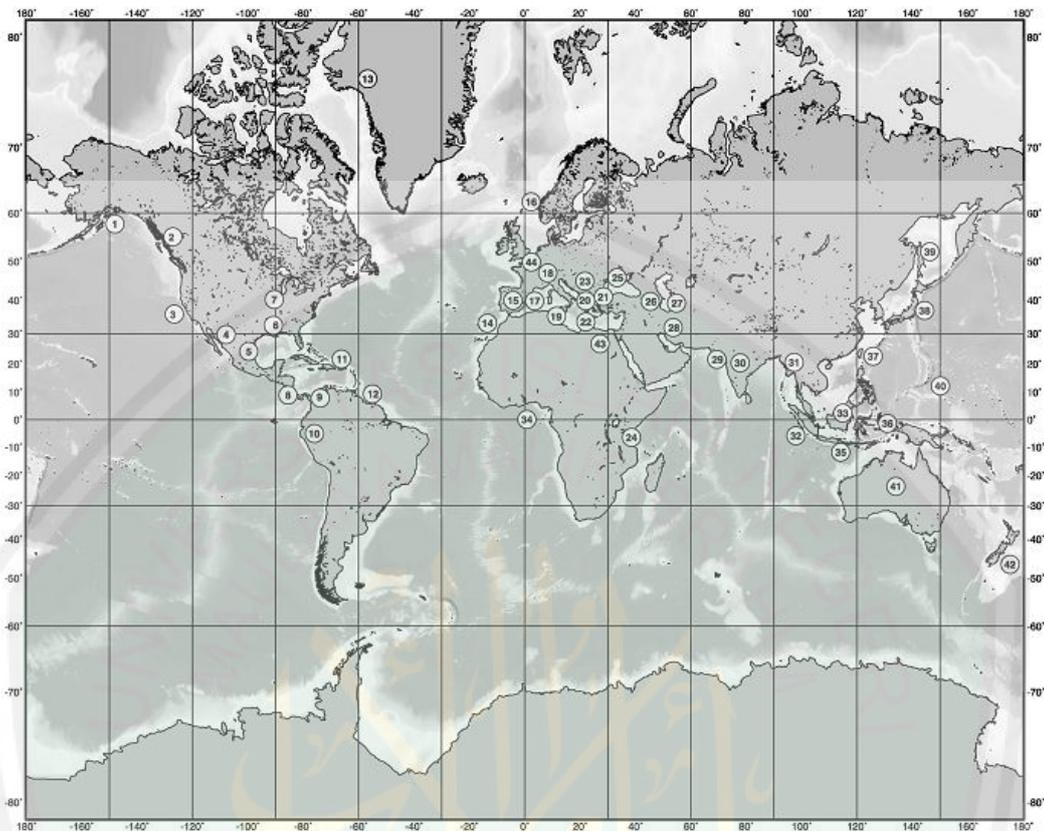
Dari semua gunung lumpur yang diketahui, lebih dari separuh (sekitar 650 di daratan, dan setidaknya 470 di lepas pantai) dapat dikaitkan dengan sabuk aktif Alpine-Himalaya. Dimulai dengan *Mediterranean Ridge*, sabuk gunung lumpur

ini terus berlanjut sampai ke pertambahan dan tubrukan Indonesia-Australia melalui Rumania dan Laut Hitam, Laut Tengah Kaukasus/Laut Kaspia, Iran, Pakistan, India dan Cina (Dimitrov, 2003).

Sisi barat samudera Pasifik - dari Pulau Sakhalin / Laut Ochotsk - daerah di utara melalui Jepang, Taiwan, Marianas, Melanesia, Samoa dan Australia sampai Selandia Baru di selatan - menampung sekitar 150 gunung lumpur darat. Jumlah total gunung lumpur lepas pantai sepanjang sabuk ini belum sepenuhnya ditentukan namun diperkirakan bisa lebih banyak lagi (Akesson, 2008).

Pada tepi timur Samudra Pasifik sangat jarang gunung lumpur. Namun, contohnya diketahui dari dan sekitar Aleenian Trench, Alaska, British Columbia, California, Costa Rica, Ekuador dan pedalaman Peru (Kopf, 2002).

Samudera Atlantik terdiri dari beberapa ratus gunung lumpur *onshore* (daratan) maupun *offshore* (lepas pantai). Sedangkan sebagian besar terkonsentrasi di sepanjang sabuk pengikat Karibia dan di dalam akresi kompleks Barbados. Kelompok/individu gunung lumpur yang lebih kecil telah dikonfirmasi sehubungan dengan Amazon dan delta Niger, di sepanjang Teluk Cadiz, di dalam lembah selatan Canary dan lepas pantai Portugal dan Maroko di DAS Alboran (Perez-Belzuz *et al.*, 1997). Sejumlah kecil gunung lumpur juga ada di Mississippi dan delta Nil, Danau Michigan, Greenland, Laut Utara dan Belanda (Kopf, 2002).



Gambar 2.6 Persebaran gunung lumpur di dunia (Kopf, 2002)

Berikut adalah lokasi persebaran gunung lumpur di seluruh dunia:

1	Aleutian Trench, Alaska Margin: Copper River Basin	23	Roumania
2	British Columbia, Canada	24	Tanzania/East Africa
3	Cascadia (Oregon, Washington)	25	Black Sea, Kerch and Crimea Peninsulas
4	California, Nevada	26	Caucasus (Taman, Georgia, Azerbaijan)
5	Mexico, Gulf of Mexico	27	Caspian Sea
6	Texas, Mississipi, Lousiana	28	Iran, Turkmenistan
7	Lake Michigan	29	Markan and Pakistan
8	Costa Rica	30	India
9	Colombia	31	Burma
10	Ecuador	32	Sumatra, Java
11	Barbados	33	Borneo, Brunei, Sabah/Malaysia

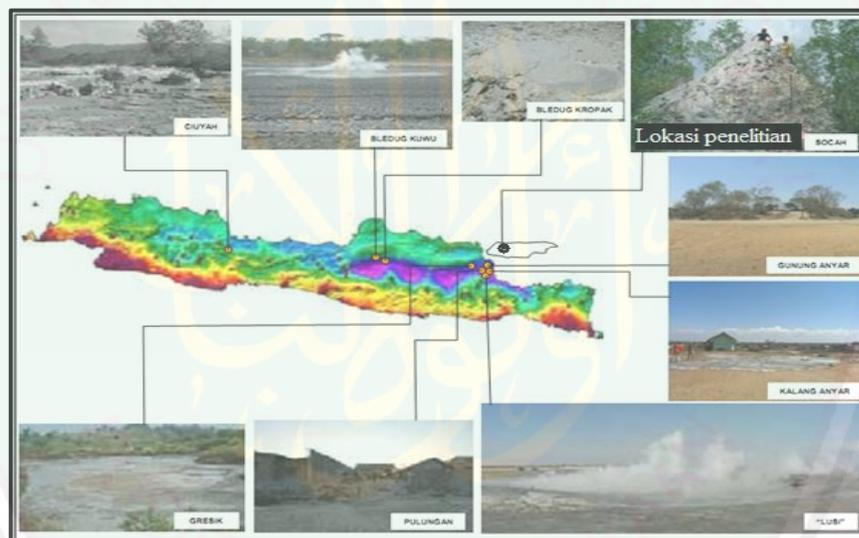
12	Venezuela and Trinidad	34	Central Australia (Gosses Bluff)
13	Greenland, North Atlantic	35	Timor-Ceram Arc
14	Morocco/North Africa	36	Irian Jaya, Papua New Guinea
15	Spain	37	Taiwan
16	Barents Sea, North Sea, Baltic Sea	38	Ryukyu Trench, Nankai, Japan Trench, Japan
17	Alboran Sea	39	Sakhalin Island/Sea of Ochotsk
18	Western Alps, Appennines/Italy	40	Marianas
19	Sicily	41	Australia
20	Peleponnesus/Greece, Adriatic Sea	42	New Zealand
21	Aegean Sea	43	Lybian Desert, Egypt
22	Eastern Mediterranean Sea	44	Netherlands
		23	Roumania

2.4.1 Gunung Lumpur di Indonesia

Indonesia merupakan salah satu diantara beberapa Negara yang memiliki cukup banyak kejadian gunung lumpur. Gunung lumpur di Indonesia tersebar di beberapa pulau, yaitu: Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Pulau Kalimantan, Pulau Timor, Pulau Semau, dan Papua. Secara keseluruhan, terdapat sekitar 50 buah gunung lumpur di Indonesia (yang sudah teridentifikasi). Goad (1816) mendiskripsikan salah satu *flat dome* di Pulau Jawa tepatnya di Grobogan, dimana lumpur dikeluarkan dari tengah puncaknya. Blummer (1922) menyebut breksi lumpur batu besar dengan sebutan *north of Langsa* (utara Langsa) (Kopf, 2002).

2.4.2 Persebaran Gunung Lumpur di Pulau Jawa-Madura

Zona Bogor, Utara Serayu, Kendeng-Madura Strait berada pada depresi aksial dari Jawa hingga Pulau Madura dengan karakteristik elisional. Sedimen Mio-Pliosen dan Pleistosen dengan cepat tersimpan di daerah depresi dan kompresi sejak dulu karena pulau Jawa-Madura berada pada lokasi batas lempeng plate konvergen. Banyak *mud diapir* dan gunung lumpur ditemukan sepanjang jalur ini (Satyana dan Asnidar 2008).



Gambar 2.7 Keberadaan gunung lumpur di Pulau Jawa dan Madura

Satyana dan Asnidar (2008) memeriksa asal-usul dan sifat dasar dari diapir lumpur (*mud diapir*) dan gunung lumpur yang ditemukan sepanjang daerah depresi ini, diantaranya adalah: gunung lumpur Ciuyah (Kuningan, bagian timur Jawa Barat), diapir Utara Serayu (bagian utara Jawa Tengah), gunung lumpur Bledug Kuwu, Bledug Kesongo, Bledug Kropak (hingga selatan Purwodadi, Jawa Tengah), diapir lumpur dan gunung lumpur di Kubah Sangiran (Jawa Tengah), LUSI (erupsi gunung lumpur, Sidoarjo, Jawa Timur), Porong, Kalang

Anyar, Pulungan (Sidoarjo), Gunung Anyar (Surabaya), Socah (Bangkalan, Madura), dan *mud diapir* dasar laut dan gunung lumpur pada Madura Strait. Pada dasarnya asal-muasalnya adalah sama, berhubungan dengan faktor-faktor pada sistem elisional.

Pulau Jawa memiliki setidaknya 14 *mud volcano*, 12 diantaranya terdapat di Jawa Timur dengan lima titik tersebar di sekitar patahan Watu Kosek (Istiadi *et al.*, 2009). *Mud volcano* yang berada di patahan Watu Kosek adalah Lumpur Sidoarjo, Porong, Pulungan, Kalang Anyar, Gunung Anyar, dan Socah. Dari lima titik gunung lumpur yang terdapat di patahan Watu Kosek, yang berpotensi bencana adalah Lumpur Sidoarjo dan gunung lumpur Gunung Anyar Surabaya. *Mud volcano* tersebut dikatakan memiliki potensi bencana karena terletak pada pemukiman padat penduduk. Untuk mengetahui kemungkinan potensi bencananya, diperlukan karakterisasi patahan Watu Kosek dan gunung lumpur Gunung Anyar Surabaya.

Madura Strait adalah sebuah lepas pantai yang merupakan perpanjangan dari Depresi Kendeng. Pada dasar model struktur dan peristiwa tektonik, menurut Widjonarko (1990) dalam Satyana dan Asnidar (2008) Selat Madura terbagi menjadi 5 struktur domain, yaitu: daerah pilinan (*wrench domain*), daerah luncur/geser (*slide domain*), daerah barat cekungan (*western basinal domain*), daerah bagian belakang cekungan (*astern basinal domain*), dan daerah tenggara blok patahan (*southeastern fault block domain*). Daerah *Wrench* dan *slide* terikat pada Madura Strait hingga Madura-Kangean di utara. *Southeastern fault block* menjadi batas selatan dari lepas pantai Madura Strait. Bagian utama

dari Madura Strait dimana diapir lumpur dan gunung lumpur yang tenang dengan barat dan timur berupa daerah cekungan.

Depresi Madura Strait atau Sub-Basin adalah satu dari dua cekungan (*basin*) yang paling dalam dan paling tebal di Indonesia, yang lainnya adalah Kutei Basin. Di daerah barat cekungan, sedimentasi sangat cepat sejak waktu Akhir Miosen muncul pada perkembangan lebih dari 3000 m bagian Plio-Pleistosen. Daerah timur lembah sugai serupa dengan daerah barat, satu-satunya perbedaan adalah daerah timur cekungan dimulai hingga surut di akhir Oligosen hingga awal Miosen, banyak yang lebih awal dari daerah barat (Satyana dan Asnidar, 2008).

Stratigrafi Madura Strait dimulai pada waktu Pertengahan Eosen dengan deposit melewati *clastics* tidak sesuai dengan basement paling atas pre-Tersier. Deposit telah diakhiri dengan peningkatan lokal ketika berakhir masa Eosen. Amblesan selama Oligosen muncul pada endapan sedimen laut dalam. Sebuah peningkatan ketika berakhirnya Oligosen yang terjadi di daerah yang tidak bersesuaian sepanjang cekungan. Selama waktu Awal Miosen laju amblesan muncul pada endapan laut dalam sedimen di area tersebut. Pada waktu pertengahan Akhir Miosen, basin telah ambles dan peningkatan yang lain mengambil alih tempat tersebut. Setelah amblesan pendek mengakhiri Akhir Miosen, sedimentasi terputus kembali dengan adanya peningkatan pada waktu Awal Pliosen. Laju amblesan di akhir waktu Pliosen dicirikan dengan penimbunan lempung tebal yang dalam keadaan tekanan berlebih (Satyana dan Asnidar, (2008).

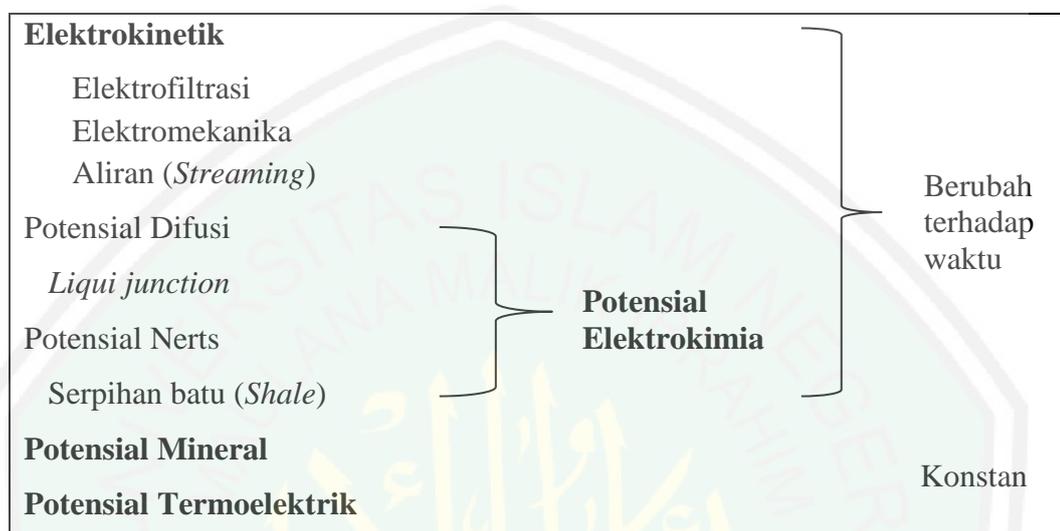
Pada area Madura Strait, sebelah timur-barat lateral kiri cenderung mengunci patahan yang mematahkan pergerakan serpih Miosen basinal selama Plio-Pleistosen dan menghasilkan rangkaian serpih diapir. Selanjutnya pada arah selatan, pengaruh dari berlangsungnya subduksi sepanjang Parit Jawa menjadi semakin signifikan dan struktur didominasi dengan mengarah langsung ke utara, yang dapat berdiri sendiri pada dasar patahan (Satyana dan Asnidar, 2008).

Sedimen muda yang sangat tebal disimpan dengan cepat dan dimampatkan dengan sistem *initiated elisional* pada depresi Madura Strait. Diapir lumpur dan gunung lumpur banyak terjadi di cekungan. Akhir-akhir ini yang diperoleh data seismik di area ini jelas terlihat dengan kehadiran diapir lumpur dan gunung lumpur submarine pada Pliosen hingga bagian Pleistosen. Kerucut klasik vulkanik bangunan gunung lumpur tipe submarine dari perkembangan tahap-3 (fase erupsi) diamati pada bagian seismik (Satyana dan Asnidar, 2008).

2.5 Potensial Diri

Potensial diri merupakan potensial yang terbentuk dari dua proses (mekanisme), yaitu proses mekanik dan proses elektrokimia. Pada proses mekanik potensial yang dihasilkan adalah potensial elektrokinetik (*streaming potential*). Sedangkan pada proses elektrokimia, potensial yang dihasilkan meliputi potensial difusi (*liquid junction*), potensial serpih (*nerts*) dan potensial mineralisasi (Telford *et al.*, 1990). Kedua proses tersebut berhubungan erat dengan pelapukan yang terjadi pada tubuh mineral, variasi sifat batuan (kandunga mineral), aktivitas biolistrik dari bahan organik, proses korosi, gradient tekanan, suhu permukaan

cairan, serta fenomena lain dari alam yang proses kejadiannya mirip (Indriana dkk., 2007).



Gambar 2.8 Bagan jenis-jenis potensial listrik

2.5.1 Potensial Elektrokinetik

Salah satu sumber potensial yang terbentuk secara alami adalah potensial elektrokinetik (*electrokinetic potential*) atau *streaming potential*. Potensial ini muncul ketika aliran fluida air (*groundwater*) melewati medium berporos. Oleh karena itu, metode potensial diri dapat digunakan dalam investigasi air tanah (*groundwater*) dan dalam aplikasi *geotechnical engineering* digunakan untuk studi perembesan air tanah (Shyahrudin dkk., 2011).

Potensial elektrokinetik bernilai kurang dari 10 mV dibentuk sebagai akibat adanya sebuah elektrolit yang mengalir melalui medium berpori atau kapiler. Potensial ini dapat diamati ketika larutan resistivitas elektrik ρ dan viskositas η terdesak melalui kapiler atau medium berpori. Besarnya resultan beda potensial antara ujung penerimanya adalah (Telford, *et al.*, 1990):

$$E_K = -\frac{\xi \Delta P k \rho}{4\pi \eta} \quad (2.1)$$

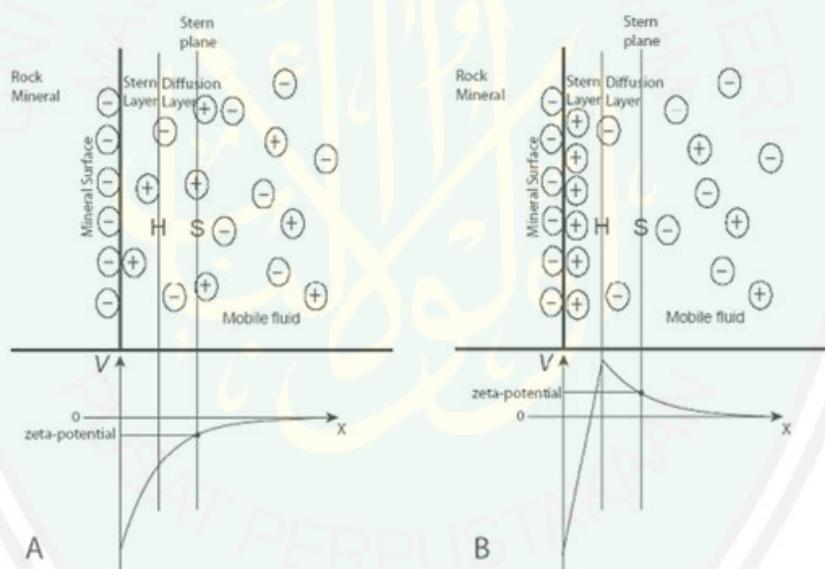
dengan

- k = Konstanta dielektrik dari elektrolit (farad/m)
- ρ = Resistivitas dari elektrolit (Ωm)
- η = Viskositas dinamik dari elektrolit (Ns/m^2)
- ΔP = Perbedaan tekanan (Nm^2)
- ξ = Potensial zeta (potensial yang muncul pada lapisan padat dan cair) (volt)

Pada saat fluida melewati medium berpori Terjadi pertukaran ion antara fluida dan partikel-partikel tanah sehingga menghasilkan anomali *streaming potential*. *Self potential* bila dihubungkan dengan adanya perbedaan gradient tegangan (*piezometrik head*), konduktivitas fluida, viskositas fluida dan potensial elektrik diantara dua lapisan (*double layer between solid and liquid phases*), akan menghasilkan efek anomali *streaming potetial* atau potensial elektrokinetik (PE) yang relatif kecil. Oleh karena itu, diperlukan alat ukur SP yang mempunyai kepekaan yang tinggi dalam millivolt (mV). Tegangan yang terukur dipermukaan karena PE yang terjadi di bawah permukaan dapat menggambarkan keadaan pergerakan air bawah permukaan di tempat pengukuran (Shyahrudin dkk., 2011).

Potensial elektrokinetik (PE) pada Gambar (2.10), adalah model *Electrical Double Layer* (EDL). EDL dibentuk dari fase antara sebuah padatan dan cairan yang ditentukan oleh sifat-sifat elektrokinetik dari bahan padat (*solid material*). Model teoritik EDL pertama kali dikemukakan oleh Helmholtz pada tahun 1879 dimana lapisan yang diam (*immobile*) mengabsorpsi ion-ion cairan (*liquid*) (Shyahrudin dkk, 2011).

Kemudian, EDL dikembangkan oleh Gouy-Chapman sebagai *stern layer* dan *diffuse layer* (Devasenathipathy and Santiago, 2003). *Stern layer* adalah lapisan yang diam (rigid) menyerap ion-ion dari diffusi layer sebagai lapisan yang bergerak karena aliran fluida. Potensial listrik yang terjadi dari EDL adalah zeta potensial (ζ). Adanya PE yang terjadi dibawah permukaan dapat dideteksi pada permukaan yang dikenal dengan anomali *self-potential* (SP). Anomali SP atau *streaming potential* tersebut menunjukkan adanya kecepatan perembesan fluida air dalam medium (Shyahrudin dkk., 2011).



Gambar 2.9 Potensial Elektrokinetik (PE) (Fagerlund & Heinson, 2003)

2.5.2 Potensial Difusi (*Liquid Junction*)

Adanya konsentrasi elektrolit dalam tanah yang bervariasi secara lokal (konsentrasinya berbeda) mengakibatkan perbedaan mobilitas anion dan kation sehingga muncul perbedaan potensial. Potensial ini disebut sebagai potensial difusi (*liquid junction* atau *diffusion potential*) (Telford, *et al.*, 1990).

Besarnya potensial ini adalah:

$$E_d = -\frac{R\theta(I_a - I_c)}{Fn(I_a + I_c)} \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (2.2)$$

dengan

I_a = Mobilitas anion (+ve)

I_c = Kation (-ve)

R = Konstanta gas (8,31 J/°C)

θ = Temperatur absolut (K)

n = ion valensi

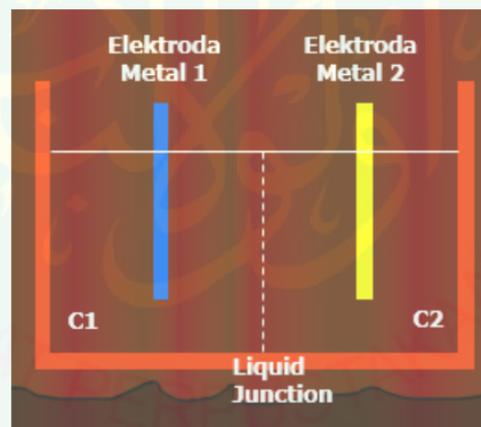
F = Konstanta Faraday ($9,64 \times 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$)

c_1, c_2 = Konsentrasi larutan (mol)

untuk larutan NaCl, $I_a/I_c = 1,49$, oleh sebab itu ketika 25°C (Telford, *et al.*, 1990),

$$E_d = -11,6 \log(C_1/C_2) \quad (2.3)$$

E_d dalam milivolt.



Gambar 2.10 Ilustrasi kejadian potensial difusi (Tambunan, 1997)

2.5.3 Potensial Lempung (*Nerts Potential*)

Potensial lempung dapat diemukan pad lapisan lempung dengan muatan minus (-) atau terjadi ketika muncul perbedaan potensial antara 2 logam identik yang dicelupkan dalam larutan yang homogen dan konsentrasi larutan masing-masing elektroda berbeda. Besarnya potensial ini diberikan oleh persamaan potensial difusi dengan syarat bahwa $I_a = I_c$ (Telford *et al.*, 1990):

$$E_s = -\frac{R\theta}{Fn} \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (2.4)$$

untuk $n = 1$, $\theta = 298$ K, persamaan ini menjadi (E_s dalam millivolt)

$$E_s = -59,1 \log(C_1/C_2) \quad (2.5)$$

Kombinasi antara potensial difusi dan potensial *nerts* disebut potensial elektrokimia atau potensial statik. Untuk NaCl ketika T°C, potensial diri elektrokimianya (dalam millivolt) adalah (Telford *et al.*, 1990):

$$E_c = -70,7 \frac{(T + 273)}{273} \log\left(\frac{C_2}{C_1}\right) \quad (2.6)$$

Ketika konsentrasi pada rasio 5:1, $E_c = \pm 50$ mV pada 25°C.

2.5.4 Potensial Mineralisasi

Ketika 2 macam logam dimasukkan dalam suatu larutan homogen, maka pada logam tersebut akan timbul beda potensial. Beda potensial yang timbul di antara kedua elektrode searah dengan potensial diri statis. Beda potensial tersebut disebut sebagai potensial kontak elektrolit. Pada daerah yang banyak mengandung mineral, potensial kontak elektrolit dan potensial elektrokimia sering timbul dan dapat diukur di permukaan dimana mineral itu berada, sehingga dalam hal ini kedua proses timbulnya potensial ini disebut juga dengan potensial mineralisasi. Potensial mineralisasi bernilai kurang dari 100 mV. Dikarenakan besarnya magnitud, potensial mineralisasi tidak dapat ditunjukkan dengan sendirinya dalam menggambarkan potensial elektrokimia lebih awal. Kehadiran logam konduktor pada konsentrasi cukup besar tampak menjadi

kondisi yang penting, namun mekanisme tepat tidak sepenuhnya jelas (Telford *et al.*, 1990).

Tabel 2.1 sumber geologi dan jenis-jenis anomalnya (Reynolds, 1997):

Sumber	Jenis anomali
<i>Potensial mineral</i>	
Sulphide ore bodies (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite, sphalerite, galena)	Negatif, 100-1000 mV
Graphite ore bodies	
Magnetite + other electronically conducting minerals	
Coal	
Manganese	
Urut kuarsa	Positif, 10-100 mV
Pegmatite	
<i>Background potential</i>	
Aliran fluida, reaksi geokimia, dll	Positif/negatif ≤ 100 mV
Efek biolistrik (tumbuhan, pohon)	Negatif, ≤ 300 mV
Gerakan air tanah	Positif/negatif, hingga 100- 1000 mV
Topografi	Negatif, hingga 2 V

Magnitude dari SP statis bergantung pada temperature; efek panas dapat disamakan pada perbedaan tekanan *streaming potential* dan sedikit penting. Korosi pada logam adalah sumber lokal potensial elektrokimia (Telford *et al.*, 1990). *Background potentials* terbentuk oleh aliran zat cair, aktivitas biolistrik pada tumbuhan dan ditimbulkan oleh perbedaan konsentrasi elektrolit pada air tanah dan aktivitas geokimia lainnya. Amplitudo yang terbentuk mempunyai variasi besar, tetapi secara umum besarnya kurang dari 100 milivolt. Secara rata-rata pengukuran potensial dengan interval beberapa ribu meter, potensialnya selalu bertambah mendekati nol atau bisa dikatakan dari positif menuju negatif. Besarnya nilai *background potentials* tergantung dari sumber-

sumber geologi yang ada di bawah permukaan sebagaimana ditunjukkan dalam tabel 2.1 (Ismulyanto, 2006).

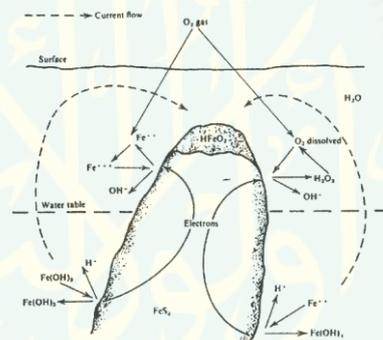
Background potentials memiliki beberapa karakteristik gradien regional. Pertama gradien potensial hasil pengukuran menunjukkan 1 milivolt per 3.050 meter dengan luasan hanya beberapa mil dan bernilai positif ataupun negatif. Hal ini diperkirakan adanya perubahan difusi dan potensial listrik pada air tanah. Nilai yang terukur dapat berubah dengan cepat dan acak pada *baseline shift* atau garis dasar *background potentials*. Gradien regional kedua yaitu, gradien regional yang mempunyai besar sama, hal ini berkaitan dengan topografi dengan nilai yang terukur selalu negatif pada puncak dan kemungkinan diakibatkan oleh adanya aliran potensial (Telfrod *et. al*, 1990).

Gradien potensial menghasilkan proses *electrofiltration*, dimana proses alami meningkat secara positif dalam arah aliran. Teori ini telah terbukti oleh percobaan laboratorium di mana potensial elektrokinetik (PE) yang dihasilkan oleh aliran air melalui medium berporos adalah linier atau berbanding lurus dengan kecepatan Darcian dengan gradien tekanan dan komposisi cairan (Bogoslovsky & Ogilvy, 1972).

2.6 Mekanisme Terbentuknya Potensial Diri

Sato dan mooney (1960) menjelaskan bahwa potensial mineralisasi dapat terjadi ketika kondisi lingkungan didukung oleh proses elektrokimia yang dapat menghasilkan potensial elektrokimia, yang disebut dengan sel galvanik. Pada tubuh mineral terjadi reaksi setengah sel elektrokimia dimana anoda berada dibawah air tanah. Pada anoda terjadi reaksi oksidasi, maka anoda merupakan

sumber arus sulfida yang berada di bawah permukaan tanah, sulfida mengalami oksidasi dan reduksi yang diakibatkan oleh H_2O dan O_2 di dalam tanah. Namun bila air tanah berada di bawah atau di atas tubuh sulfida, maka tidak akan terjadi proses elektrokimia sebagai penyebab adanya potensial elektrokimia. *Ore body* sendiri bertindak sebagai konduktor untuk memindahkan elektron. Akibatnya, arus listrik mengakibatkan perpindahan ion positif (negatif) pada larutan di daerah atas (bawah) dari *ore body* dan perpindahan elektron pada *ore body* menghasilkan pengamatan anomali negatif SP di permukaan tanah.

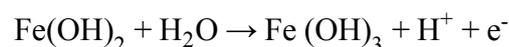


Gambar 2.11 Mekanisme *Self potential* pada pirit (Sato and Mooney, 1960)

Sato dan mooney menggambarkan aliran-aliran ion dan elektron mengalir di sekitar sulfida dan di dalam sulfida (Gambar 2.12). Jika suatu sulfida, misalnya pirit (FeS_2) di dalam tanah, maka akan timbul reaksi sebagai berikut:

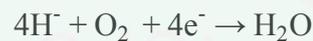


Oleh karena jumlah H_2O di sini berlebih, maka $Fe(OH)_2$ yang terbentuk masih bereaksi lagi menjadi:



Jika reaksi-reaksi ini berlangsung terus, maka disekitar sulfida akan banyak mengandung ion-ion H^+ , hal ini mengakibatkan terjadinya aliran ion negatif ke

arah bawah (tertariknya ion-ion OH^- dari atas air tanah oleh H^+ membentuk H_2O). Jika jumlah ion-ion H^+ yang terjadi banyak, maka akan mencapai daerah di atas air tanah, dan di tarik oleh O_2 untuk membentuk H_2O dengan persamaan reaksinya sebagai berikut:



Pada umumnya e^- diambil dari dalam tubuh sulfida (FeS_2). Hal ini mengakibatkan adanya aliran ion-ion positif dari atas ke bawah (di luar tubuh sulfida) dan aliran elektron dari bawah ke atas (di dalam sulfida). Untuk H_2O yang terjadi di daerah atas air tanah akan bereaksi dengan sulfida tersebut, menjadi:



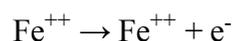
Karena jumlah H_2O di daerah ini tidak berlebihan, maka tidak akan terjadi Fe(OH)_3 , sehingga Fe(OH)_2 yang terjadi akan terurai menjadi:



Jika jumlah Fe^{++} yang terjadi banyak, maka akan dapat mencapai daerah di bawah permukaan air tanah, dan bereaksi dengan H_2O menjadi:



Dengan adanya reaksi ini akan mempercepat bertambahnya jumlah ion-ion H^+ di daerah tersebut. Jika jumlah Fe^{++} itu tidak banyak, maka akan berubah menjadi:



Teori sato dan mooney mengasumsikan bahwa daerah sulfida seharusnya merupakan penghantar yang baik untuk dapat membawa elektron dari suatu kedalaman ke daerah dekat permukaan tanah (Sato dan Mooney, 1960).

Terdapat beberapa hal yang dapat menyebabkan terjadinya potensial mineralisasi, seperti (Tambunan, 1997):

1. Medium atau lapisan tanah dengan konsentrasi ion berbeda, seperti pada lapisan pasir dan lempung atau antara medium air tawar dan air asin.
2. Perlapisan tanah dengan aliran zat cair berupa air tanah, dimana pada air tanah terdapat banyak ion yang alirannya menghasilkan potensial pada permukaan tanah kemudian sering dikenal dengan *streaming potential* atau *electrokinetic potential*.
3. Medium yang di dalamnya terdapat senyawa sulfida (mineral) dengan proses elektrokimia didalamnya yang menghasilkan potensial dan dikenal dengan potensial mineralisasi.

2.7 Metode Geolistrik *Self Potential* (SP)

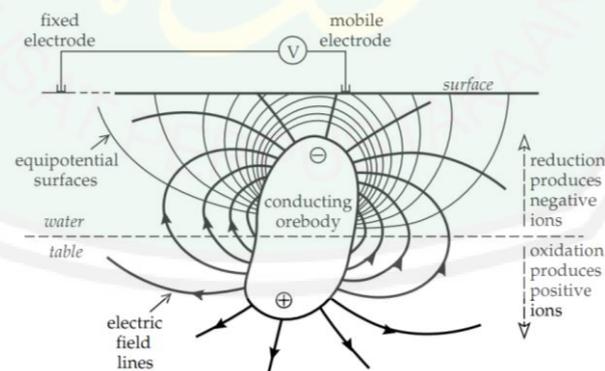
Metode ini pertama kali digunakan oleh Robert Fox pada tahun 1830 untuk menemukan daerah yang mengandung sulfida di Corn Wall, Amerika Serikat. Pengukuran yang dilakukan menggunakan lempeng tembaga sebagai elektrode dan galvanometer sebagai pengukur beda potensial yang timbul. Pengukuran pertama kali ini merupakan pengukuran yang sederhana, hanya mengukur beda potensial yang timbul di antara pasangan elektrode yang dihubungkan dengan milivoltmeter (Ismulyanto, 2006).

Metode *Self Potential* (SP) didasarkan pada perbedaan pengukuran potensial alami yang dihasilkan oleh sumber-sumber elektrokimia, elektrokinetik dan termoelektrik. Di satu sisi, sejumlah fenomena geologi dapat dipelajari dengan

metode ini dan, di sisi lain, kemungkinan memiliki beberapa sumber yang berbeda dapat membingungkan dalam mengolah data SP (Sill, 1983).

Prinsip kerja metode ini adalah mengukur tegangan statis alam (*static natural voltage*) yang berada di kelopak titik-titik di permukaan tanah (Sharma, 1977). Potensial diri umumnya berhubungan dengan pelapukan tubuh mineral sulfida (*weathering of sulphide mineral body*), perubahan dalam sifat-sifat batuan (kandungan mineral) pada daerah kontak-kontak geologi, aktifitas bioelektrik dari material organik, korosi, perbedaan suhu dan tekanan fluida di bawah permukaan dan fenomena-fenomena alam lainnya (Telford *et al.*, 1990).

Anomali SP dapat memiliki amplitudo ratusan milivolt pada tanah tandus. Potensial diri selalu menunjukkan pusat anomali negatif dan stabil selama jangka waktu yang panjang. Anomali ini biasanya berhubungan dengan deposito logam sulfida (Corry 1985), magnetit atau grafit (Kearey *et al.*, 2002).



Gambar 2.12 Model skematis sumber anomali *self-potential* tubuh bijih (Lowrie, 2007)

Metode SP pertamakali digunakan untuk menentukan daerah yang mengandung mineral logam. Setelah keberhasilan metode ini kemudian banyak

orang untuk mencari mineral-mineral logam yang berhubungan dengan mineral-mineral sulfide dan grafit. Berawal dari inilah maka banyak pakar geofisika berusaha untuk mengungkap mekanisme dari fenomena potensial mineralisasi (Indriana dkk., 2007).

2.7.1 Prosedur Lapangan

Peralatan yang dibutuhkan untuk survei potensial diri sangatlah simple. Terdiri dari digital voltmeter yang memiliki impedansi tinggi untuk mengukur beda potensial alami antara dua elektroda yang ditanam ke dalam tanah. Digital voltmeter impedansi tinggi untuk mengukur beda potensial antar dua elektroda yang ditanam dalam tanah. Reaksi elektrokimia terjadi antara logam dan unsur dalam tanah, yang disebabkan oleh bertambahnya kekuatan dari isian palsu (*spurious charges*) pada elektroda, yang dapat memalsukan atau mengaburkan potensial diri alam yang nilainya kecil. Untuk menghindari atau meminimalisir efek non-polarisasi dari elektroda yang digunakan. Masing-masing elektroda terdiri dari batang logam yang ditenggelamkan ke dalam larutan jenuh; susunan yang umum adalah batang tembaga di dalam larutan CuSO_4 . Kombinasi ditampung didalam pot keramik yang memungkinkan elektrolit merembes melalui dinding berporos dari pot keramik ini, dengan demikian dapat membuat kontak elektrik dengan tanah (Lowrie, 2007).

Resultan gaya elektrokimia pada bidang kontak antara elektroda dengan air tanah dari sebuah elektroda potensial yang ditancapkan ke dalam tanah akan membentuk potensial palsu (*spurious*), meski tidak ada arus yang melaluinya. Potensial palsu mempunyai nilai berbeda-beda antara satu tempat dengan tempat

yang lain, atau antara satu waktu terhadap waktu yang lain, sehingga sangat sulit membuat faktor koreksinya untuk mereduksi nilai potensial ini. Konsenkuensinya diperlukan elektroda yang bersifat non polarisasi, sehingga nilai potensialnya tidak dipengaruhi oleh arus yang melewatinya. Elektroda semacam ini dapat didesain dari logam penghantar yang dicelupkan ke dalam larutan jenuhnya, misalnya logam Cu dalam larutan CuSO_4 , logam Zn dalam larutan ZnSO_4 dan sebagainya. Logam dan larutan tersebut dikemas dalam sebuah container berbentuk pot berpori (porous pot). Penggunaan pot berpori dimaksudkan agar larutan dapat merembes secara perlahan sehingga membuat kontak dengan tanah.

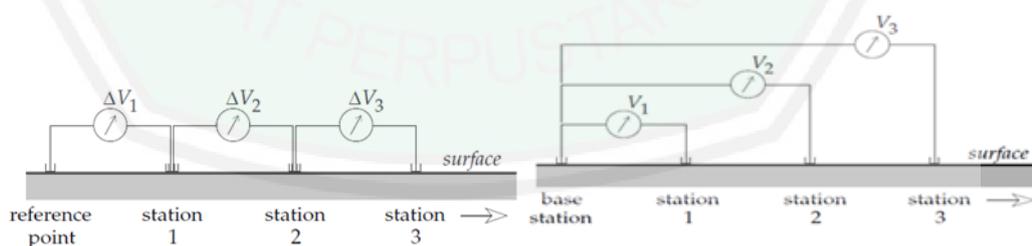
Ada dua metode lapangan yang biasa digunakan yaitu metode gradien potensial (*leap frog*) dan medan total (Gambar 2.14). Metode gradien potensial menggunakan jarak tetap antara dua elektroda. Perbedaan potensial diukur antara dua elektroda, sepasangan elektroda ini bergerak maju sepanjang garis survei yang sudah ditentukan dengan satu berada di depan (*leading*) menempati titik-titik pengukuran dan yang satu lagi berada di belakang mengikuti pergerakan elektroda *leading* dan menempati titik pengukuran yang sudah ditempati elektroda *leading*. Total potensial di sebuah stasiun pengukuran relatif ke titik awal di luar daerah penelitian ditemukan dengan menjumlahkan perbedaan potensial tambahan. Beberapa polarisasi elektroda tidak dapat dihindari, bahkan dengan elektroda nonpolarizable. Hal ini menimbulkan error kecil di setiap pengukuran; hal ini akan menambahkan error kumulatif dalam potensial total (Lowrie, 2007).

Efek polarisasi kadang-kadang dapat dikurangi dengan *interchanging leading* dan *trailing* elektroda. Error Kumulatif adalah kelemahan paling serius dari konfigurasi gradient potensial (*leap frog*). Keuntungan praktis dari teknik ini adalah hanya dibutuhkan kawat penghubung pendek untuk dipindahkan bersama dengan elektroda (Lowrie, 2007).

Metode medan total menggunakan elektroda tetap di stasiun pangkalan di luar wilayah eksplorasi dan elektroda pengukuran *mobile*. Dengan metode ini potensial total diukur secara langsung di setiap stasiun. Dibutuhkan kawat penghubung elektroda yang cukup panjang untuk memungkinkan cakupan yang baik dari daerah tertentu. Metode medan total menghasilkan error kumulatif lebih kecil dibandingkan dengan metode gradien. Hal ini memungkinkan lebih banyak fleksibilitas dalam menempatkan elektroda mobile dan biasanya memberikan data kualitas yang lebih baik (Lowrie, 2007).

a) Metode gradien (*fixed electrode spacing*)

b) Metode medan total (*fixed based*)



Gambar 2.13 Teknik lapangan metode potensial diri, (a) metode gradien dan (b) metode medan total (Lowrie, 2007).

Metode potensial diri yang di desain dengan elektroda pot berpori (*porous pot*) sangat tepat diterapkan untuk penelitian panas bumi, karena pada umumnya reservoir panas bumi berisi fluida panas yang mengandung mineral-mineral

sulfida yang bersifat konduktif. Metode potensial diri diperlukan untuk mengetahui jalur komunikasi, arah aliran air injeksi di bawah permukaan. Metode potensial diri juga sangat tepat untuk digunakan dalam memetakan distribusi anomali yang berhubungan dengan arah dan besaran relatif aliran fluida.

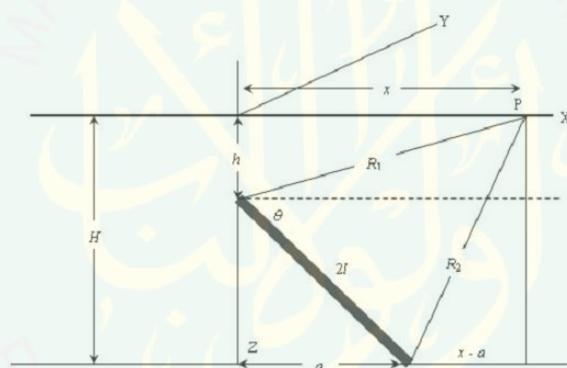
2.7.2 Data Potensial Diri

Data potensial diri mentah merupakan gabungan dari tiga komponen data dengan panjang gelombang yang berbeda. Tiga komponen data tersebut adalah *Self Potential Noise* (SPN), efek topografi (*Topographic Effect*, TE) dan potensial sisa atau residu (*Self Potential Residual*, SPR). SPN dicirikan dengan panjang gelombang yang pendek dan gradiennya yang curam karena hanya disebabkan oleh sumber yang ada di permukaan. Penyebab SPN antara lain: potensial aliran skala kecil, potensial aliran difusi serta aktivitas akar tumbuh-tumbuhan. Amplitudo SPN sangat tergantung pada vegetasi maka nilai amplitudonya menjadi tinggi di hutan yang lebat, nilainya berkurang di hutan biasa dan amplitudonya rendah pada tanah terbuka (Indriana, dkk., 2007).

Hasil pengukuran SP ke arah naik (*up hill*) menunjukkan harga potensial yang semakin positif. Sedangkan pada keadaan lainnya untuk pengukuran ke arah turun (*down hill*) berkurang. Keadaan di atas dinamakan efek topografi. Penyebab TE adalah adanya medan aliran potensial karena aliran air dari tempat yang tinggi. SP sisa dicirikan oleh panjang gelombang yang relatif panjang dan gradiennya relatif landai. Komponen inilah yang mempunyai hubungan dengan litologi bawah tanah (Sato dan Mooney, 1960).

2.7.3 Penafsiran Anomali

Anomali SP sering diinterpretasikan secara kualitatif melalui bentuk profil, amplitude, polaritas, dan pola kontur. Bagian atas dari bijih mineral diasumsikan langsung berada di bawah posisi potensial minimum atau maksimum. Jika sumbu polarisasi yaitu sumbu diantara katoda dan anoda pada bijih mineral adalah miring dari garis vertikal, bentuk profil akan menjadi asimetrik dengan kemiringan yang curam dan juga positif mengikuti keduanya berada pada sisi bawah (Pratama, 2017).



Gambar 2.14 Penampang lintang model lempeng dua dimensi (Kartini, 2005)

Lempeng miring yang tertanam dalam tanah dianggap sebagai suatu sumber anomali SP yang terletak pada kedalaman dari ujung atas (h), kedalaman ujung bawah (H) dan panjang ($2l$). Model lempeng miring ini dikembangkan oleh Rao dan Babu (1983) dengan asumsi *strike* tak terhingga. Dalam sistem koordinat kartesian O berada tepat di ujung batas lempeng, sumbu Y terletak pada arah *strike*, sedangkan sumbu Z adalah arah vertikal. *Dip* (θ) dari lempeng diukur searah jarum jam terhadap sumbu X , dirumuskan dengan persamaan:

$$V_{(x)} = M \ln \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (2.7)$$

Bila r_1 dan r_2 pada persamaan (2.7) dinyatakan dalam x , maka didapat:

$$V_{(x)} = M \ln \frac{x^2 + h^2}{(x - a)^2 + H^2} \quad (2.8)$$

Dimana $M = \frac{I\rho}{2\pi}$ dan $a = \frac{H-h}{\tan \theta}$

dengan:

- I = rapat arus persatuan panjang (A)
- ρ = resistivitas medium (Ω)
- x = jarak titik origin (0,0) ke titik P (m),
- h = kedalaman ujung atas lempeng (m)
- θ = sudut kemiringan lempeng terhadap arah horizontal ($^\circ$)

Bila ditentukan x_0 adalah $1/2$ jarak antara V_{\max} dan V_{\min} , x_s adalah jarak simetris yaitu jarak dari titik origin ke titik yang mempunyai amplitude yang sama tetapi berlainan tanda, x_{\max} adalah jarak dari titik origin ke titik yang mempunyai voltase maksimum, x_{\min} adalah jarak dari titik origin ke titik yang mempunyai voltase minimum, maka parameter-parameter dari lempeng yang terdiri dari : kedalaman ujung atas (h), kedalaman ujung bawah (H) dan sudut polarisasi sumber anomali (θ) dapat dihitung. Yaitu dengan menggunakan persamaan-persamaan yang dikembangkan dari teori Ram dan Babu (1983) dalam Kartini (2005):

$$h = (|x_{\max} \cdot x_{\min}|)^{1/2} \quad (2.9)$$

$$a = \frac{x_s - h^2}{2x_0} \quad (2.10)$$

$$H = (x_s^2 - a^2)^{1/2} \quad (2.11)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{H - h}{a} \right) \quad (2.12)$$

2.8 Geologi Regional Daerah Penelitian

2.8.1 Cekungan Jawa Timur bagian Utara

Al-Quran mengisyaratkan tentang lapisan bebatuan yang menjadi unsur terpenting bagi struktur pembentukan bumi. Lapisan ini memanjang, mulai dari permukaan bumi sampai ke dalam perut bumi, yang terdiri dari berbagai macam tingkatan bebatuan yang memiliki unsur fisika dan kimia tertentu. Al-Quran mengisyaratkan bagaimana pembentukan warna bebatuan yang terdapat di lapisan bumi disebabkan oleh reaksi kimia, seperti larutan air, pencairan, zat hidrat dan zat asam karbon (Jamal dan Jamal, 2008).

Dalam Surat Fathir ayat 27, Allah Swt berfirman:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَآخْرَجْنَا بِهِ ثَمَرَاتٍ مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهَا ۗ وَمِنَ الْجِبَالِ جُدَدٌ بَيضٌ وَحُمْرٌ مُخْتَلِفٌ
أَلْوَانُهَا وَعَرَايِبٌ سُودٌ (٢٧)

“Tidakkah kamu melihat bahwasanya Allah, menurunkan hujan dari langit lalu Kami hasilkan dengan hujan itu buah-buahan yang beraneka ragam macam jenisnya (warnanya). Dan diantara gunung-gunung itu ada garis-garis putih dan merah yang beraneka macam warnanya dan ada (pula) yang hitam pekat.” (Q.S. Fatir [35]:27).

Ayat di atas merupakan cara Allah mengingatkan tentang kesempurnaan dan kekuasaan-Nya dalam menciptakan sesuatu yang berbeda bentuknya dari unsur yang satu yaitu air yang diturunkan-Nya dari langit. Berdasarkan Tafsir Ibnu Katsir (2003) kalimat *“(وَمِنَ الْجِبَالِ جُدَدٌ بَيضٌ وَحُمْرٌ مُخْتَلِفٌ أَلْوَانُهَا)”* *“Dan diantara gunung-gunung itu ada garis-garis putih dan merah yang beraneka macam warnanya dan ada (pula) yang hitam pekat”*, memiliki makna Allah menciptakan gunung-gunung dengan warna (unsur penyusun) yang berbeda. Di

sebagian gunung-gunung terdapat jalan-jalan, yaitu (الْجُدُّ) yang merupakan jamak dari (جَدَّة) yang warnanya berbeda-beda yakni unsur penyusun yang berbeda. Ibnu Abbas r.a memaknai lafadz (الْجُدُّ) sebagai jalan-jalan, demikian pula Abu Malik, al-Hasan, Qatadah dan as-Suddi. Diantara jalan-jalan tersebut terdapat (سُوْدٌ غَرَابِيْبٌ). Ikrimah memaknai lafadz (الْغَرَابِيْبُ) sebagai gunung-gunung tinggi yang hitam, demikian pula Abu Malik, 'Atha' al-Khurasani dan Qatadah. Dalam Shihab (2003) istilah yang lumrah adalah (سَوَادٌ غَرِيْبٌ) hitam pekat, tetapi redaksi ayat ini membalikkannya untuk menggambarkan kerasnya kepekatan itu.

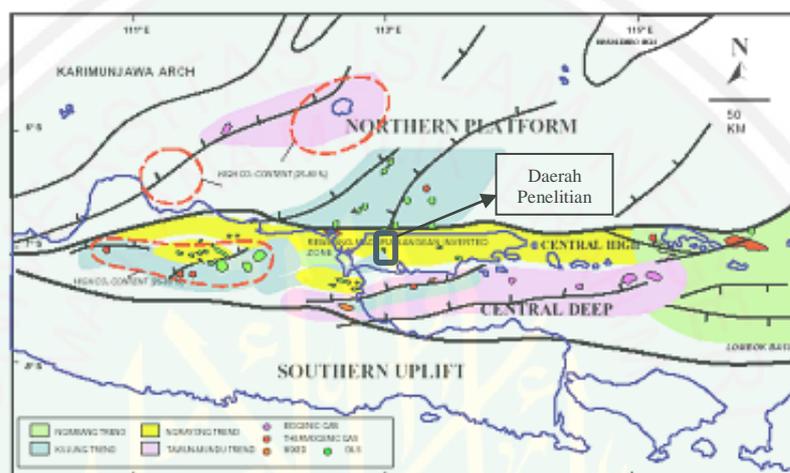
Sebagaimana yang terkandung dalam ayat di atas gunung (daratan bumi) yang tersusun dari berbagai macam warna dimana perbedaan warna dan macam-macamnya adalah indikasi unsur yang berbeda. Menurut tim penyusun tafsir al-Muntahah kemu'jizatan ayat ini dari segi ilmu pengetahuan bukan saja nampak ketika ia menyebutkan bahwa warna gunung yang bermacam-macam itu disebabkan adanya perbedaan materi-materi yang dikandung oleh bebatuan gunung-gunung itu. Jika materinya besi, maka warna dominannya adalah merah; jika materinya batubara, maka warna dominannya adalah hitam; jika materinya perunggu, maka gunung tersebut berwarna kehijau-hijauan; dan seterusnya (Shihab, 2003). Daerah penelitian termasuk dalam Zona Rembang-Madura yang merupakan bagian dari cekungan sedimentasi Jawa Timur bagian Utara (*East Java Geosyncline*). Cekungan ini terbentuk pada Oligosen Akhir yang berarah Timur-Barat hampir sejajar dengan Pulau Jawa (Bemmelen, 1949). Menurut Koesoemadinata (1978) cekungan Jawa Timur bagian utara merupakan

geosinklin dengan ketebalan sedimen tersier diperkirakan lebih dari 6000 meter. Gejala tektonik tersier muda terlihat pada cekungan Jawa Timur bagian utara berarah timur-barat.

Ada tiga tahap orogenesis di Indonesia yang berpengaruh terhadap pengendapan seri batuan Kenozoikum. Yang pertama terjadi di antara interval Kapur Akhir–Eosen Tengah, kedua pada Eosen Tengah (*Intramiocene Orogeny*) dan ketiga terjadi pada Plio-Pleistosen. Orogenesa yang terjadi pada Miosen Tengah ditandai dengan peristiwa penting dalam distribusi sedimen dan penyebaran flora dan fauna, terutama pada daerah Indonesia bagian barat. Selain itu orogenesis juga menyebabkan terjadinya fase regresi (susut laut) yang terjadi dalam waktu singkat di Jawa dan daerah Laut Jawa. Fase orogenesis miosen tengah ditandai juga oleh hiatus di daerah Cepu dan dicirikan dengan perubahan fasies yaitu dari fasies transgresi menjadi fasies regresi di seluruh Zona Rembang. Selain hal tersebut diatas, fase orogenesis ini ditandai oleh munculnya beberapa batuan dasar Pra-Tersier di daerah pulau Jawa Utara (Bemmelen, 1949).

Menurut Pringgoprawiro (1983) susunan endapan sedimen di Cekungan Jawa Timur bagian Utara dimasukkan kedalam stratigrafi Mandala Rembang dengan urutan dari tua ke muda yaitu Formasi Ngimbang, Formasi Kujung, Formasi Prupuh, Formasi Tuban, Formasi Tawun, Formasi Bulu, Formasi Ledok, Formasi Mundu, Formasi Lidah dan endapan termuda yang disebut sebagai endapan Undak Solo. Anggota Ngrayong Formasi Tawun statusnya ditingkatkan menjadi Formasi Ngrayong oleh Pringgoprawiro (1983). Status

anggota Selorejo Formasi Mundu ditingkatkan menjadi Formasi Selorejo. Sedangkan Formasi Lidah mempunyai tiga anggota yaitu Anggota Tambakromo, Anggota Malo, sepadan dengan Anggota Dander dan Anggota Turi.



Gambar 2.15 Tiga struktur utama Cekungan Jawa Timur (Satyana dan Purwaningsih, 2003).

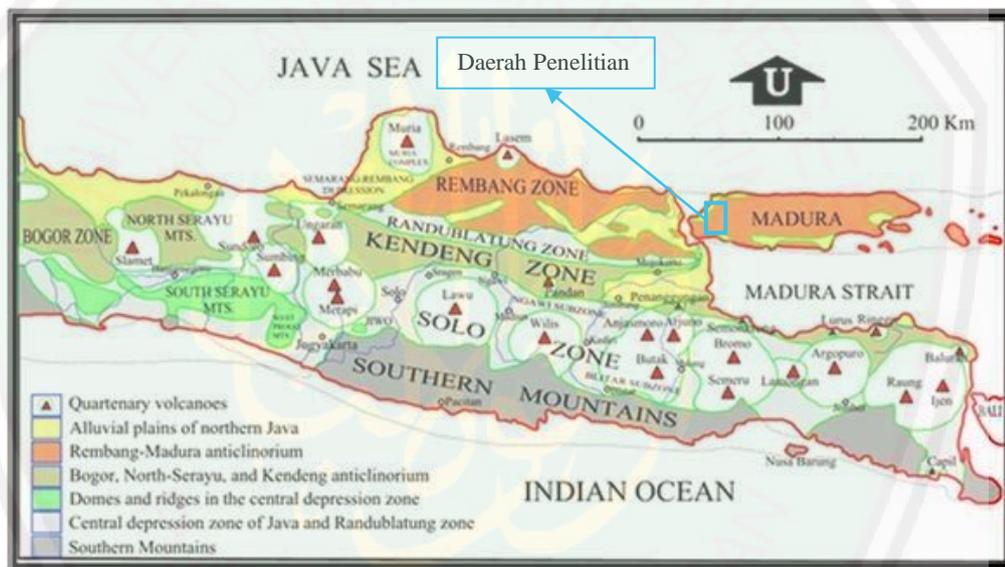
Pringgoprawiro (1983) membagi stratigrafi Cekungan Jawa Timur bagian Utara dari Zona Rembang-Madura menjadi 15 (lima belas) satuan yaitu Batuan Pra-Tersier, Formasi Ngimbang, Formasi Kujung, Formasi Prupuh, Formasi Tuban, Formasi Tawun, Formasi Ngrayong, Formasi Bulu, Formasi Wonocolo, Formasi Ledok, Formasi Mundu, Formasi Selorejo, Formasi Paciran, Formasi Lidah dan Undak Solo.

2.8.2 Fisiografi

Secara fisiografi Jawa Timur terbagi menjadi 7 satuan fisiografi (Bemmelen, 1949), satuan tersebut ke utara adalah:

- 1) Busur Vulkanik Kuarter

- 2) Dataran Aluvial Utara Jawa
- 3) Zona Rembang dan Madura
- 4) Bogor, Serayu Utara, dan Kendeng antiklinorium
- 5) Kubah dan punggung di zona depresi pusat
- 6) Zona Depresi Randublatung
- 7) Pegunungan Selatan



Gambar 2.16 Peta fisiografi regional Jawa Tengah dan Jawa Timur oleh van Bemmelen (1949)

Bagian timur Pulau Jawa dan Pulau Madura merupakan perpanjangan kearah timur dari Zona antiklinorium Rembang di Utara dan Zona Kendeng di Selatan (Bemmelen, 1949). Selat Madura dengan kedalaman lebih dari 100 m dan lebar maksimum 68 km, membentuk kemenerusan zona antiklinorium Rembang yang menuju ke arah timur di bawah Delta Brantas (Mojokerto). Sedangkan Zona Kendeng dibentuk oleh jalur pegunungan yang merupakan

kemenerusan dari pegunungan Serayu Utara di Jawa Tengah, dengan panjang 250 km dan lebar 40 km.

Ditinjau dari fisiografinya, daerah penelitian berada dalam Zona Rembang-Madura. Zona ini meliputi pantai utara Jawa yang membentang dari Tuban ke arah timur melalui Lamongan, Gresik, dan hampir keseluruhan Pulau Madura. Daerah datarannya berundulasi dengan jajaran perbukitan yang berarah barat-timur dan berselingan dengan dataran aluvial. Lebar rata-rata zona ini adalah 50 km dengan puncak tertinggi 515 m (Gading) dan 491 (Tungangan). Litologi karbonat mendominasi zona ini. Aksesibilitas cukup mudah dan karakter tanah keras.

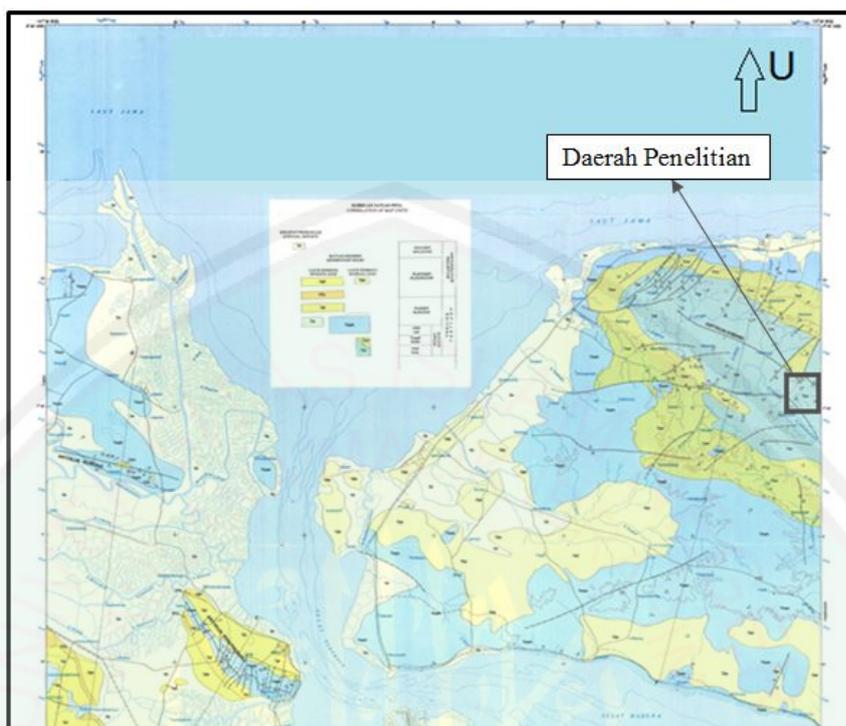
Jalur Rembang-Madura tersusun dari pegunungan lipatan berbentuk Antiklinorium yang memanjang ke arah Barat–Timur, dari Kota Purwodadi melalui Blora, Jatirogo, Tuban sampai Pulau Madura. Morfologi di daerah tersebut dapat dibagi menjadi 3 satuan, yaitu Satuan Morfologi dataran rendah, perbukitan bergelombang dan Satuan Morfologi perbukitan terjal. Punggung perbukitan yang terbentuk umumnya memanjang berarah Barat–Timur, sehingga menjadikan banyak pola aliran sungai hampir sejajar (sub-parallel) dan sebagian berpola mencabang (*dendritic*).

2.8.3 Stratigrafi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian termasuk dalam Formasi Tawun (Gambar 2.16). Bagian bawah Formasi ini terdiri dari batulempung gampingan. Bagian atas terdiri dari napal pasiran bersisipan batugamping dan batupasir gampingan. Batu lempung gampingan berwarna kelabu tua-muda, dan dijumpai bintal gampingan.

Tanahnya berwarna coklat muda-kekuningan, berkarbon, pelapukannya menyuban dan struktur kerucut-dalam-kerucut. Bantal gampingan, berwarna coklat tua-kelabu dan tebalnya antara 4 cm sampai 10 cm dengan panjang antara 5 cm sampai 40 cm dan pada umumnya pejal. Napal pasiran berwarna kelabu, agak keras, pelapukannya membundar serta berkarbon. Tanah lapukannya berwarna coklat muda-kekuningan (Supandjono, 1992).

Batuannya kaya akan fosil plangton dan umumnya pejal serta berstruktur kerucut-dalam-kerucut. Sisipannya batu gamping, ada yang berbutir kasar dan halus, mempunyai warna kelabu muda. Bila lapuk berwarna coklat kekuningan. Tebalnya antara 5 cm sampai 40 cm, berstruktur aliar dan silang-siur. Yang berbutir halus, berwarna kelabu tua; bila lapuk, berwarna coklat kekuningan; tebal sisipan antara 10 dan 15 cm; kaya akan fosil foraminifera besar dan moluska. Batupasir gampingan berwarna coklat kekuningan; keras; berbutir sedang; terpilah buruk, membundar tanggung-menyudut; mengandung karbon dan sedikit damar; berfosil forum besar dan moluska (Supandjono, 1992).



Gambar 2.17 Peta Geologi daerah Sapuluh Madura (Supandjono, 1992)

Keterangan:

Qa	Aluvium	: Kerakal, kerikil, pasir, lempung, dan pecahan cangkang fosil.
Qpp	Formasi Pamekasan	: Batupasir coklat kemerahan, bercak-bercak kelabu, lunak, berbutir kasar, batulempung kelabu, mengandung pecahan cangkang moluska, konglomerat, komponen utama batugamping, lunak.
Tpl	Formasi Lidah	: Batulempung biru, kehitaman, kenyal, pejal, dan keras bila kering, miskin fosil.
Tpm	Formasi Madura	: Bagian atas: Batugamping terumbu, putih, pejal, berongga halus, setempat berlapis buruk, mengandung foram besar dan pecahan ganggang, tanahnya kecoklatan atau kehitaman. Bagian Bawah: Batugamping kapuran, sangat ringan, agak keras, putih kekuningan, pejal, mengandung moluska, foram besar dan pecahan ganggang.
Tmw	Formasi Watukoceng	: Pasiran dengan batugamping, batupasir kuarsa bersisipan batu gamping orbitoid dan batu pasir berlapis tipis

Tmt	Formasi Tawun	: Napal pasiran bersisipan batugamping dan batupasir gampingan, batulempung gampingan
	Lokasi	: Semburan lumpur Bujhel Tasek

Foraminifera yang terdapat dalam satuan ini adalah: *Globigenirous subuadratus*, *Globigerinoides trilobus*, *Globigerinoides quadrilobatus*, *Globigerinoides immaturus*, *Globoquadrina altispira*, *Globorotalia siakensis*, *Lepidocyliina* sp., *Miogypsina* sp., *Amphistegina* sp., *Eponides* sp., *Shiponinia* sp., *Amonia* sp., *Anomalina* sp., *Tectularia* sp., *Operculina* sp., dan *Lenticulina* sp. Kumpulan fosil tersebut menunjukkan umur miosen Awal-Tengah atau Zona N5-N13 yang diendapkan dalam lingkungan sublitoral. Formasi ini tersebar luas di pulau Madura bagian utara, barat, utara dan di selatan tertindih formasi watukoceng, ke timur meluas ke Lembar Tanjungbuni dan Pamekasan. Di Kabupaten Pancaran, di utara Kombangan tebalnya tidak kurang dari 1000 m (Supandjono, 1992).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian



Gambar 3.1 Lokasi penelitian, semburan lumpur Bujhel Tasek di desa Katal Barat, Kecamatan Geger, kabupaten Bangkalan (Sumber Google Earth 2017 diakses pada tanggal 21 September 2017)

Penelitian dilaksanakan pada tanggal 30 – 31 mei 2015. Lokasi penelitian terletak di daerah sumber lumpur Bujhel Tasek desa Katal Barat 1 kecamatan Geger kabupaten Bangkalan, tepatnya pada sekitar koordinat $-6^{\circ}59'41.03''$ LS $112^{\circ}58'22.53''$ BT (koordinat Bujhel Tasek Bini) dan $-6^{\circ}59'33.39''$ LS $112^{\circ}58'10.93''$ BT (koordinat Bujhel Tasek Laki).

3.2 Alat dan Bahan

Agar penelitian dapat berjalan dengan baik dan lancar, diperlukan alat dan bahan yang mendukung dalam pelaksanaan penelitian ini. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian adalah:

Tabel 3.1 Alat dan bahan

No	Nama alat	Jumlah
1	Elektroda pot berpori, dari kawat tembaga yang di bungkus dalam keramik gerabah dengan ukuran diameter 10 cm dan panjang 20 cm	10 buah
2	Kabel konektor, panjang 50 cm	4 buah
3	Kabel gulung, panjang 200 m	2 buah
4	Capit buaya	8 buah
5	Kristal (CuSO_4)	2 kg
6	Akuades (H_2O)	5 liter
7	Peta Geologi	1 set
8	Digital multimeter	2 buah
9	Rol meter, panjang 100 m	1 buah
10	GPS	1 buah
11	Laptop	1 buah
12	Software Excel 2003	1 paket
13	Software Surfer versi 11	1 paket
14	Buku catatan dan alat tulis	1 Set

3.3 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Self Potential* dengan konfigurasi elektroda berjalan. Dengan menggunakan dua elektroda berjalan dan dua elektroda yang tetap. Jarak antara dua elektroda adalah 10 m. Pengukuran elektroda berjalan dimulai dari sumber lumpur perempuan menuju sumber lumpur laki-laki. Dan lintasan kedua elektroda berjalan dimulai dari sumber lumpur laki-laki menuju sumber lumpur perempuan dengan jalur lintasan berbeda dari sebelumnya.

3.4 Prosedur Penelitian

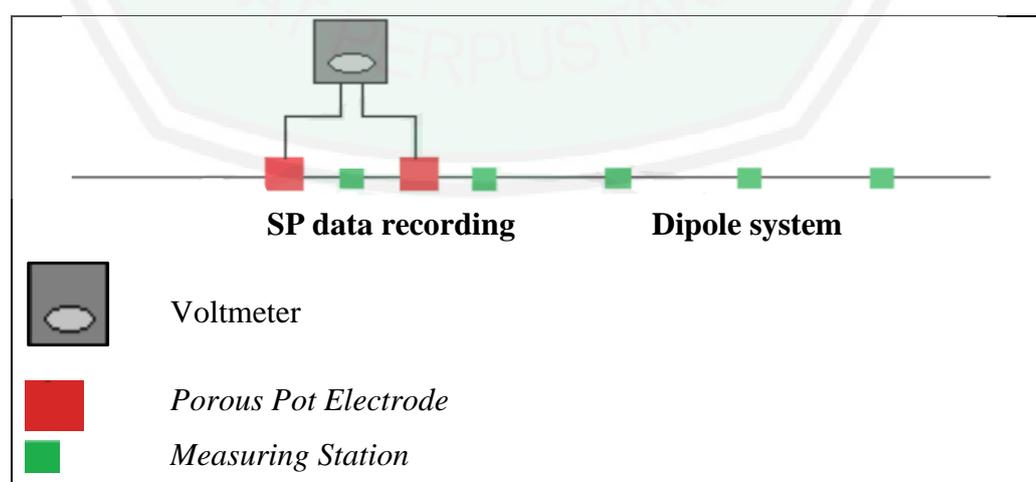
Metode penelitian yang dilakukan di lapangan yaitu metode *Self potential*. Prosedur penelitian yang perlu dilakukan ada 4 tahap, yaitu: kalibrasi alat, pengambilan data, pengolahan data, dan interpretasi data.

3.4.1 Kalibrasi Alat

Tujuan kalibrasi alat adalah untuk memperoleh data lapangan yang akurat. Kalibrasi elektroda non polarisasi dilakukan dengan cara menanam kedua elektroda ke tanah dengan jarak yang relatif dekat (10 cm). Kemudian nilai potensial diukur dengan hasil yang diperoleh harus < 2 milivolt. Apabila nilai potensial > 2 milivolt, maka kedua elektroda pot berpori harus dibersihkan, kemudian diisi kembali dengan larutan CuSO_4 dengan konsentrasi yang sama di antara kedua elektroda tersebut. Hal ini akibat elektroda pot berpori tidak bersih atau larutan bocor (Indriana, dkk. 2007).

3.4.2 Akuisis Data di Lapangan

Pengukuran data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan digital multimeter yang memiliki impedansi masukan tinggi untuk mengabaikan arus dari bumi selama proses pengukuran. Konfigurasi elektroda yang dipergunakan adalah model konfigurasi elektroda berjalan.



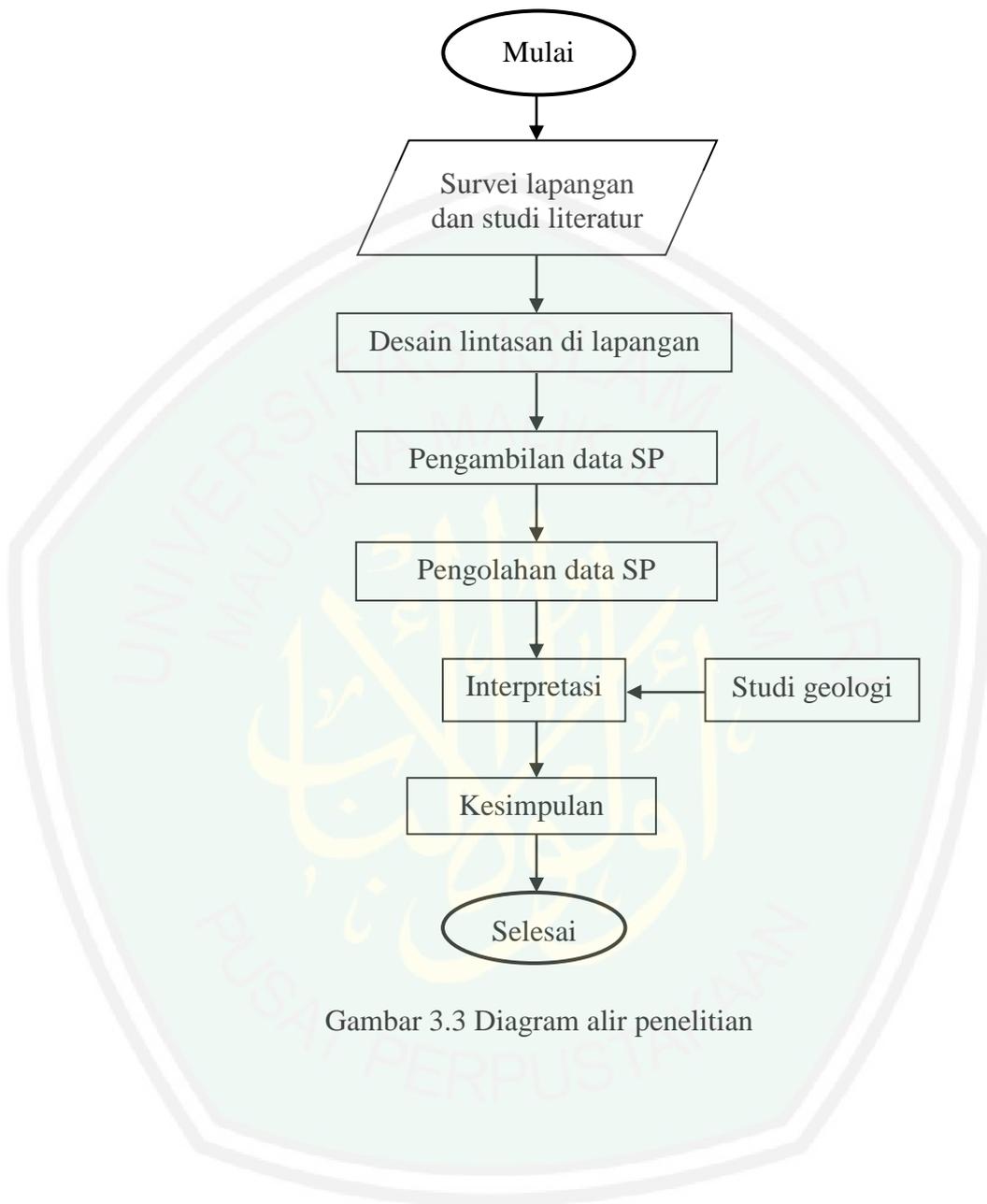
Gambar 3.2 Pengukuran Potensial Diri Metode Gradien Potensial (Sarkowi, 1995)

3.4.3 Pengolahan Data

Data yang diperoleh dilapangan adalah nilai potensial antara 2 elektroda berjalan yang terbaca pada digital multimeter. Data potensial diri yang diperoleh di lapangan belum menunjukkan potensial diri di tempat tersebut. Sehingga perlu dilakukan koreksi, salah satunya adalah koreksi *leap frog*. Selain itu karena lokasi penelitian merupakan daerah dengan topografi tidak datar, dimana potensial diri sangat dipengaruhi oleh pergerakan fluida bawah permukaan, sehingga dilakukan koreksi topografi (koreksi *streaming potential*).

3.4.4 Interpretasi Data

Potensial diri yang telah terkoreksi dapat diinterpretasikan secara kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi kualitatif dilakukan dengan mempergunakan *software* surfer 11. Hasil keluaran *software* surfer 11 berupa peta kontur isopotensial sehingga diketahui bagaimana pola anomali potensial diri di daerah penelitian serta kedalaman sumber anomalnya. Interpretasi kuantitatif dilakukan untuk mengetahui geologi bawah permukaan dan pola persebaran aliran lumpur daerah Bujhel Tasek Bini dan Laki berdasarkan data potensial diri yang didapat, serta mengidentifikasi tipe *mud volcano* dari Bujhel Tasek Bini dan Laki berdasarkan literatur.



Gambar 3.3 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode *self potential* (SP) merupakan salah satu metode eksplorasi dalam geofisika yang memanfaatkan potensial alami yang terbentuk di alam. Metode SP merupakan metode yang sangat sederhana dan simple dalam prakteknya. Data yang diperoleh berupa beda potensial yang terjadi antara dua elektroda yang di tanam dalam tanah. Beda potensial tersebut terbentuk akibat reaksi antara elektroda pot berporos dengan potensial diri yang ada di alam (yang terkandung dalam tanah). Metode SP sangat responsif terhadap pergerakan fluida dalam tanah.

Pada bab IV ini akan ditunjukkan hasil yang diperoleh dari kegiatan penelitian di lapangan berupa: koordinat posisi (lintang, bujur dan ketinggian), potensial diri (mV) dan interpretasi beserta analisis data yang diperoleh. Sesuai dengan hasil analisis dan pembahasan pada bab ini, kemudian akan dapat ditarik beberapa kesimpulan pada bab selanjutnya.

4.1 Akuisisi Data

Penelitian dilakukan dengan metode *self potential* (SP) konfigurasi elektroda gradient potensial (*leap frog*) (Gambar 3.2). Satu paket elektroda terdiri dari pot berpori (*porous pot*), larutan kovalen CuSO_4 dan kawat tembaga (Cu). Pengambilan data dilakukan dengan menanam dua elektroda dalam tanah dengan jarak antara keduanya adalah 10 m. Kedua elektroda dihubungkan dengan kabel penghubung dan untuk membaca potensialnya maka dipasang juga digital voltmeter diantara sambungan kedua elektroda.

Lintasan pertama adalah lintasan yang menghubungkan antara Bujhel Tasek Bini dengan Bujhel Tasek Laki, lintasan ke-2 adalah jalur yang menghubungkan antara Bujhel Tasek Laki dengan Bujhel Tasek Bini. Selama sepasang elektroda berjalan mengukur potensial diri pada titik-titik pengukuran (lintasan 1 dan 2), satu pasang elektroda lain di letakkan di titik tetap dekat dengan semburan Bujhel Tasek Bini dan mencatat potensial diri setiap selang waktu 5 menit.

Lintasan ke-3 berada di dekat (selatan) Bujhel Tasek Bini dan satu pasang elektroda lagi diletakan di titik tetap dekat dengan Bujhel Tasek untuk mengukur potensial diri selama proses pengukuran potensial diri pada lintasan ke-3.

Lintasan ke-4 berada di dekat (barat laut) Bujhel Tasek Laki dan satu pasang elektroda lagi diletakan di titik tetap dekat dengan Bujhel Tasek Laki untuk mengukur potensial diri selama proses pengukuran potensial diri pada lintasan ke-4.

Selama proses pengukuran, data yang diperoleh dan dicatat meliputi nilai potensial diri (mV), waktu pengukuran (dalam jam dan menit), posisi titik pengukuran (lintang, bujur dan elevasi) yang diukur dengan menggunakan GPS Garmin.

4.2 Hasil dan Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari akuisisi data metode *self potential* di lapangan berupa potensial diri (mV) yang diakibatkan oleh proses mekanik dan elektrokimia. Besar nilai potensial diri terukur dapat dilihat pada lampiran 1. Terlebih dahulu data mentah dikoreksi dengan koreksi *leap frog* dan koreksi topografi (*streaming potential*). Setelah diperoleh data terkoreksi, data diproses

dengan *software* Surfer 11. Hasil dari pengolahan data dengan *software* Surfer 11 berupa peta kontur isopotensial yang menggambarkan pola persebaran potensial diri di lokasi penelitian, daerah semburan lumpur Bujhel Tasek. Untuk selanjutnya dapat dilakukan analisis secara geologi berdasarkan data SP dan literatur.

4.2.1 Sebaran Nilai Potensial Diri

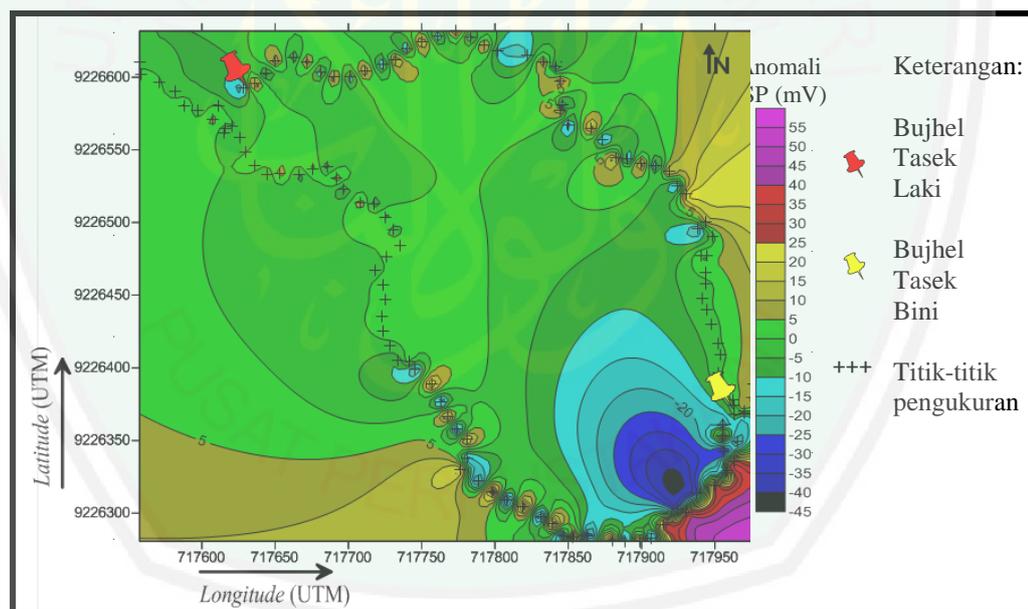
Akuisisi data dilakukan dengan konfigurasi elektroda gradien potensial (*leap frog*) dan diperoleh 124 data. Konfigurasi ini dilakukan dengan jarak tetap antara elektroda, 10 m. Perbedaan potensial diukur antara elektroda, sepasang elektroda bergerak maju sepanjang garis survei yang telah ditentukan dimana salah satu elektroda mengikuti elektroda lain (yang berada di depan) dan menempati lokasi (titik pengukuran) yang sebelumnya telah ditempati oleh elektroda depan dan begitu seterusnya (Lowrie, 2007).

Data potensial yang diperoleh (data mentah) merupakan gabungan dari tiga komponen data dengan panjang gelombang yang berbeda, yaitu potensial diri *noise* (SPN), efek topografi (*Topographic Effect*, TE) dan SP sisa atau residu (*residual* SP, SPR). Oleh karena itu perlu dilakukan koreksi data. Koreksi yang dilakukan meliputi koreksi *leap frog* dan topografi. Koreksi topografi dilakukan karena area penelitian berada pada daerah dengan topografi tidak rata (memiliki ketinggian berbeda-beda) atau perbukitan.

Persebaran nilai SP yang telah dilakukan koreksi diolah menjadi peta isopotensial. Gambar 4.1 merupakan hasil pengolahan data menggunakan *software* Surfer 11 yang menggambarkan distribusi potensial diri di area penelitian, semburan lumpur Bujhel Tasek. Besar kecilnya nilai potensial diri

yang terukur di suatu tempat dapat dipengaruhi oleh aliran fluida bawah tanah, pelapukan bahan-bahan organik, proses korosi, dan proses mineralisasi pada tubuh mineral.

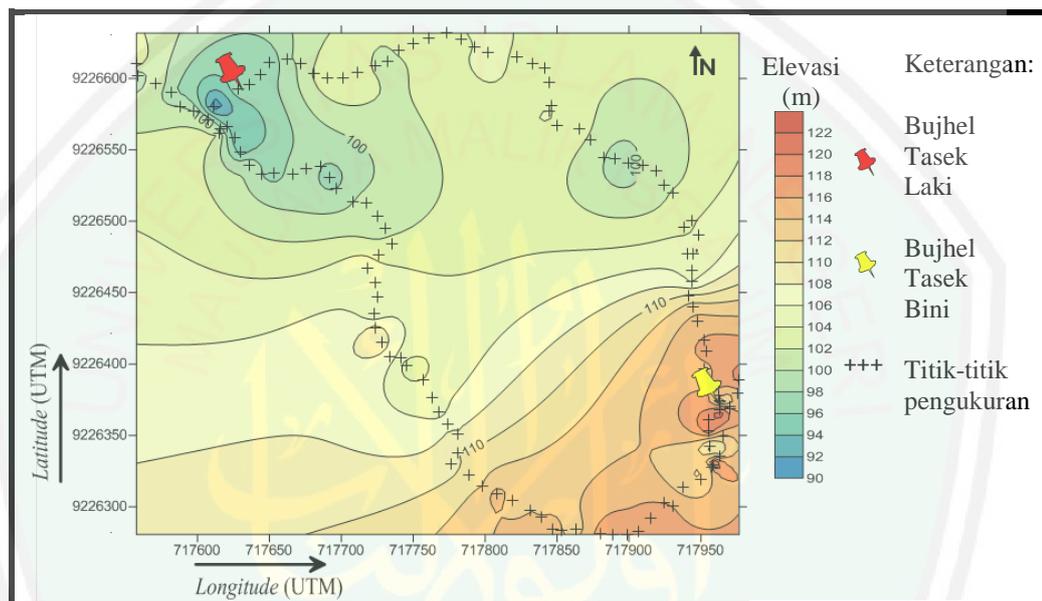
Berdasarkan gambar 4.1 menunjukkan adanya anomali di daerah penelitian dengan nilai potensial berkisar -42.6211mV sampai dengan 42.629mV . Jenis anomali dengan rentang ini dapat disebabkan oleh *background potential* (nilai potensial target) yang bersumber dari fluida yang mengalir, aktivitas bioelektrik dalam vegetasi, variasi konsentrasi elektrolit dalam air tanah, dan aktivitas geokimia lainnya (Tabel 2.1).



Gambar 4.1 Peta kontur isopotensial daerah Bujhel Tasek

Berdasarkan gambar 4.1 zona potensial diri terkecil berada dekat dengan Bujhel Tasek Bini, yakni pada arah barat daya Bujhel Tasek Bini. Potensial diri yang berada pada titik pengukuran sekitar Bujhel Tasek Laki memiliki nilai sekitar -2 mV hingga 4 mV . Secara keseluruhan daerah penelitian memiliki anomali potensial diri negatif, sehingga termasuk dalam zona konduktif. Zona

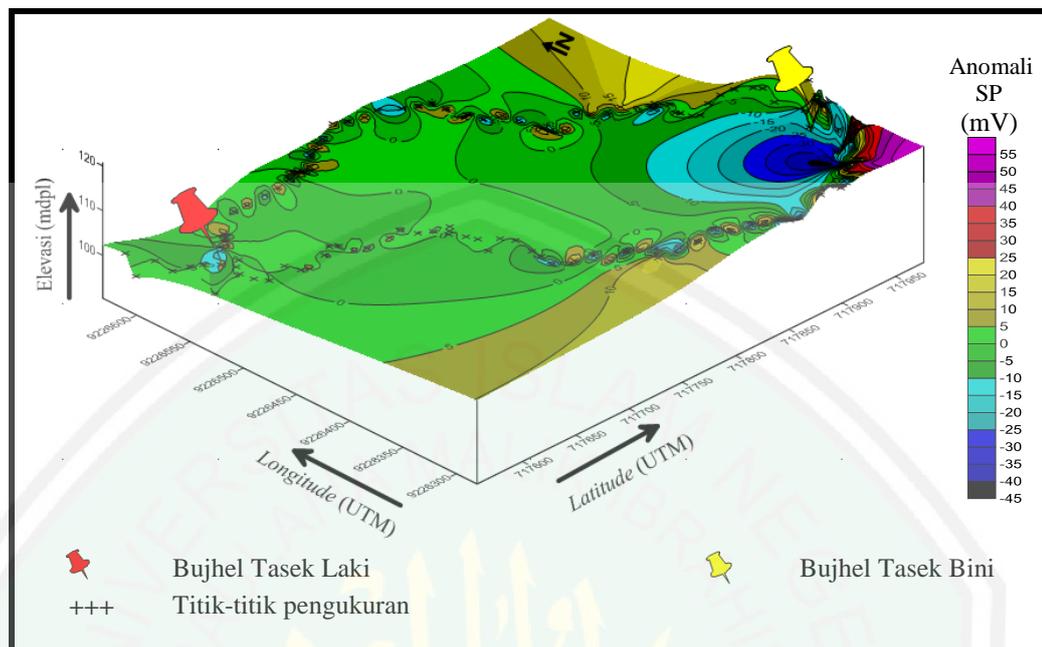
anomali potensial paling negatif terukur di arah barat daya Bujhel Tasek Bini dengan nilai potensial diri terendah $-42,62$ mV. Sedangkan untuk anomali potensial diri tertinggi berada pada arah selatan Bujhel Tasek Bini dengan nilai potensial diri mencapai $42,63$ mV.



Gambar 4.2 Peta kontur ketinggian daerah penelitian

Melihat gambar 4.2 Bujhel Tasek Bini berada pada daerah dengan ketinggian kurang lebih 116 m. Sedangkan daerah Bujhel Tasek Laki berada pada ketinggian sekitar 102 m, lebih rendah dari Bujhel Tasek Bini.

Anomali potensial diri juga dipengaruhi oleh topografi yang secara langsung mempengaruhi kontrol aliran fluida pada suatu wilayah. Seperti yang dikemukakan oleh Hamzah dkk. (2008), semakin kecil anomali potensial diri (bernilai negatif) maka akumulasi aliran air ke lokasi tersebut relatif semakin besar.



Gambar 4.3 Peta kontur isopotensial 3D

Bujhel Tasek Bini berada pada daerah yang lebih tinggi jika dibanding daerah sekelilingnya. Hal ini menjadikan aliran fluida disekitar Bujhel Tasik Bini cukup besar sehingga gradien potensialnya cukup besar pula. Struktur geologi mempengaruhi terbentuknya potensial diri. Daratan yang terbentuk dari hasil semburan lumpur akan memiliki kenampakan luar yang menonjol dengan daratan asli daerah sekitar. Hal ini juga menimbulkan gradien potensial yang tinggi.

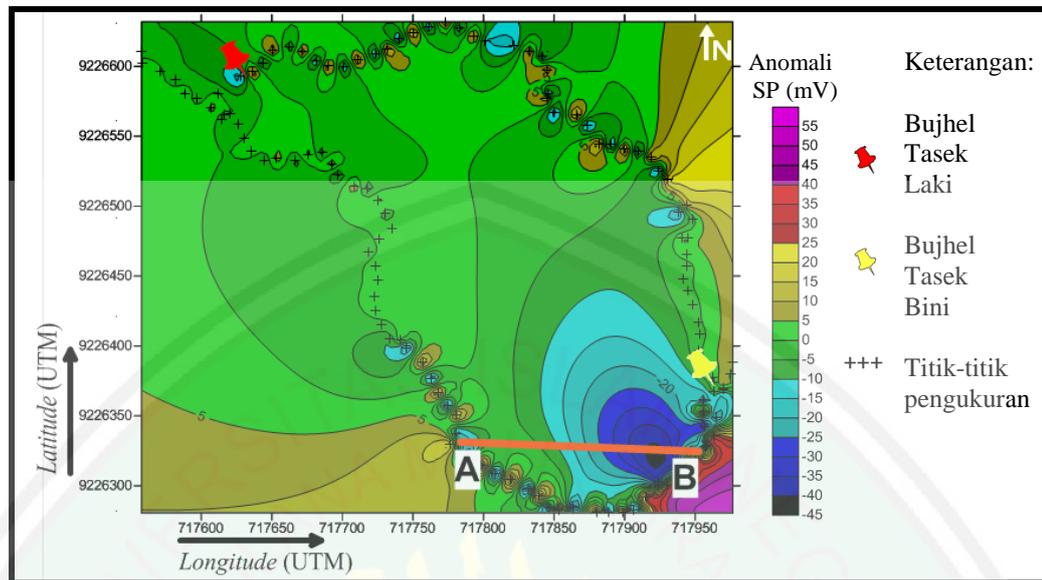
4.2.2 Penampang Melintang Peta Kontur Isopotensial

Bujhel Tasek terletak pada Jalur Rembang-Madura yang merupakan sedimentasi dari Cekungan Jawa Timur bagian Utara. Jalur ini terdiri dari pegunungan lipatan berbentuk Antilinerium yang memanjang ke arah Barat-Timur dari kota Purwodadi melalui Blora, Jatirogo, Tuban hingga Pulau Madura. Daerah penelitian memiliki morfologi permukaan berupa perbukitan

bergelombang dengan struktur tanah yang didominasi oleh batu kapur dan struktur bawah permukaan berupa lempung dan batu kapur (gamping) (Hurun, 2016).

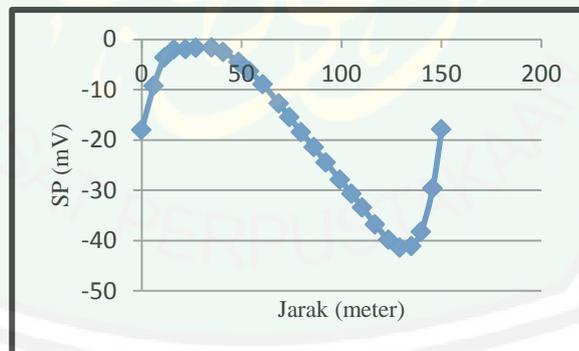
Interpretasi kuantitatif dilakukan untuk menentukan parameter dari benda penyebab anomali sehingga didapatkan kedalaman serta sudut polarisasi. Untuk mendapatkan kedalaman serta sudut polarisasinya terlebih dahulu dibuat tampang melintang pada daerah yang diperkirakan terdapat sumber anomali atau lokasi dengan klosur tertutup sehingga didapat kurva profil yang menggambarkan keberadaan sumber anomali SP. Bagian atas dari bijih mineral diasumsikan langsung berada di bawah posisi potensial minimum atau maksimum (Pratama, 2017).

Terlebih dahulu dilakukan slice kontur isopotensial dengan surfer 11 kemudian hasil slicing yang berupa jarak dan potensial diproyeksikan ke koordinat kartesian sehingga diperoleh kurva profil sayatan. Selanjutnya dapat dilakukan pencocokan dan perhitungan dengan metode *kurve matching* model lempeng miring. Perhitungan nilai parameter-parameter benda penyebab anomali meliputi kedalaman ujung atas (h), kedalaman ujung bawah (H) dan sudut polarisasi (θ) dengan menggunakan rumus (2.9), (2.10), (2.11), dan (2.12).



Gambar 4.4 Peta kontur isopotensial dengan sayatan A-B

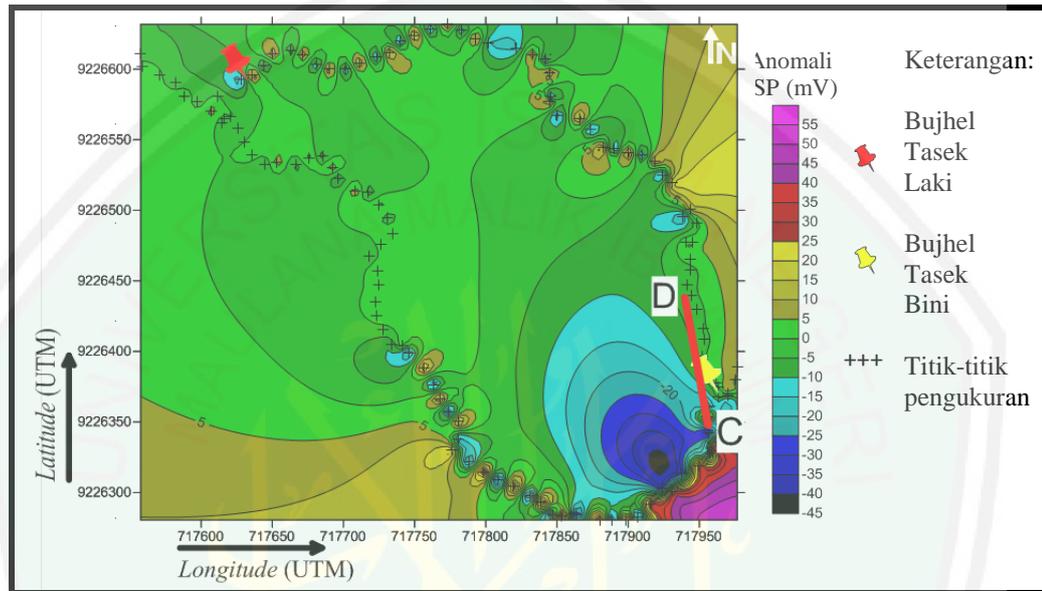
Gambar 4.5 adalah kurva profil sayatan pada lintasan A-B yang dimulai pada arah barat daya Bujhel Tasek Bini menuju arah selatan Bujhel Tasek Bini. Berikut kenampakan kurva lintasan A-B:



Gambar 4.5 Kurva profil sayatan pada lintasan A-B

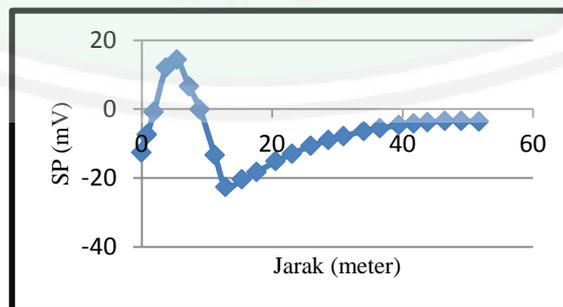
Hasil digitasi diketahui bahwa lokasi sayatan memiliki nilai potensial diri minimum $-41,54$ mV dan potensial diri maksimum $-1,611$ mV. Setelah dilakukan perhitungan, sumber anomali sayatan A-B memiliki nilai kedalaman ujung atas (h) = $67,401$ m, kedalaman ujung bawah (H) = $77,39$ m dan sudut polarisasi (θ) = $27,35^{\circ}$. Dalam Indriana (2007) profil yang tajam

mengindikasikan adanya sumber yang dalam. Gambar 4.5 menunjukkan profil yang lebar dan landai, maka dapat diasumsikan lokasi sayatan A-B memiliki sumber anomali yang dangkal serta melebar.



Gambar 4.6 Peta kontur isopotensial dengan sayatan C-D

Gambar 4.6 adalah peta kontur isopotensial dengan lokasi sayatan C-D yang melintasi Bujhel Tasek Bini. Detail dari nilai potensial diri lokasi sayatan dapat dilihat pada gambar 4.7, berikut kurva profil sayatan lintasan C-D:



Gambar 4.7 Kurva profil sayatan pada lintasan C-D

Hasil digitasi dan sayatan menunjukkan nilai potensial minimum yang terukur pada lokasi sayatan adalah -22,63 mV dan potensial maksimumnya adalah 14,39 mV. Menurut Hurun (2016), kedalaman lumpur bawah permukaan Bujhel Tasek Bini yang teridentifikasi mencapai 1,88 meter hingga 18 meter yang menunjukkan sumber dangkal. Setelah dilakukan perhitungan, sumber anomali sayatan C-D memiliki nilai kedalaman ujung atas (h) = 8,34 m, kedalaman ujung bawah (H) = 8,56 m dan sudut polarisasi (θ) = $1,85^{\circ}$. Anomali SP di titik ini dipengaruhi oleh lumpur Bujhel Tasek Bini. Hal ini dapat dilihat dari nilai h , H , dan θ yang berarti bahwa sumber anomali berada pada kedalaman dangkal dengan kemiringan sekian menjadikan sumber anomali melebar. Sesuai dengan ekspresi luar Bujhel Tasik Bini berupa kubangan.

Secara geologi daerah penelitian termasuk dalam Formasi Tawun dengan bagian atas tersusun atas napal pasiran bersisipan dengan batu gamping dan batu pasir gampingan. Bagian bawah tersusun atas batu lempung gampingan berbintal gampingan (*calcareous nodules*) dan tanah lapukannya berwarna cokelat muda-kekuningan serta berkarbon.

Potensial mineralisasi bisa disebabkan karena adanya medium atau lapisan tanah dengan konsentrasi ion berbeda, seperti pada lapisan pasir dan lempung atau antara medium air tawar dan air asin. Berdasarkan skripsi Hurun (2016) lokasi sekitar BTB (sebelah timur) memiliki komposisi geologi batu kapur yang mengandung air asin, lempung, pasir, dan air tanah. Anomali potensial lokasi sayatan C-D memiliki rentang -22,63 mV hingga 14,39 mV, sumber anomali dengan nilai tersebut diperkirakan berasal dari *background*

potential berupa aliran fluida, reaksi geokimia serta topografi dan potensial mineral urat kuarsa atau pagmatite di bawah lapisan bawah permukaan.

Material semburan Bujhel Tasek Bini mengandung banyak air, hal ini terlihat dari konsistensi lumpur yang encer. Hal itu menjadikan titik semburan Bujhel Tasek Bini memiliki morfologi luar berupa kubangan lumpur (*Swamp-like area*), dengan diameter 10-15 m. Berdasarkan tipe gunung lumpur yang digagas oleh Kalinko (1964) dalam Dimitrov (2002), Bujhel Tasek Bini termasuk dalam tipe kelas II yaitu *Chikishlyar Type*. Karena Bujhel Tasek Bini memiliki karakter semburan yang tenang dan terus menerus. Lumpur yang disebarkan mengandung banyak air dan gas. Gas dipancarkan secara terus menerus sehingga banyak timbul gelembung-gelembung (*bubble*) gas di permukaan kubangan lumpur ini (Bujhel Tasek Bini). Menurut Hurun (2016), arah sebaran lumpur Bujhel Tasek Bini adalah utara-selatan dengan lebar dari kandungan lumpur yang berada di bawah permukaan sekitar 65 meter.

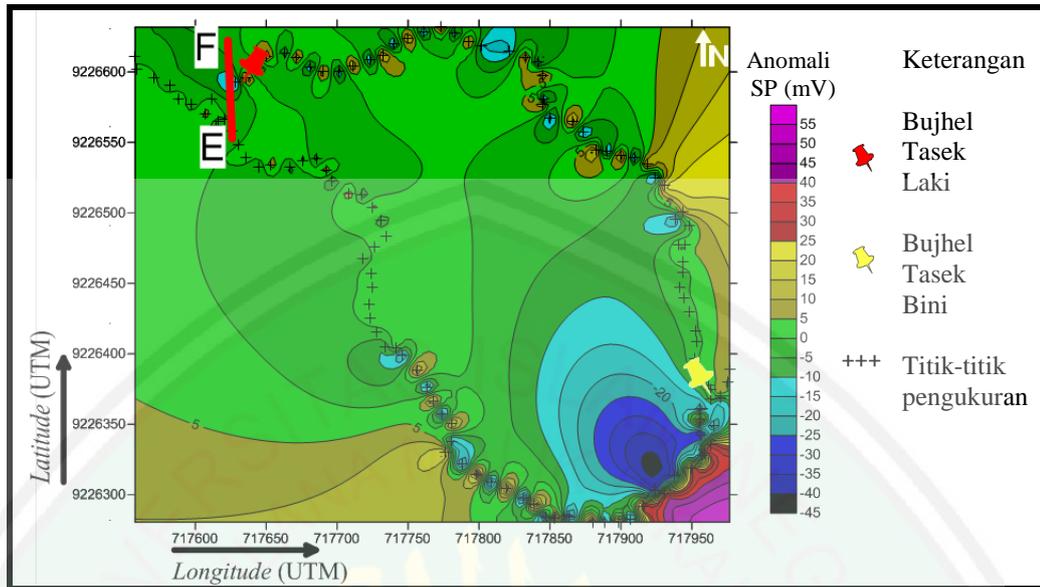
Pembentukan gelembung (*bubble*) gas memainkan peran penting dalam vulkanisme lumpur. Gelembung gas juga terdapat pada sedimen lunak. Permeabilitas rendah tanah liat di daerah gunung lumpur disebabkan karena aliran lumpur yang keluar kurang besar. Perambatan gas dari reservoir utama terjadi karena naiknya gelembung menuju permukaan.



Gambar 4.8 Bujhel Tasek Bini

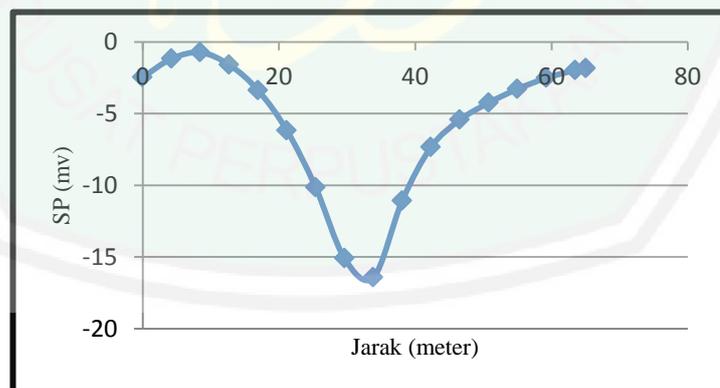
Menurut Albarello (2005) Gelembung gas berasal dari kedalaman reservoir lumpur atau di bawahnya dan berada di sepanjang saluran lumpur setidaknya dalam bentuk terlarut. Lumpur yang naik akan terdekomposisi, sehingga metana akan berevolusi dari larutan dan akan berkembang bersamaan dengan gelembung gas bebas yang ada. Jika fase gas semacam itu tetap terperangkap di dalam lumpur, mekanisme kenaikan lumpur akan terpengaruh secara signifikan. Hanya gelembung yang relatif besar yang bisa lepas dari lumpur sementara yang lebih kecil tetap terjebak dalam lumpur dan ikut serta dalam arus lumpur.

Ekspansi (pemuai) gas akan menghasilkan peningkatan porositas lumpur sehingga terjadi penurunan kepadatan. Karena variasi kerapatan mempengaruhi gradien tekanan penggerak maka aliran lumpur yang keluar dapat menjadi lebih cepat seperti yang terjadi pada Bujhel Tasek Bini.



Gambar 4.9 Peta kontur isopotensial dengan sayatan E-F

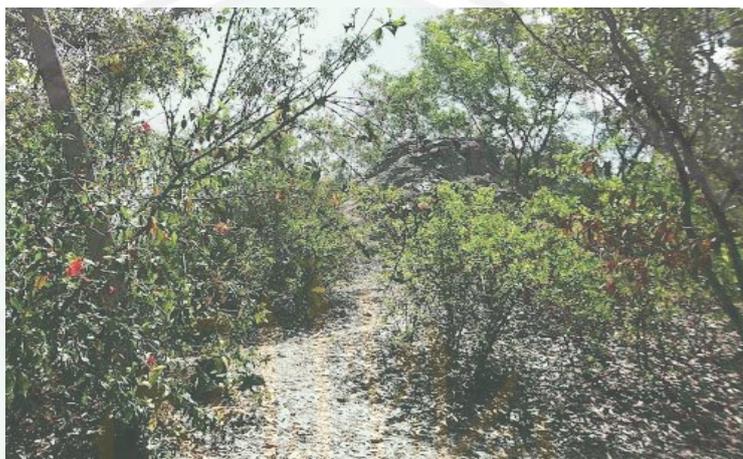
Gambar 4.9 adalah peta kontur isopotensial dengan lokasi sayatan pada lintasan E-F yang melintasi Bujhel Tasek Laki. Detail dari nilai potensial diri lokasi sayatan dapat dilihat pada gambar 4.10, berikut kurva profil sayatan lintasan E-F:



Gambar 4.10 Kurva profil sayatan pada lintasan E-F

Gambar 4.10 menunjukkan kurva yang sedikit tajam dan lebar, sehingga diperkirakan sumber anomali SP sayatan E-F cukup dalam. Potensial diri minimum pada sayatan E-F adalah -16,43 mV dan potensial maksimumnya

adalah $-0,74$ mV. Setelah dilakukan perhitungan diketahui sumber anomali sayatan E-F memiliki nilai kedalaman ujung atas (h) = 14,98 m, kedalaman ujung bawah (H) = 16,92 m dan sudut polarisasi (θ) = $40,89^{\circ}$.



Gambar 4.11 Ekspresi eksternal Bujhel Tasek Laki



Gambar 4.12 Titik semburan Bujhel Tasek Laki (puncak kerucut)

Ekspresi eksternal gunung lumpur sangat bervariasi; hal ini dipengaruhi oleh material semburan. Bujhel Tasek Laki memiliki ekspresi eksternal berbentuk kerucut dengan tinggi ± 15 meter, yang termasuk dalam tipe kelas I yakni *Lokbatan Type*. Tipe ini merupakan tipe gunung lumpur dengan letusan

eksplosif serta material letusan berupa lumpur rendah viskositas. Material letusan Bujhel Tasek Laki berupa lumpur hitam kental (rendah viskositas) disertai pancaran gas. Pusat semburan Bujhel Tasek Laki berada pada puncak kerucut.

Tabel 4.1 hasil perhitungan nilai h, H dan θ pada setiap slice

Slice	Kedalaman ujung atas h (meter)	Kedalaman ujung bawah H (meter)	Sudut polarisasi θ ($^{\circ}$)
A-B	67,401	77,39	27,35 ⁰
C-D	8,34	8,56	1,85 ⁰
E-F	14,98	16,92	40,89 ⁰

Secara menyeluruh sumber anomali di daerah Bujhel Tasek memiliki kedalaman atas (h) 8,34 m - 67,401 m, kedalaman ujung bawah (H) 8,56 m-77,39 m dan kemiringan benda penyebab anomali (θ) 1,85⁰ – 40,89⁰. Anomali bersumber dari *background potential* aliran fluida, reaksi geokimia serta topografi dan potensial mineral urat kuarsa atau pegmatite.

Lempeng miring ini diinterpretasikan sebagai lapisan batuan dengan permeabilitas tinggi sehingga dapat dilalui atau dialiri fluida lumpur. Kedalaman benda anomali hasil perhitungan menunjukkan kantong lumpur besar berada di dekat Bujhel Tasek Bini yaitu daerah dengan anomali potensial diri paling rendah (paling negatif). Penyebab terbentuknya semburan lumpur Bujhel Tasek Bini dan Bujhel Tasek Laki adalah sebagai akibat dari retakan yang terbentuk di titik semburan, sehingga fluida lumpur muncul dan membentuk kubangan lumpur dan gunung lumpur. Model sebaran lumpur bawah permukaan dapat dilihat di skripsi Hurun (2016).

Sebagian besar gunung lumpur termasuk Bujhel Tasek terbentuk karena adanya penerobosan tekanan yang disebabkan oleh adanya patahan, peristiwa di atas puncak struktural, dan waktu aktivitas. Bujhel Tasek termasuk dalam Zona Bogor-Utara Serayu-Kendeng-Madura yang merupakan tempat produksi *mud diapir* dan gunung lumpur. Pada zona ini telah banyak ditemui semburan lumpur. Menurut beberapa ahli Bujhel Tasek masih dalam satu jalur lipatan dengan semburan lumpur yang ada di Sidoarjo (LUSI), dan Surabaya (Karang Anyar, Rungkut).

Terbentuknya semburan lumpur yang ada di Pulau Jawa-Madura, termasuk Bujhel Tasek, berkaitan dengan sistem elisional. Sistem elisional merupakan suatu sistem geologi yang dicirikan dengan cekungan dalam yang aktif, proses sedimentasi cepat, kompaksi (pemadatan) sedimen yang tidak sempurna, adanya tekanan sedimentasi yang melewati batas tekanan hidrostatik (*overpressured*), deformasi aktif, dan umur sedimen muda (terutama Pliosen). Pada sistem elisional juga terjadi pembalikan densitas batuan dari atas ke bawah (ada lapisan sedimen berdensitas rendah di lapisan bawah yang ditutupi oleh sedimen berdensitas tinggi di lapisan atas) dan keadaan termal cekungan di atas rata-rata yang menjadikan material semburan dapat memiliki suhu di atas ruangan.

Sistem elisional akan melahirkan batuan sedimen yang kurang terkompaksi, *overpressured*, dan densitas rendah siap naik ke permukaan. Jika sebuah retakan tiba-tiba mengenai massa batuan yang dalam kondisi sangat kritis ini, maka massa batuan ini akan meruntuhkan ikatan kohesi antar mineralnya, sehingga batuan menjadi sedimen lagi yang bersifat sangat ringan

(*buoyant*). Pada saat itu sedimen akan naik menuju permukaan menjadi diapir. jika diapir terus naik dan menembus permukaan maka akan terbentuk gunung lumpur. Semburan lumpur dapat mengeluarkan segala batuan, sedimen, air, gas dan minyak dari bawah permukaan dimana saluran *feeder channel* terbentuk.

Secara keseluruhan Bujhel Tasek Bini maupun Laki tidak membahayakan karena intensitas semburan tidak besar, tidak memiliki bau gas yang menyengat dan bersuhu ruangan.

4.3 *Mud Volcano* Perspektif al-Qur'an

Al-Qur'an terdiri dari 6.236 ayat dengan 1.108 ayat mengandung kata bagian dari alam, seperti air, awan, besi, bintang, burung, cahaya, darah, emas, jahe, kapal, kilat, langit, dan zarah (Purwanto, 2015). Dan keharusan mempelajarinya juga Allah sampaikan dalam Al-Qur'an Surat Yunus ayat 101:

قُلْ أَنْظُرُوا مَاذَا فِي السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ ۚ وَمَا تُغْنِي الْأَيْتُ وَالنُّذُرُ عَنْ قَوْمٍ لَا يُؤْمِنُونَ (١٠١)

“Katakanlah: "Perhatikanlah apa yang ada di langit dan di bumi. Tidaklah bermanfaat tanda kekuasaan Allah dan Rasul-rasul yang memberi peringatan bagi orang-orang yang tidak beriman." (Q.S. Yunus [10]:101).

Lafadz قُلْ merupakan bentuk *fi'il amar* atau kalimat perintah yang berarti katakanlah yang secara tekstual diperintahkan kepada nabi Muhammad SAW. namun secara konteks makna yang terkandung dalam ayat ditunjukkan kepada seluruh manusia (Shihab, 2003). Dalam bahasa kasus seperti ini disebut *mukhattab ghairu mu'ayyan*. Lafadz أَنْظُرُوا yang berasal dari akar kata نَظَرَ (bentuk masdar) yang artinya penglihatan. Lafadz أَنْظُرُوا merupakan bentuk jamak dari *fi'il amar* نَظَرَ dengan dlomir *jamak mukhattab*. Lafadz نَظَرَ atau اِنْتِظِرْ dalam Elia's

Modern Dictionary 9th edition dinyatakan mempunyai beberapa makna, yaitu: 1) *اِنْتَضَرَ* yang memiliki makna melihat secara dekat, 2) *اِنْتَضَرَ* yang memiliki makna diharapkan, untuk mengantisipasi, untuk melihat ke depan, dan 3) *اِنْتَضَرَ* yang berarti menunggu (kata-kata yang sering digunakan di tempat parkir kendaraan di tanah Arab). Shihab (2003) memaknai secara harfiah lafadz *اَنْظُرُوا* dengan lihatlah, perhatikan, renungkan. Sedangkan menurut Baiquni (1995) arti kata *اَنْظُرُوا* adalah lakukanlah.

Secara keseluruhan ayat di atas mengandung pengarahan kepada hamba-hamba-Nya untuk berfikir tentang nikmat-nikmat-Nya dan dalam apa yang Allah ciptakan di langit dan di bumi (Ghoffar, 2003). Di bumi banyak hal yang dapat diperhatikan/dipelajari mulai dari manusianya, hewan serta tumbuhan hingga peristiwa-peristiwa alam yang muncul di permukaan bumi. baik itu peristiwa/fenomena yang terjadi secara alami ataupun akibat dari campur tangan dan perilaku manusianya.

Salah satu fenomena alam yang dapat diamati adalah semburan lumpur Bujhel Tasek. Semburan lumpur Bujhel Tasek diperkirakan muncul karena adanya patahan yang terjadi pada lapisan bawah permukaannya sehingga fluida lumpur bertekanan tinggi disertai gas naik ke permukaan sehingga membentuk kubangan lumpur (Bujhel Tasek Bini) dan gunung lumpur (Bujhel Tasek Laki).

Material lumpur dari dalam bumi naik ke permukaan melalui rekahan yang terjadi. Rekahan-rekahan yang terbentuk dapat diakibatkan oleh lempeng lempeng bumi yang masih terus bergerak atau aktifitas industri pengeboran. Dalam al-

Quran lempeng bumi diibaratkan seperti awan yang terus bergerak, yaitu dalam Surat an-Naml 88:

وَتَرَى الْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ السَّحَابِ ۚ صُنْعَ اللَّهِ الَّذِي أَتَقَنَ كُلَّ شَيْءٍ ۚ إِنَّهُ خَبِيرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ (٨٨)

“Dan kamu lihat gunung-gunung itu, kamu sangka dia tetap di tempatnya, padahal ia berjalan sebagai jalannya awan. (begitulah) perbuatan Allah yang membuat dengan kokoh tiap-tiap sesuatu; sesungguhnya Allah Maha Mengetahui apa yang kamu kerjakan.” (Q.S. an-Naml [27]:88)

Dalam Tafsir Jalalain (2008) gunung-gunung yang terlihat diam di tempatnya padahal ia berjalan lambat karena saking besarnya sebagaimana jalannya awan ketika tertiuip angin. Berjalannya gunung-gunung juga disebutkan dalam Surat al-Kahfi ayat 47:

وَيَوْمَ نُسَيِّرُ الْجِبَالَ وَتَرَى الْأَرْضَ بَارِزَةً (٤٧)

“Dan (ingatlah) akan hari (yang ketika itu) kami perjalankan gunung-gunung dan kamu akan dapat melihat bumi datar.” (Q.S. al-Kahfi [18]:47).

Quraisy Shihab (2003) ditafsirkan gunung-gunung bergerak dengan cepat bagai awan. Dalam Tafsir Ibnu Katsir (2003), lafadz *صُنْعَ* merupakan mashdar yang mengukuhkan jumlah sebelumnya yang kemudian dimudlofkan kepada fa'ilnya yaitu lafadz Allah, sehingga menjadi (*صُنْعَ اللَّهِ الَّذِي أَتَقَنَ كُلَّ شَيْءٍ*) yang memiliki makna Allah melakukan semua itu (bergeraknya gunung yang terlihat diam) dengan ketetapan-Nya yang besar dan membuat kokoh setiap apa yang diciptakan-Nya serta meletakkan hikmah-hikmah di baliknya. Pada kalimat (*إِنَّهُ*) (*خَبِيرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ*), lafadz *تَفْعَلُونَ* dalam tafsir Jalalain (2008) dapat dibaca *يَفْعَلُونَ*, yakni

perbuatan maksiat yang dilakukan oleh musuh-musuh-Nya dan perbuatan taat yang dilakukan oleh kekasih-kekasih-Nya.

Perintah Allah kepada manusia untuk memperhatikan dan mempelajari alam raya adalah dalam rangka memperoleh manfaat dan kemudahan-kemudahan bagi kehidupan manusia (Shihab, 2007). Point utama dan yang paling penting dalam mempelajari alam dan seisinya (ayat-ayat kauniyah) adalah kesadaran bahwa ayat-ayat kauniyah tersebut menunjukkan kekuasaan Allah. Hikmah dan kesadaran akan hal itu tidak dapat diperoleh oleh orang-orang yang tidak beriman, karena pandangan mereka tidak mengarah pada mengambil pelajaran dari ayat-ayat tersebut (alam dan seisinya) dan tidak pula menggunakan ayat-ayat tersebut untuk mencari bukti atas ke-Esaan Allah dan kekuasaan-Nya, seperti yang telah disebutkan dalam Surat Yunus ayat 101:

وَمَا تُغْنِي الْأَيُّهُ وَالنُّذُرُ عَنْ قَوْمٍ لَا يُؤْمِنُونَ (١٠١)

“Tidaklah bermanfaat tanda kekuasaan Allah dan Rasul-rasul yang memberi peringatan bagi orang-orang yang tidak beriman.” (Q.S. Yunus [10]:101).

Dalam Q.S. Yunus ayat 101 Allah memberikan bimbingan-Nya lebih lanjut dalam al- Qur’an, bagaimana caranya agar manusia dapat memahai ayat-ayat yang berkaitan dengan alam semesta, yang secara garis besar melukiskan proses-proses alamiah yang terjadi di dalamnya. Melakukan observasi dengan penuh perhatian untuk dapat menjawab pertanyaan “bagaimana proses itu terjadi?”. Memeriksa alam semesta dapat diartikan membaca ayatullah yang dapat merinci dan menguraikan serta menerangkan ayat-ayat di dalam al- Qur’an yang merupakan garis besar, sebab di dalam kitab suci itu sendiri alam semesta serta proses-proses

yang terjadi di dalamnya seringkali dinyatakan sebagai ayat Allah (Baiquni, 1995).



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisa pada bab IV dimana semua data telah dikumpulkan dari lapangan dan pengolahan menggunakan bantuan software excel dan surfer 11 maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengolahan data dan peta kontur isopotensial maka daerah penelitian merupakan zona konduktif yang dapat dilihat dari rendahnya nilai potensial yang diukur. Nilai potensi tertinggi penelitian ini adalah 42.629 mV, sedangkan nilai potensial terendah penelitian ini adalah -42.6211mV.
2. Untuk sayatan A-B pada daerah tonjolan besar dekat dengan Bujhel Tasek Bini didapatkan kedalaman ujung atas (h) = 67,401 m, kedalaman ujung bawah (H) = 77,39 m dan kemiringan benda penyebab anomali (θ) = 27,35⁰.
3. Untuk sayatan C-D yang melintasi Bujhel Tasek Bini didapatkan kedalaman ujung atas (h) = 8,34 m, kedalaman ujung bawah (H) = 8,56 m dan kemiringan benda penyebab anomali (θ) = 1,85⁰.
4. Untuk sayatan E-F pada daerah dekat dengan Bujhel Tasek Laki didapatkan kedalaman ujung atas (h) = 14,98 m, kedalaman ujung bawah (H) = 16,92 m dan kemiringan benda penyebab anomali (θ) = 40,89⁰.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan studi teoritik lebih lanjut untuk interpretasi kuantitatif data SP dengan model yang lain.
2. Titik-titik pengukuran perlu diperbanyak di sekitar Bujhel Tasek.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Qur'an al-Karim. 1989. Al-Qur'an dan Terjemahannya. Departemen Agama RI. Semarang: Toha Putera.
- Albarello, Dario. 2005. *Mud Volcanoes as Natural Strainmeters a Working Hypothesis*. Springer, p.239-249.
- Abubakar, Bahrun. 2008. Terjemah Tafsir Jalalain Berikut Asbabun Nuzul Jilid 2. Bandung: Sinar Baru Algensindo.
- Akhmanov, G.G. & Mazzini, A. 2007. *Mud Volcanism in Elisional Basin*. Jakarta: International Symposium on LUSI, BPPT-IAGI-LIPI.
- Akesson, Maria. 2008. *Mud Volcanoes a Review*. Thesis. Lund: Departement of Geology Lund University.
- Albarello, D. Palo, M. and Martinelli, G. 2012. *Monitoring Methane Emission of Mud Volcanoes by Seismic Tremor Measurements: a Pilot Study*. Natural Hazards And Earth System Sciences. vol.12, p.3617-3629.
- Baiquni, Achmad. 1995. *Al-Qur'an Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*. Jakarta: Dana Bhakti Wakaf.
- Basu1, P. Verma, R. Paul, R. & Viswanath, K. 2012. *Mud Volcanoes in Deep Water of Andaman Forearc Basin*. Biennial International Conference Exposition on Petroleum Geophysics. Dehradun: INTEG, GEOPIC, ONGC.
- Bemmelen Van, R.W. 1949. *The Geology of Indonesia*. V.I.A. Martinus Nijhoff. The Hague.
- Bogoslovsky, V.A. & Ogilvy A.A. 1972. *The Study of Streaming Potentials on Fissured Media Models*. Geophys Propecting, no.51, p.109-117 .
- Devasenathipathy, S. & Santiago J.G. 2003. *Electrokinetik Flow Diagnostic*. Springer Verlag, New York: Department of Mechanical Engineering Stanford University.
- Dimitrov, L.I. 2002. *Mud Volcanoes-the Most Important Pathway for Degassing Deeply Buried Sediments*. Earth-Science Reviews, vol.59, p.49-76.
- Dimitrov, L.I. 2003. *Mud Volcanoes-a Significant Source of Atmospheric Methane*. Geo-Marine Letters vol.23, p.155-161.

- Etiopo, Giuseppe. 2005. *Mud Volcanoes and Microseepage: The Forgotten Geophysical Components of Atmospheric Methane Budget*. *Annals of Geophysics*, vol.48, no.1, p.1-7.
- Evans, R.J., Davies, R.J. & Stewart, S.A. 2006. *Internal Structure and Eruptive History of a Kilometre-scale Mud Volcano System, South Caspian Sea*. *Basin Research* vol.19, p.153-163.
- Fagerlund, F. & Heinson, G. 2003. *Detecting Subsurface Groundwater Flow in Fractured Rock using Self-Potential (SP) Methods*. *Environmental Geology*, vol.43, no.7, p.782-794.
- Ghoffar, M. Abdul. 2003. *Tafsir Ibnu Katsir Jilid 4*. Bogor: Pustaka Imam Syafi'i.
- Ghoffar, M. Abdul. 2003. *Tafsir Ibnu Katsir Jilid 6*. Bogor: Pustaka Imam Syafi'i.
- Google Earth. 2017. Diakses pada tanggal 21 September 2017) <http://www.google.co.id/intl/id/earth>.
- Graue, K. 2000. *Mud Volcanoes in Deep Water Nigeria*. *Marine and Petroleum Geology* vol.17, p. 959-974.
- Hamzah, M., S., Djoko, S., Wahyudi, W.P., Budi, S. 2008. *Deteksi Aliran Air dalam Media Pori Pemodelan Fisik dengan Metode Self Potential*. Prosiding, Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II.
- Hensen, C., Nuzzo, M., Hornibrook, E., Pinheiro, L.M., Bock, B., Magalhães, V. H. & Brückmann, W. 2007. *Sources of Mud Volcano Fluids in the Gulf of Cadiz—Indications for Hydrothermal Imprint*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* vol.71, p.1232-1248.
- Hovland, M., Hill, A., Stokes, D. 1997. *The Structure and Geomorphology of the Dashgil Mud Volcano, Azerbaijan*. *Geomorphology*, vol.21, p.1-15.
- Hurun, Nurisyadzatul. 2016. *Analisis Data Geolistrik Resistivitas untuk Pemodelan Struktur Geologi Bawah Permukaan Gunung Lumpur Bangkalan*. Skripsi. Malang: Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Huseynov, D.A. and Guliyev, I.S. 2004. *Mud Volcanic Natural Phenomena in the South Caspian Basin: Geology, Fluid Dynamics and Environmental Impact*. *Environmental Geology*, vol.46, p.1012-1023.
- Ichwan, Muhammad Nor. 2001. *Memasuki Dunia Al-Qur'an*. Semarang: Lubuk Raya.

- Indriana,R,D., Nurwidyanto, M.I. dan Haryono, K.W. 2007. *Interpretasi Bawah Permukaan Dengan Metode Self Potential Daerah Bledug Kuwu Kradenan Grobogan*. Berkala Fisika, vol.10, no.3, p.155-167.
- Ishido, T. Nishi, Y. and Pritchett, J.W. 2010. *Application of Self potential Measurements to Geothermal Reservoir Engineering: Characterization of Fractured Reservoirs*. Proceedings, Trithy-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- Ismulyanto, Tri. 2006. *Penentuan Posisi Sumber Air Di Daerah Rambipuji Menggunakan Metode Potensial Diri*. Skripsi. Jember: Program Studi Pendidikan Fisika Jurusan Pendidikan MIPA, FKIP Universitas Jember.
- Jamal, A.B. dan Jamal, D.S. 2008. *Ensiklopedi Petunjuk Sains dalam al-Qur'an dan Sunnah*. Jakarta Timur: Kaunee.
- Judd, A.G., Hovland, M., Dimitrov, L.I., Gil, G.S. & Jukes, V. 2002. *The Geological Methane Budget at Continental Margins and its Influence on Climate Change*. Geofluids, vol.2, p.109-126.
- Judd, A. 2005. *Gass Emissions from Mud Volcanoes Signivicant to Global Climate Change*. Springer, p.147-157.
- Kartini dan Danusaputro, H. 2005. *Estimasi Penyebaran Polutan Dengan Metodeself Potential (Studi Kasus TPA Jati Barang, Kecamatan Mijen, Semarang)*. Berkala Fisika. vol.8, no.1, p.27-32.
- Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Oxford: Black-well Science Ltd.
- Koesoemadinata. 1978. *Geologi Minyak dan Gas Bumi*. ITB: Bandung.
- Kopf, A.J. 2002. *Significance of Mud Volcanism*. Reviews of Geophysics, vol.40, no.2.
- Kopf, A. J. 2003. *Global Methane Emission through Mud Volcanoes and its Past and Present Impact on the Earth's Climate*. International Journal of Earth Science, vol.92, no.806-816.
- Lorenz, V. 1975. *Formation of Phreatomagmatic Maar-Diatreme Volcanoes and its Relevaness to Kimberlite Diatremes*. Physical Chemistry of Earth. vol.9, p.7-27.
- Lowrie, William. 2007. *Fundamentals of Geophysics Second Edition*. USA: Cambridge University Press, p.203.

- Milkov, A.V. 2000. *Worldwide Distribution of Submarine Mud Volcanoes and Associated Gas Hydrates*. Marine Geology, vol.167, p.29-42.
- Naudet, V., Revil, A., Rizzo, E., Bottero, J.Y., Begasat, P. 2004. *Groundwater Redox Conditions and Conductivity in a Contaminant Plume from Geoelectrical Investigations*. Journal of Hydrology and Earth Science. vol.8, no.1, p.8-22.
- Perez-Garcia, Carolina. 2012. *A Multidisciplinary Subsurface Analysis of Mud Volcanoes and Salt Diapirs in European Seas*. Disertasi. Tromso: The Faculty of Science and Technology Department of Geology University of Tromso.
- Perez-Belzuz, F., Alonso, B. & Ercilla, G. 1997. *History of Mud Diapirism and Triggering Mechanisms in the Western Alboran Sea*. Tectonophysics, vol.282, p.399-422.
- Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D.A. & Jamtveit, B. 2003. *Mud and Fluid Migration in Active Mud Volcanoes in Azerbaijan*. Geo-Mar Lett, vol.23, p.258-268.
- Pratama, A.A. 2017. *Pemodelan Aliran Fluida Panas Manifestasi Hidrotermal Songgoriti, Kota Batu Menggunakan Metode Self-Potential*. Skripsi. Surabaya: Departemen Teknik Geofisika Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pringgoprawiro, H. 1983. *Stratigrafi Cekungan Jawa Timur Utara dan Paleogeografinya: Sebuah Pendekatan Baru*. Disertasi Doktor. Bandung: ITB.
- Raharjo, S.A. dan Sehad. 2011. *Survei Metode Self Potential Menggunakan Elektroda Pot Berpori untuk Mendeteksi Aliran Fluida Panas Bawah Permukaan di Kawasan Baturaden Kabupaten Banyumas Jawa Tengah*. Berkala Fisika, vol.8, no.1, p.7-21.
- Rakhman, Arie Noor. 2014. *Karakteristik Sifat Fisik Kembang Susut Lumpur Sidoarjo dan Implikasinya Terhadap Potensi Bencana Amblesan Berikut Mitigasinya di Kecamatan Porong dan Sekitarnya*. Yogyakarta: Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST).
- Rao, A.D. and Babu, Ram H.V. 1983. *Quantitative Interpretation of Self Potential Anomalies due to Two-dimensional Sheet-like Bodies*. Geophysics 48, p.659-1664.
- Reynolds, John. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Singapore: John Wiley and Sons.

- Sarkowi, Muh. 1995. *Interpretasi Kuantitatif Profile Anomali Self Potential dengan Metode Iteratif Otomatis*. Skripsi. Universitas Diponegoro Semarang.
- Sato and Money. 1960. *The Electrochemical Mechanism of Sulphida Self Potential*. Geophysics, vol.XXV, p.226-246.
- Satyana, A.H. dan Purwaningsih, M.E.M. 2003. Oligo-Miocene Carbonates of Java: Tectonic Setting and Effects of Volcanism. Jakarta: Proceedings of Joint Convention IAGI & HAGI.
- Satyana, A.H. dan Asnidar. 2008. *Mud Diapirs and Mud Volcanoes in Depression of Java to Madura: Origins, Nature, and Implication to Petroleum System*. Proceedings, Indonesian Petroleum Association Thirty-Second Annual Convention & Exhibition.
- Sehah dan Raharjo, S.A. 2011. *Survei Metode Self Potential Menggunakan Elektroda Pot Berpori untuk Mendeteksi Aliran Fluida Panas Bawah Permukaan di Kawasan Baturaden Kabupaten Banyumas Jawa Tengah*. Jurnal Fisika FLUX. vol.8, no.1, p.7-21.
- Sharma, P.V. 1997. *Environmental and Geophysics*. USA: Cambridge University Press.
- Shihab, M. Quraish. 2007. *Membumikan al-Qur'an*. Bandung: Mizan.
- Shihab, M. Quraish. 2003. *Tafsir al-Mishbah: Pesan, Kesan dan Keserasian al-Qur'an*. Jakarta: Lentera Hati.
- Sill, William R. 1983. *Self Potential Modeling from Primary Flows*. Geophysics vol.48, no.1, p.76-86.
- Supandjono. 1992. *Geology of the Surabaya & Sapulu Quadrangle, Jawa*. Bandung: Departemen Pertambangan dan Eenergi.
- Syahrudin, M.H., Lantu dan Syamsuddin. 2011. *Penentuan Laju Perembesan Air Dalam Media Berpori Menggunakan Metoda Geolistrik Daerah Resapan Air Kampus Unhas Tamalanrea Makassar*. Makassar: FMIPA Universitas Hasanuddin.
- Tambunan, C. dan Pertama, W. 1997. *Metode Geofisika Potensial Diri (Self Potential)*. PUSDIKLAT Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. & Keys, D.A. 1990. *Applied Geophysics*. USA: Cambridge University Press.

Yusifov, Mehdi. 2004. *Seismic Interpretation and Classification of Mud Volcanoes of the South Caspian Basin, Offshore Azerbaijan*. Thesis. Texas: Texas A&M University.





LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Observasi *Self Potential*

No	Lintang (Latitude)	Bujur (Longitude)	Ketinggian (m)	SP terkoreksi (mV)
1	717963.29	9226374.36	108	-1.93
2	717963.26	9226367.72	122	-1.00
3	717952.33	9226396.53	115	-1.01
4	717953.49	9226408.69	117	-2.35
5	717952.42	9226416.44	116	-0.66
6	717948.05	9226429.73	115	-2.00
7	717944.78	9226439.70	113	-1.01
8	717941.49	9226447.45	111	-1.35
9	717943.75	9226457.40	106	-2.76
10	717943.78	9226465.14	105	2.60
11	717940.51	9226477.32	105	6.19
12	717944.93	9226477.30	104	4.15
13	717948.31	9226490.56	104	-2.76
14	717943.93	9226500.54	104	13.50
15	717938.43	9226495.59	104	-22.61
16	717930.74	9226519.40	103	23.25
17	717924.14	9226524.95	100	-21.86
18	717918.65	9226534.93	100	19.90
19	717909.83	9226539.39	102	-20.31
20	717899.89	9226540.54	98	23.05
21	717889.95	9226543.90	99	-21.96
22	717882.22	9226544.38	100	21.00
23	717873.43	9226557.24	102	-20.21
24	717865.73	9226565.02	103	21.15
25	717850.27	9226567.30	103	-20.96
26	717844.78	9226577.27	104	19.70
27	717845.90	9226580.59	102	-17.91
28	717844.87	9226597.18	103	16.05
29	717841.59	9226607.15	104	-16.16
30	717832.76	9226610.51	103	15.70
31	717821.73	9226614.98	104	-16.61
32	717821.73	9226614.98	105	17.35
33	717801.85	9226618.38	105	-15.76
34	717793.02	9226621.74	104	16.40
35	717783.10	9226627.31	104	-17.51
36	717773.17	9226631.78	104	20.35
37	717761.00	9226628.51	102	-19.06
38	717749.93	9226624.13	102	20.90

39	717739.97	9226619.75	102	-19.81
40	717732.20	9226612.04	101	21.45
41	717723.34	9226608.76	102	-18.96
42	717711.17	9226604.38	104	19.20
43	717701.20	9226600.00	104	-18.01
44	717690.15	9226600.05	103	18.25
45	717681.32	9226603.40	102	-17.36
46	717671.41	9226610.08	100	15.10
47	717662.58	9226613.43	100	-12.31
48	717650.41	9226611.27	96	16.15
49	717643.74	9226602.45	97	-16.16
50	717635.98	9226595.85	97	19.30
51	717628.23	9226592.56	98	-20.01
52	717611.60	9226580.46	90	0.98
53	717620.38	9226566.05	96	0.81
54	717625.88	9226558.28	95	-2.96
55	717630.25	9226548.31	95	-0.04
56	717635.74	9226539.44	100	3.29
57	717644.56	9226532.76	98	-6.28
58	717653.40	9226533.83	97	9.05
59	717666.66	9226532.67	99	-8.02
60	717675.52	9226537.06	99	8.00
61	717685.47	9226538.12	98	-8.17
62	717692.07	9226530.35	97	9.96
63	717696.46	9226522.59	98	-11.81
64	717708.58	9226513.69	100	9.42
65	717717.41	9226512.55	101	-9.16
66	717725.11	9226503.67	100	7.67
67	717730.60	9226494.79	101	-2.20
68	717734.98	9226483.71	103	3.23
69	717726.10	9226476.01	103	1.16
70	717718.33	9226467.19	106	-3.12
71	717723.81	9226457.21	105	3.71
72	717724.88	9226447.25	106	0.14
73	717722.62	9226435.10	104	1.47
74	717723.68	9226425.14	109	2.30
75	717728.06	9226415.16	109	-1.68
76	717733.54	9226405.19	107	-9.85
77	717741.27	9226404.05	105	5.38
78	717745.67	9226398.50	103	-26.29
79	717756.68	9226388.50	104	24.24

80	717763.26	9226376.30	106	-24.54
81	717767.64	9226366.33	105	26.59
82	717774.23	9226357.45	108	-30.28
83	717780.84	9226350.79	108	26.65
84	717780.78	9226337.51	110	-22.42
85	717776.33	9226329.79	109	24.40
86	717788.45	9226322.00	111	-31.17
87	717798.37	9226314.21	112	39.36
88	717808.29	9226308.64	115	-36.81
89	717819.32	9226304.17	113	38.52
90	717831.45	9226297.48	114	-36.86
91	717839.17	9226293.02	114	40.37
92	717846.87	9226284.14	115	-38.90
93	717853.49	9226283.01	114	42.63
94	717863.45	9226284.07	113	-38.74
95	717880.01	9226280.69	117	39.98
96	717888.85	9226280.65	118	-36.39
97	717898.80	9226280.61	116	41.74
98	717906.54	9226282.79	116	-38.33
99	717915.42	9226291.60	117	41.30
100	717924.31	9226302.62	116	-38.28
101	717930.93	9226300.38	116	38.35
102	717937.62	9226313.63	113	-34.12
103	717949.80	9226319.11	112	36.01
104	717957.57	9226327.92	113	-33.76
105	717963.13	9226335.64	112	34.36
106	717965.39	9226348.91	113	-30.51
107	717962.20	9226377.68	116	2.17
108	717976.61	9226388.68	119	9.70
109	717975.47	9226379.84	115	2.73
110	717969.90	9226368.80	117	-17.94
111	717969.90	9226369.90	115	15.09
112	717955.50	9226361.12	119	-26.38
113	717955.47	9226353.37	120	24.75
114	717956.53	9226342.31	108	-42.62
115	717958.68	9226329.03	124	32.51
116	717614.84	9226561.65	102	-2.59
117	717615.96	9226564.96	98	-2.55
118	717607.14	9226570.53	100	7.68
119	717597.22	9226577.21	100	-4.78
120	717588.39	9226580.56	100	5.96

121	717581.80	9226590.54	98	-4.51
122	717570.78	9226596.12	102	1.13
123	717558.64	9226601.70	98	3.87
124	717557.57	9226610.56	103	-4.19





KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN)
MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Gajayana No. 50 Dinoyo Malang (0341) 551345 Fax. (0341) 572533

BUKTI KONSULTASI SKRIPSI

Nama : Aatinaa Zulfaa
NIM : 12640071
Fakultas/ Jurusan : Sains dan Teknologi/ Fisika
Judul Skripsi : Aplikasi Metode *Self Potential* untuk Interpretasi Bawah Permukaan Lokasi Semburan Lumpur Bujhel Tasek, Kabupaten Bangkalan
Pembimbing I : Drs. Abdul Basid, M.Si
Pembimbing II : Erna Hastuti, M.Si

No	Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1	21 Agustus 2017	Konsultasi Bab I, II dan III	
2	27 September 2017	Konsultasi Bab II	
3	22 Januari 2018	Konsultasi Bab I, II, III dan Acc	
4	24 Januari 2018	Konsultasi Data dan Bab IV	
5	26 Januari 2018	Konsultasi Data dan Acc	
6	26 Januari 2018	Konsultasi Kajian Agama Bab I dan IV	
7	20 April 2018	Konsultasi Bab IV dan V	
8	20 April 2018	Konsultasi Kajian Agama Bab II	
9	23 April 2018	Konsultasi Kajian Agama dan Acc	
10	30 April 2018	Konsultasi Semua Bab, Abstrak dan Acc	

Malang, 03 Mei 2018
Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika,

Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003