



JURNAL GEOSAINS TERAPAN

VOLUME 4 NO. 1 | TAHUN 2021 | DEPARTEMEN GEOSAINS FMIPA UI

NUR RIZKY AMELIA, SUPRIYANTO, HARYONO HARYANTO

- 1 – 14 Identifikasi Struktur Geologi Sebagai Potensi Area Jebakan Hidrokarbon Berdasarkan Integrasi Data Gaya Berat dan Data Seismik di Pulau Timor, Indonesia Timur

PRISKA EZRAHAYU, SUPRIYANTO

- 15 – 22 Identifikasi Sesar di Bawah Permukaan yang Dapat Menyebabkan Gempa Berdasarkan Metode First Horizontal Derivative dan Second Vertical Derivative di Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur

ASRI OKTAVIONI INDRASWARI

- 23 – 31 Mouth Bar Reservoir Dimension Characterization Based on Water Rise Phenomenon: Case Study on X Field, Kutei Basin, Indonesia

SALSABILA SISQI INDRESWARI, SUPRIYANTO, AGUS KUSWANTO

- 32 – 38 Identifikasi Endapan Bijih Besi Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah Menggunakan Korelasi serta Komparasi Metode IP-resistivitas dan Magnetik

ABDURROHMAN JAUHARI, ISKANDARSYAH

- 39 – 44 Identification of Potential Landslides Area of Sukabumi, West Java Using Gravity Anomalies and Classification of Support Vector Machine

MUTHIA MAHIRA, DYAH NINDITA SAHDARANI, INDAH PRASTITI

- 45 – 50 Identifikasi Potensi Panas Bumi Menggunakan Teknologi Pengindraan Jauh di Daerah XY, Sukabumi, Jawa Barat

ABRIYANTO PUTRA SETIAWAN NUGRAHA, FELIX M H SIHOMBING

- 51 – 58 Karakteristik Batu Bara di Daerah Bayah Bagian Selatan, Provinsi Banten Berdasarkan Analisis Proksimat, Ultimat, dan Maseral

AHMAD RIZKY REYNDA

- 59 – 65 Variasi Komposisi Pasir Pantai Pulau Lombok Menggunakan Analisis Petrografi

MUJAHID NAJIB ROBBANI, SUPRIYANTO

- 66 – 71 Pemantauan Perubahan Tahanan Jenis Listrik Tanah Akibat Pemberian Pupuk Jenis NPK, Urea, ZA dan ZK pada Lahan Pertanian Terkondisi Menggunakan Alat Geolistrik Sederhana

**FELIX M H SIHOMBING, DWIKY GURUH AUGUSTY, ELISHA CHRISTY ROTUA TOBING,
EMIR RAKHIM**

- 72 – 79 Pemanfaatan Model Singkapan Geologi Virtual untuk Menggantikan Kuliah Lapangan di Cipamingkis, Kabupaten Bogor

JURNAL GEOSAINS TERAPAN

Volume 4, No. 1, November 2021

Jurnal Geosains Terapan (J. Geos T.) adalah jurnal nasional yang dipublikasikan dua kali setahun oleh Pusat Studi Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA), Universitas Indonesia.

Jurnal Geosains Terapan memberikan kesempatan bagi kontributor untuk menuliskan paparan ilmiah untuk mendukung atau berhubungan dengan ilmu kebumian, meliputi: Geologi, Geofisika, Geokimia, Geodesi, Geomorfologi, Geografi Fisik, dan terapannya. Jurnal Geosains Terapan akan dipublikasikan dalam bentuk buku jurnal dan jurnal *on-line*.

DEWAN REDAKSI JURNAL GEOSAINS TERAPAN

Penasehat	:	Dekan FMIPA UI
Pengarah	:	Manajer Riset dan Pengabdian Masyarakat FMIPA UI
Penanggungjawab	:	
Pimpinan Redaksi	:	Dr. Supriatna, MT
Wakil Pimpinan Redaksi	:	Eko Waludi, ST, M. Si.
Dewan Editor	:	
Ketua	:	Dr. Eng. Supriyanto, M. Sc.
Anggota	:	Prof. Dr. Jan Sopaheluwakan, LIPI Dr. Idwan Suhardi, Kemenristek RI Dr. Agus Guntoro, Universitas Trisakti Dr. Ildrem Safri, Unpad Dede Djuhana, M. Si., Ph. D., FMIPA UI Dr. Supriyanto, FMIPA UI Dr. Suryantini, ITB Dr. <i>rer. nat.</i> Abdul Haris, FMIPA UI Dr. Khasani, ST, M.Eng., UGM Dr. Yuni Krisyuningsih Krisnandi, FMIPA UI
Redaktur Pelaksana	:	Sukiato Khurniawan, S.T., M.Sc. Elisha Christy Rotua BR Tobing, S.Si Abd Hafidz, M.T. Luthfi Yufajjiru Surya Dharma, S.Si
Keuangan	:	
Staf Administrasi	:	Agus Riyanto, S.Si

JURNAL GEOSAINS TERAPAN

SK ISSN: 0005.2502468X/JL.3.1?SK.ISSN/2016.2 (15 Februari 2016)

Kantor: Pusat Studi Geosains Gedung A, Lantai Dasar, FMIPA UI

Kampus UI Depok 16424

<http://www.sci.ui.ac.id/jgt>; <http://journal.ui.ac.id/jgt>

Telp. (021) 7866732; e-mail: jgt@sci.ui.ac.id

DAFTAR ISI

Identifikasi Stuktur Geologi Sebagai Potensi Area Jebakan Hidrokarbon Berdasarkan Integrasi Data Gaya Berat dan Data Seismik di Pulau Timor, Indonesia Timur Nur Rizky Amelia, Supriyanto, Haryono Haryanto	1 – 14
Identifikasi Sesar di Bawah Permukaan yang Dapat Menyebabkan Gempa Berdasarkan Metode First Horizontal Derivative dan Second Vertical Derivative di Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur Priska Ezrahayu, Supriyanto	15 – 22
Mouth Bar Reservoir Dimension Characterization Based on Water Rise Phenomenon: Case Study on X Field, Kutei Basin, Indonesia Asri Oktavioni Indraswari	23 – 31
Identifikasi Endapan Bijih Besi Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah Menggunakan Korelasi serta Komparasi Metode IP-resistivitas dan Magnetik Salsabila Sisqi Indreswari, Supriyanto, Agus Kuswanto	32 – 38
Identification of Potential Landslides Area of Sukabumi, West Java Using Gravity Anomalies and Classification of Support Vector Machine Abdurrohman Jauhari, Iskandarsyah	39 – 44
Identifikasi Potensi Panas Bumi Menggunakan Teknologi Pengindraan Jauh di Daerah XY, Sukabumi, Jawa Barat Muthia Mahira, Dyah Nindita Sahdarani, Indah Prastiti	45 – 50
Karakteristik Batu Bara di Daerah Bayah Bagian Selatan, Provinsi Banten Berdasarkan Analisis Proksimat, Ultimat, dan Maseral Abriyanto Putra Setiawan Nugraha, Felix M H Sihombing	51 – 58
Variasi Komposisi Pasir Pantai Pulau Lombok Menggunakan Analisis Petrografi Ahmad Rizky Reynda	59 – 65
Pemantauan Perubahan Tahanan Jenis Listrik Tanah Akibat Pemberian Pupuk Jenis NPK, Urea, ZA dan ZK pada Lahan Pertanian Terkondisi Menggunakan Alat Geolistrik Sederhana Mujahid Najib Robbani, Supriyanto	66 – 71
Pemanfaatan Model Singkapan Geologi Virtual untuk Menggantikan Kuliah Lapangan di Cipamingkis, Kabupaten Bogor Felix M H Sihombing, Dwiky Guruh Augusty, Elisha Christy Rotua Tobing, Emir Rakhim ...	72 – 79

Identifikasi Struktur Geologi Sebagai Potensi Area Jebakan Hidrokarbon Berdasarkan Integrasi Data Gaya Berat dan Data Seismik di Pulau Timor, Indonesia Timur

Nur Rizky Amelia*, Supriyanto, dan Haryono Haryanto

Program Studi Geofisika, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia
*Narahubung: ameliasanurrizky@gmail.com

Abstrak

Pulau Timor merupakan salah satu pulau yang masuk ke dalam kawasan timur Indonesia dan memiliki potensi minyak dan gas bumi. Penelitian pada bagian barat Pulau Timor bertujuan untuk mengidentifikasi potensi area jebakan hidrokarbon berdasarkan struktur bawah permukaan. Kemampuan metode gravitasi dalam menentukan perbedaan densitas dan metode seismik dalam menentukan batas-batas struktur dapat memberikan informasi yang cukup jelas dalam mengidentifikasi struktur bawah permukaan. Kedua metode dalam penelitian ini digunakan dengan memanfaatkan pemodelan ke depan 2D data gravitasi satelit yang didukung dengan data sekunder berupa penampang seismik 2D dan data geologi permukaan. Model bawah permukaan dibuat pada dua lintasan, lintasan A-C dan lintasan D-F. Hasil pemodelan ke depan 2D data gravitasi satelit pada lintasan A-C dan D-F menunjukkan lima lapisan batuan dengan kedalaman maksimum $\pm 12,4$ km yang terkonfirmasi cukup baik oleh data penampang seismik dan data geologi. Kesesuaian tersebut terlihat oleh model penampang struktur yang dibuat berdasarkan model penampang seismik menghasilkan nilai error yang cukup kecil, yaitu pada lintasan A-C memiliki error 3,93% dan pada lintasan D-F memiliki error 4,63%. Selain itu, analisis turunan horizontal pertama (FHD) dan turunan vertikal kedua (SVD) pada kedua lintasan dapat mengidentifikasi kemenerusan struktur besar, yang juga teridentifikasi pada penampang seismik dan pemodelan yang dibuat. Model penampang struktur yang telah dibuat dapat memberikan gambaran element petroleum system Pulau Timor, sehingga informasi tersebut dapat digunakan untuk menentukan potensi area jebakan hidrokarbon dan sebagai infomasi awal dalam kegiatan eksplorasi.

Kata kunci: Gravitasi; Seismik; Struktur geologi; Petroleum system; Pulau Timor

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan akan energi minyak dan gas bumi menyebabkan pemanfaatan hasil eksplorasi minyak bumi di kawasan barat Indonesia perlu diperluas ke kawasan timur Indonesia. Berdasarkan SKK Migas (2018) tingkat keberhasilan eksplorasi di wilayah timur Indonesia cukup tinggi, namun tantangan geografis, informasi yang masih terbatas dan hasil pengeboran yang belum menjanjikan mengakibatkan kegiatan eksplorasi di kawasan timur Indonesia masih belum banyak diminati. Maka dari itu, pengembangan informasi dilakukan di salah satu kawasan Timur Indonesia yaitu Pulau Timor bagian barat dengan memanfaatkan ilmu geofisika untuk menggambarkan struktur bawah permukaan. Pemanfaatan ilmu geofisika dilakukan dengan mengintegrasikan metode gravitasi dan metode seismik. Kemampuan metode gravitasi dalam mendeteksi perbedaan densitas baik secara horizontal maupun kedalaman dapat digunakan untuk mempelajari struktur pada batuan bawah permukaan (Dewi et al., 2020; Musset & Khan, 2000), sedangkan kemampuan metode seismik dalam menentukan batas-batas struktur, dapat memberikan informasi yang cukup jelas terutama dalam memperlihatkan distribusi patahan (Bacon, 2005).

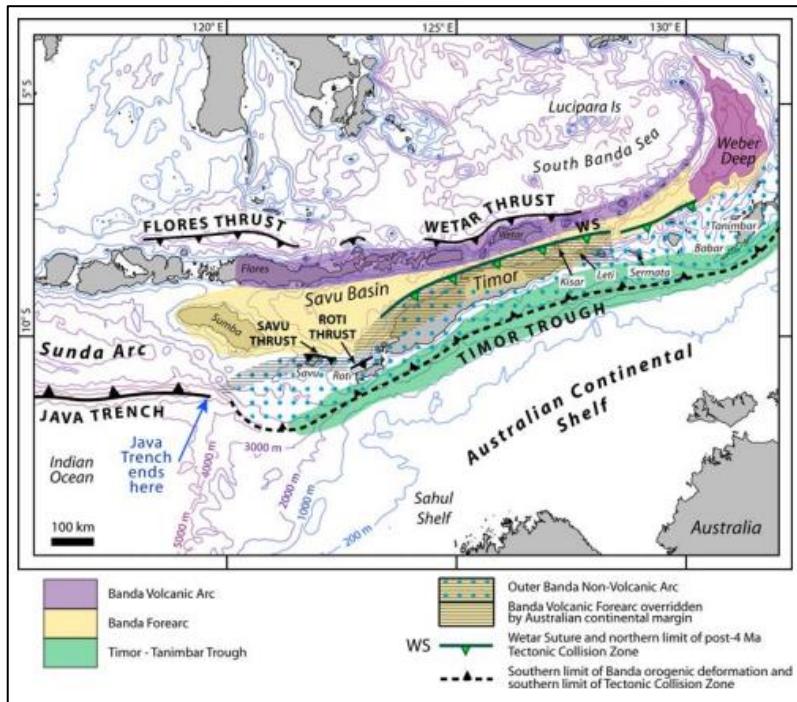
Dalam penelitian ini, data gravitasi digunakan sebagai data primer yang kemudian akan didukung oleh data seismik dan informasi data geologi sebagai data sekunder (Padmawidjaja et al., 2019; Qiu et al., 2020). Metode gravitasi dimanfaatkan untuk mengidentifikasi keberadaan

struktur yang terbentuk berdasarkan analisis turunan horizontal pertama (*First Horizontal Derivative*; FHD) dan turunan vertikal kedua (*Second Vertical Derivative*; SVD), data kedalaman berdasarkan analisis kedalaman, dan pembuatan model struktur bawah permukaan dengan pemodelan ke depan (*forward modeling*) (Andari et al., 2019; Padmawidjaja et al., 2019; Rosid et al., 2020), sedangkan data seismik yang diperoleh berupa data 2D *seismic section* dalam domain waktu (TWT) dan *time structure map* akan memberikan informasi berupa distribusi patahan dan batas lapisan secara horizontal yang akan digunakan sebagai acuan dalam membuat model. Pemodelan struktur geologi yang diperoleh dapat digunakan sebagai penentu zona jebakan hidrokarbon berdasarkan mekanisme *element petroleum system*. Berdasarkan penelitian ini, diharapkan integrasi kedua metode dapat memberi gambaran struktur yang kompleks dan optimal, sehingga hasil dari penelitian ini dapat dimanfaatkan dalam pengembangan informasi dasar di bidang eksplorasi migas di kawasan timur Indonesia.

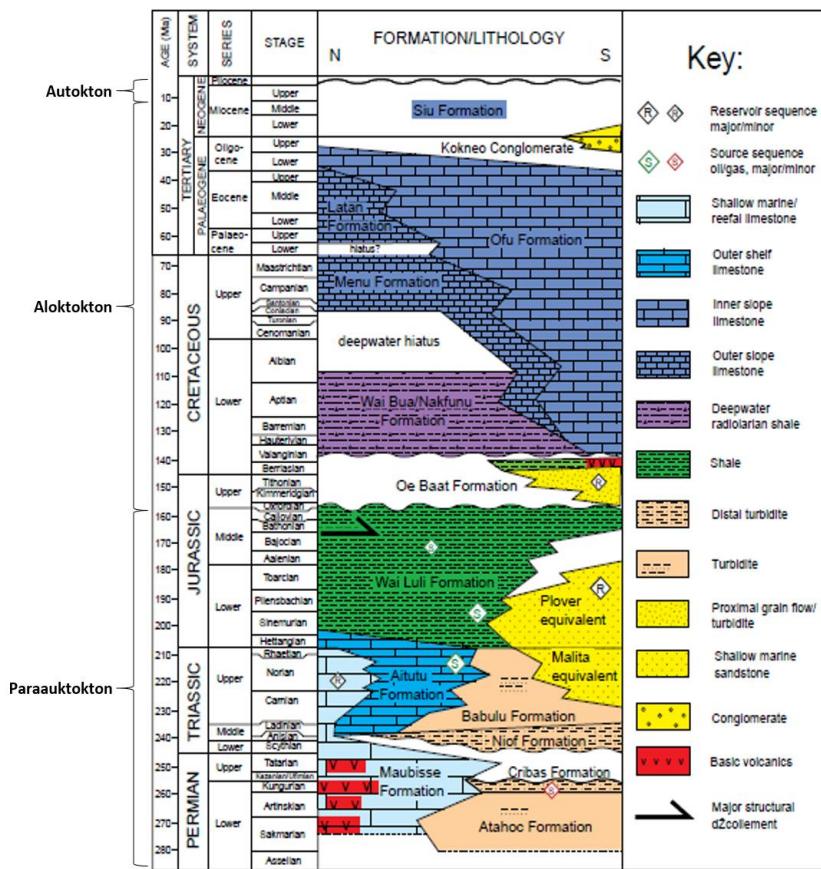
2. Landasan Teori

2.1. Geologi Regional

Pulau Timor menjadi salah satu pulau di Nusa Tenggara Timur yang berada pada jalur busur banda bagian luar (*outer arc*) keberadaan Pulau Timor pada jalur busur Banda bagian luar, membuat Pulau Timor menjadi pulau *non-vulcanic arc* (Koesnama, 2015). Kemunculan Pulau Timor berkaitan dengan *Australia continental margin* yang



Gambar 1. Tectonic setting di regional Laut Banda (Audley-Charles 2011).

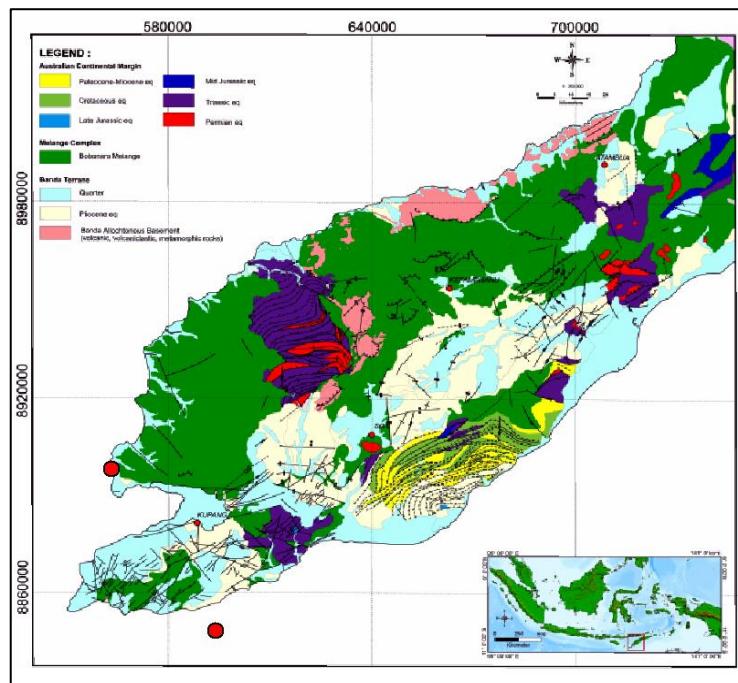


Gambar 2. Stratigrafi Pulau Timor (modifikasi dari Charlton, 2001).

bertumbukan dengan Asian fore-arc Gambar 1 (Audley-Charles, 2004 dan 2011).

Proses tumbukan dimulai pada Zaman Neogen antara Australia continental margin NW dengan forearc dari Banda volcanic. Pada 12 Ma, Indian oceanic crust dengan umur Kapur (Cretaceous) yang menempel pada Australia

continental margin mulai mengalami subduksi ke bawah Banda forearc. Proses subduksi berlangsung hingga 4 Ma, pada saat itu terjadi kolisi antara Australia continental margin dengan Banda trench yang menyebabkan massa kerak Australia tertolak masuk ke dalam forearc Banda (Audley-Charles, 2011). Penolakan tersebut menyebabkan



Gambar 3. Peta geologi umur batuan di Pulau Timor bagian barat (modifikasi dari Erdi et al., 2018).

massa kerak Australia mengalami *roll back* di bawah *Banda trench* bersamaan dengan efek *pull-down* hingga menghasilkan *fold and thrust* sepanjang 23.000 km dan mengalami pengangkatan hingga 3 km di atas permukaan laut. Selain itu, orogenik Timor membentuk depresi yang melibatkan dorongan dekat dengan *Australia continental margin*. Zona depresi tersebut dikenal dengan *Timor trough* dan menjadi ujung distal dari *fold and thrust* yang diperkirakan memiliki kedalaman 2–3,2 km (Audley-Charles, 1981; Harsolumakso et al., 2019).

2.2. Stratigrafi Regional

Pulau Timor memiliki struktur kompleks yang disebabkan oleh proses tektonik yang terjadi. Proses tektonik tersebut mempengaruhi posisi stratigrafi batuan penyusunnya. Berdasarkan Audley-Charles (2011), Bachri & Permana (2015), dan Charlton (2001), batuan di Pulau Timor terbagi menjadi tiga satuan tektonostratigrafi, yaitu: alokton, paraauktokton, autokton. Alokton merupakan endapan *active margin* busur Banda (Asia) hasil penujaman lempeng samudera akibat *rifting* benua Australia pada Zaman Kapur hingga akhir Pliosen. Paraauktokton merupakan endapan *passive margin* kontinental Australia dari dua megasekuen yang dibedakan berdasarkan waktu *rifting*, yaitu Sekuen Kekneno dan Kolbano.

Autokton merupakan batuan yang terendapan setelah terjadi kolisi antara benua Australia dengan *volcanic arc* pada periode Miosen Akhir hingga Pliosen (Bachri & Permana, 2015). Ketiga satuan tektonostratigrafi tersebut memiliki litologi formasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan stratigrafi yang terbentuk, sebagian besar Pulau Timor tersusun atas endapan paraauktokton (*Australia continental margin*) dan autokton. Endapan autokton yang tersingkap ke permukaan mengisi sebagian besar Pulau Timor berupa batuan Kuarter dan Bobonaro

mélange yang diperlihatkan pada Gambar 3. Kompleks Bobonaro yang tersebar pada masa Miosen Akhir mengisi 60% dari Pulau Timor (Charlton, 2001; Harsolumakso et al., 2019).

2.3. Petroleum System Daerah Penelitian

Proses kolisi pada *Australia continental margin* dengan *Banda trench* mengakibatkan perubahan struktur dan terbentunya zona depresi. Kedua hal tersebutlah yang menyebabkan Pulau Timor memiliki *petroleum system*.

Kunci *element petroleum system* di Pulau Timor terjadi dalam suksesi Mesozoikum, khususnya pada Zaman Trias dan Jura (Erdi et al., 2018; Koesnama, 2015). *Source rock* terdapat pada masa Trias–Jura, dengan sampel serpih bituminous pada masa Trias mengandung 8%–23,3% TOC dan pada Zaman Jura memiliki kualitas yang baik untuk minyak dan gas bumi (Charlton, 2001; Erdi et al., 2018). *Reservoir rock* yang memungkinkan terjadi di Pulau Timor terdapat pada batuan Trias Akhir–Jura Awal. Penentuan umur batuan reservoir tersebut disesuaikan berdasarkan sumur eksplorasi di Pulau Timor yaitu Sumur Banli-1 (Charlton, 2001; Erdi et al., 2018). Potensi *seal* pada Pulau Timor terdapat pada batuan Jura tengah–Kapur.

2.4. Metode Gaya Berat

Metode gravitasi atau gaya berat digunakan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan berdasarkan perbedaan densitas dari daerah sekelilingnya ($\rho = \text{gram/cc}$), yang mana perbedaan densitas ini diakibatkan oleh ketidakseragaman struktur geologi bawah permukaan (Andari et al., 2019).

2.5. Konsep Dasar Gaya Berat

Ilmu yang mendasari konsep metode gravitasi adalah hukum Newton. Hukum Newton menjelaskan bahwa gaya tarik-menarik antar dua partikel akan berbanding lurus

dengan hasil kali kedua massa dan berbanding terbalik dengan jarak (Telford et al., 1990). Hal ini dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = \gamma (m_1 m_2 / r^2) r_1 \quad (1)$$

dengan:

F = Gaya yang bekerja pada m_2 (N)

γ = Konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

r_1 = Arah vektor satuan

$m_1 m_2$ = Massa benda 1 dan 2 (kg)

Namun dalam metode gravitasi, nilai gravitasi yang terukur bukanlah nilai gaya gravitasi (F) melainkan nilai percepatan gravitasi (g). Hubungan antara keduanya dijelaskan pada hukum Newton II yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = m \times g \quad (2)$$

$$g = (\gamma M_e / R e^2) r_1 \quad (3)$$

dengan:

F = Gaya yang bekerja pada m_2 (N)

r_1 = Arah vektor satuan

r = Jarak antar partikel massa (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

M_e = Massa bumi (kg)

R_e = Jari-jari (m)

Respon anomali gravitasi terhadap densitas suatu massa dapat dilihat dari potensial gravitasi. Potensial gravitasi berkaitan dengan percepatan gravitasi, yang mana percepatan gravitasi merupakan medan potensial yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$g = (\gamma M_e / R e^2) r_1 \quad (4)$$

dengan:

r_1 = Arah vektor satuan

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

M_e = Massa bumi (kg)

R_e = Jari-jari (m)

2.6. Koreksi Lintang

Koreksi lintang dilakukan karena posisi lintang bumi dapat mempengaruhi nilai medan gravitasi yang terukur akibat bentuk Bumi yang tidak bulat. Koreksi lintang dinyatakan dalam persamaan berikut (Telford et al., 1990):

$$g_L = 978031.846(1 + 0.005278895 \sin^2 \Phi + 0.000023462 \sin^4 \Phi) \quad (5)$$

2.7. Koreksi Udara Bebas

Koreksi udara bebas (*Free Air Correction*) dilakukan karena adanya pengaruh ketinggian terhadap medan gravitasi bumi sebesar -0.3085 mGal/m untuk daerah ekuator. Koreksi udara bebas dinyatakan dalam persamaan berikut (Reynolds, 1997):

$$g_{FAA} = g_{obs} - g_L + 0.3085h \quad (6)$$

dengan:

g_{FAA} = Koreksi udara bebas

g_L = Koreksi lintang

g_{obs} = Gravitasi pembacaan

h = Ketinggian (m)

2.8. Koreksi Bougeur

Koreksi Bougeur dilakukan untuk menghilangkan perbedaan ketinggian tanpa mengabaikan massa batuan, yang mana massa batuan tersebut terletak di antara titik pengukuran dengan bidang geoid (Andari et al., 2019). Koreksi Bougeur dinyatakan dalam persamaan berikut (Telford et al., 1990):

$$g_{BC} = 2\pi\rho\gamma h \quad (7)$$

dengan:

g_{BC} = Koreksi Anomali Bougeur (mGal)

h = Ketinggian (m)

ρ = Densitas batuan (gram/cc)

2.9. Koreksi Terrain

Koreksi *terrain* dilakukan untuk memperhitungkan bentuk topografi di sekitar titik pengukuran gravitasi. Hal ini dikarenakan terdapat massa yang terletak di antara titik pengamatan dengan bidang *spheroid* pada ketinggian tertentu yang dapat mempengaruhi nilai gravitasi. Koreksi *terrain* dinyatakan dalam persamaan berikut (Reynold, 1997):

$$g_{TC} = 0.4191 \frac{\rho}{n} (r_2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r_2^2 + z^2}) \quad (8)$$

dengan:

g_{TC} = Koreksi *terrain*

ρ = Densitas Koreksi Bouguer (Mg m^{-3})

n = Jumlah segmen

r_1, r_2 = Jari-jari (m)

z = Perbedaan ketinggian (m)

2.10. Complete Bougeur Anomaly (CBA)

Complete Bougeur Anomaly (CBA) merupakan hasil anomali gravitasi yang didapat setelah melakukan koreksi dengan asumsi bahwa pengamatan terletak di atas titik datum. *Complete Bougeur Anomaly* (CBA) dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$g_{CBA} = g_{obs} - g_t + (\Delta g_L + \Delta g_{FAC} - \Delta g_{BC} + \Delta g_{TC}) \quad (9)$$

dengan:

g_{obs} = Gravitasi pembacaan (mGal)

g_t = Gravitasi teoritis (mGal)

Δg_L = Hasil Koreksi Tidal (mGal)

Δg_{FAC} = Hasil Koreksi Udara Bebas (mGal)

Δg_{BC} = Hasil Koreksi Bougeur (mGal)

Δg_{TC} = Hasil Koreksi Terrain (mGal)

2.11. Analisis Spektrum

Analisis spektrum dapat memisahkan anomali residual dan anomali regional dari *Complete Bougeur Anomaly* (CBA). Hal ini dikarenakan CBA berasosiasi dengan

kedalaman dangkal (*short wavelength*) dan kedalaman yang dalam (*long wavelength*) (Grandis, 2014). Pemisahan anomali dapat dilakukan dengan menggunakan *radial average power spectrum*, yang mana data ditransformasikan dari spasial ke domain frekuensi dengan menggunakan algoritma 2D *Fast Fourier Transform* (FFT). Pemisahan anomali regional dan anomali residual dapat dilakukan dengan menentukan panjang gelombang, yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\lambda = 1/k \quad (10)$$

Selain sebagai pemisah, analisis spektrum dapat dimanfaatkan untuk analisis kedalaman, yang dinyatakan dalam persamaan berikut (Sigismundi, 2019):

$$h = \frac{s}{4\pi} \quad (11)$$

dengan:

λ = Panjang gelombang (km)

k = Wavenumber

h = Kedalaman (m)

s = Kemiringan

2.12. First Horizontal Derivative (FHD)

First Horizontal Derivative (FHD) digunakan untuk menggambarkan laju perubahan nilai gravitasi yang disebabkan pada arah x dan y yang terdapat benda anomali. FHD digunakan untuk menentukan batas horizontal adanya kontras densitas batuan. Persamaan FHD secara matematis sebagai berikut (Blakely, 1996; Rosid et al., 2020):

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (12)$$

dengan:

$\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ = Turunan pertama laju perubahan nilai gravitasi pada arah x dan y.

2.13. Second Vertical Derivative (SVD)

Second Vertical Derivative (SVD) dimanfaatkan untuk memunculkan efek dangkal agar dapat menggambarkan anomali residual dari benda anomali yang dangkal. SVD juga dapat digunakan sebagai penentu batas struktur. Persamaan SVD diturunkan dari persamaan Laplace's yang dapat dituliskan sebagai berikut (Elkins, 1951; Sumintadireja et al., 2018):

$$\nabla^2 \Delta H = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 \Delta H = \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

dengan:

$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 g}{\partial y^2}$ dan $\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$ = Turunan kedua laju perubahan nilai gravitasi pada arah x, y, z.

2.13. Pemodelan ke Depan (*Forward Modelling*)

Pemodelan ke depan merupakan metode interpretasi yang memperkirakan densitas bawah permukaan dengan membuat terlebih dahulu benda geologi berdasarkan parameter model bawah permukaan (Rosid et al., 2020). Dalam proses pembuatan model akan dilakukan dengan *trial and error* dengan mencocokan kurva hasil pengamatan dengan kurva hasil kalkulasi, sehingga pemodelan yang dibuat akan berbeda-beda.

2.14. Metode Seismik

Metode seismik dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi geologi bawah permukaan dan parameter fisik struktur menggunakan shock wave yang dapat menjalar melalui bawah permukaan dan kembali lagi ke permukaan (Hubscher, 2014). Terdapat dua jenis metode seismik yaitu seismik refleksi dan seismik refraksi yang dapat menghasilkan profil struktur yang berbeda. Dalam dunia eksplorasi hidrokarbon, jenis seismik yang sering digunakan adalah metode seismik refleksi karena murah, efisien dan dapat memberikan profil bawah permukaan yang dalam dengan baik.

3. Metode Penelitian

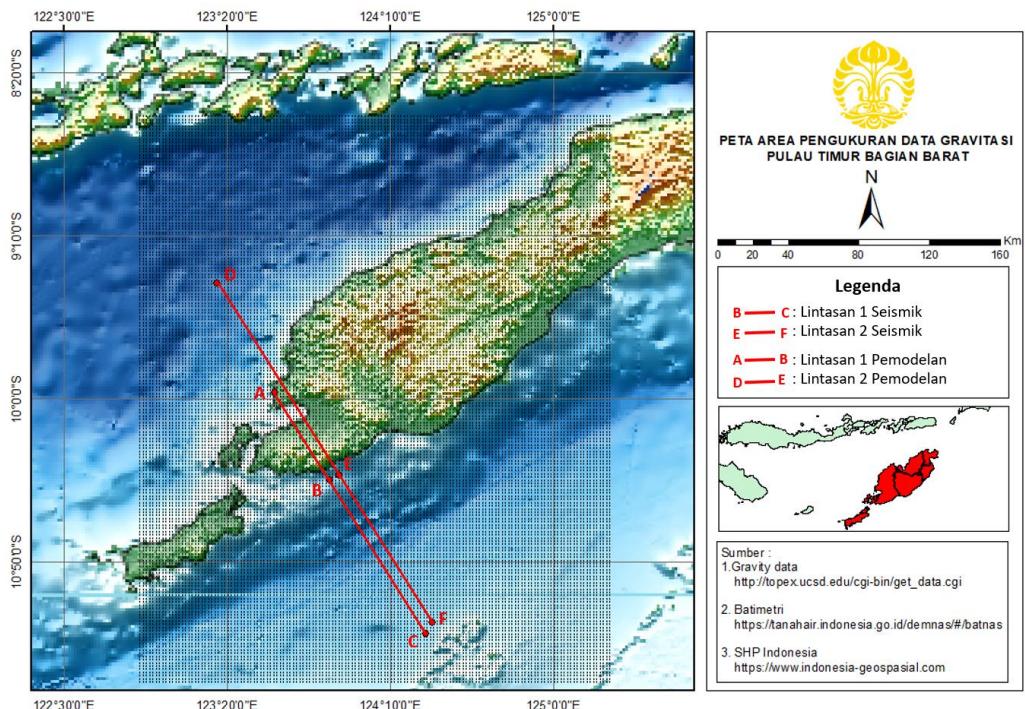
3.1. Data Penelitian

Penelitian dilakukan di Pulau Timor bagian barat dengan menggunakan data primer berupa data gravitasi dan data sekunder berupa data seismik. Data gravitasi yang digunakan berupa data satelit TOPEX/Poseidon dengan luas area penelitian sebesar $\pm 86.016 \text{ km}^2$ dan jumlah titik pengukuran sebanyak 25.666 titik. Pemilihan area yang cukup luas pada data gravitasi bertujuan untuk mengetahui pesebaran nilai gravitasi yang dapat melengkapi Pulau Timor bagian barat dan lintasan penampang seismik. Data seismik merupakan data yang sudah diolah dan terdapat pada Migas Data Repository. Seismik yang digunakan ada 2 lintasan, yaitu lintasan B ke C dengan panjang lintasan $\pm 101 \text{ km}$ dan lintasan E ke F dengan panjang lintasan $\pm 98 \text{ km}$ yang ditunjukkan pada Gambar 4.

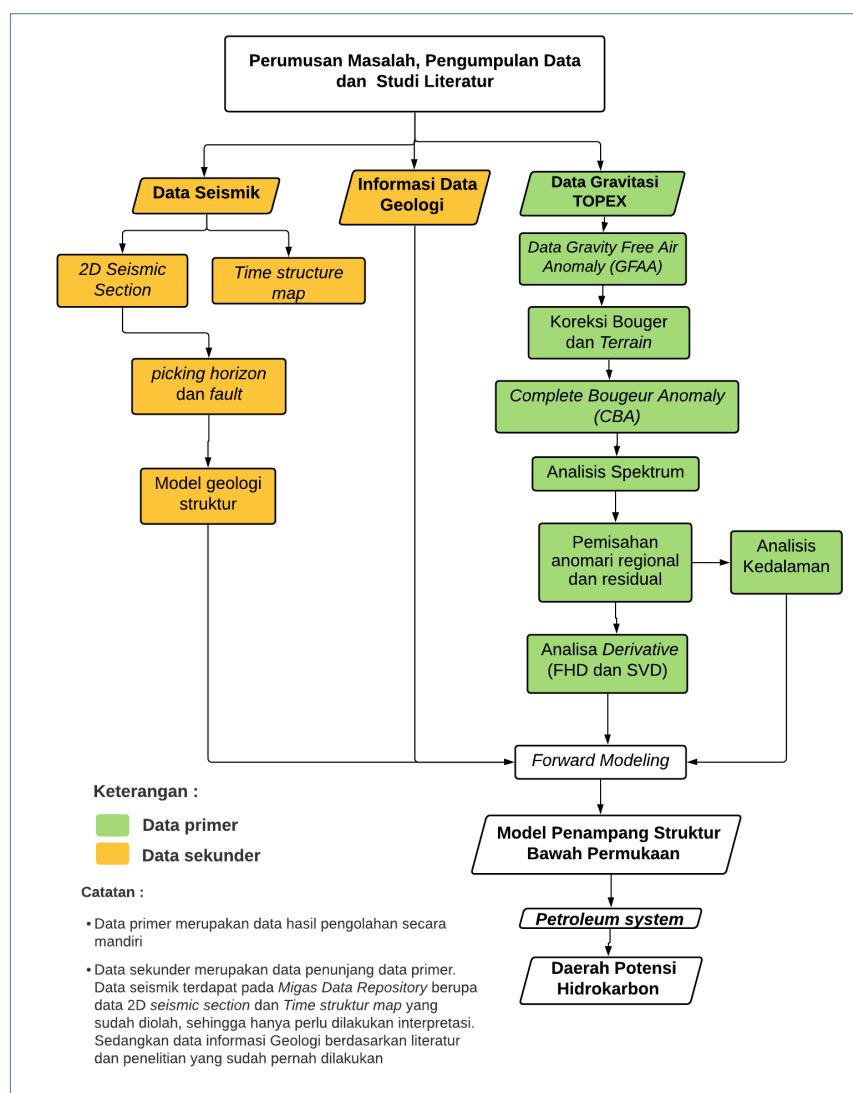
Pada penelitian ini, pemodelan ke depan 2D data gravitasi satelit dibuat pada lintasan A-C dan D-F. Pemodelan pada lintasan B-C dan E-F dibuat mengikuti model penampang seismik, sedangkan lintasan A-B dan D-E berdasarkan trial error dan meneruskan hasil pemodelan pada lintasan B-C dan E-F.

3.2. Alur Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat tiga data yang digunakan yaitu data gravitasi, data seismik dan informasi data geologi (Gambar 5). Data gravitasi satelit yang diperoleh berupa data *Free Air Anomaly* dari laman https://topex.ucsd.edu/cgi_bin/get_data.cgi. Sedangkan data seismik menjadi data sekunder atau pendukung yang diperoleh berupa data 2D *seismic section* dan *time structure map* yang sudah diolah dan terdapat pada *Migas Data Repository* yang diunggah dari laman <https://geoseismic-seasia.blogspot.com/search/label/11%20Timor%20Sea>.



Gambar 4. Peta area pengukuran data gravitasi dan data seismik.



Gambar 5. Diagram alir penelitian.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Metode Seismik

Pada metode seismik, penampang struktur yang telah dikorelasikan dengan time struktur map memberikan informasi berupa batas lapisan secara horizontal (Gambar 6a dan 6b). Terdapat lima batas lapisan yang terbentuk yaitu batuan tertua Perm, Trias, Jura, Kapur hingga batuan paling muda yaitu Pliosen. Pada penelitian ini penulis menambahkan lapisan dengan jenis batuan yang lebih muda dari Pliosen yaitu Kuarter berdasarkan informasi geologi (Harsolumakso et al., 2019; Rosidi et al., 1996). Interpretasi penentuan struktur vertikal dilakukan dengan picking fault, yang mana interpretasi dengan picking fault dilakukan berdasarkan informasi penelitian sebelumnya (Harsolumakso et al., 2019; Koesnama, 2015; Jones et al., 2011; Lee & Bawden, 2011) yang dilakukan pada daerah yang tidak jauh dari penampang seismik pada penelitian saat ini.

Hasil interpretasi seismik pada Gambar 7a dan 7b memperlihatkan model struktur geologi dengan enam lapisan yang dibedakan berdasarkan umur batuannya. Lapisan Perm menjadi lapisan basement dan lapisan Kuarter menjadi seabed-nya. Struktur patahan terlihat memanjang dari SE-NW, yang terbentuk akibat pengaruh dari proses kolisi (Audley-Charles, 2011; Jones et al., 2011; Lee & Bawden, 2011).

4.2. Metode Gravitasi

4.3.1. Peta Complete Bouger Anomaly (CBA)

Peta CBA diperoleh setelah hasil pengoreksian dihitung berdasarkan persamaan 9. Hasil dari perhitungan tersebut kemudian akan di proses melalui perangkat lunak Oasis Montaj. Hasil pengolahan memperlihatkan peta *Complete Bougeur Anomaly* (CBA) dengan rentang nilai anomali sebesar -40 mgal sampai 370 mgal (Gambar 8a). Nilai anomali tinggi pada daerah penelitian tersebar di bagian utara dan selatan dari Pulau Timor. Nilai anomali tinggi pada sisi utara dipengaruhi oleh keberadaan *forearc Banda* atau *Banda volcanic island* yang dibatasi oleh zona kolisi tektonik (Audley-Charles, 2011). Hal ini dikarenakan terdapat batuan beku (Rosidi et al. 1996) dengan densitas tinggi yang dapat mempengaruhi nilai anomali menjadi tinggi. Sedangkan zona anomali tinggi di area selatan diakibat oleh kemunculan palung Timor (Audley-Charles, 2011) yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Nilai anomali rendah yang diperoleh di daerah penelitian tersebar di bagian barat hingga timur pada Pulau Timor, dipengaruhi oleh sebaran litologi batuan yang didominasi batuan sedimen klastik berupa batugamping (Rosidi et al., 1996).

4.3.2. Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual dari Peta CBA

Pemisahan anomali pada peta CBA dengan analisis spektrum dilakukan untuk melihat perbedaan *body anomaly* pada anomali regional (dalam) dan anomali residual (dangkal). Pemisahan tersebut menghasilkan peta anomali regional dengan rentang nilai berkisar -35,5 mgal sampai

361,4 mgal (Gambar 9a) dan peta anomali residual dengan rentang nilai berkisar -19,8 mgal sampai 18,7 mgal (Gambar 9b). Berdasarkan pemisahan anomali regional dan residual menggunakan analisis spektrum, diperoleh peta anomali regional dan peta anomali residual yang cukup baik. Hal ini terlihat dengan hasil peta residual yang tidak teridentifikasi adanya anomali regional yang terbaca pada hasil tersebut.

Selain sebagai pemisah anomali, penggunaan analisis spektrum dapat digunakan sebagai analisis kedalaman dari setiap *body anomaly* yang dipisahkan. Analisis kedalaman berdasarkan kurva *radial average power spectrum* (Gambar 10) menghasilkan nilai kedalaman anomali regional sebesar ± 26 km, kedalaman anomali residual sebesar $\pm 7,9$ km dan anomali *noise* sebesar ± 1 km. Nilai kedalaman anomali yang diperoleh dapat digunakan sebagai batas kedalaman pada saat melakukan pemodelan ke depan (*forward modelling*).

4.3.3. Analisis Derivatif dari Peta Anomali Residual

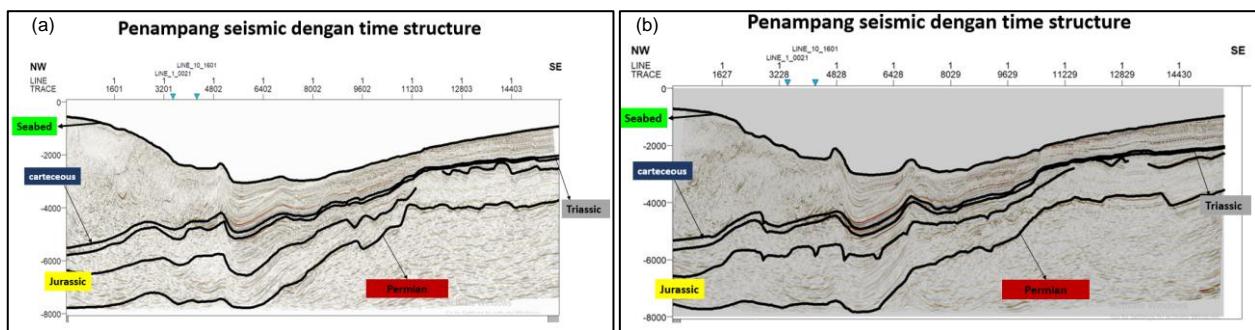
Analisis derivatif dengan filter *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) dapat digunakan dalam mengidentifikasi keberadaan struktur geologi. Pengolahan dengan analisis derivatif menghasilkan peta kontur *First Horizontal Derivative* (FHD) dengan rentang nilai anomali berkisar 0,0002 sampai 0,0036 mgal/m (Gambar 11a). Sedangkan peta kontur *Second Vertical Derivative* (SVD) memiliki rentang nilai anomali berkisar $6,15 \times 10^{-7}$ sampai $5,89 \times 10^{-7}$ mgal/m (Gambar 11b).

Hasil peta FHD di sisi timur pada Pulau Timor memperlihatkan nilai FHD maksimum mendominasi di area tersebut dan diperkuat dengan nilai SVD minimum yang memungkinkan terdeteksi keberadaan struktur. Namun, apabila dilihat berdasarkan peta umur batuan pada Gambar 3, kemunculan nilai FHD maksimum lebih dipengaruhi oleh munculnya perbedaan litologi yang banyak ditemukan di sisi timur Pulau Timor.

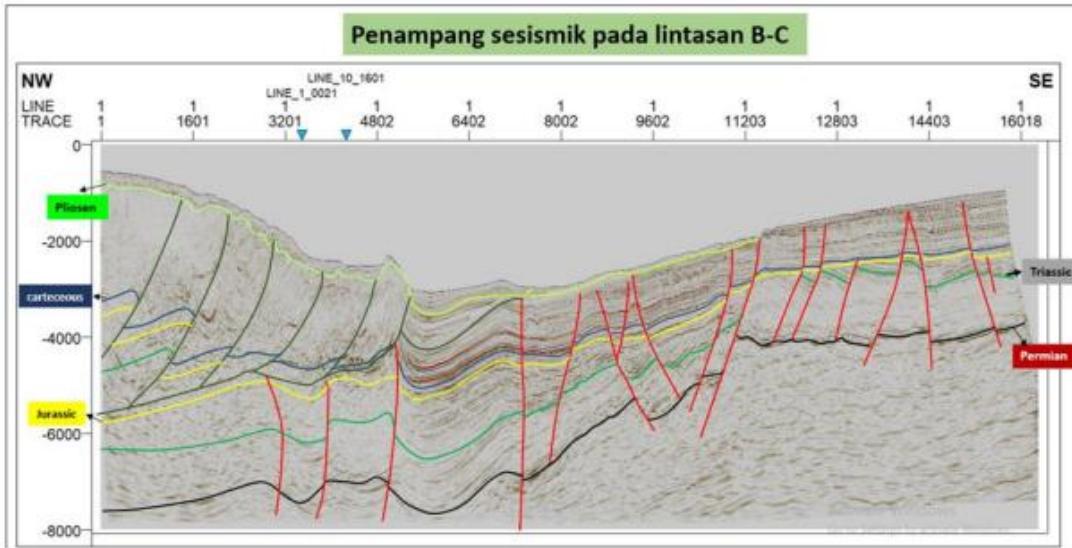
Pada penelitian ini, untuk melakukan identifikasi struktur, dilakukan *slicing* pada peta FHD dan SVD. Garis *slicing* dibuat memanjang dari darat hingga laut, yang mana garis *slicing* tersebut dibuat segaris mengikuti lintasan pengukuran metode seismik.

Hasil kurva FHD dan SVD pada lintasan A-C dan lintasan D-F pada Gambar 11a dan 11b, memperlihatkan tiga garis yang mengidentifikasi keberadaan struktur yaitu garis x, y dan z pada Gambar 12a dan Gambar 12b. Ketiga garis pendugaan struktur tersebut memperlihatkan korelasi yang sesuai berdasarkan Blakely (1996), yang mana adanya korelasi pada kurva FHD yang bernilai maksimum dengan kurva SVD yang bernilai nol. Garis pendugaan struktur pada x, y dan z berdasarkan elevasi, memperlihatkan bahwa struktur pendugaan yang terbaca berada di area laut dengan kedalaman lebih dari 1 kilometer.

Keberadaan struktur pada area darat tidak dapat teridentifikasi, hal tersebut memungkinkan terjadi akibat kedalaman anomali residual yang mencapai 12 km atau terlalu dalam sehingga struktur yang dangkal tidak dapat



Gambar 6. Penampang seismik dengan *time structure map* (a) Lintasan B-C dan (b) Lintasan E-F.



Gambar 7. Gambaran struktur geologi pada penampang seismik setelah dilakukan picking fault pada lintasan B-C.

teridentifikasi dengan jelas oleh kurva FHD dan SVD.

Hasil analisis pada kurva FHD dan SVD dari kedua lintasan tersebut kemudian dikorelasikan untuk memperlihatkan kesinambungan dari hasil struktur yang teridentifikasi. Korelasi kedua lintasan tersebut memperlihatkan bahwa ketiga struktur yang teridentifikasi yaitu pada garis x, y dan z memiliki kesinambungan (Gambar 12a dan 12b), yang menandakan bahwa ketiga struktur tersebut saling menerus yang dapat dilihat pada Gambar 13. Kemenerusan struktur tersebut memanjang dari *Tenggara ke Barat laut*, yang mana keberadaan struktur ini dipengaruhi oleh pergerakan *Australia continental margin* yang bergerak mendekati *Banda trench* dan menyebabkan proses kolisi. Pada proses kolisi yang terbentuk dahulu adalah Pulau Timor pada bagian timur dan menyebar ke bagian barat, sehingga struktur memanjang dari tenggara (SE) ke barat laut (NW).

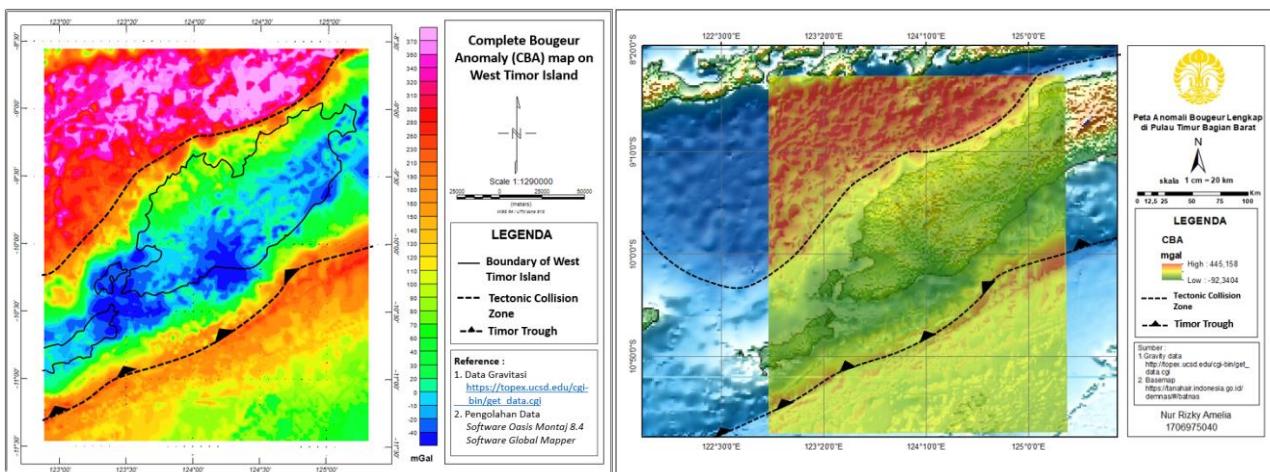
4.3. Forward Modelling

Pemodelan dibuat pada garis lintasan A-C yang merupakan lintasan pengukuran yang diambil dari darat hingga laut tanpa melintasi *tectonic collision zone*, sedangkan pemodelan pada garis lintasan D-F merupakan lintasan pengukuran yang diambil memotong pulau dan melewati batas *tectonic collision zone*. Garis *slicing* untuk pemodelan struktur bawah permukaan pada lintasan A-C

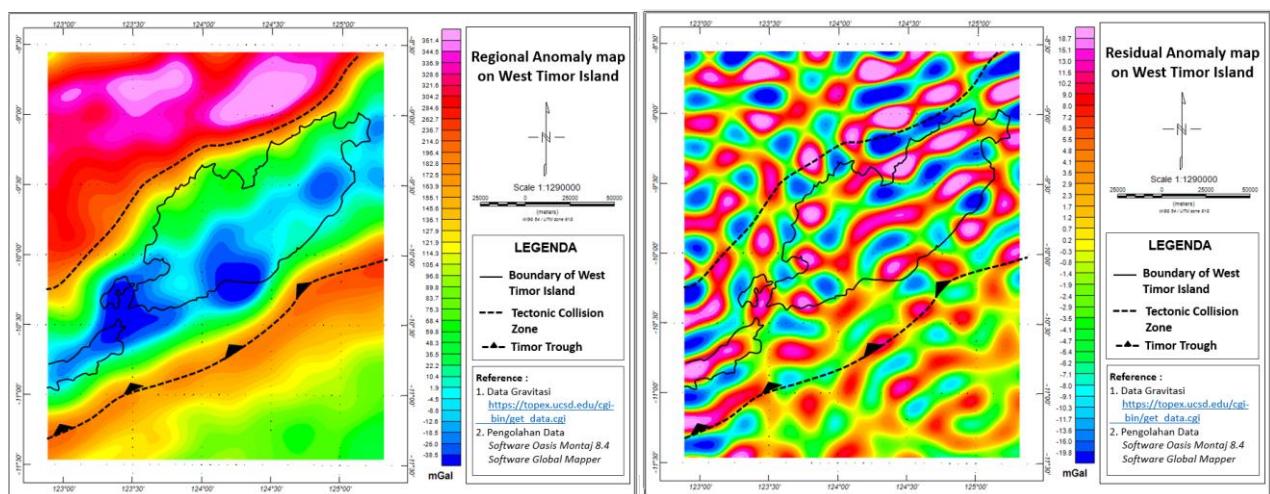
dan D-F dibuat menggunakan peta anomali residual pada data gravitasi. Pembuatan model dilakukan dengan memasukan nilai densitas batuan berdasarkan informasi litologi formasi geologi dan bentuk pemodelan dibuat berdasarkan hasil model interpretasi seismik dan informasi data geologi.

Pemodelan pada kedua lintasan memiliki kedalaman struktur maksimum $\pm 12,4$ km dengan enam batas horizon sebagai penyusun lapisan berdasarkan data seismik. Nilai densitas pada horizon tertua atau Perm sebesar ± 3 g/cc, nilai densitas pada horizon dengan umur Trias sebesar $\pm 2,6$ g/cc, nilai densitas pada horizon dengan umur Jura sebesar $\pm 2,4$ g/cc, nilai densitas pada horizon dengan umur Kapur sebesar $\pm 2,3$ g/cc, nilai densitas pada horizon dengan umur Pliosen sebesar $\pm 2,2$ g/cc, dan nilai densitas pada horizon dengan umur Kuarter dan endapan *Bobonaro mélange* sebesar $\pm 2,2-2$ g/cc. Penentuan nilai densitas berdasarkan informasi geologi (Erdi et al., 2018; Koesnama, 2015; Rosidi et al., 1996) yang kemudian disesuaikan dengan table densitas (Telford et al., 1990).

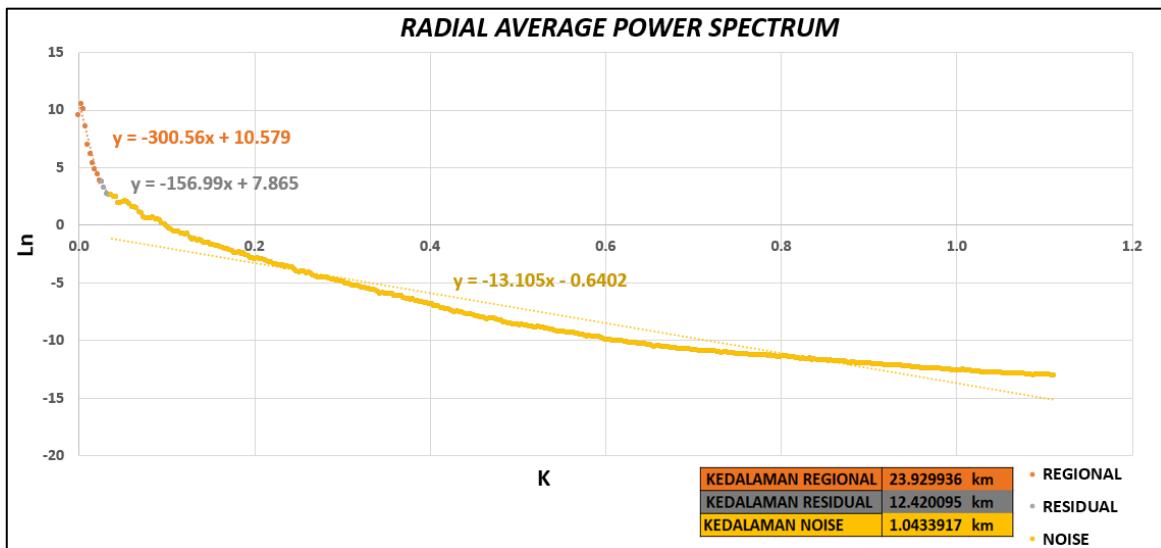
Berdasarkan proses tektonik pada Gambar 14 dan Gambar 15 yang berkaitan dengan pembentukan model pada lintasan A-C dan lintasan D-F, interpretasi seismik pada offshore selatan dari Pulau Timor dapat menunjukkan dua struktur utama yang terbentuk yaitu *thrust fault* di bagian utara dan *normal fault* di bagian selatan dari gambar



Gambar 8. Kiri: (a) Peta Complete Bouguer Anomaly (CBA) dan kanan: (b) Peta CBA hasil overlay dengan peta batimetri.



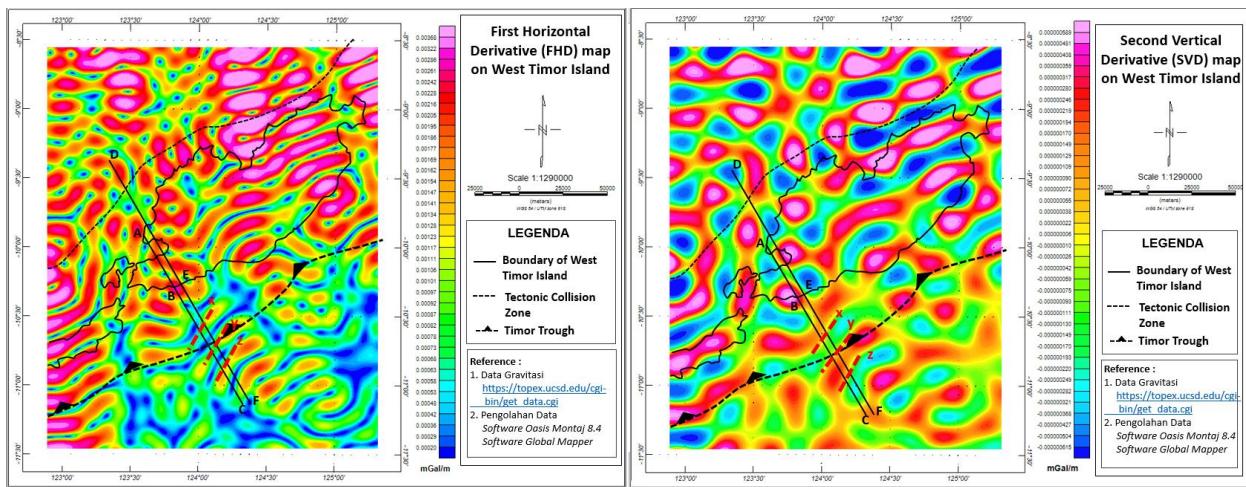
Gambar 9. Kiri: (a) Peta Anomali Regional dan kanan: (b) Peta Anomali Residual.



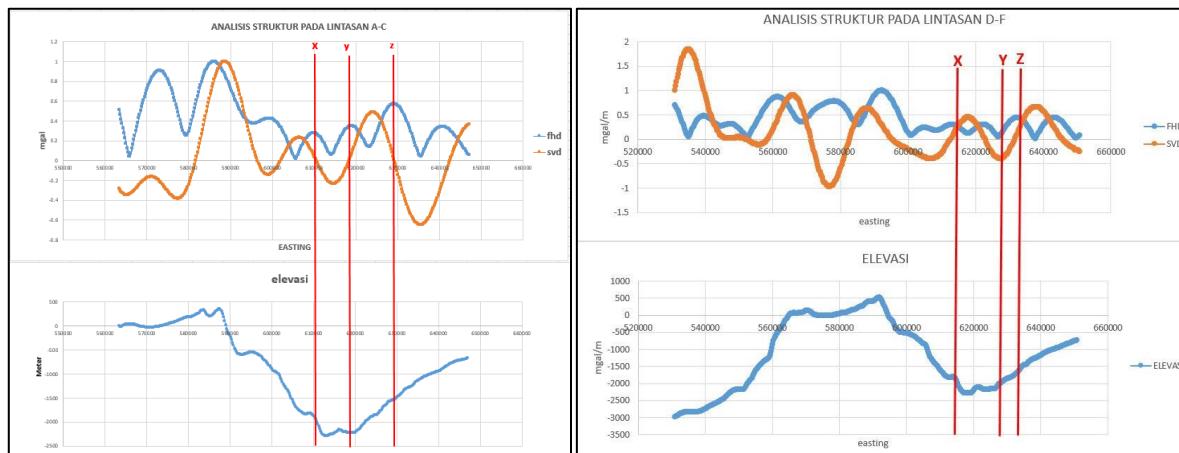
Gambar 10. Kurva Radial Average Power Spectrum.

penampang seismik. Pernyataan Sapiie et al. (2017) tersebut dalam penelitiannya sesuai dengan yang digambarkan pada penelitian ini, yang mana kedua struktur tersebut ditandai dengan kemunculan *Timor trough*. Identifikasi zona *Timor trough* pada penelitian ini

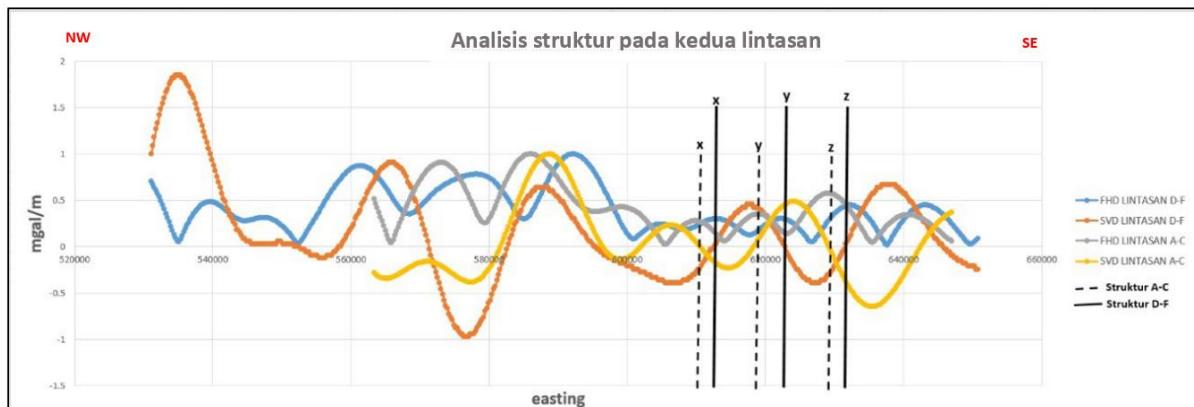
berdasarkan model sistem tektonik yang telah dilakukan oleh Richardson & Blundell (1996), yang menyimpulkan bahwa keberadaan *Timor trough* terletak di sebelah selatan busur Banda dengan kedalaman ± 2.000 meter sesuai dengan penelitian yang sedang dilakukan.



Gambar 11. Kiri: (a) Peta First Horizontal Derivative (FHD) dan kanan: (b) Peta Second Vertical Derivative (SVD).



Gambar 12. Kiri: (a) Identifikasi struktur pada lintasan A-C dan kanan: (b) Identifikasi struktur pada lintasan (D-F).

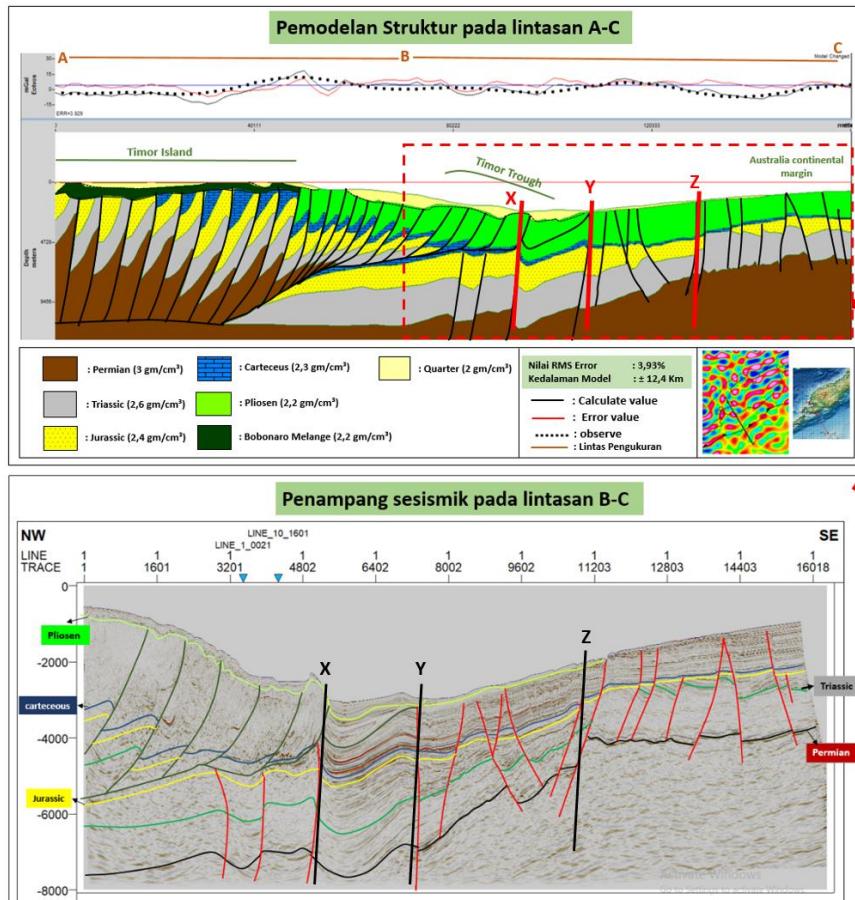


Gambar 13. Kurva anamisis struktur pada lintasan A-C dan D-F.

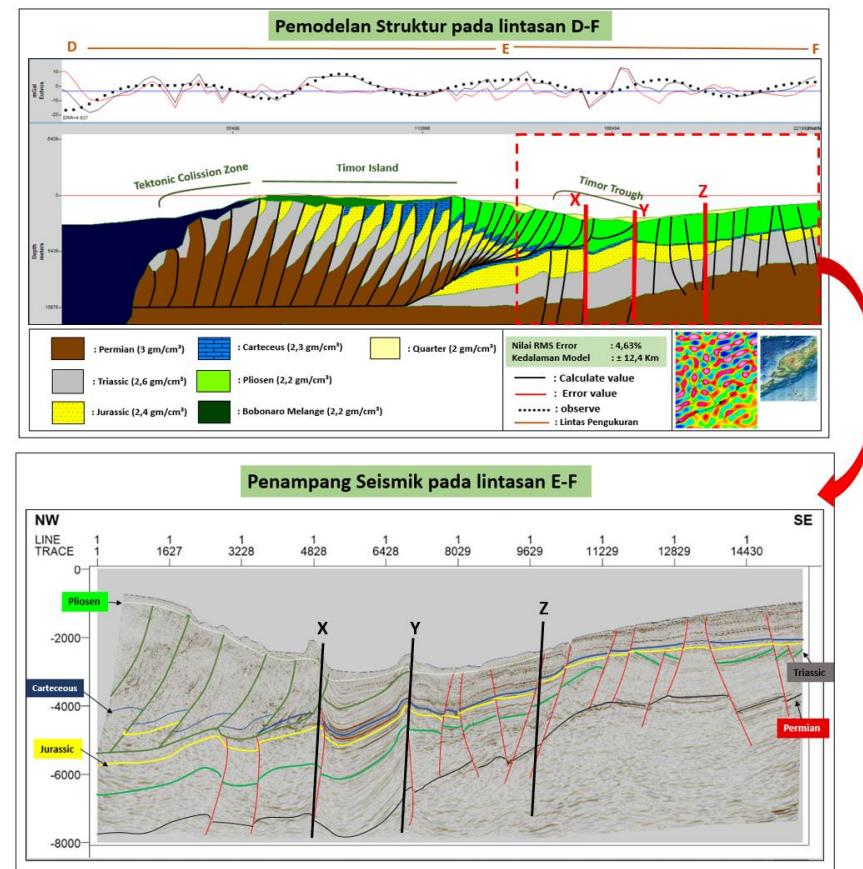
Pembentukan struktur tersebut tidak terlepas dari proses kolisi yang terjadi antara benua Australia dengan busur Banda menghasilkan *fold and thrust* akibat dari penolakan proses subduksi *Australia continental margin* ke bawah *forearc Banda*, yang sekarang disebut dengan *tectonic collision zone* (Audley-Charles, 2011) yang terlihat pada Gambar 15. Proses kolisi terus terjadi hingga mulai naik ke permukaan dengan membawa batuan runtuh seperti *Bobonaro mélange* (Gambar 3) (Harsolumakso et al., 2019) yang dikenal sebagai Pulau Timor (Audley-Charles 2011). Pergerakan *Australia continental margin* yang masih terus berlangsung mengakibatkan struktur yang terbentuk

semakin kompleks, hal ini diperlihatkan munculnya daerah perlipatan pada *Timor trough* dan struktur besar di bagian laut sebelum *Timor trough*.

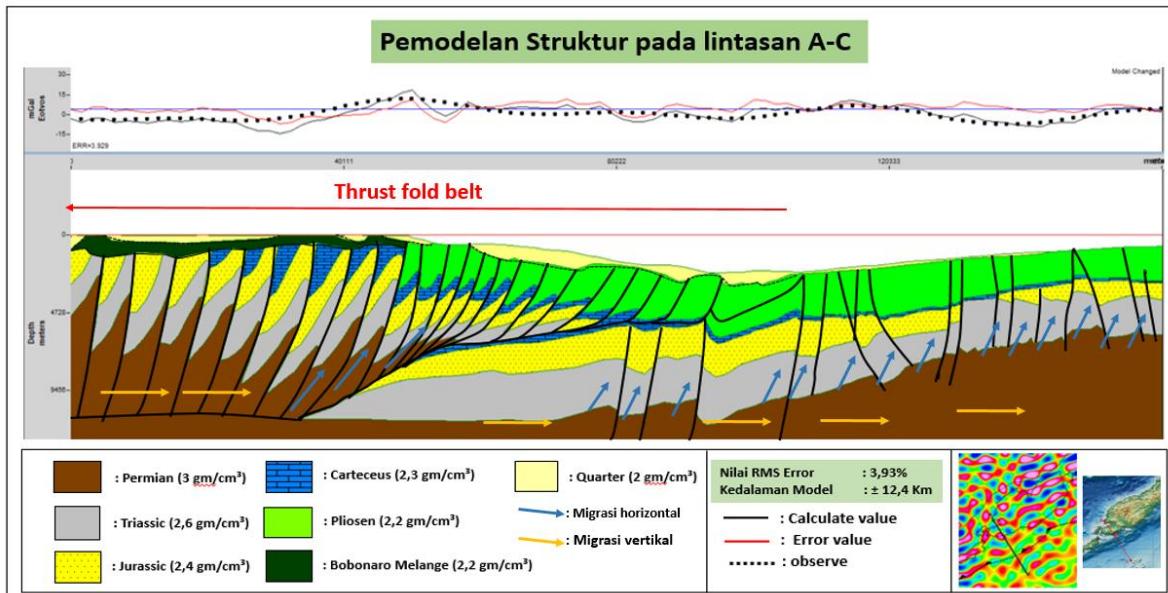
Selain itu, hasil pemodelan yang telah dibuat berdasarkan acuan model penampang seismik dan infomasi geologi memperlihatkan adanya kesesuaian struktur yang teridentifikasi pada data seismik dengan analisis derivatif pada data gravitasi. Analisis struktur yang dilakukan memperlihatkan tiga struktur yang teridentifikasi pada garis x, y dan z. Ketiga garis struktur tersebut berada pada kedalaman di bawah nol meter yang menandakan struktur yang teridentifikasi berada pada daerah laut



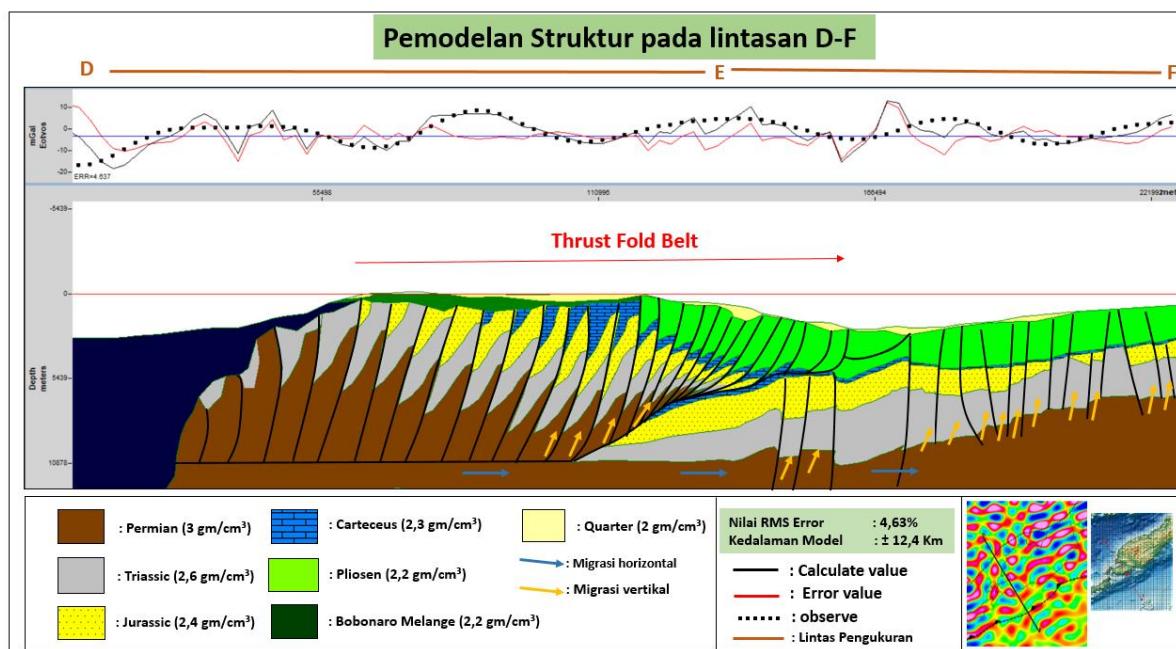
Gambar 14. Model penampang struktur bawah permukaan pada lintasan A-C hasil korelasi dengan model penampang seismik, informasi geologi dan analisis derivatif.



Gambar 15. Model penampang struktur bawah permukaan pada lintasan D-F hasil korelasi dengan model penampang seismik, informasi geologi dan analisis derivatif.



Gambar 16. Model petroleum system pada lintasan A-C.



Gambar 17. Model petroleum system pada lintasan D-F.

(Gambar 12a dan 12b) dan dekat dengan daerah Timor trough yang ditunjukkan pada Gambar 14 dan 15.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, struktur yang teridentifikasi dari kurva FHD dan SVD (Gambar 12a dan 12b) apabila ditarik garis lurus dengan model struktur bawah permukaan yang dibuat sesuai dengan penampang seismik dapat memperlihatkan posisi struktur yang terbaca sesuai seperti Gambar 14 dan 15, dengan struktur yang teridentifikasi ditandai dengan garis berwarna merah pada penampang model struktur bawah permukaan dan garis berwarna hitam pada penampang seismik. Hal ini dapat membuktikan bahwa kedua metode saling berkorelasi, sehingga pemodelan yang dibuat dapat memberikan gambaran yang cukup sesuai.

4.4. Analisis Potensi Jebakan Hidrokarbon

Proses kolisi pada *Australia continental margin* dengan *Banda trench* mengakibatkan perubahan struktur dan terbentuknya zona depresi (Audley-Charles, 2011). Kedua hal tersebutlah yang menyebabkan Pulau Timor memiliki *petroleum system* yang berprospek dalam kegiatan eksplorasi minyak dan gas bumi. Berdasarkan pemodelan yang dibuat, terdapat lima *element petroleum system* yang bekerja yaitu: source, trap, seal, reservoir, dan migrasi (Magoon & Beaumont 1994) (Gambar 16 dan Gambar 17). Penentuan kelima *element petroleum system* pada pemodelan yang dibuat akan disesuaikan berdasarkan informasi umur batuan dari *time structure map* pada penampang seismik Gambar 7 (Charlton, 2001; Erdi et al., 2018).

Source rock atau batuan induk pada pemodelan ini berada pada batuan Trias yang ditandai dengan warna abu-abu (Charlton, 2001; Koesnama, 2015). Batuan ini berpotensi sebagai source rock, salah satunya ditemukan di Formasi Aitutu, yang memiliki batuan berupa outer shelf limestone dengan beberapa kandungan fosil di dalamnya (Bachri & Permana, 2015; Koesnama, 2015). Seal pada pemodelan ini terdapat pada batuan dengan umur Kapur yang ditemukan di Formasi Nakfunu (Charlton, 2001; Koesnama, 2015). Keberadaan radiolarian shale mengakibatkan batuan ini secara petrografi memiliki porositas yang buruk, sehingga cocok sebagai seal yang dapat menahan hidrokarbon bermigrasi (Bachri & Permana, 2015). Reservoir rock pada pemodelan ini berada pada batuan Jura yang ditandai dengan warna kuning berbintik. Berdasarkan Charlton (2001) dan Erdi et al. (2018) potensial reservoir terbaik dengan umur batuan Jura yaitu sandstone "plover equivalent". Hal ini dikarenakan porositas dan permeabilitas pada batuan tersebut dinilai sangat baik. Trap atau seal geometris pada pemodelan ini berupa structural trap. Hal ini dikarenakan proses pembentukan Pulau Timor mengakibatkan struktur batuan berubah, perubahan ini yang menyebabkan terbentuknya zona hidrokarbon (Audley-Charles, 2011; Charlton, 2001). Pada Gambar 16 dan Gambar 17 diperlihatkan proses migrasi yang ditandai oleh panah bewarna kuning dan biru. Proses migrasi terjadi secara vertikal dan horizontal, yang mana terjadi laju perpindahan hidrokarbon dari source rock ke reservoir melalui patahan.

Pada penelitian ini, daerah yang berpotensi menjadi area jebakan hidrokarbon adalah area yang memiliki struktur yang lengkap, yang mana terdapat source rock, kemudian memiliki jalur migrasi berupa patahan yang menjadi jalur perpindahan hidrokarbon dari source rock ke reservoir, dan memiliki trap yang baik di mana antara struktur yang satu dengan yang lainnya terdapat jalur migrasi dari reservoir yang tertutup oleh seal (Koesnama, 2015; Magoon & Beaumont, 1994). Pada pemodelan A-C dan pemodelan D-F, tidak semua struktur pada zona thrust fold belt berpotensi sebagai area jebakan hidrokarbon. Struktur thrust fold belt pada area darat yang berada di sisi barat laut tidak seluruhnya memungkinkan untuk menjadi daerah jebakan hidrokarbon. Hal ini dapat terlihat bahwa lapisan seal pada Gambar 16 dan Gambar 17 mulai hilang yang kemungkinan disebabkan oleh proses erosi pada batuan yang tersingkap di daerah darat. Berdasarkan kedua pemodelan tersebut, daerah yang memungkinkan untuk memiliki potensi sebagai jebakan hidrokarbon mulai dari zona thrust fold belt sebelum memasuki area darat sampai zona Timor trough.

5. Kesimpulan

- Berdasarkan analisis derivatif terdapat tiga garis (x, y dan z) yang teridentifikasi sebagai struktur pada lintasan A-C dan D-F. Ketiga struktur dari kedua lintasan juga menunjukkan kemenerusan dari tenggara (SE) ke barat laut (NW) yang menandakan bahwa struktur menerus dari lintasan D-F ke lintasan A-C.
- Hasil model penampang struktur bawah permukaan yang dibuat berdasarkan model penampang seismik

memiliki kesesuaian. Hal ini terlihat dari nilai error pada hasil pemodelan ke depan kedua lintasan memiliki nilai yang cukup kecil, yang mana pada lintasan A-C memiliki error 3,93% dan pada lintasan D-F memiliki error 4,63%. Selain itu hasil identifikasi struktur dari analisis derivatif berkorelasi dengan hasil pemodelan, struktur yang teridentifikasi dapat terlihat dan tergambar dengan baik pada pemodelan yang dibuat.

- Model penampang struktur yang dibuat dapat menggambarkan element petroleum system, dapat digunakan sebagai penentu area jebakan hidrokarbon. Element petroleum system pada penelitian ini, yaitu: source rock berumur Trias, reservoir rock berumur Jura, seal rock berumur Kapur, terdapat jalur migrasi berupa fault dan terdapat structural trap.
- Berdasarkan model struktur dan element petroleum system yang terlihat pada penampang pemodelan, daerah yang memiliki potensi sebagai area jebakan hidrokarbon yaitu mulai dari zona thrust fold belt sebelum memasuki area darat sampai zona Timor trough karena memiliki struktur perlapisan yang sesuai.

6. Saran

- Perlu dilakukan analisis struktur menggunakan filter lain untuk memperlihatkan struktur yang lebih kompleks dan belum terbaca pada filter FHD dan SVD.
- Informasi data sumur dan data kedalaman pada data seismik dapat ditambahkan, guna mengoptimalkan hasil pemodelan dan informasi yang diberikan pada data gravitasi.

Daftar Pustaka

- Andari, W., Karyanto., & Kurniawan, R. (2019). Identifikasi batas sub-cekungan hidrokarbon menggunakan analisis SHD (Second Horizontal Derivative) dan SVD (Second Vertical Derivative) berdasarkan korelasi data gaya berat dan seismik. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5(1), 60–74. doi:10.1144/SP355.12
- Audley-Charles, M.G. (2004). Ocean trench blocked and obliterated by Banda forearc collision with Australian proximal continental slope. *Tectonophysics*, 389, 65–79. doi:10.1038/127783a
- Audley-Charles, M.G. (2011). Tectonic post-collision processes in Timor. *Geological society special publication*, 355, 241–266. doi:10.1144/SP355.12
- Bachri, S., & Permana, A.K. (2015). Tektonostratigrafi cekungan Timor di bagian barat Pulau Timor. *Jurnal Geologi dan Sumber daya Mineral*, 16(2), 79–91.
- Bacon, M. (2005). Seismic survey. *Encyclopedia of Geology* (pp. 151–158). UK: Elsevier. doi: 10.1016/BO-12-369396-9/00110-6.
- Blakley, R.J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge: Cambridge University Press
- Charlton, T.R. (2001). The petroleum potential of West Timor. *Indonesian Petroleum Association*, 28, 301–17. doi: 10.29118/ipa.183.301
- Dewi, I.R., Puspitasari, F., Nasri, M.Z., & Martha, A. (2020). 3D data gravity modeling for identification of the formation structure of the hydrocarbon basin in the Bajubang region, Jambi province. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 6(3), 216–27. doi: 10.23960/jge.v6i3.103

- Elkins, T.A. (1951). The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*, 16(1), 29-50. doi: 10.1190/1.1437648
- Erdi, A., Kusuma, N.M., Sapiie, B., & Rudyawan, A. (2018). New perspective of Mesozoic hydrocarbon prospectivity within West Timor. *Australia Society of Exploration Geophysicists*, 1-7. doi: 10.1071/aseg2018abp031
- Grandis, H. (2014). Simulation of 3D gravity anomaly of thin coal layer in sedimentary environment and its delineation. *International Journal of Tomography and Simulation*, 26(2), 1-11.
- Harsolumakso, A.H., Sapiie, B., Rudyawan., A., Tiranda, H., Reski., E., & Fauziah, R. (2019). Understanding structural style of onshore Timor basin from detailed fieldwork. *Modern Applied Science*, 13(4), 123. doi: 0.5539/mas.v13n4p123.
- Hubscher, C. (2014). Reflection and refraction seismology. In *Encyclopedia of Marine Geosciences* (pp.1-15). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-007-6644-0
- Jones, W., Tripathi, A., Rajagopal, R. & Williams, A. (2011). Petroleum prospectivity of the west Timor trough. *PESA News*, 114, 61-65.
- Koesnama, Permana, A.K. (2015). Sistem minyak dan gas di cekungan Timor, Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 16(1), 23-32.
- Lee, S.G., & Bawden, M. (2011). Exploration opportunities in the prolific Bonaparte Basin of the Timor sea. *Spectrum Geo Expro*, 8(2).
- Magoon, L.B., & Beaumont, E.A. (1994). *Petroleum systems in exploring for oil and gas traps*. Tulsa: American Association Of Petroleum of Geologist (AAPG), 5-13.
- Musset, A.E., & Khan, M.A. (2000). *Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics*. New york: Cambridge University Press.
- Padmawidjaja, T., Iskandar,Y., Wibowo, A.S., & Lelono, E.B. (2019). South Natuna Basin Reconfiguration Based on recent seismic and gravity surveys. *Scientific Contribution Oil and Gas*, 42(1), 1-5.
- Qiu, L., Chen, Z., & Liu, Y. (2020). Recognition of the pre-salt regional structure of Kwanza basin, offshore in West Africa, derived from the satellite gravity data and seismic profiles. *Journal of Geophysics and Engineering*, 17(6), 956-66.
- Reynolds, J.M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics* (2nd ed.). New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Richardson, A. N. & Blundell, D.J. (1996). Continental collision in the Banda Arc. In: Hall, R. & Blundell, D. J. (eds) *Tectonic Evolution of Southeast Asia Geological of America Special Publication*, 106, 47-60.
- Rosid, M.S., Tullailah., N.N., & Wibowo., R.A. (2020). Cekungan Sumatra Utara menggunakan data gravitasi dan seismik. *Jurnal Fisika UNNES*, 10(1), 8-21.
- Rosidi, H.M.D, Suwitudirdjo, K., & Tjokroasapoetro, S. (1996). Peta geologi lembar Kupang-Atabua skala 1:250:000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
- Sapiie, B., Tiranda. H., Harsolumakso. A.H., Reski, E., Hadiana, M., Danil, D., Abdullah, C.I., & Rudyawan, A. 2017. New insight of fold-thrust belt evolution as implication of hydrocarbon prospect in the West Timor Island, Indonesia. *AAPG Annual Convention and Exhibition*, 2-4.
- Sigismondi, M.E. (2019). Radial Averaged Power Spectrum, 1-6. doi: 10.13140/RG.2.2.17169.07528
- SKK Migas. (2018). 65 Kawasan Timur Indonesia: Destinasi Eksplorasi Masa Depan vol 65. Jakarta: SKK Migas.
- Sumintadireja, P. (2018). A Note on the use of the second vertical derivative of gravity data with reference to Indonesian cases. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 50(1), 127-39.
- Telford, W.M. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.

Identifikasi Sesar di Bawah Permukaan yang Dapat Menyebabkan Gempa Berdasarkan Metode *First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative* di Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur

Priska Ezrahayu* dan Supriyanto

Program Studi Geofisika, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia
*Narahubung: priskaa.ezrahayu@gmail.com

Abstrak

Pemindahan ibu kota negara di Pulau Kalimantan, tepatnya di wilayah administratif Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur sudah ditetapkan oleh Presiden Joko Widodo. Alasan pemindahan ibu kota negara disebabkan karena kecilnya risiko bencana alam, salah satunya bencana gempa bumi. Akan tetapi, berdasarkan catatan sejarah, wilayah Kalimantan Timur pernah mengalami gempa bumi dan dipotong oleh Sesar Sangkulirang dan Sesar Paternoster yang masih aktif. Meskipun magnitudo gempa tidak terlalu besar, gempa bumi yang berpusat di kedalaman yang dangkal (<60 km) dapat bersifat merusak. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan dan jenis struktur bawah permukaan yang terdapat di Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur dengan menggunakan metode gravitasi. Pengolahan data dianalisis menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat sebaran anomali sebesar 6.4 mGal hingga 22.6 mGal. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa daerah Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur memiliki struktur berupa antiklin, sinklin, dan diduga terdapat sesar naik dan sesar normal. Data berupa peta seismisitas dan peta bahaya gempa bumi BMKG menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki potensi gempa bumi rendah, dengan kata lain jika terjadi gempa bumi, lokasi penelitian dapat tetap merasakan getarannya. Maka dari itu, lokasi calon ibu kota negara baru dapat dikatakan memiliki potensi gempa bumi, namun magnitudo getaran yang dirasakan ringan dan tidak merusak.

Kata kunci: Gempa bumi; *First Horizontal Derivative*; *Second Vertical Derivative*; Anomali Bouger

1. Pendahuluan

Wilayah Kalimantan adalah daerah yang memiliki tektonik kompleks karena dikelilingi oleh Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, dimana interaksi lempeng-lempeng tersebut yang membentuk daerah timur Kalimantan (Hamilton, 1979). Pada Pulau Kalimantan terdapat beberapa sesar, yaitu Sesar Tinjai di Sarawak, Sesar Adang di Kalimantan Barat dan Sesar Sangkulirang di Kalimantan Timur, serta Sesar Paternoster di Selat Makasar (Moss dan Chambers, 1999). Pulau Kalimantan dinilai memiliki lokasi geografis yang strategis dan memiliki potensi kebencanaan yang kecil, sehingga Pulau Kalimantan berpotensi dijadikan ibu kota baru Indonesia.

Kalimantan Timur spesifiknya memiliki sesar yang tidak terlalu aktif aktivitas pergerakannya, namun gempa bumi dengan sesar yang relatif dangkal tetap berpotensi menghasilkan kerusakan yang signifikan. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keberadaan dan jenis sesar yang terdapat di Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur. Metode gravitasi yang digunakan terbagi dua, yaitu metode turunan pertama horizontal (*First Horizontal Derivative*/FHD) yang berperan untuk menentukan batas struktur anomali dan turunan kedua vertikal (*Second Vertical Derivative*/SVD) yang dapat mengidentifikasi jenis sesar yang ada di timur Pulau Kalimantan. Mengetahui keberadaan dan jenis sesar dapat meminimalkan risiko bencana gempa bumi yang mungkin terjadi di wilayah calon ibu kota Indonesia yang baru.

2. Landasan Teori

2.1. Geologi Regional

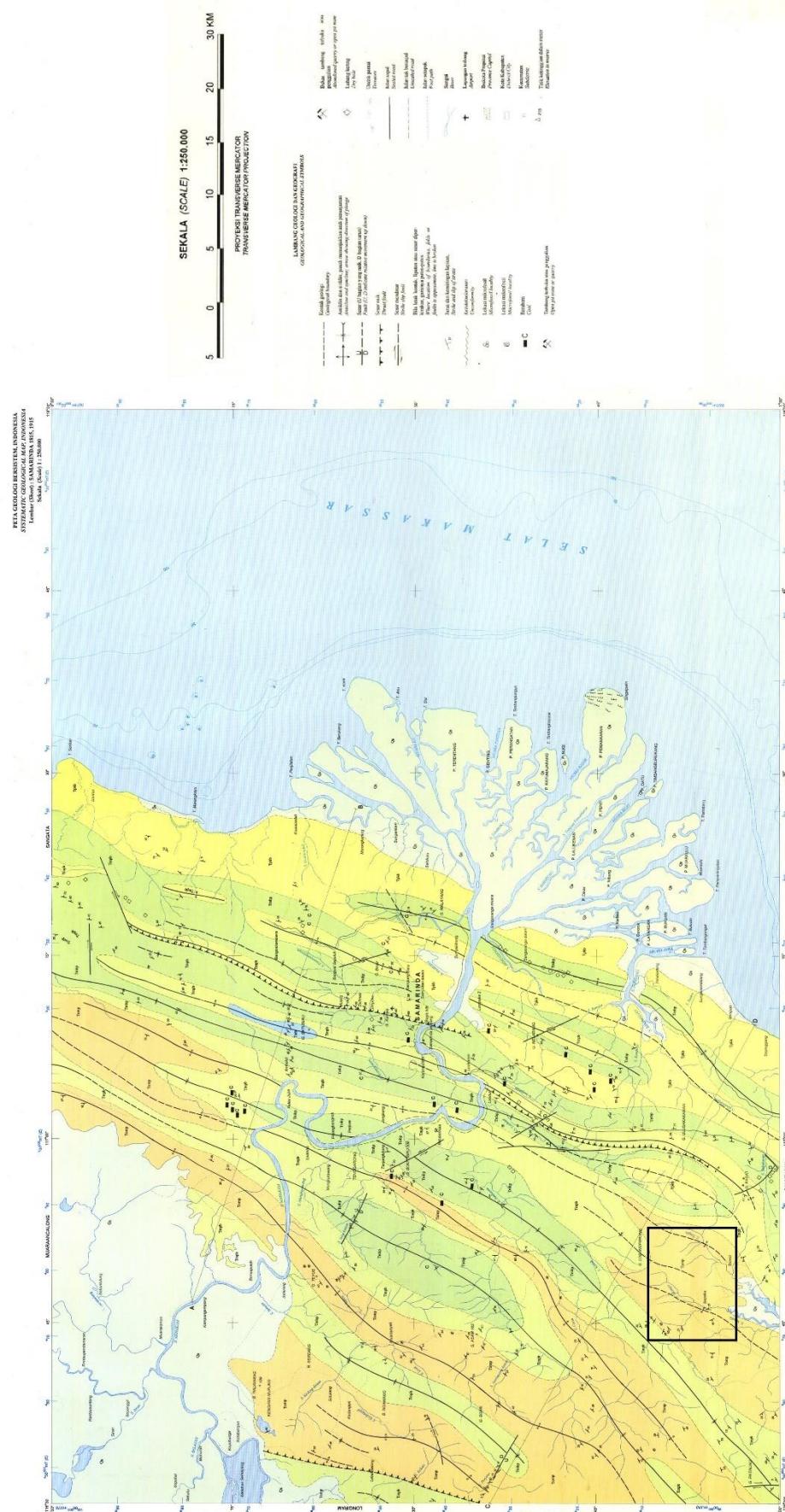
Wilayah penelitian merupakan daerah yang tersusun dari lapisan aluvium dan terbagi menjadi beberapa formasi seperti Formasi Kampungbaru, Formasi Pulau Balang, Formasi Balikpapan, Formasi Bebuluh, dan Formasi Pamaluan. Formasi-formasi tersebut secara stratigrafi mempunyai kontak selaras (Satyana et al., 1999).

Pada wilayah ini terdapat endapan yang tersusun atas batupasir, batulepung, batulanau, serpih dengan sisiran batugamping, dan endapan batu bara (Satyana et al., 1999). Pada Peta Geologi Lembar Samarinda (Gambar 1), kotak yang berwarna hitam adalah perkiraan lokasi yang akan diteliti. Peta Geologi Lembar Samarinda menunjukkan terdapat beberapa struktur berupa antiklin, sinklin dan terdapat sesar. Formasi yang mengalami lipatan sangat kuat terdapat di Formasi Pamaluan, Bebuluh dan Balikpapan. Selain itu formasi yang mengalami lipatan yang lemah terdapat pada Formasi Kampungbaru (Satyana et al., 1999).

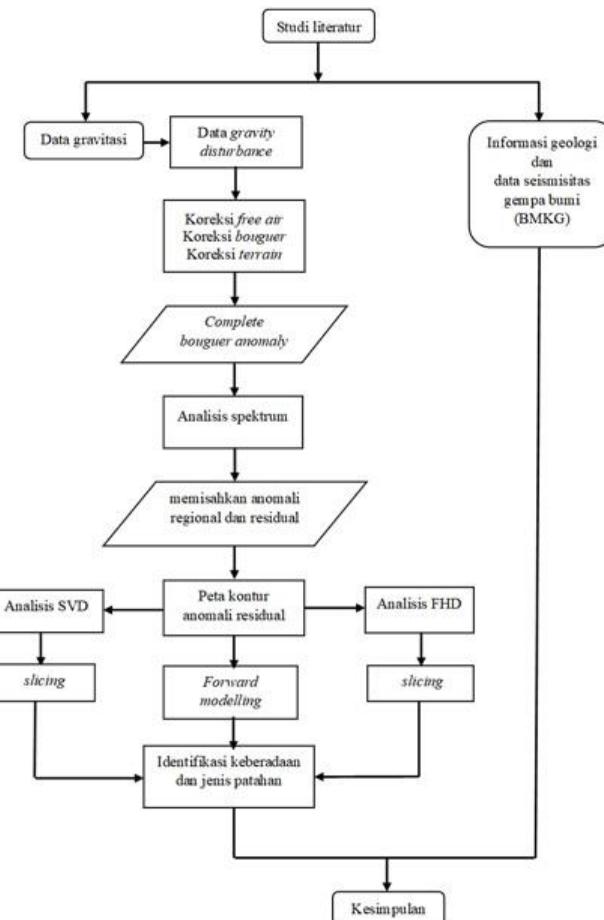
2.2. Dasar Metode Gravitasi

Metode gravitasi adalah metode yang dimanfaatkan untuk membaca kondisi bawah permukaan dengan menganalisis variasi densitas batuan yang menimbulkan perbedaan percepatan gravitasi di permukaan bumi atau disebut dengan anomali gravitasi. Prinsip dasar metode gravitasi adalah Hukum Newton (Grandis, 2009), yang dituliskan dalam Persamaan 1:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$



Gambar 1. Daerah penelitian (kotak hitam) dalam Peta Geologi Lembar Samarinda (Supriatna, Sukardi, & Rustandi, 1978).



Gambar 2. Diagram alur penelitian.

F : gaya tarik menarik antara dua benda (N)

G : konstanta gravitasi universal
 $(6.67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2})$

m_1 : massa bumi (kg)

m_2 : massa benda di permukaan bumi (kg)

r : jarak antara dua partikel bermassa m_1
dan m_2 (m)

Variasi gravitasi pada setiap titik permukaan bumi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu faktor lintang, penyimpangan alat, kedalaman, ketinggian, topografi, pasang surut, dan variasi densitas bawah permukaan. Oleh karena itu, perlu dilakukan koreksi, seperti koreksi *drift*, *tide*, *latitude*, *free air*, *terrain* dan *bouguer* (Telford et al., 1990).

2.3. First Horizontal Derivative (FHD)

First Horizontal Derivative (FHD) merupakan perubahan nilai anomali gravitasi secara horizontal untuk menentukan batas kontras densitas secara horizontal (Telford et al., 1990). Dengan memiliki karakter yaitu nilai maksimum atau minimum pada kontak anomali, dapat ditentukan batas struktur geologinya (Cordell, 1979). Nilai FHD didapat dari Persamaan 1 di atas dengan rumus:

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

2.4. Second Vertical Derivative (SVD)

Second Vertical Derivative (SVD) dapat meningkatkan efek dekat permukaan dan mengabaikan anomali yang lebih dalam. Oleh karena itu, hasil yang didapatkan berasosiasi dengan struktur dangkal (Grandis, 2009), sehingga dapat menganalisis jenis sesar naik atau normal. Persamaan SVD dapat diperhitungkan dari Laplace karena medan gravitasi memenuhi persamaan Laplace. SVD dapat diperoleh dari turunan horizontal (Persamaan 2) dengan rumus sebagai berikut:

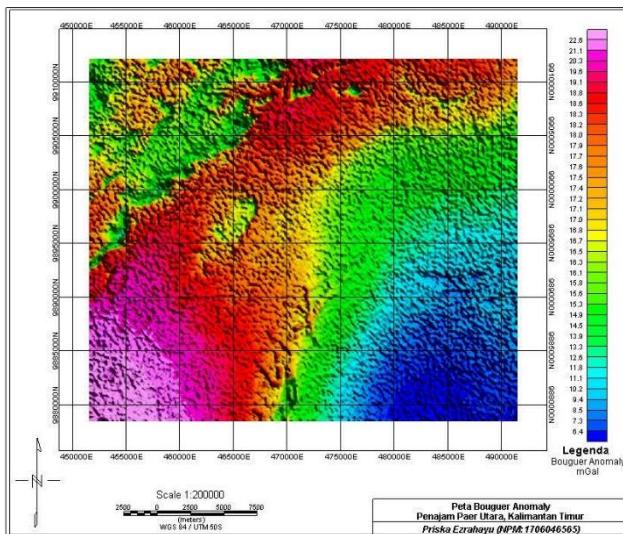
$$\begin{aligned} \nabla^2 g &= \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} &= - \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Adapun kriteria menurut Blakely (1996), menyatakan bahwa kriteria untuk mengidentifikasi jenis struktur patahan adalah:

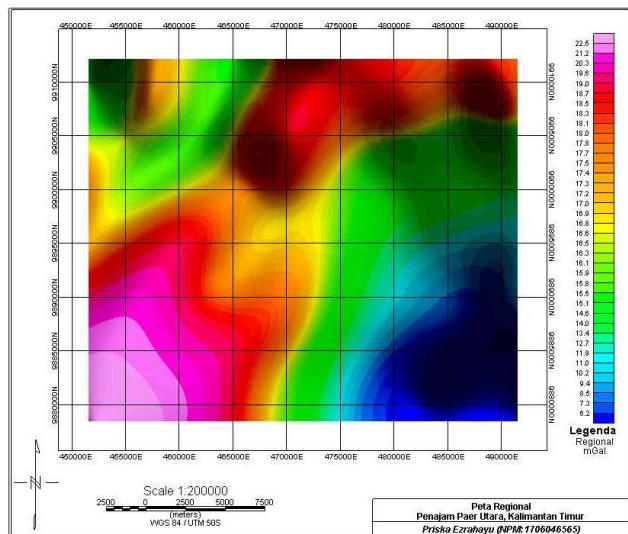
$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right)_{\text{maksimal}} > \left| \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right)_{\text{minimal}} \right| \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right)_{\text{maksimal}} < \left| \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right)_{\text{minimal}} \right| \quad (5)$$

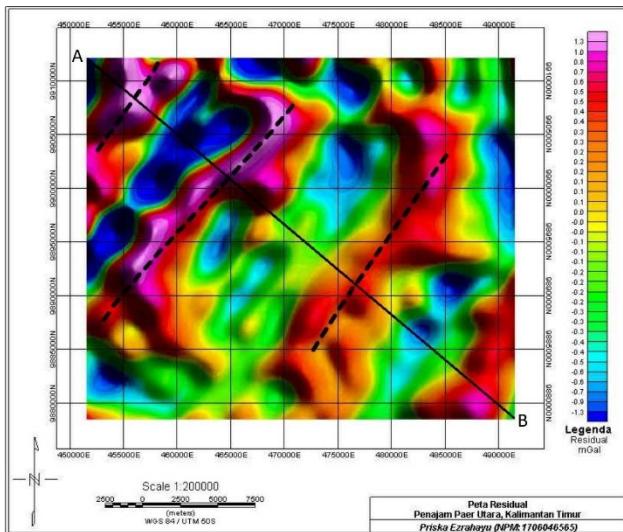
Persamaan 4 menunjukkan patahan normal, sedangkan Persamaan 5 menunjukkan patahan naik.



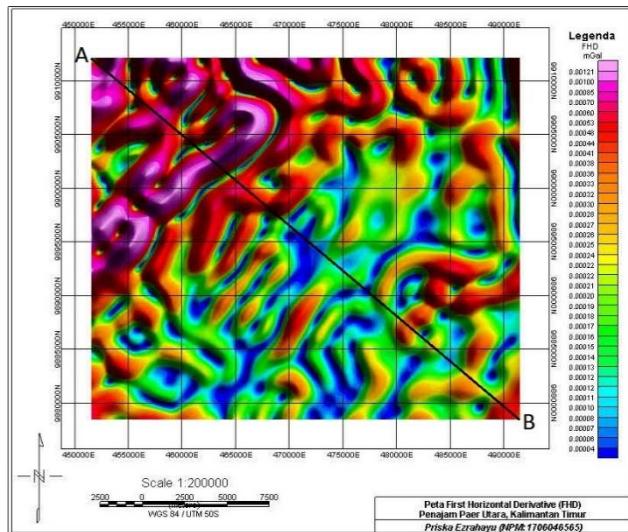
Gambar 3. Peta anomali Bouger.



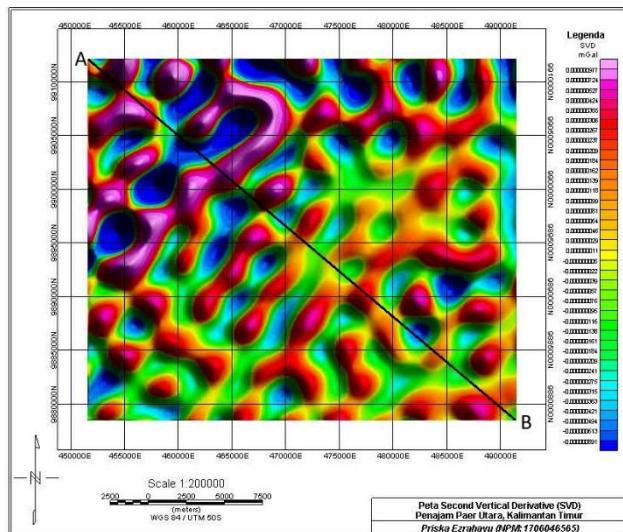
Gambar 4. Peta anomali regional.



Gambar 5. Peta anomali residual.



Gambar 6. First Horizontal Derivative (FHD).



Gambar 7. Second Vertical Derivative (SVD).

3. Metode Penelitian

Data yang digunakan yaitu data satelit GGMPlus yang diambil dari web <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/>.

Data GGMPlus merupakan tipe data *gravity disturbance* data medan gravitasi yang telah mengalami koreksi pasang surut dan koreksi lintang, namun masih memerlukan beberapa koreksi yaitu *free air*, *bouguer* dan *terrain*. Hasil

dari koreksi tersebut akan menghasilkan peta *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis spektrum *fourier transform* untuk memperkirakan kedalaman suatu anomali, dan memisahkan anomali regional dan residual. Setelahnya, barulah dilakukan analisis turunan yaitu *First Horizontal Derivative* (FHD) untuk menentukan batas antara kontras densitas dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk menentukan jenis sesar. Pembuatan model bawah permukaan digunakan untuk membaca kondisi bawah permukaan. Hasil interpretasi dan analisis di wilayah penelitian kemudian divalidasi dengan menggunakan data seismisitas kegempaan, serta peta bahaya gempa bumi. Kemudian data-data yang sudah didapat yaitu model bawah permukaan, data seismisitas gempa dan peta bahaya gempa bumi dianalisis untuk menentukan potensi gempa bumi di wilayah penelitian. Ringkasan dari alur penelitian dan data-data yang digunakan disederhanakan dalam Gambar 2.

4. Hasil dan Penelitian

4.1. Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Proses ini dilakukan untuk memisahkan anomali regional yang berasosiasi dengan kedalaman yang tinggi, sedangkan anomali residual berasosiasi dengan kedalaman yang relatif lebih dangkal. Proses pemisahan dilakukan dengan menggunakan analisis spektrum dengan filter *bandpass*. Hasil dari pemisahan ini ditunjukkan pada Gambar 4 untuk anomali regional dan Gambar 5 untuk anomali residual.

Pada Gambar 4, anomali regional bernilai 6.2 mGal sampai 22.5 mGal dengan pola anomali tinggi ditunjukkan oleh warna merah sampai ungu yang memanjang di bagian barat daya, utara sampai timur laut. Anomali bernilai rendah ditunjukkan oleh warna biru yang tersebar di arah tenggara.

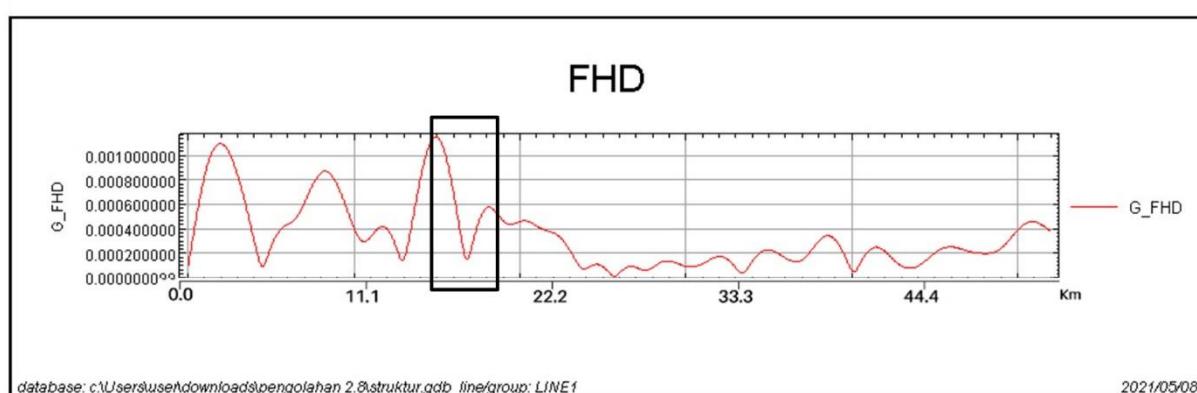
Gambar 5 merupakan Peta Anomali Residual bernilai -1.3 mGal sampai 1.3 mGal dengan anomali tinggi ditunjukkan oleh warna merah sampai ungu yang tersebar di arah barat laut dan bagian timur laut yang memanjang sampai bagian selatan daerah penelitian. Anomali rendah ditunjukkan oleh warna biru yang tersebar di bagian barat laut.

4.2. Hasil Analisis FHD dan SVD

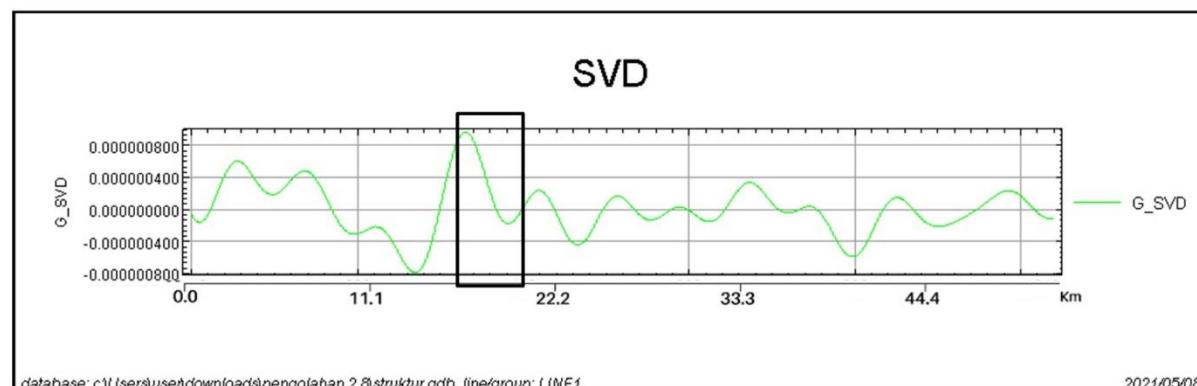
Pada Gambar 6 terdapat garis hitam A–B yang merupakan garis *slice* yang tegak lurus memotong struktur. Terlihat FHD bernilai antara 0.000004 mGal/m sampai 0.0121 mGal/m. Pola anomali tinggi yang berwarna ungu tersebar di daerah barat laut, sedangkan pola anomali rendah berwarna biru tersebar di arah selatan dan tenggara.

Pada Gambar 7 garis hitam A–B juga merupakan garis *slice* yang dilakukan dalam analisis. Terlihat anomali SVD bernilai dari -0.000000891 mGal/m² sampai 0.000000977 mGal/m². Kontras anomali terlihat di bagian barat laut dan bagian tenggara lokasi penelitian. Kontur SVD mendekati nilai 0 ditunjukkan dengan gambar kekuningan karena diduga terdapat sesar pada daerah penelitian.

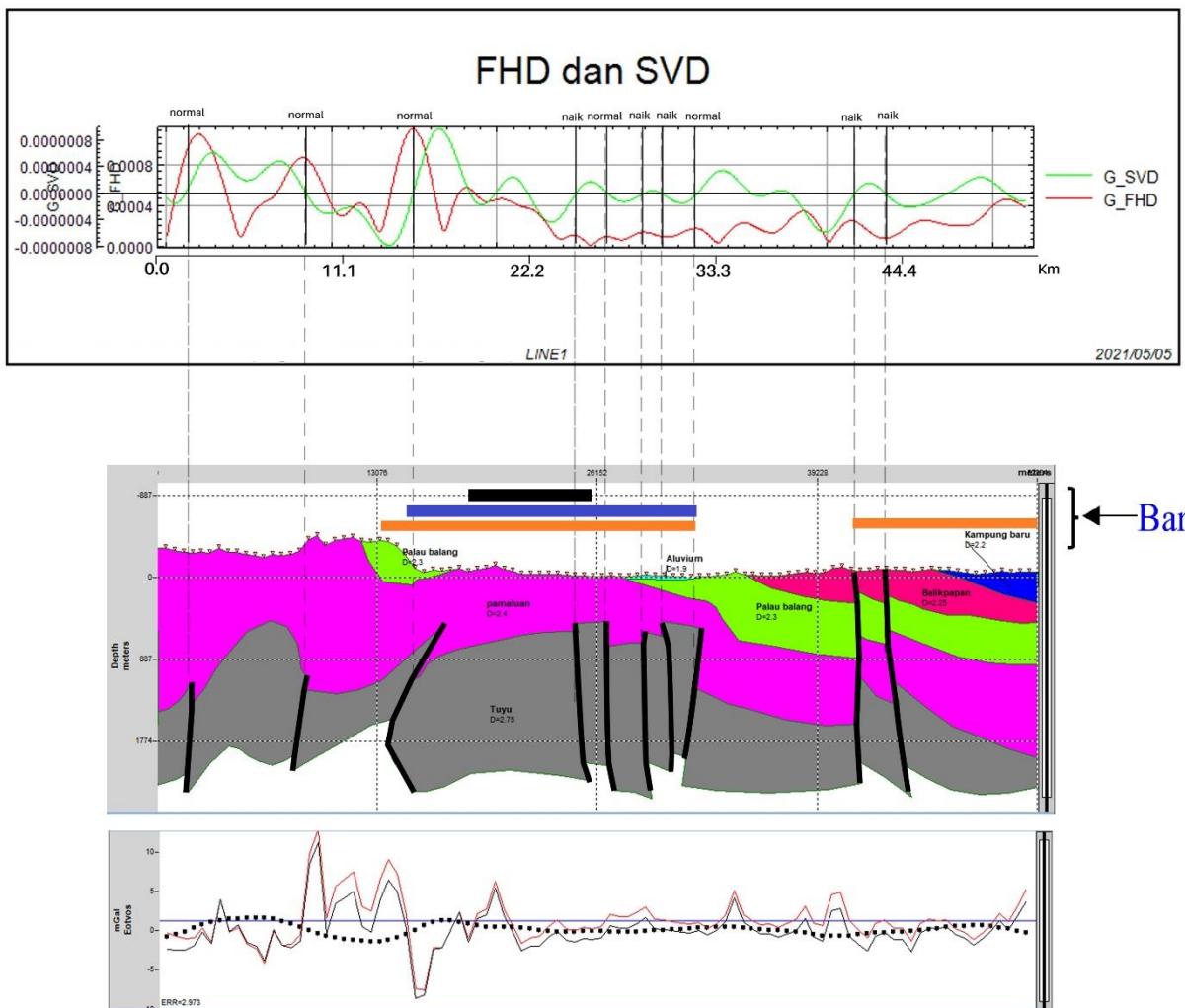
Dari FHD terhadap jarak, dapat diketahui batas struktur sesar berdasarkan karakteristik bentuk kurva tajam berupa



Gambar 8. Kurva FHD.



Gambar 9. Kurva SVD.



Gambar 10. Model bawah permukaan lokasi penelitian.

nilai maksimum atau minimum pada bidang kontak anomali. Gambar 8 hasil dari kurva FHD dengan kotak berwarna hitam adalah salah satu nilai maksimum untuk menentukan batas kontak.

Kemudian kurva SVD yang bernilai 0 digunakan untuk menentukan jenis sesar. Gambar 9 kurva SVD dengan kotak hitam yang menunjukkan kurva bernilai nol.

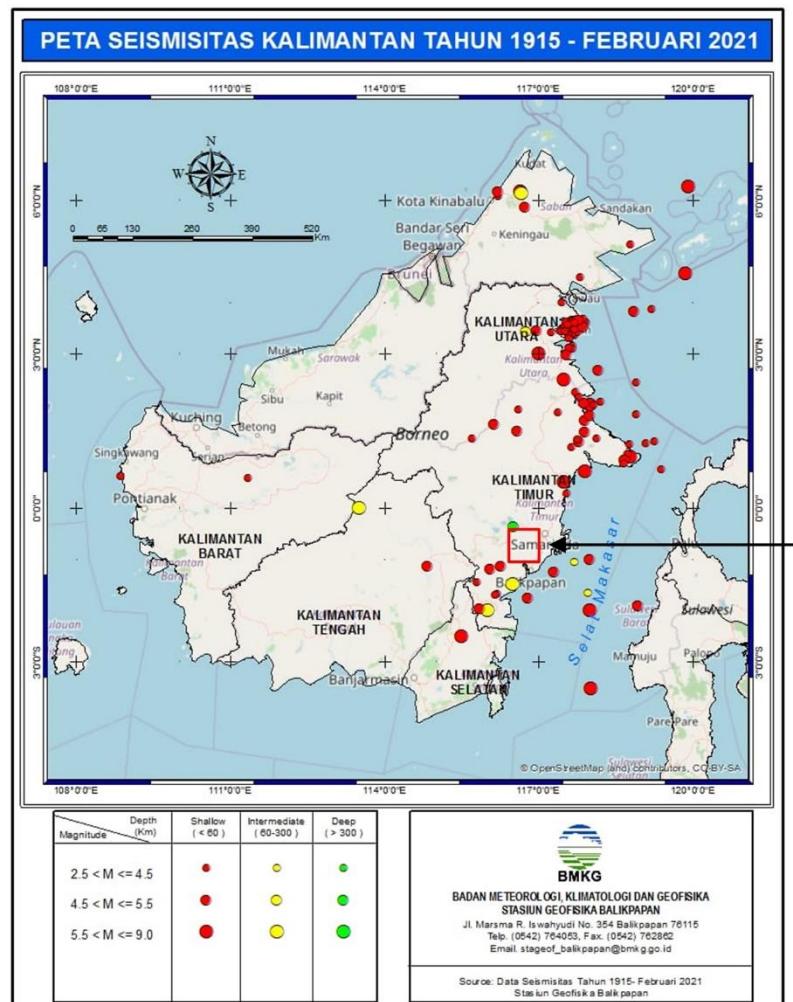
Bidang kontak patahan pada kurva FHD yang berada pada nilai minimum atau maksimum berkorelasi dengan nilai nol pada kurva SVD, sehingga dapat diketahui batas-batas terjadinya perubahan nilai anomali. Untuk mengidentifikasi sesar pada suatu penampang anomali SVD, didasarkan pada kriteria nilai menurut Reynolds (1997) pada persamaan 4 dan 5.

4.3. Analisis Struktur

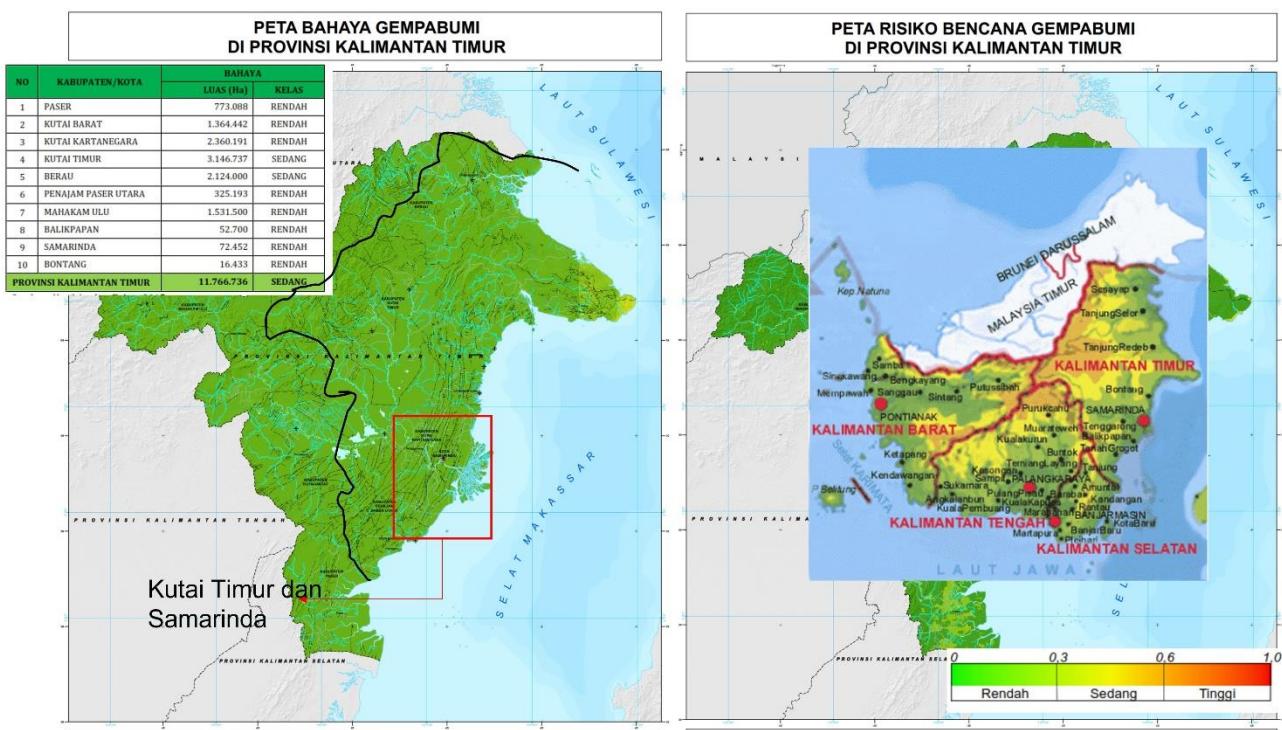
Hasil interpretasi batas kontak antara bidang yang tersesarkan diidentifikasi dari nilai SVD yang memiliki nilai nol, dengan mengkorelasikan FHD maksimum atau minimum. Hasil interpretasi ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada garis ke-1 jarak ± 1 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih besar dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar normal. Pada garis ke-2 jarak ± 8 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih besar dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum,

sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar normal. Garis ke-3 jarak ± 15 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih besar dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar normal. Garis ke-4 jarak ± 25 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih kecil dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar naik. Garis ke-5 jarak ± 27 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih besar dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar normal. Garis ke-6 jarak ± 29 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih kecil dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar naik. Garis ke-7 jarak ± 30 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih kecil dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak minimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar naik. Garis ke-8 pada jarak ± 32 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih besar dari SVD minimum dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar normal. Garis ke-9 jarak ± 42 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih kecil dari SVD minimum, dengan nilai FHD puncak yang maksimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar naik. Garis ke-10 jarak ± 44.4 km, terlihat bahwa SVD maksimum lebih kecil dari SVD



Gambar 11. Peta seismisitas Kalimantan (BMKG, 2021).



Gambar 12. Peta bahaya bencana gempabumi Kalimantan (BMKG, 2017).

minimum, dengan nilai FHD puncak yang minimum, sehingga diinterpretasikan terdapat indikasi sesar naik.

Pemodelan ini dilakukan di lintasan pada peta anomali residual. *Slice A-B* yang melewati daerah *interest* kontras densitas dan memanjang tegak lurus dengan struktur geologi yang terbaca. Model yang dibuat memiliki kedalaman ± 1.7 km di bawah permukaan. Pada kala Oligosen awal, terbentuk Blok Tuyu yang memiliki densitas sebesar 2.75 gr/cm^3 (Satyana et al., 1999). Sejarah tektonik wilayah ini dimulai dengan pemekaran (*rifting*) kemudian diikuti oleh *sagging* sehingga diinterpretasi terdapat sesar normal. Pada kala Oligosen akhir terbentuk Formasi Pamaluan yang memiliki densitas sebesar 2.4 gr/cm^3 (Satyana et al., 1999). Blok Tuyu yang mengalami *sagging* yaitu pemberhentian pemekaran, kemudian mengalami fase ekstensional (pemekaran) kembali pada Formasi Pamaluan, sehingga diduga terbentuk sesar yang memanjang mulai dari Blok Tuyu hingga Formasi Pamaluan. Pada kala Miosen Awal terbentuk Formasi Pulau Balang yang memiliki denistas sebesar 2.3 gr/cm^3 (Satyana et al., 1999). Fase inversi merupakan hasil reaktivasi sesar yang semula sesar turun mengalami ekstensional kemudian mengalami kompresional menjadi sesar naik, sehingga terdapat dua kenampakan pergerakan sesar yang berbeda dalam satu bidang sesar. Pada kala Miosen Tengah terbentuk Formasi Balikpapan dengan densitas sebesar 2.25 gr/cm^3 . Di mana proses inversi yang awalnya mengalami penurunan kemudian mengalami pengangkatan, sehingga formasi patahan naik yang berada di Formasi Pulau Balang terbaca hingga ke Formasi Balikpapan. Formasi Kampung Baru memiliki densitas 2.22 gr/cm^3 . Formasi ini terbentuk pada Pliosen sampai Kuarter dimana proses tektoniknya sama seperti formasi sebelumnya yang terendapkan sedimen. Sedimen pengisi yang berada pada batuan teratas adalah aluvium rata-rata densitas adalah 1.9 gr/cm^3 .

Pemodelan pada posisi *bar* Gambar 10 ditunjukkan oleh tanda panah. Pada *bar* berwarna kuning, yaitu kawasan ibu kota negara perluasan, diduga terdapat 8 sesar yang terdiri sesar naik dan normal. *Bar* berwarna biru, yaitu wilayah kawasan ibu kota negara (IKN), pada wilayah terdapat diduga terdapat 6 sesar, baik sesar naik maupun normal. *Bar* berwarna hitam, yaitu pusat inti ibu kota negara diduga terdapat 1 sesar naik. Maka di bawah permukaan lokasi penelitian teridentifikasi adanya sesar naik maupun sesar normal.

4.4. Interpretasi Potensi Bencana

Wilayah calon ibu kota yang dianalisis menggunakan metode gravitasi teridentifikasi memiliki beberapa indikasi sesar dengan pergerakan naik maupun normal. Litologi didominasi oleh batuan sedimen yang telah mengalami pelapukan dan erosi sehingga batuan ini sangat mudah bergeser ketika terjadi pergerakan di lempeng salah satunya karena gempa bumi.

Pada peta seismisitas (Gambar 11), kotak yang berwarna merah adalah lokasi penelitian. Sekeliling lokasi penelitian terdapat pusat gempa bumi dengan magnitudo sedang range nilai sebesar $2.5 < M \leq 5.5$ dengan kedalaman *shallow* dan *intermediate* dapat kita lihat pada Gambar 11. Pada peta bahaya gempa bumi (Gambar 12)

terlihat bahwa Kabupaten Penajam Paser Utara memiliki bahaya gempa yang dengan kelas rendah.

5. Kesimpulan

Analisis turunan metode gravitasi, lebih efektif dalam mengidentifikasi struktur sesar, terlihat dari adanya hubungan yang saling berkaitan satu sama lain pada sistem sesar dengan gempa bumi. Pada penelitian ini, *First Horizontal Derivative* (FHD) berperan untuk menentukan batas struktur, dan *Second Vertical Derivative* (SVD) berperan dalam mengidentifikasi jenis patahan, naik atau normal.

Struktur yang terbaca pada peta geologi di permukaan antara lain adalah antiklin dan sinklin yang terbukti dengan ditemukannya 10 indikasi sesar naik maupun normal, dengan model bawah permukaan memiliki kedalaman ± 1.7 km yang telah penulis buat.

Sehingga seluruh data yang di dapat dari penelitian ini yaitu data gravitasi yang mengindikasikan adanya sesar naik maupun normal dan lokasi penelitian yang didominasi oleh batuan sedimen, serta data peta seismisitas (Gambar 11) dan data peta bahaya gempa (Gambar 12), maka data tersebut dapat disimpulkan bahwa lokasi calon ibu kota dianalisis berpotensi gempa bumi dengan magnitudo yang dirasakan ringan dan tidak merusak.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Supriyanto, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan ilmu selama bimbingan serta memberikan saran selama proses pembuatan penelitian ini.

Daftar Referensi

- Satyana, A., Imanhardjo, S. & Nugroho, D. (1999). Tectonic controls on the hydrocarbon habitats of the Barito, Kutei, and Tarakan Basins, Eastern Kalimantan, Indonesia: Major dissimilarities in adjoining basins. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(1–2), 99–122.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika.
- Reynolds, J. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York: John Wiley & Sons.
- Cordell, L. (1979). Gravimetric Expression of Graben Faulting in Santa Fe Country and The Espanola Basin, New Mexico. *New Mexico: New Mexico, Geol. Sot. Guidebook, 30th Field Conf*, 59-64.
- Blakely, R. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. New York: Cambridge University Press.
- Moss, S. & Chambers, J. (1999). Tertiary facies architecture in the Kutai Basin. *Journal of Asian Earth Science* 17(), 157–181.
- Hamilton, W.B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region*. Washington : U.S. Govt. Print. Off.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.

Mouth Bar Reservoir Dimension Characterization Based on Water Rise Phenomenon: Case Study on X Field, Kutei Basin, Indonesia

Asri Oktavioni Indraswari*

Geology Study Program., FMIPA, Universitas Indonesia,Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia

* Corresponding author : asrioktavioni@ui.ac.id

Abstract

In X field, Kutei Basin, Indonesia, there are two hydrocarbon volume values known: Initial Gas in Place (IGIP), which is calculated based on predicted geomodel, and CGIP (Connected Gas in Place), which is an actual dynamic volume calculated from current production data. The discrepancy between IGIP (Initial Gas In Place) and CGIP (Connected Gas In Place) in the X field reaches 21%, with IGIP has more volume than CGIP. This discrepancy shows that the current geomodel gives over-optimistic values. To resolve this discrepancy between IGIP and CGIP, several parameters used in the current X geomodel, from which IGIP comes (e.g. mouth bar dimension, water rise discount limit, and net pay bar limit), need to be reviewed. There are two types of reservoir models in the X field: channel and mouth bar. This study only examined the mouth bar reservoir model since the the mouth bar reservoirs contributes 60% to the total IGIP. In the current geomodel, an 800 m pay bar limit is applied. Discount limit of 1000 m radius within water rise well is also applied to net pay. These numbers are hypothetical; thus, this study is carried out to check the connectivity and limit of the mouth bar reservoirs using well log correlation supported by pressure trend analysis. The study is focused on the X field at the interval of Stratigraphic Unit (SU) 4. This specific location and interval were chosen based on its high numbers of water rise occurrences. The methodology of this study includes well correlation using sequence stratigraphy concept, water rise analysis by finding the depletion source for reservoir with water rise, and detail sand to sand correlation supported by pressure data to define bar limit. The water rise analysis shows that water rise influence distance in the study area is 703 m (P50); thus, 1000 m radius used for water rise discount radius in X geomodel can be challenged. Meanwhile, the mouth bar dimension analysis shows that the reservoir area with effective pressure connectivity in mouth bar facies in the study area is within 597 m radius (P50); thus, the 800 m radius used for net pay bar limit in X current geomodel can be challenged. The results also demonstrate that mouth bar dimension is proportional to water rise influence distance. This result of new parameter values, which are 20%-30% lower than the current numbers used in the geomodel, can then be applied to update the current geomodel, lowering the current IGIP value and closing the discrepancy gap of IGIP and CGIP.

Keywords: Mouth bar reservoir; Sequence stratigraphy; Water rise

1. Introduction

The continuous production of oil and gas in a hydrocarbon field can result in reservoir depletion. While the hydrocarbon is lifted from the subsurface, the fluid contacts, e.g., OWC (Oil-Water Contact), GWC (Gas-Water Contact), will move upward as the water below the hydrocarbon fills up the empty pore of the reservoir. This phenomenon is here termed 'water rise'. In reservoirs with high-density production wells, this water rise phenomenon, coupled with sequence stratigraphy analysis, could be used as a monitoring tool to check reservoir connectivity (Ainsworth, 2005).

Currently, in X field, Kutei Basin, Indonesia, there are two volume values known: Initial Gas in Place (IGIP), which is calculated based on predicted geomodel, and CGIP (Connected Gas in Place), which is an actual dynamic volume calculated from current production data. The more minor the discrepancy between the two values, the more accurate the geomodel is. However, currently, the CGIP value has 21% less number than the IGIP meaning the geomodel gives a more optimistic result of volume.

The difference in the volume values shows that the current reservoir dimension parameter used in the X field geomodel might be overestimated. To resolve the discrepancy between IGIP and CGIP, several parameters used in the current X geomodel need to be studied further. There are two different reservoir types in the X geomodel:

mouth bar and channel reservoirs. Both reservoir volumes are modelled and computed separately. Since the IGIP in the mouth bar contributes 60% to the total IGIP, the parameters in bar modelling are more likely to be examined. The current geomodel uses a net pay bar limit of 800 m as its mouth bar radius is measured from the well.

Besides the net pay bar limit, another parameter to be reviewed is the discount limit of 1000 m within the water rise well. This discount limit means a reduction of net pay sand volume applied to reservoir in wells where the water rise phenomenon occurred. In the current geomodel, water rise risk deduction of initial net pay as much as 60% is applied within delta front environment and 80% in the delta plain considering its better connectivity. This water rise radius may associate with the bar limit previously mentioned. These numbers 800 m net pay bar limit and 1000 m water rise radius are still hypothetical; thus, this study is carried out to check in detail the connectivity and limit of the reservoirs using well log correlation.

2. Study Area

X field is a gas field located at the Kutei Basin, Indonesia. It consists of stacked fluvio-deltaic reservoirs. The study area is in X field at the interval of Stratigraphic Unit (SU) 4. This specific location and interval were chosen based on its high numbers of water rise occurrences.

2.1. Kutei Basin

Kutei Basin is a prolific producer of both oil and gas in Indonesia. It is situated in the eastern part of Borneo Island. The geological history of the Borneo Island and the Kutei basin is related to the extensional and compressional movements between the Eastern Eurasia and the Pacific plates in the east and the Australian plate in the south. The big picture can be summarised in two main tectonic phases: a first extensional tectonic phase which opened the basin to the sedimentation processes and filling, and a second compression tectonic phase (Moss and Chambers, 1999). Generally, there are two types of petroleum system settings that developed in Kutei Basin, shelf (deltaic) system in the west and deep offshore (turbiditic) system in the east (Doust and Noble, 2008; Dunham et al., 2001; Saller et al., 2006). Distribution of the facies controls the distribution of the petroleum system. Those two systems are superimposed in a narrow fringe that corresponds to the present-day external axis. The early turbidite systems present beneath the internal axis are too deeply buried to be reasonably taken into account.

In the shelf system, where X field is located, the major reservoirs are the fluvial channel and mouth bar sandstones, closely associated with coal and coaly shale source rocks. In contrast, the reservoirs are turbidite lobes and channels deep offshore, with mostly re-transported organic matter as a source rock. Both systems have complex trapping mechanisms, often mixed structural with stratigraphic components (Moss et al., 1997).

2.2. Stratigraphy and Sedimentology

The X field is vertically divided into six main Stratigraphic Units (SU 1 to 6, SU 1 as the lowest layer) of 300-400 m thick sediment corresponding to third (3rd) order sequence (Hyne, 1995) and bounded by regional maximum flooding surfaces (MFS) interpretation. Each main stratigraphic unit is divided into several 15-40 m thick sequences; it corresponds to a single deltaic unit bounded by local flooding surfaces. As previously mentioned, this study will be carried out only in the interval of SU 4.

The X field is represented by a vertical and lateral juxtaposition of delta front deposits and upper delta plain deposits. Vertically, the X field has an overall progradation trend. At basin scale (3rd order, SU cycles) and smaller scale (4th order, i.e. 3-4 deltaic cycles), prograding and retrograding cycles alternate in response to the balance between eustatic variations, subsidence ratios and sediment supply. Laterally, the western part of the field is mainly represented by the upper delta plain to proximal delta front reservoirs (channels and stacked mouth bars). On the eastern side, the delta front deposits predominate, the mouth bars being smaller and more isolated, especially in the deeper SU (SU4 to SU-6).

Distributary mouth bar reservoir consists of very fine to fine sandstones, sub-rounded, well-sorted, and well consolidated, with fair visual porosity. In distal positions, to the east, it becomes silty and shows poorer porosity. A single mouth bar thickness ranges from 1 to 5 m (1.5 m on average). Stacked mouth bars can reach up to 15 m. Average porosity is 11.4% with a maximum of 27%, and

average permeability is 10 mD with a maximum of 1D. In the modern Mahakam delta, mouth bars have two morphologies: triangular for mouth bars located at the bifurcation of a distributary channel and elongated for tidal-reworked ones.

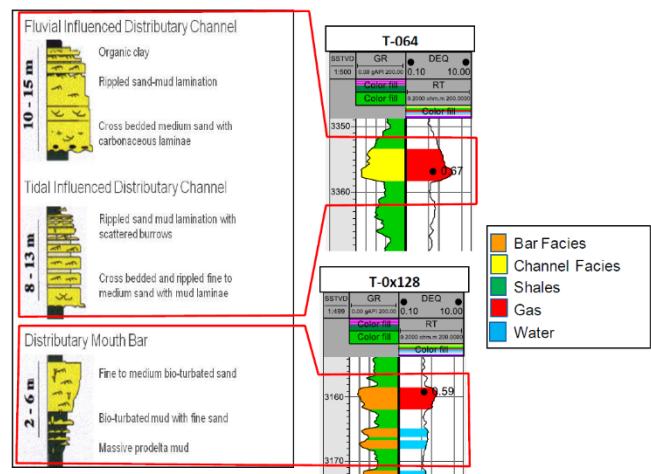


Figure 1. Typical of log signature of distributary channel and mouth bar facies in X Field.

2.3. Modern Mahakam Delta

The modern Mahakam delta is taken as an analogue to model the sedimentology in the study area. The delta is classified as a fluvial dominated delta with tidal influence (Galloway, 1975). It is presently prograding over a Maximum Flooding Surface formed during the Holocene sea-level rise between 18000 and 6000 years ago. In most cases, the thickness of a single regressive deltaic sequence will be on the order of 20-100 meters (and more generally 20-60 m) (Siemers et al., 1994).

There are three main depositional settings present in modern Mahakam Delta: delta plain, delta front, and prodelta. However, only the delta plain and the delta front will be discussed further due to the study area scope.

The core interpretation of the modern Mahakam Delta is compared to the log signature (gamma ray-resistivity log) taken from the study area. Figure 1 showing the typical gamma-ray and resistivity logs of the main reservoirs in the study area. From Figure 1, both the distributary channel model (fluvial influenced and tidal influenced) (top-left model diagram) show a fining-upward sequence, hence, the name 'bell' shape. In the log T-064 in Figure 1, the channel facies are given yellow on the gamma-ray log. Meanwhile, the mouth bar facies (bottom-left model diagram) shows a coarsening-upward sequence, commonly called a 'funnel' shaped sequence. The mouth bar facies are marked by orange color in the gamma-ray log as shown in well T-0x128 (bottom-right in Figure 1).

3. Materials and Methods

This study uses 78 wells. Data contained on each well includes:

- Formation pressure data from wireline acquisition

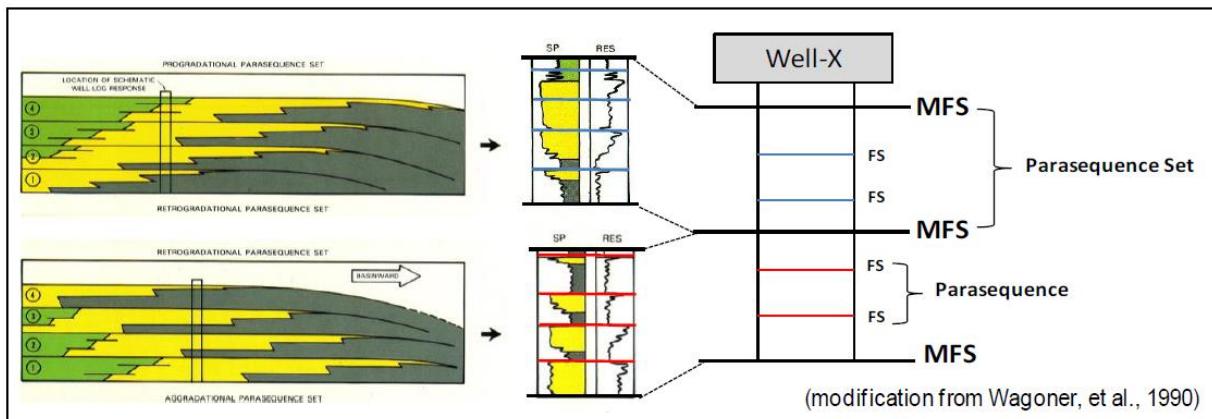


Figure 2. Parasequence and parasequence set definition (modification from Wagoner et al., 1990)
FS = Flooding Surface, MFS = Maximum Flooding Surface.

- Perforation data (flow/weak flow/no flow) and zone status (open/closed)
- Well log data (gamma ray, NPHI, RHOB, resistivity)
 - Facies data: distributary channel and distributary mouth bar
 - Fluid data: gas, possible gas, water rise, and water
- Drainage radius from production

To begin with, well correlation is performed, and geological layer is defined as one deltaic cycle of ~30 m average thickness using sequence stratigraphy concept in Petrel. Then, water rise analysis is carried out by finding the depletion source for reservoir with water rise to see the distance of influence needed for water rise to happen. Detailed sand to sand correlation is then performed to analyse the extension of the mouth bar reservoirs. Perforation data on each reservoir, along with the pressure data, helps to see the possibility of reservoir connectivity. Drainage radius data guides in defining the mouth bar radius.

4. Results and Discussion

4.1. Parasequence Correlation

The well correlation is performed using the sequence stratigraphy concept. A parasequence is a relatively conformable succession of genetically related beds or bedsets (within a parasequence set) bounded by marine flooding surfaces (FS) (Figure 2) or their correlative surfaces (Van Wagoner et al., 1990). Meanwhile, a parasequence set is a succession of parasequences in a distinctive stacking pattern bounded by major marine-flooding surfaces (MFS) and their correlative surfaces (Van Wagoner et al., 1990).

The correlation performed in this study is in the order of parasequence or deltaic cycle, which represents fifth (5th) order stratigraphic sequence. There are 12 parasequences defined between marker 4a to 5a (Figure 3). The parasequence boundaries are picked at the highest gamma-ray or when it has the most shales, which can be interpreted as flooding surface. The average thickness of one parasequence is 20 to 30 meters which corresponds to

the thickness of one deltaic cycle at the time of deposition. The correlation is performed for 78 wells within SU-4 in the study area, representing 9 North-South line sections & 9 West-East line sections. From the log observation, it can be seen that the funnel shape (orange-coloured facies) is dominant compared to the bell shape (yellow-coloured facies) in the combination of log gamma-ray and resistivity. This funnel shape indicates a mouth bar facies, while the bell shape indicates the channel facies (Figure 3).

4.2. Water Rise Analysis

In this study, formation pressure is used to support the correlation and connectivity of the reservoirs. Connected reservoirs should have the same pressure depletion trend during a production period. The formation pressure is obtained using wireline formation tester tools (RFT/ MDT, RDT, etc.).

The classical signature of water rise as observed from open-hole logs is high to medium resistivity associated or not to a gas peak but sometimes with a small NPHI-RHOB crossover (not always) and a relative increase in NPHI values. Once a water rise is suspected on a well, it is often necessary to run a fluid analysis to confirm the fluid interpretation. The pressure data in water rise bearing levels are often depleted but less than in the gas-bearing part, sometimes higher due to pressure build-up from the aquifer. It is often difficult to differentiate between water rise and gas on petrophysical interpretation, and if fluid analysis results are inconclusive, then the fluid becomes “possible water rise” in fluid status (Figure 4).

In this study, water rise is defined as water that has pressure < 0.95 deq (Figure 4). However, since the study aims to evaluate mouth bar dimension, only water rise in bar facies is studied in the analysis.

4.2.1. Water Rise Influence Distance

The source of depletion is determined by looking at surrounding wells of water rise well. This depletor must be drilled and has been produced earlier than the water rise well. Pressures of both reservoirs are then plotted. Through time, if the plot shows the same pressure decreasing trend, it is possible that both reservoirs are connected, and the produced well act as the source of depletion.

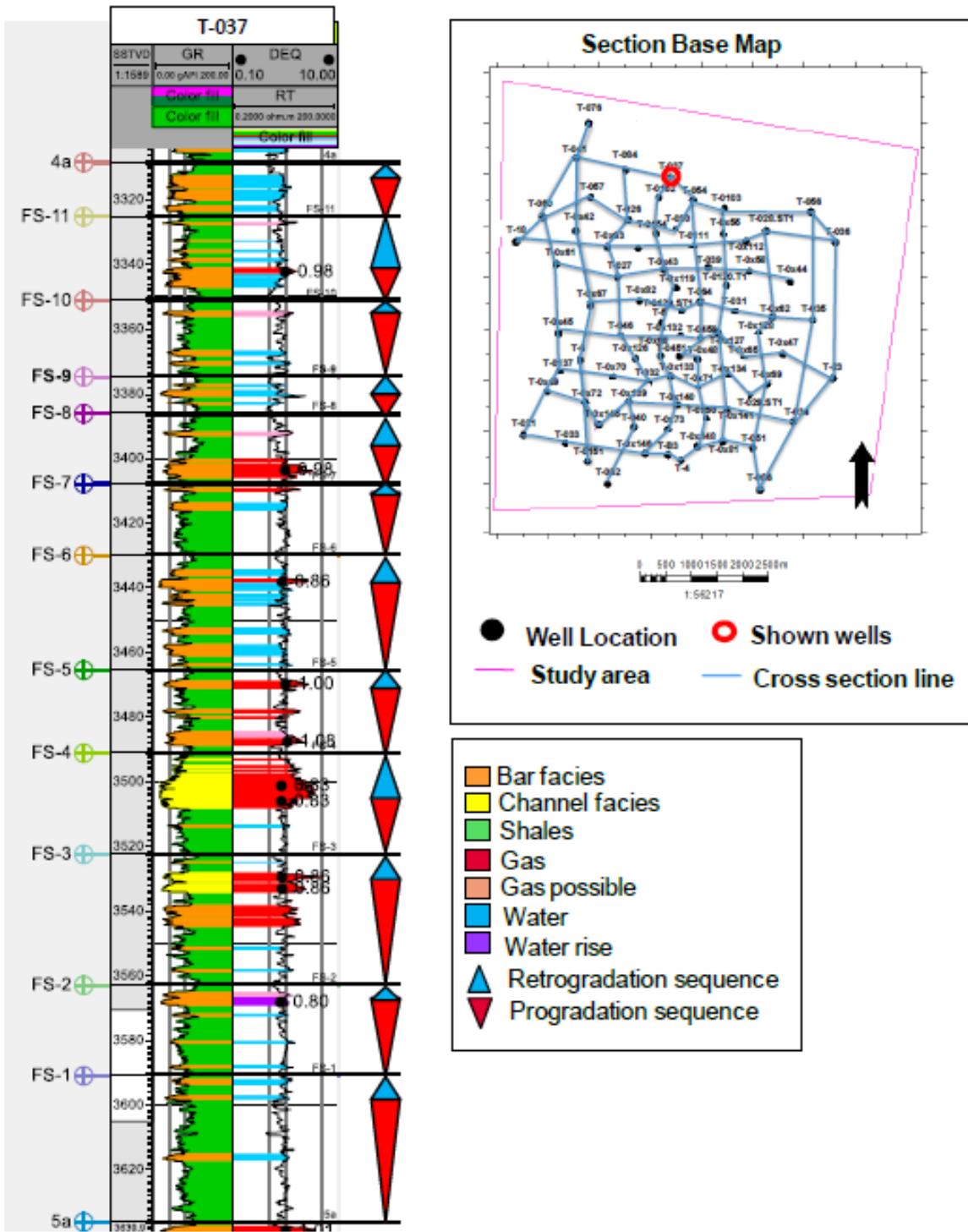


Figure 3. Markers and parasequence defined in the log.

For example, T-0x44, drilled in 2007, has water rise on its reservoir in layer 4a (Figure 5a). All surrounding wells with gas in their reservoir on the 4a layer are identified. Based on the drilled year, the possible sources of depletion are T-028.ST1, T-031, and T-064 (Figure 5b). However, T-031 have not been perforated (Figure 5c), and from the pressure plot (Chart 1), T-064 does not have the same pressure depletion trend as T-0x44. Therefore, it is concluded that the depletor of T-0x44 is T-028.ST1 with water rise influence distance of 1106 m.

Distance between water rise and its source of depletion define how far a produced well could affect its surrounding wells, which can also be interpreted as reservoir connectivity and the extension of mouth bar dimension. However, the disconnectivity between reservoirs could happen not only because of the extension of the mouth bar body ends. The burial process and diagenesis could make a permeability barrier that disconnects reservoirs even though they belong to the same mouth bar body.

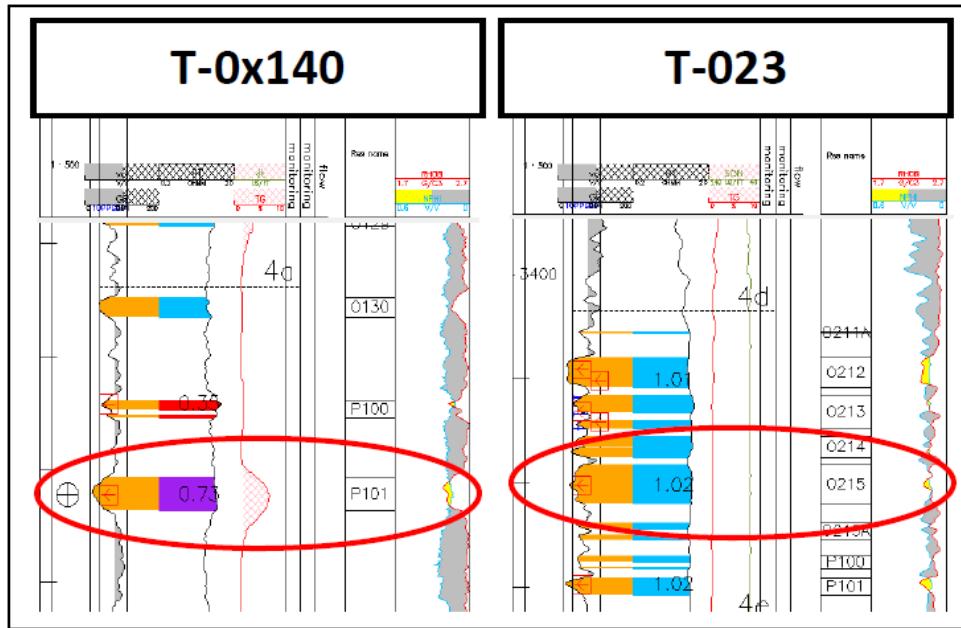


Figure 4. Example of water rise (left) and original water (right) interpreted from log. The number on the log (0.73, 1.02) are reservoir pressure in deq.

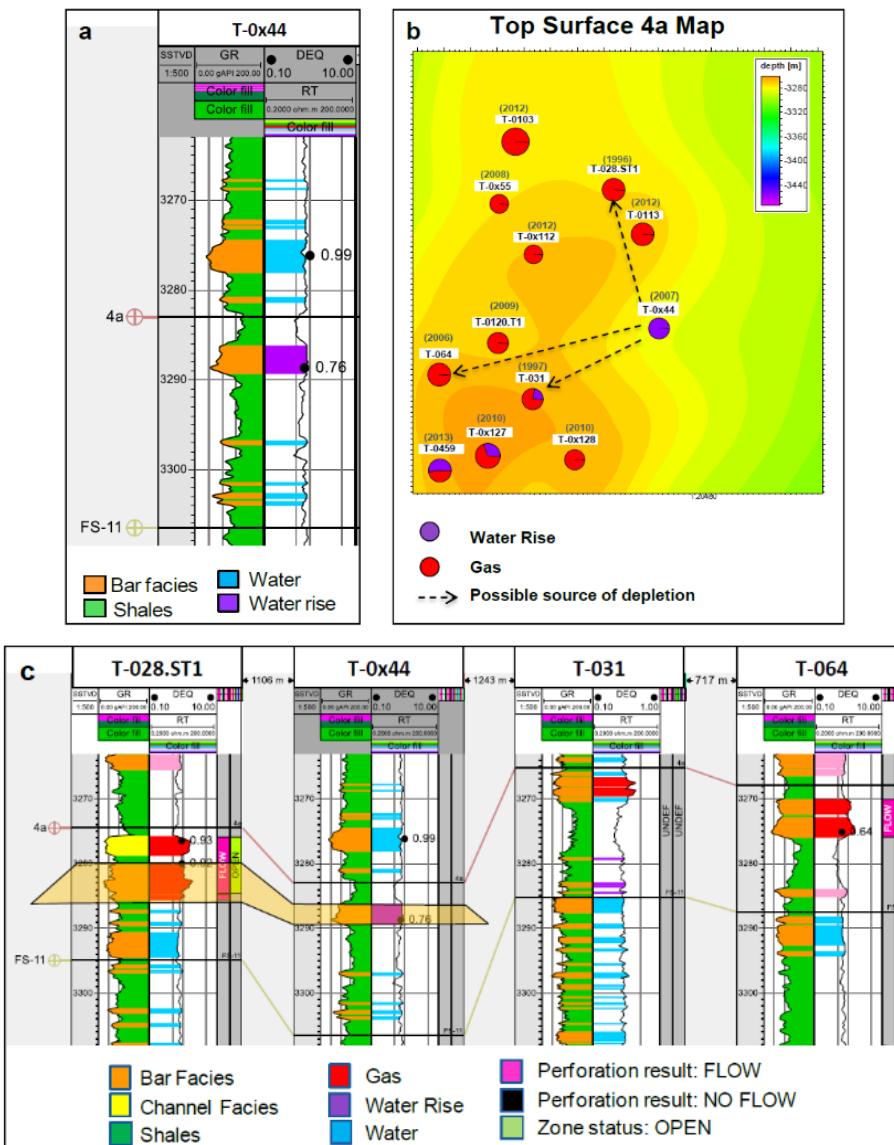


Figure 5. (a) Reservoir with water rise on layer 4a of T-0x44; (b) Location of T-0x44 and its surrounding wells with its drilled year; (c) The section shows T-028.ST1 is connected with T-0x44 on layer 4a and act as the source of depletion.

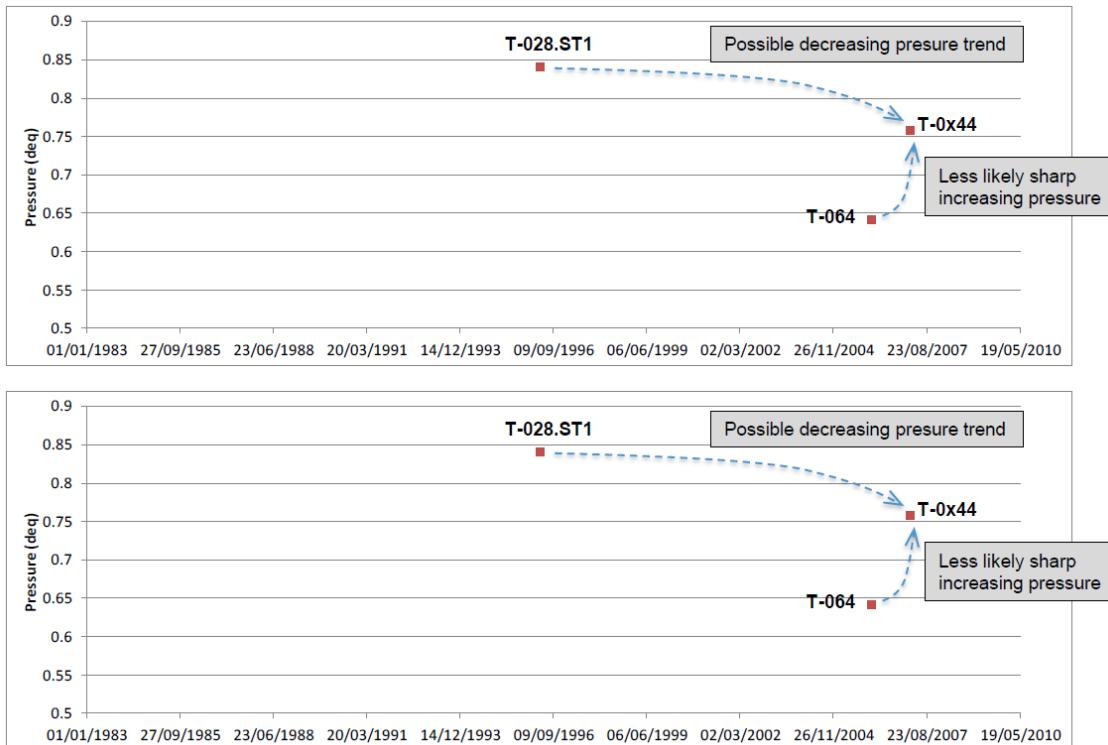


Chart 1. Pressure plots of possible source of depletions for water rise in T-0x44.

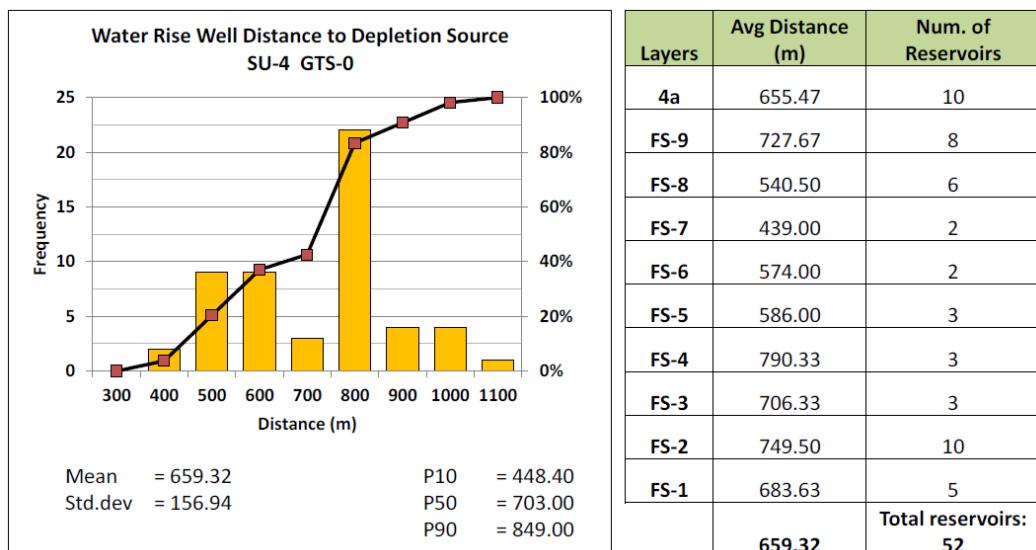


Chart 2. Histogram and table of water rise distance to its depletion source in SU-4 X field

From 145 reservoirs with water rise in all 78 wells in the study area, 92 are in bar facies. The depleters of some of these reservoirs are in channel facies. These water rise reservoirs connected to channel depleters cannot be analysed because their numbers will not represent the mouth bar dimension. There are 52 reservoirs in bar facies that are depleted by produced bar reservoirs (Chart 2). From the result of water rise analysis, it is observed that the influence distance of water rise in this study area is ~700 m (703 m for P50 value and 659 m for mean value), which means less than 1000 m as implemented in the current X geomodel (Chart 3).

4.3. Mouth Bar Dimension Analysis

4.3.1. Mouth Bar Dimension

To see the mouth bar dimension, a detailed sand-to-sand correlation is performed on Petrel. This correlation is supported by pressure trend analysis, just like what has been performed in water rise analysis. The starting point is from the well with the thickest bar layer, which could be interpreted as the centre of the bar. Indeed, this reservoir has to have pressure data on it to make it easier to correlate with other reservoirs from other wells. Afterwards, by looking at its surrounding wells on cross-section (Figure 6a) and by its pressure data plot (Figure 6b), it determines which well is connected and which is not. The correlation

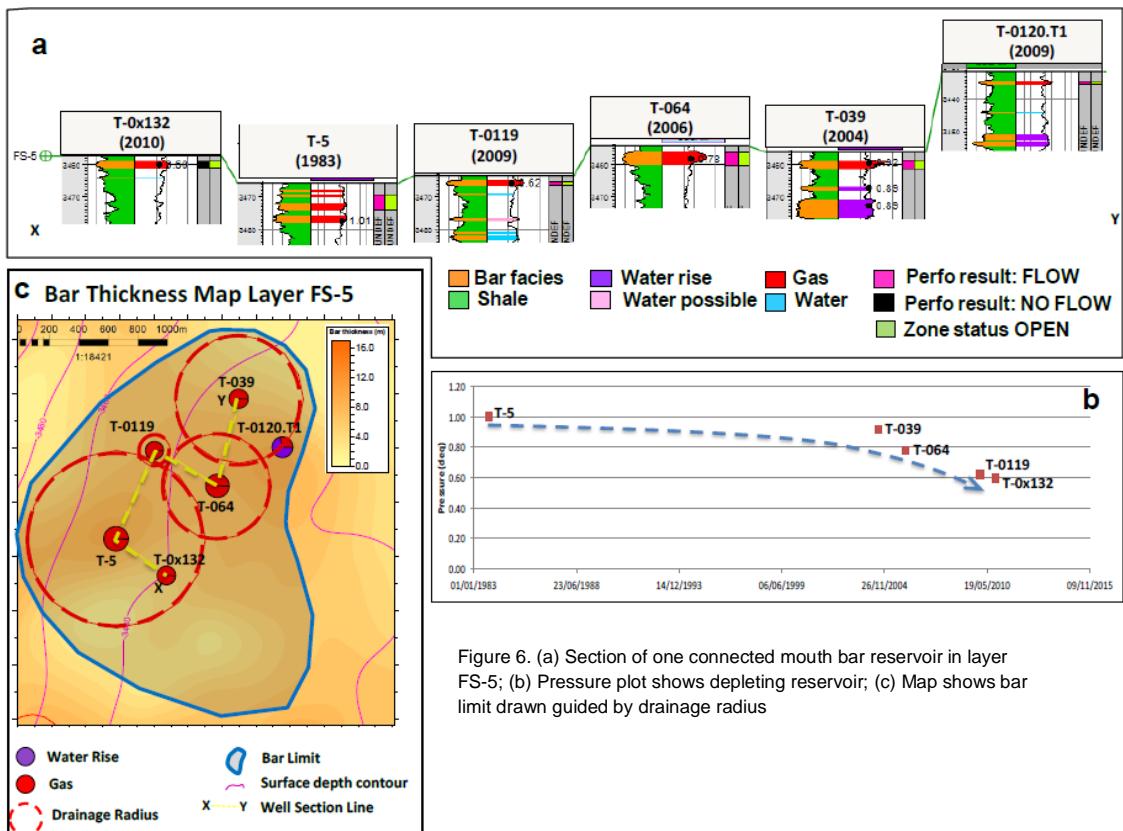


Figure 6. (a) Section of one connected mouth bar reservoir in layer FS-5; (b) Pressure plot shows depleting reservoir; (c) Map shows bar limit drawn guided by drainage radius

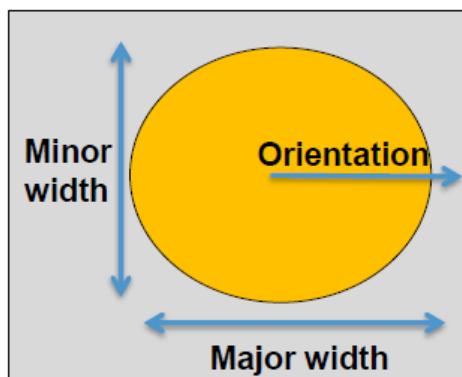


Figure 7. Schematic of bar dimension parameters.

Table 1. Bar dimension parameter values obtained from detail correlation.

Layers	Number of Bars	Orientation (° NE)				Major Width (m)				Minor Width (m)				Maj/Min ratio			
		Min	Mean	Max	StdDev	Min	Mean	Max	StdDev	Min	Mean	Max	StdDev	Min	Mean	Max	StdDev
4a	13	71	104	140	24	819	1172	1620	250	699	974	1298	202	1.01	1.21	1.61	0.16
FS-11	5	77	107	120	18	914	1254	1484	241	778	1015	1163	156	1.17	1.23	1.33	0.07
FS-10	6	89	108	122	14	881	1130	1355	177	799	983	1148	139	1.01	1.16	1.52	0.19
FS-9	10	70	109	132	23	920	1361	2106	410	614	998	1614	288	1.06	1.38	1.75	0.21
FS-8	8	70	108	151	31	892	1171	1486	243	677	951	1220	175	1.09	1.23	1.42	0.12
FS-7	5	104	115	139	14	776	1210	2323	630	772	876	957	75	1.01	1.37	2.54	0.66
FS-6	10	70	107	132	21	853	1317	1911	354	699	1047	1643	313	1.01	1.29	1.76	0.28
FS-5	10	65	101	125	25	917	1316	1780	262	562	967	1296	261	1.05	1.41	1.84	0.26
FS-4	13	68	101	137	23	621	1155	1765	347	599	846	1089	145	1.01	1.35	1.79	0.28
FS-3	10	70	108	153	26	657	1206	1609	287	639	895	1347	215	1.03	1.36	1.80	0.22
FS-2	7	63	90	114	19	885	1294	1718	283	570	996	1362	290	1.09	1.34	1.89	0.26
FS-1	7	82	106	131	16	870	1224	1784	320	602	978	1338	291	1.07	1.28	1.60	0.19
All Layers	104	63	105	153	22	621	1234	2323	315	562	957	1643	225	1.01	1.31	2.54	0.25

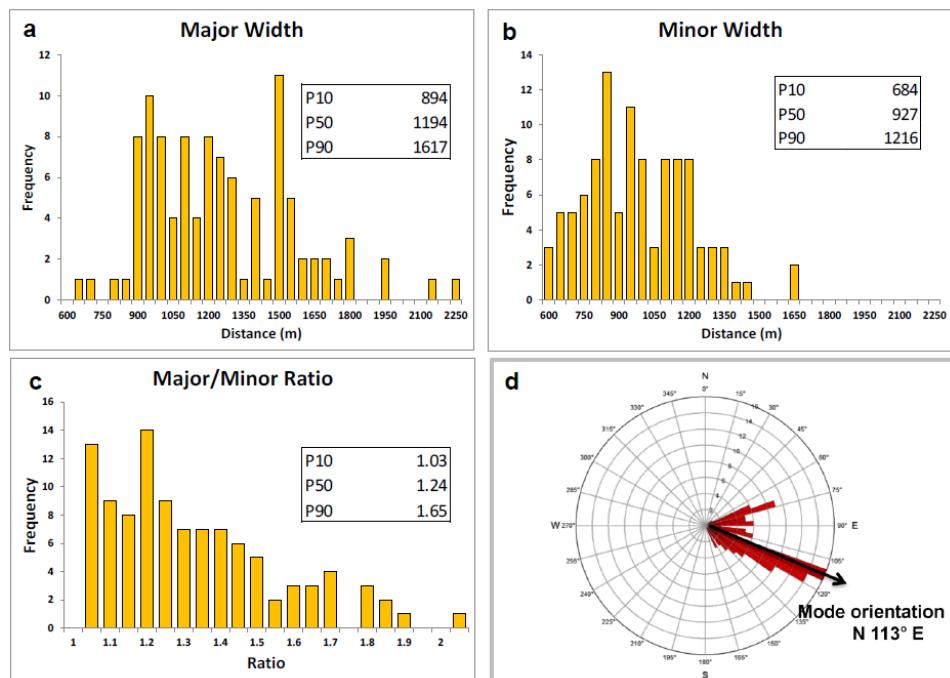


Chart 3. Histogram shows the (a) major width, (b) minor width, and (c) major/minor ratio from all bars observed in all layers; Rose diagram shows the (d) orientation of mouth bar bodies observed.

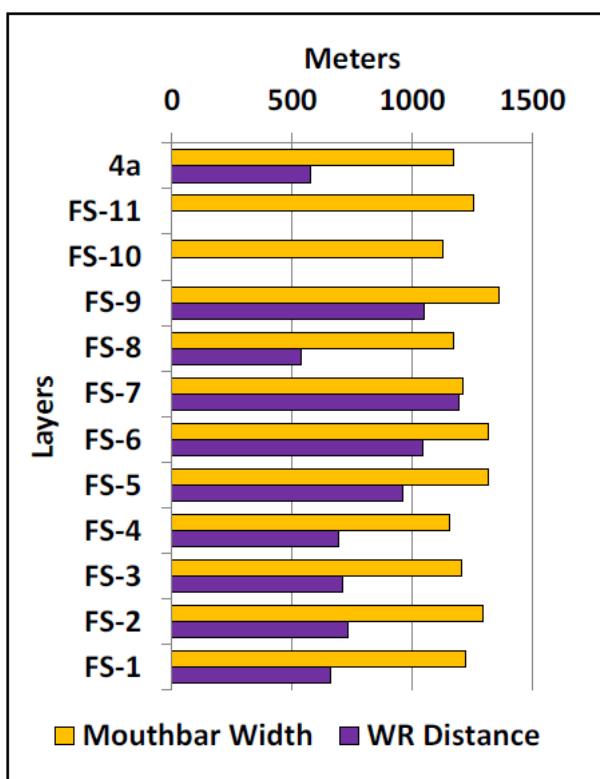


Chart 4. Water rise influence distance is always less than mouth bar width on every layer.

goes on until there are no more connected reservoirs to this particular mouth bar body. In the end, the limit of this one mouth bar is drawn and guided by the drainage radius of each well (Figure 6c).

The bar dimensions measured in this step are orientation, major width, and minor width of the mouth bar (Figure 7). The bar limit drawn shows more anisotropy than the drainage radius, which is assumed as an isotropic

cylindrical body. Hence, it has the parameter of major and minor width instead of radius. The orientation shows the direction of the major direction and, therefore, can be interpreted as the direction of sedimentation when the mouth bar was deposited.

From 12 zones in the study area, there are 104 connected mouth bar reservoir bodies observed. Each has its dimension to be inserted as input value later on the geomodeling (Table 1).

This analysis shows that the major width for one mouth bar reservoir body in this study area is ~1200 m (P50 = 1194 m). It is on the value of ~900 m (P50 = 927 m) for minor width. It is also observed that the mouth bar body in this study area is an ellipsoid body with a ratio of major and minor width of 1.24 (P50) oriented to the southeast direction (mode of orientation = N 113° E) (Chart 3).

Nonetheless, to compare these values with the current parameter used in X geomodel, it is crucial to divide the major/minor width obtained by two so that they are comparable to each other. Here the width represents diameter instead of radius used in the model. Therefore, the value of bars' half-width from this study is in the range of 450 m (half of the minor width 900 m) to 600 m (half of the major width 1200 m), less than 800 m value currently assumed and used in X geomodel.

4.3.2. Link with Water Rise Influence Distance

All reservoirs with water rise and its source of depletion belong to the same mouth bar body. Thus, the water rise influence distance should have a relation with mouth bar dimension. This study shows that the water rise influence distance on every layer is less than the average major width of mouth bar and proportional to each other (Chart 4). This result suggests that the modelling parameter for water rise discount limit area could be set to be proportional to the net pay bar limit.

It is seen on Chart 4 that layer FS-11 and FS-10 does not have water rise on them even though there are mouth bar reservoir bodies observed. One of many possible explanations is that the burial process intensified on these layers and caused poor porosity and permeability, which prevented water rise. It is also possible that these reservoirs indeed have good petrophysical properties but are not connected to active aquifers so that no water rise phenomenon occurred.

5. Conclusion

- Water rise influence distance in the study area is 703 m (P50); thus, 1000 m radius used for water rise discount radius in X geomodel can be challenged.
- Reservoir area with effective pressure connectivity in mouth bar facies in the study area is within 597 m radius (P50); thus, 800 m radius used bar radius in X geomodel can be challenged. However, lateral radius variation across the X field is expected.
- Mouth bar radius is proportional to water rise influence distance.
- This result of new parameter values, which are 20%-30% lower than the current numbers used in the geomodel, can then be applied to update the current geomodel, lowering the current IGIP value and closing the discrepancy gap of IGIP and CGIP.
- Parasequence correlation combined with the water rise phenomenon could be helpful as a method to determine reservoir connectivity and, therefore, reservoir dimension in the subsurface.

Acknowledgements

Major contribution came from my supervisors Jean-Claude Heidmann and Pierre-Yves Dequierez from IFP School, and also my internship mentors back in TEPI: Dodiono and Yudhistira Adji. My master programme was financially supported by Total S.A. Global.

References

- Ainsworth, R.B. (2005). Sequence stratigraphic-based analysis of reservoir connectivity: influence of depositional architecture—a case study from a marginal marine depositional setting. *Pet. Geosci.* 11, 257 LP – 276. <https://doi.org/10.1144/1354-079304-638>
- Doust, H. & Noble, R. (2008). Petroleum systems of Indonesia. *Marine and Petroleum Geology* 25(2), 103–129. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.05.007>
- Dunham, J.B., Brown, T.J., Lin, R., Redhead, R.B., Schwing, H.F., & Shirley, S.H. (2001). Transport and concentration of gas- and oil-prone kerogens into deep water sediments of the Kutei Basin, East Kalimantan, Indonesia. *AAPG International Conference & Exhibition 2000*.
- Galloway, W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In *Deltas: Models for Exploration* (pp. 87-98).
- Hyne, N.J. (1995). Sequence stratigraphy: a new look at old rocks. In *Sequence Stratigraphy of the Mid-Continent* (pp. 5-17).

- Moss, S. & Chambers, J. (1999). Tertiary facies architecture in the Kutai Basin, Kalimantan, Indonesia. *J. Asian Earth Sci.* 17, 157–181. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00035-X)
- Moss, S.J., Chambers, J., Cloke, I., Satria, D., Ali, J.R., Baker, S., Milsom, J., & Carter, A., (1997). New observations on the sedimentary and tectonic evolution of the Tertiary Kutai Basin, East Kalimantan. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 126, 395–416.
- Saller, A., Lin, R. & Dunham, J. (2006). Leaves in turbidite sands: The main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 90, 1585–1608.
- Siemers, C.T., Chambers, J.L.C. & Allen, G.P. (1994). Field Seminar on the Sedimentology and Sequence Stratigraphy of Modern and Ancient Fluvial, Deltaic and Shelf Deposits. Mahakam delta/Kutei Basin fluvial/deltaic depositional systems, East Kalimantan, Indonesia. *Am. Assoc. Pet. Geol. Geoservices*.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Campion, K.M., & Rahmanian, V.D. (1990). Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. *AAPG Methods in Exploration Series* vol. 7.

Identifikasi Endapan Bijih Besi Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah Menggunakan Korelasi serta Komparasi Metode IP-resistivitas dan Magnetik

Salsabila Sisqi Indreswari^{1*}, Supriyanto¹, dan Agus Kuswanto²

¹ Program Studi Geofisika, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, 16424, Indonesia

² PT Geoscan Eksplorasindo, Jalan Palem nomor 3, Ujung Berung, Kota Bandung, Jawa Barat, 40611, Indonesia

*Narahubung: salsabilasisqi@gmail.com

Abstrak

Penelitian dilakukan pada Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah menggunakan korelasi serta komparasi metode polarisasi terimbass (IP), resistivitas listrik, dan magnetik untuk memetakan keberadaan zona mineralisasi endapan bijih besi yang bersifat ekonomis. Luas daerah yang menjadi objek penelitian sekitar 0,3 km². Konfigurasi elektroda yang digunakan pada metode geolistrik adalah konfigurasi Wenner dan terdapat lima lintasan pengukuran geolistrik berarah barat laut-tenggara dengan panjang setiap lintasan 470 m. Data resistivitas listrik dapat menunjukkan jenis litologi, zona alterasi, dan zona mineral logam. Data IP dapat menunjukkan adanya zona mineralisasi serta memetakan kondisi bawah permukaan mineralisasi endapan bijih besi secara lateral dan vertikal. Kemudian data magnetik yang diberikan mencakup area pengukuran geolistrik, sehingga dapat dilakukan *profiling* anomali magnetik pada setiap lintasan geolistrik. Data magnetik mampu memetakan zona batuan teralterasi dan zona struktur. Daerah penelitian berada pada batuan gunung api yang terdiri atas breksi berkomposisi andesit dan basal, aliran lava, batupasir tufan, tuf, serta intrusi andesit dan basal. Berdasarkan informasi geologi regional dan litologi daerah penelitian, genesa bijih besi pada daerah penelitian terbentuk dari proses hidrotermal dan tergolong bijih besi primer (bijih besi oksida–magnetit dan hematit).

Kata kunci: Bijih besi; Geolistrik; Magnetik; Polarisasi terimbass; Resistivitas

1. Pendahuluan

Bijih besi merupakan salah satu mineral logam komoditas utama sumber daya geologi Indonesia. Berdasarkan data Badan Geologi (2018), potensi sumber daya bijih besi di Indonesia sebesar 12.079,45 bijih juta ton, sedangkan cadangan total bijih besi yang terbukti dan terkira sebesar 3.074,01 bijih juta ton. Bijih besi di Indonesia salah satunya terdistribusi di Provinsi Kalimantan Tengah (Haryadi dan Saleh, 2012). Potensi bijih besi di Pulau Kalimantan diklasifikasikan menjadi bijih magnetit-hematit, bijih lateritik, dan bijih limonitik (Van Bemmelen, 1949).

Metode magnetik dan geolistrik merupakan kombinasi metode yang cocok digunakan pada kasus pemetaan zona mineralisasi endapan bijih besi. Data resistivitas listrik dapat menentukan jenis litologi serta menunjukkan adanya zona alterasi dan zona mineral logam. Data IP dapat menunjukkan adanya zona mineralisasi serta dapat memetakan kondisi bawah permukaan zona mineralisasi secara lateral dan vertikal. Data magnetik mampu memetakan zona batuan teralterasi dan zona struktur pada daerah penelitian (Chandra, 2011). Kombinasi data geofisika yang didukung oleh data geologi mampu mendelineasi keberadaan zona prospek endapan bijih besi yang bersifat ekonomis dan dapat dijadikan sebagai rekomendasi titik pemboran.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan korelasi data IP, resistivitas listrik, dan magnetik yang kemudian dilengkapi dengan data geologi untuk menentukan jenis bijih besi di daerah penelitian serta menentukan zona prospek endapan bijih besi yang bersifat ekonomis sebagai rekomendasi titik pemboran. Selain itu

bertujuan untuk menghasilkan studi komparasi metode IP, resistivitas listrik, dan magnetik dalam eksplorasi bijih besi.

2. Landasan Teori

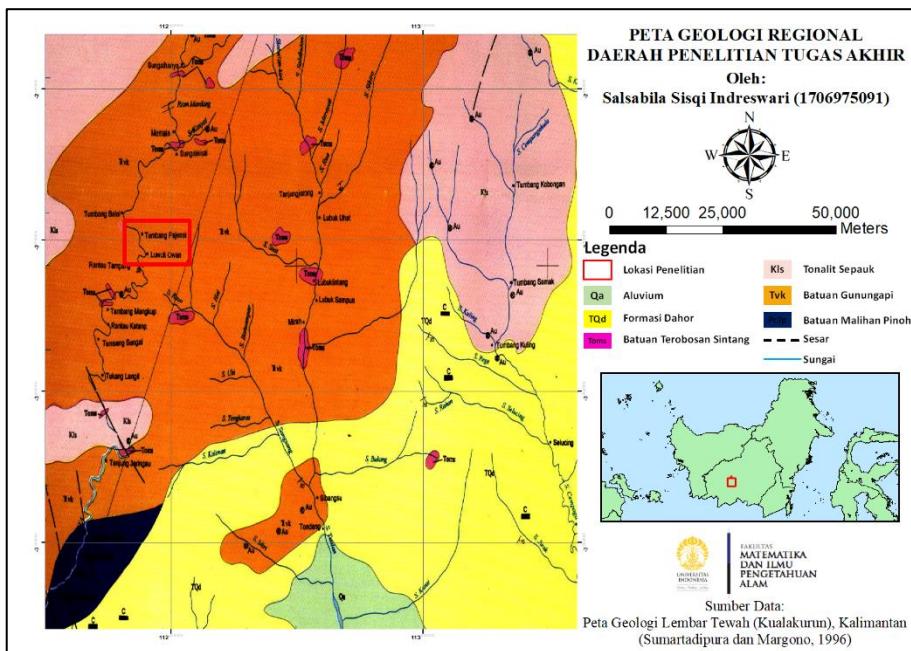
2.1. Kondisi Geografis, Geologi, dan Litologi Daerah Penelitian

Secara administratif, daerah penelitian termasuk Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah. Berdasarkan geologi regional pada Gambar 1, daerah penelitian termasuk ke dalam Peta Geologi Lembar Tewah (Kualakurun) oleh Sumartadipura dan Margono (1996). Lokasi penelitian berada pada batuan gunung api atau batuan vulkanik (Tvk) yang tersusun atas breksi berkomposisi andesit dan basal, aliran lava, batupasir tufan, tuf, serta intrusi andesit dan basal (Toms) (Sumartadipura dan Margono, 1996).

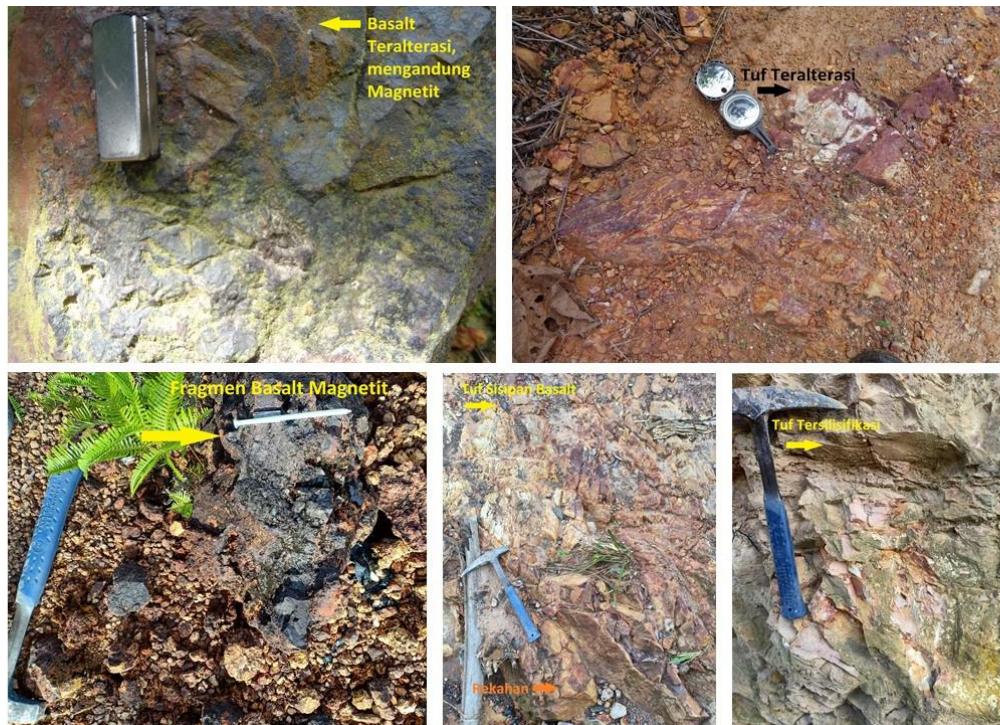
Gambar 2 menunjukkan beberapa batuan yang terdapat pada lokasi penelitian, yaitu basal teralterasi yang mengandung magnetit, tuf teralterasi, tuf sisipan basal dengan basal yang mengandung magnetit serta terdapat struktur rekahan di sekitarnya, dan tuf tersilisifikasi.

2.2. Bijih Besi Daerah Penelitian

Berdasarkan informasi geologi regional dan litologi daerah penelitian, dapat diambil hipotesis bahwa genesa bijih besi pada daerah penelitian terbentuk dari proses hidrotermal yang berkaitan dengan larutan hidrotermal (Chandra, 2011). Oleh karena itu, bijih besi pada daerah penelitian termasuk bijih besi magnetit-hematit yang tergolong besi oksida. Pada umumnya, endapan hidrotermal berkaitan dengan alterasi dinding batuan, yang terjadi karena adanya interaksi antara fluida hidrotermal



Gambar 1. Peta geologi regional daerah penelitian (telah diolah kembali dari Sumartadipura dan Margono, 1996).



Gambar 2. Batuan yang terdapat di daerah penelitian (PT Geoscan Eksplorasindo, 2019).

dengan batuan di sekitarnya. Di daerah penelitian, umumnya alterasi terjadi pada batuan basal dan tuf.

2.3. Metode Polarisasi Terimbas (IP)

Metode IP memiliki prinsip yaitu menginjeksikan arus listrik, kemudian dilakukan pengukuran nilai beda potensial primer antara dua elektroda potensial. Kemudian aliran arus listrik dimatikan dan dilakukan pengukuran nilai beda potensial sekunder sampai mencapai nol selama waktu peluruhanannya, sehingga akan diperoleh nilai chargeabilitas semu (*apparent chargeability*; Ma) melalui perbandingan nilai beda potensial primer (V_p) dengan hasil integral nilai

beda potensial sekunder (V_s) terhadap waktu peluruhan (t), sebagai berikut (Reynolds, 2011):

$$Ma = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t) dt \quad (1)$$

2.4. Metode Resistivitas Listrik

Metode resistivitas listrik digunakan untuk menentukan distribusi nilai resistivitas bawah permukaan (Loke, 2000). Prinsip metode resistivitas adalah menggunakan dua elektroda arus untuk menginjeksikan arus listrik ke dalam bumi dan dilakukan pengukuran nilai beda potensial pada dua elektroda potensialnya, sehingga akan diperoleh nilai

resistivitas semu (*apparent resistivity*) yang memerlukan proses inversi untuk menghasilkan nilai resistivitas sesungguhnya (*true resistivity*).

Nilai resistivitas semu yang terukur (ρ_a) dipengaruhi oleh faktor geometri konfigurasi elektroda yang digunakan (K), perubahan nilai beda potensial (ΔV), serta nilai arus listrik yang diinjeksikan (I), dengan persamaan sebagai berikut (Telford et al., 1990):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

2.5. Konfigurasi Wenner

Penelitian ini menggunakan konfigurasi Wenner pada metode geolistrik (IP dan resistivitas). Spasi antar elektroda pada konfigurasi Wenner memiliki nilai yang sama. Oleh karena itu, konfigurasi Wenner dengan spasi (a) memiliki faktor geometri (K) sebesar (Reynolds, 2011):

$$K = 2\pi a \quad (3)$$

2.6. Metode Magnetik

Studi yang mempelajari kemagnetan bumi adalah cabang tertua geofisika (Telford et al., 1990). Salah satu metode geofisika untuk mengukur anomali medan magnetik di permukaan bumi akibat variasi distribusi benda termagnetisasi di bawah permukaan bumi adalah metode magnetik, sehingga metode magnetik bisa digunakan untuk memprediksi keadaan geologi.

Proses pengolahan data magnetik terdiri atas beberapa tahapan. Pada tahap awal, dilakukan proses pengolahan data hasil akuisisi lapangan yang masih dipengaruhi oleh medan magnet dalam dan luar bumi untuk memperoleh

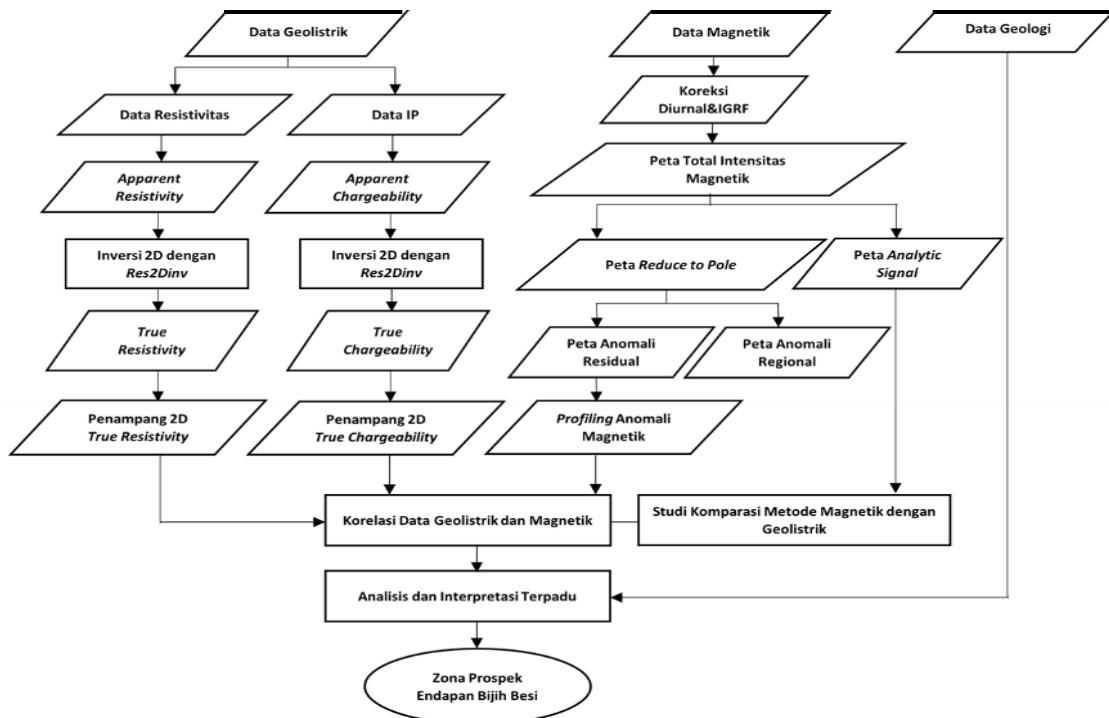
nilai anomali magnetik, dengan menerapkan koreksi harian (*diurnal correction*) dan koreksi IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*).

Tahapan selanjutnya adalah melakukan *gridding* untuk memperoleh peta total intensitas magnetik, yang dilanjutkan dengan proses *filtering* untuk memperhalus profil anomali magnetik dan menghilangkan efek-efek *noise*. Beberapa filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah *butterworth filter* untuk memisahkan anomali regional dan residual, filter reduksi ke kutub (*reduce to pole*) untuk menghilangkan efek sudut inklinasi dan deklinasi pada suatu pengukuran yang disebut efek dipol (dua kutub), dan filter sinyal analitik (*analytic signal*) yang merepresentasikan anomali magnetik sesungguhnya dari tubuh anomali.

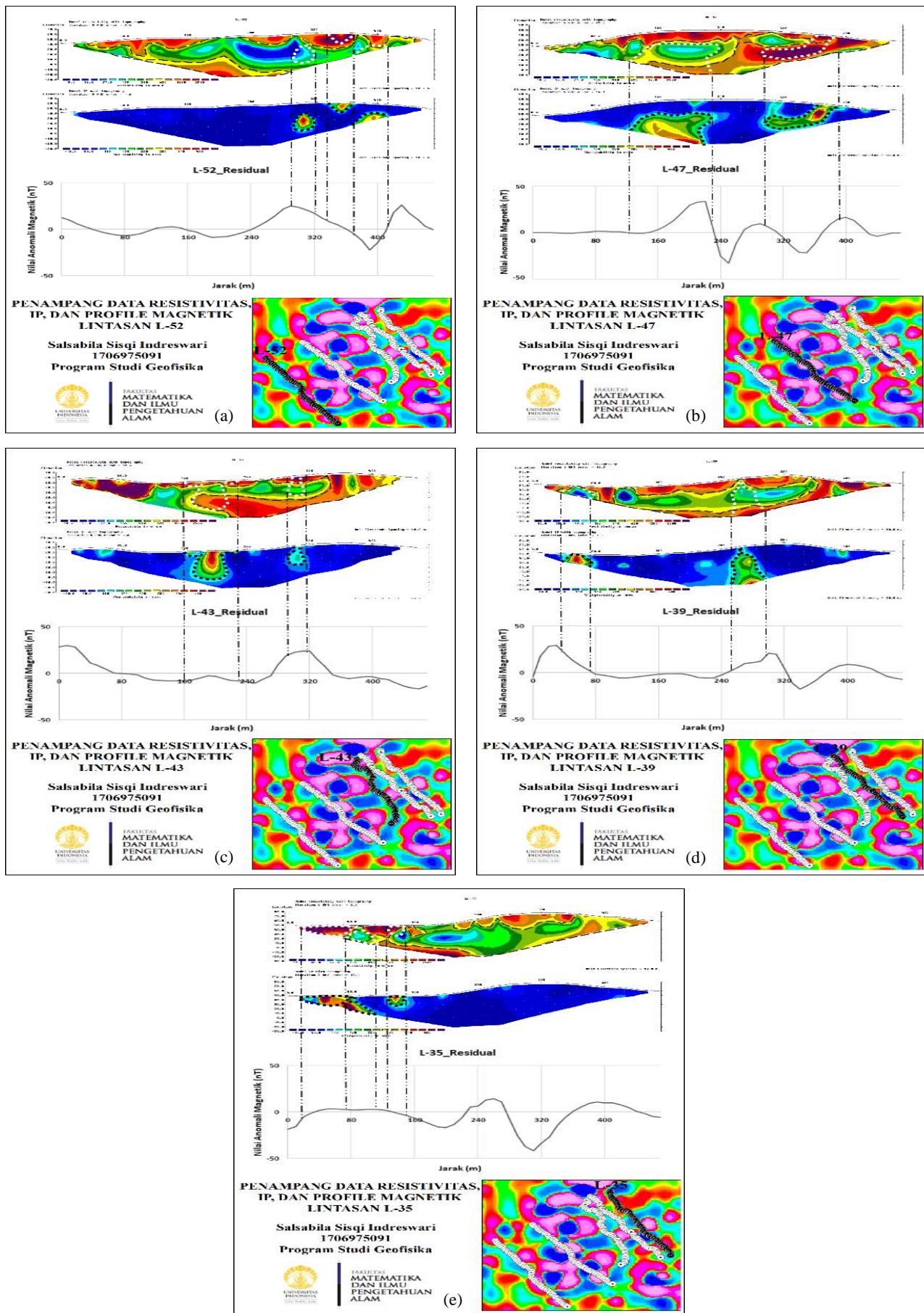
3. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan data yang diberikan oleh PT. Geoscan Eksplorasindo, meliputi data IP, resistivitas listrik, dan magnetik. Pengolahan data geofisika dilakukan sesuai dengan diagram alir penelitian pada Gambar 3, terdiri atas pengolahan data IP dan resistivitas listrik untuk mendapatkan penampang 2D data geolistrik, serta pengolahan data magnetik meliputi koreksi diurnal dan IGRF, pembuatan peta total intensitas magnetik, pembuatan peta reduksi ke kutub dan sinyal analitik dari peta total intensitas magnetik, pemisahan anomali regional dan residual dari peta reduksi ke kutub, dan pembuatan profil anomali magnetik (*profiling*) dari peta anomali magnetik residual pada setiap lintasan geolistrik.

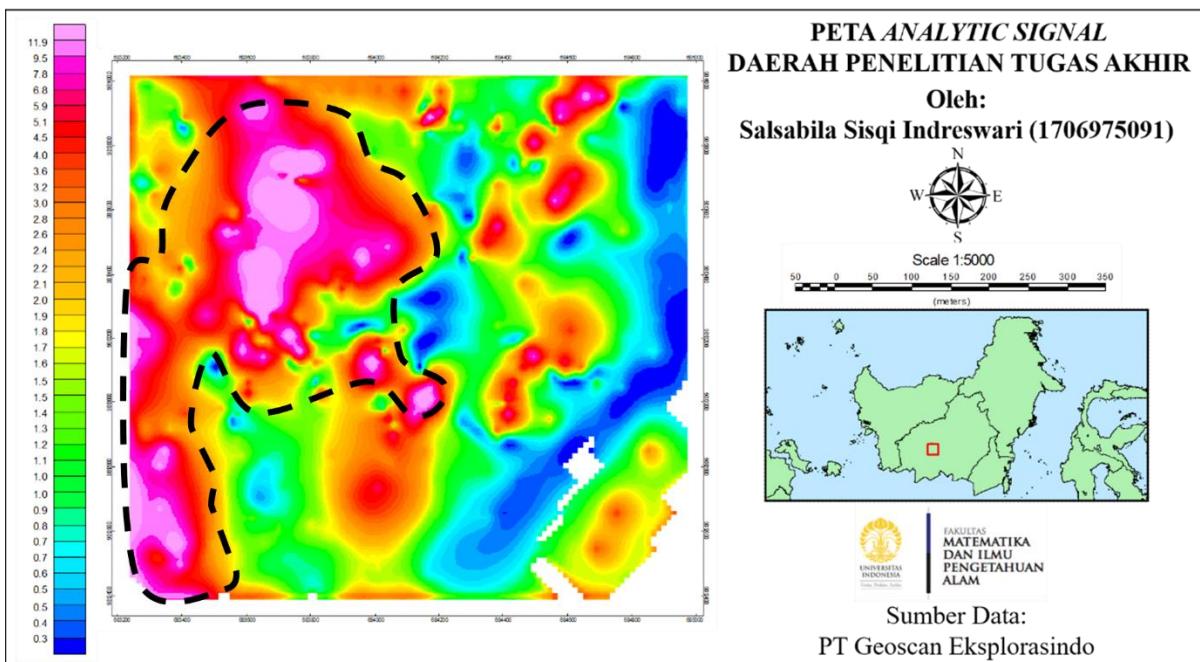
Setelah itu, dilakukan korelasi antar data geofisika yang kemudian dilengkapi dengan data geologi seperti data litologi daerah penelitian dan peta geologi regional. Analisis



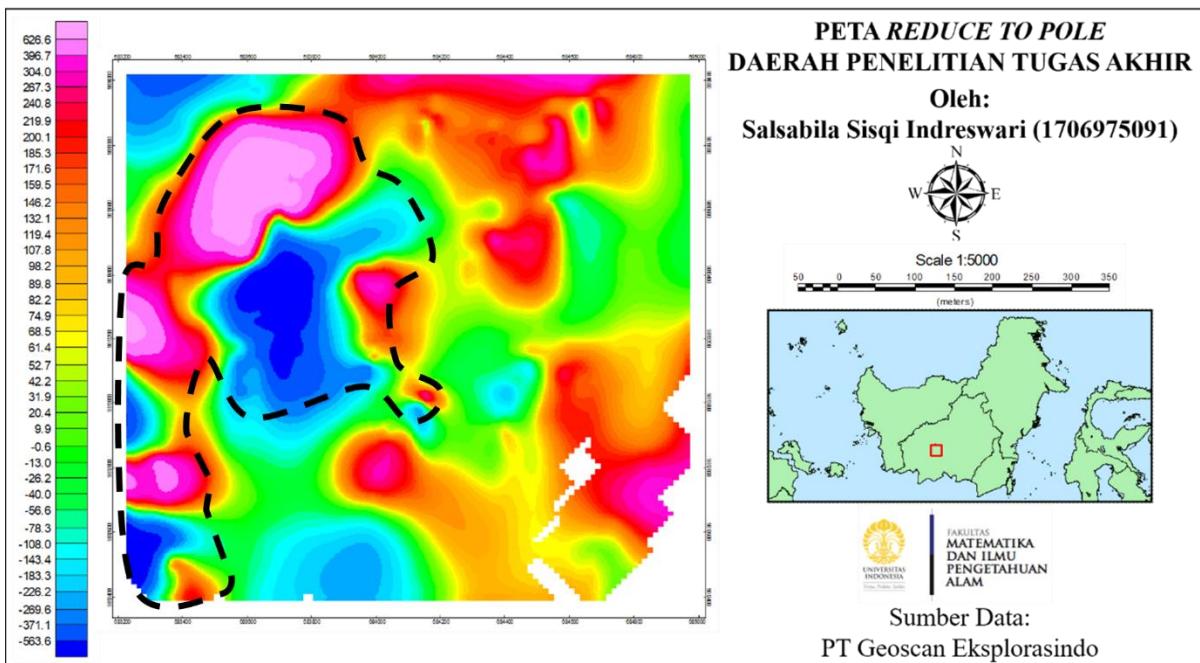
Gambar 3. Diagram alir penelitian.



Gambar 4. Penampang data setiap lintasan yang digunakan untuk korelasi (a) L-52 (b) L-47 (c) L-43 (d) L-39 (e) L-35.



Gambar 5. Interpretasi zona prospek (disimbolkan dengan garis putus-putus berwarna hitam) yang mengindikasikan keterdapatannya bijih besi oksida pada daerah penelitian ketika hanya menggunakan metode magnetik berdasarkan peta sinyal analitik.



Gambar 6. Zona prospek ketika dikorelasikan dengan peta reduksi ke kutub.

serta interpretasi data geofisika dan geologi dilakukan untuk menentukan zona prospek endapan bijih besi yang bersifat ekonomis sebagai rekomendasi titik pemboran. Selain itu, juga dilakukan studi komparasi antarmetode geolistrik dan magnetik dalam mengidentifikasi endapan bijih besi menggunakan peta sinyal analitik yang dikorelasikan dengan peta reduksi ke kutub.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Korelasi Data IP, Resistivitas Listrik, dan Magnetik dalam Eksplorasi Bijih Besi

Interpretasi berupa korelasi data IP, resistivitas listrik, dan magnetik dilakukan pada zona *overlie* lintasan

geolistrik di peta anomali magnetik residual yang merupakan zona dengan anomali magnetik positif dan negatif yang berpasangan, karena umumnya zona ini dapat menjadi hipotesis keterdapatannya mineral bijih besi (Killo et al., 2015). Kemudian lokasi utama zona mineralisasi bijih besi serta jenis mineral bijih besi ditentukan berdasarkan kontras anomali *chargeability* yang dikorelasikan dengan kontras anomali resistivitas listrik dan dilengkapi dengan profil anomali magnetik sesuai dengan Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4, terdapat lima lintasan pengukuran geolistrik dengan setiap lintasan sepanjang 470 meter dan berarah barat laut-tenggara (titik 0 m berada di barat laut dan titik 470 m berada di tenggara). Berdasarkan keseluruhan grafik profil magnetik setiap

lintasan pada Gambar 4, terlihat adanya pasangan anomali magnetik positif dan negatif yang dapat mengindikasikan zona mineralisasi bijih besi. Kemudian, terlihat juga adanya undulasi pada setiap profil magnetik di sekitar seluruh zona prospek yang dapat mengindikasikan keberadaan struktur sebagai salah satu pengontrol mineralisasi (Chandra, 2011). Strukturnya diduga berupa rekahan (*fracture*) berdasarkan keterangan litologi daerah penelitian.

Berdasarkan penampang resistivitas listrik setiap lintasan pada Gambar 4, terlihat adanya tiga perlapisan batuan, dengan respon nilai resistivitas tinggi pada lapisan pertama dekat permukaan, yang dapat mengindikasikan adanya batuan penutup yang terletak di permukaan setiap lintasan (Chandra, 2011). Batuan penutup ini diperkirakan merupakan batuan vulkanik tersilisifikasi berdasarkan keterangan litologi daerah penelitian dan nilai resistivitasnya yang tinggi, karena umumnya alterasi tipe silisifikasi menghasilkan mineral resistif seperti kuarsa. Kemudian di bawahnya terdapat respon nilai resistivitas rendah sampai menengah sebagai lapisan kedua yang dapat mengindikasikan keberadaan batuan vulkanik yang kaya akan magnetit dan hematit atau besi oksida (Vella & Emerson, 2012). Terakhir, lapisan ketiga yang terletak di paling bawah memiliki respon nilai resistivitas relatif tinggi yang diduga merupakan batuan vulkanik.

Pada lintasan L-52 (Gambar 4a) endapan bijih besi diduga terdapat di sebelah tenggara lintasan, kemudian lintasan L-47 (Gambar 4b) dan L-43 (Gambar 4c) diduga terdapat endapan bijih besi di sekitar bagian tengah dan tenggara lintasan. Berbeda dengan lintasan L-39 (Gambar 4d) yang diduga terletak pada bagian barat laut dan tengah lintasan, serta L-35 (Gambar 4e) yang diduga terletak pada bagian barat laut lintasan. Dugaan keterdapatannya dan konsentrasi mineral bijih besi didasarkan pada korelasi data IP, resistivitas listrik, dan magnetik pada setiap lintasannya.

Berdasarkan data IP setiap lintasan serta menurut Vella dan Emerson (2012), zona prospek endapan bijih besi pada daerah penelitian memiliki anomali *chargeability* relatif menengah sampai tinggi. Nilai *chargeability* menengah sampai tinggi mengindikasikan magnetit ditemukan pada semua lintasan dan nilai menengah mengindikasikan hematit seperti yang ditemukan pada lintasan L-52 dan L-43.

Berdasarkan data resistivitas listrik setiap lintasan serta menurut Vella dan Emerson (2012), zona prospek endapan bijih besi pada daerah penelitian umumnya memiliki anomali resistivitas relatif rendah sampai menengah. Akan tetapi, terdapat beberapa zona prospek dengan anomali resistivitas tinggi yang berkorelasi dengan anomali *chargeability* tinggi. Hal ini mengindikasikan adanya zat pengotor yang berasosiasi dengan mineral besi di bawah permukaan ataupun diduga berasosiasi dengan batuan vulkanik tersilisifikasi jika zona prospeknya terletak dekat dengan permukaan (Chandra, 2011).

Berdasarkan profil magnetik setiap lintasan, zona prospek bijih besi berada pada daerah dengan anomali magnetik positif dan negatif yang berpasangan, dengan nilai relatif tinggi mengindikasikan bijih besinya terkandung dalam batuan vulkanik yang belum teralterasi ataupun tersilisifikasi, sedangkan nilai relatif rendah

mengindikasikan bijih besinya terkandung dalam batuan vulkanik yang sudah teralterasi ataupun tersilisifikasi.

4.2. Studi Komparasi Metode IP, Resistivitas Listrik, dan Magnetik dalam Eksplorasi Bijih Besi

Magnetit dan hematit termasuk besi oksida yang menurut Vella dan Emerson (2012), mineral magnetit memiliki efek IP yang menengah hingga tinggi, sedangkan mineral hematit memiliki efek IP yang rendah hingga menengah.

Vella dan Emerson (2012) menyimpulkan bahwa batuan yang kaya akan magnetit dan hematit memiliki resistivitas yang rendah hingga menengah serta menghasilkan respon IP yang dapat terukur dan relatif menengah hingga tinggi. Namun, diperlukan kehati-hatian ketika melakukan interpretasi data hasil survei geolistrik pada lingkungan geologi dengan kandungan besi oksida dalam jumlah yang signifikan. Hal ini dikarenakan ada kemungkinan lain yang dapat menyebabkan pembacaan nilai *chargeability* tinggi selain keberadaan batuan yang kaya akan mineral logam, seperti keberadaan air tanah ataupun akumulasi mineral lempung. Selain itu, metode geolistrik lebih responsif terhadap besi sulfida (pirit, kalkopirit, pirotit, dan arsenopirit), karena adanya akumulasi mineral sulfida dalam jumlah yang lebih banyak, dan mineral sulfida termasuk mineral logam dengan nilai konduktivitas lebih tinggi.

Penelitian Grandis dan Sumintadireja (2018) menunjukkan efektivitas pendugaan bijih besi menggunakan metode magnetik yang mampu mendelineasi batas-batas anomali magnetik yang menjadi target. Dalam eksplorasi bijih besi oksida, target anomali umumnya direpresentasikan oleh anomali magnetik relatif tinggi. Hal ini dikarenakan mineral-mineral besi oksida termasuk mineral-mineral magnetik yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik relatif tinggi (Grandis dan Sumintadireja, 2018).

Ketika hanya menggunakan metode magnetik dalam eksplorasi bijih besi, umumnya untuk mempermudah interpretasi, digunakan peta reduksi ke kutub dan peta sinyal analitik. Dengan menggunakan peta sinyal analitik daerah penelitian pada Gambar 5, dapat diinterpretasi bahwa zona prospek dengan nilai sinyal analitik yang maksimum mengindikasikan keterdapatannya bijih besi oksida dengan ukuran anomali cukup luas.

Kemudian ketika dikorelasikan dengan peta reduksi ke kutub pada Gambar 6, zona prospek tersebut berada pada pasangan anomali magnetik positif dan negatif yang dapat menjadi hipotesis keterdapatannya endapan bijih besi, karena secara umum endapan bijih besi berada pada zona dengan anomali magnetik positif dan negatif yang berpasangan (Killo et al., 2015).

Oleh karena itu, dalam eksplorasi bijih besi oksida, metode magnetik memiliki tingkat efektivitas sangat tinggi, sedangkan metode geolistrik memiliki tingkat efektivitas yang menengah (Ford et al., 2007). Sehingga, metode magnetik lebih sensitif dibandingkan dengan metode geolistrik dalam eksplorasi bijih besi oksida. Akan tetapi, metode magnetik kurang akurat mengidentifikasi bentuk dan kedalaman endapan bijih besi, sehingga metode IP

dan resistivitas listrik tetap diperlukan karena kombinasi ketiga metode saling melengkapi ketika interpretasi data.

5. Kesimpulan

Korelasi data IP, resistivitas listrik, dan magnetik menunjukkan bahwa endapan bijih besi pada daerah penelitian berjenis magnetit dan hematit, dengan anomali *chargeability* relatif menengah sampai tinggi, anomali resistivitas yang umumnya relatif rendah sampai menengah, dan berada pada daerah dengan anomali magnetik positif dan anomali magnetik negatif yang berpasangan.

Komparasi metode IP, resistivitas listrik, dan magnetik menunjukkan bahwa untuk mendeteksi bijih besi oksida (magnetit dan hematit) lebih sensitif menggunakan metode magnetik dibandingkan metode geolistrik. Akan tetapi, metode geolistrik tetap diperlukan dengan penggunaan yang disertai kehati-hatian, karena korelasi antarmetode saling melengkapi ketika interpretasi data.

Hasil interpretasi berupa korelasi data IP, resistivitas listrik, dan magnetik pada tahap eksplorasi pendahuluan dapat digunakan sebagai rekomendasi titik pemboran pada tahap eksplorasi detail, sehingga dapat mengarahkan rencana pemboran dengan lebih baik.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapan kepada PT Geoscan Eksplorasindo yang telah mengizinkan serta memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian dengan mengolah data geofisika lapangan berupa data IP, resistivitas listrik, dan magnetik.

Daftar Referensi

- Badan Geologi. (2018). Executive Summary Pemutakhiran Data dan Neraca Sumber Daya Mineral dan Batubara Status 2018. *Neraca Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panasbumi Tahun 2018*, 1-35.
- Chandra, R. (2011). *Menentukan Daerah Prospek Bijih Besi Menggunakan Metode Geolistrik di Daerah "C" dengan Data Pendukung Geomagnet*. Skripsi. Universitas Indonesia.
- Ford, K., Keating, M., & Thomas, M.D. (2007). *Overview of Geophysical Signatures Associated with Canadian Ore Deposits*. Canada: Geological Survey of Canada.
- Grandis, H., & Sumintadireja, P. (2018). Ground Magnetic Survey for Shallow Iron Ore Prospecting. *EAGE-HAGI 1st Asia Pacific meeting on Near Surface Geoscience & Engineering*, Yogyakarta, Indonesia.
- Haryadi, H., & Saleh, R. (2012). Analisis Keekonomian Bijih Besi Indonesia. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 8, 1-16.
- Killo, Y.K., Jonathan, R., Lewier, S.E., & Yusias, A. (2015). Penyelidikan Bijih Besi dengan Metode Geomagnet dan Geolistrik. *Jurnal Institut Teknologi Nasional Yogyakarta*, 371-376.
- Loke, M. H. (2000). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies*. England: Birmingham University.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Oxford: Wiley-Blackwell.
- Sumartadipura, A. S., & Margono, U. (1995). *Peta Geologi Lembar Tewah (Kualakurun), Kalimantan, Skala 1:250.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Telford, M.W., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., & Keys, D.A. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.
- Van Bemmelen, R. W. (1949). *The Geology of Indonesia Vol. II Economic Geology*. Netherlands: Martinus Nijhoff, The Hague.
- Vella, L., & Emerson, D. (2012). Electrical Properties of Magnetite and Hematite-Rich Rocks and Ores. *ASEG Extended Abstracts*, 1, 1-4, DOI: 10.1071/ASEG2012ab232.

Identification of Potential Landslides Area of Sukabumi, West Java Using Gravity Anomalies and Classification of Support Vector Machine

Abdurrohman Jauhari* and Iskandarsyah

Geophysics Study Program, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia

*Corresponding author: abdurrohman.jauhari@ui.ac.id

Abstract

Landslides are one of the natural disasters that have claimed many victims ranging from property to lives. In an effort to reduce losses caused by landslides, it is important to carry out disaster mitigation processes. Mitigation that will be discussed is in the form of identifying potential disaster zones using gravity geophysical methods and remote sensing. The research was conducted in the Sukabumi area, West Java, which is a densely populated area and part of the Bandung Zone and the Southern Mountain Zone according to Van Bemmelen (1949). The method used is the gravitational anomaly method with Second Vertical Derivative (SVD) analysis and optical image analysis with the Support Vector Machine (SVM) classification to produce a map of the distribution of landslide potential in the Sukabumi Regency.

Keywords: SVD; SVM classification; Mitigation; Natural disaster

1. Introduction

Fault is the displacement of broken rock from its original position. According to Supartoyo (2019), faults are cracks in rock that have shifted. The presence of faults on one side can have high economic value because they can be associated with hydrocarbon traps or become a pathway for magma to escape to the surface that carries minerals of high economic value. On the other hand, it can trigger losses caused by shifting faults, triggering tectonic earthquakes whose vibrations can trigger landslides on the surface.

This research uses gravity method with Second Vertical Derivative (SVD) analysis. SVD is an analysis that can describe regional anomalies associated with shallow structures which values can be used to identify fault types in the research area (Hartati, 2012). Then high resolution satellite imagery analysis is conducted to identify land cover changes in the research area that are correlated with physical parameter related to the causes of landslides.

In this article, the method used is the gravity anomaly method which focuses on finding the presence of faults that are the source of strong vibrations in the surrounding area which is also one of the important parameters in the cause of landslides. This method also utilizes high-resolution satellite imagery to see changes in land cover in the research area to assess the load on the surface and the presence of soil/vegetation supports on the surface.

2. Literature Review

2.1. Geology of West Java

Sukabumi is a part of the West Java region where the formation of geological structures occurs simultaneously under the influence of the collision activity of the Indian-Australian plate with the Eurasian plate which has lasted since the Cretaceous Period until now. According to Van Bemmelen (1949), Sukabumi is an area with geological characteristics consisting of volcanoes and is located

between the physiographic Bandung Zone and the Southern Mountain Zone. The Bandung Zone includes steep hills separated by several fairly wide valleys. Near the Bandung Zone is Mount Walat where lies the Walat Formation. The depositional environment of this formation shows land related to sedimentation in a river or fluvial environment (Adhiperdana, 2018).

2.2. Bouger Anomaly Analysis

Bouguer anomaly is an anomaly caused by lateral density variations in rocks in the earth's crust that are already in the reference plane, namely the geoid plane. The equation to calculate the value of the Bouguer anomaly is written in equations below:

$$g_{obs} = g_{read} - g_{tidal} - g_{drift} \quad (2.1)$$

$$g_{AB} = g_{obs} - g_{\phi} + g_{FA} - g_B + TC \quad (2.2)$$

2.2. Second Vertical Derivative (SVD)

Second Vertical Derivative (SVD) analysis is an analysis that has properties as a high pass filter, which can describe local anomalies associated with shallow structures so that their values can be used as a reference in identifying the types of faults in the research area, either up or down faults. (Hartati, 2012). According to Telford et al. (1990) which is also quoted by Sarkowi (2012), the theoretical SVD value can be derived from the Laplace equation for the gravity anomaly below the surface as follows:

$$\nabla^2 \Delta g = \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Delta g)}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

2.3. Support Service Machine Classification

SVM solves the problem of finding the dividing line or plane by finding the maximum marginal hyperplane or the dividing plane with the maximum margin. The search for the dividing line or field not only considers the separation but also considers the furthest distance to be able to separate the two classes right in the middle (Imam & Supriyadi, 2014).

3. Methodology

The data in this study uses satellite gravity data from TOPEX. The data can be accessed on the website <https://topex.ucsd.edu> which can be accessed for free. The data that can be obtained are gravity data that has been corrected for free air (gFA) and topographic data in the form of measurement coordinates in units of degrees, elevation. The supporting data in this research are remote sensing data from Sentinel2A satellite imagery and SRTM 30m data from West Java. Satellite image data can be accessed via <https://usgs.earthdata.nasa.gov/> for free.

But for the another one, SRTM 30m data is downloaded via the website <https://tanahair.indonesia.go.id/>. The downloaded satellite image data then goes through several correction stages to reduce noise in satellite imagery.

3.1. Spectrum Analysis

In the process of processing the gravity data after passing through several resistances to get a complete Bouguer anomaly, the next step that must be done is spectrum analysis. Spectrum analysis is carried out to determine the frequency content of the existing data so that it can determine the depth of the anomaly and the width of the window. This is done by using the fast Fourier transform (FFT).

3.2. Separation of Regional and Residual Anomalies

Residual anomaly is needed because interpreting the subsurface need a shallow depth. This is because at a fairly shallow depth it has undergone a process of erosion and rock deformation (Wachidah & Minarto, 2018). The process of separating regional and residual anomalies in this study is by using the moving average method and the MVE matrix with the order of 5x5 on the Oasis Montaj software.

3.3. Derivative Analysis

Derivative analysis to determine boundaries and determine the type of fault is carried out by calculating the first horizontal derivative (FHD) and second vertical derivative (SVD) of the trajectory of the Bouguer anomaly, which is then made cross-sectional. FHD calculation is calculated using the equation:

$$FHD = \frac{g(i)-g(i-1)}{\Delta x} \quad (2.6)$$

where g is the value of the Bouguer anomaly (mgal) and x is the difference in the path distance (m). The following is the result of the FHD calculation process made via Microsoft Excel.

3.3. Pansharpening

Pansharpening is an abbreviation of "panchromatic sharpening" which is an activity in "sharpening" multispectral data using panchromatic data (single band). Pansharpening is done by combining lower spatial resolution data and higher spatial resolution data. The data used in increasing the spatial resolution is high resolution data that is panchromatic (or band raster) to combine with lower resolutions of multiband raster data.

3.5. Supervised Classification

Supervised classification is carried out based on the researcher's knowledge of the area regarding land cover areas. The pixel values in the sample area are then used by the computer software as a key to identify other pixels. Areas that have similar pixel values will be included in a pre-defined class. The implementation process begins by creating a training sample based on pixels to be classified into certain classes.

3.6. Slope Analysis

Slope analysis in this study uses DEM data from Sukabumi district which is processed using ArcGIS Pro 10.2 software. DEM data is processed using the Slope Tool in ArcGIS where the Slope Tool identifies the steepness of each cell of the raster surface. The lower the slope value, the flatter the terrain; the higher the slope value, the steeper the terrain. The slope analysis map shows the slope data from 1 degree to above 90 degrees by separating the classes into different colors.

4. Discussion

4.1. Bouger Anomaly

The Bouguer anomaly contour map of Sukabumi district in Figure 1 below shows that the anomaly value ranges from 30 mgal to 280 mgal. The positive anomaly is indicated by the red, while pink colored contours indicates that the subsurface density distribution of the area is higher than the surrounding area, while the negative anomaly indicated by the blue contour indicates that the subsurface density distribution of the area is lower than the surrounding area.

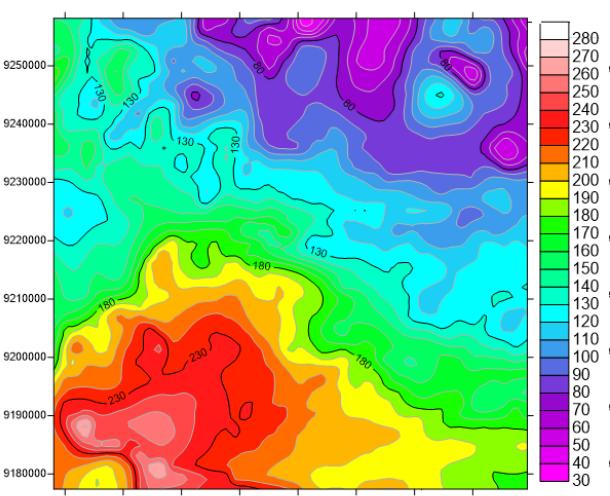


Figure 1. Countour of Sukabumi Bouger anomaly (the color values in the right column is in mgal).

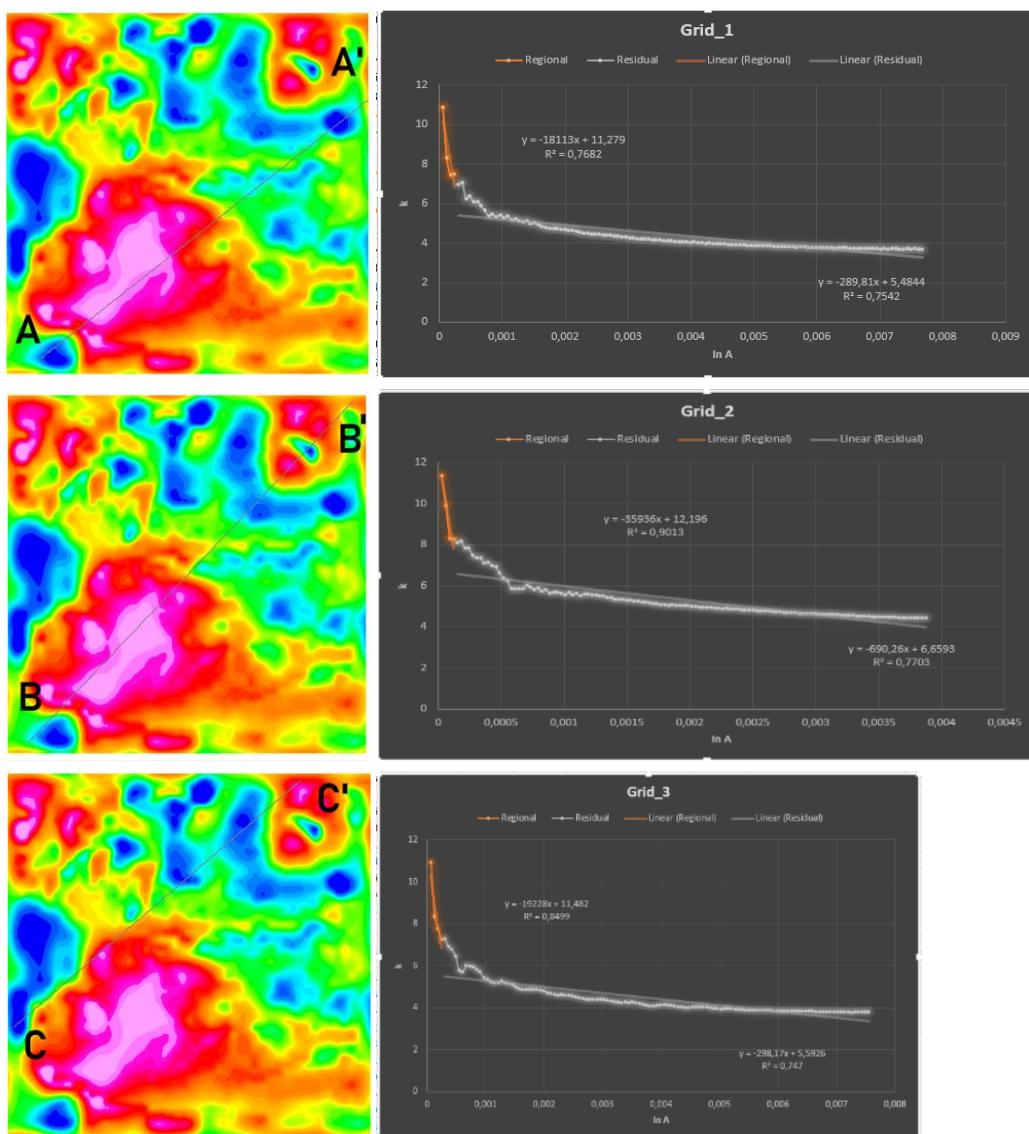


Figure 2. Spectrum analysis results of grid 1 for AA' anomaly map, grid 2 for BB' anomaly map and grid 3 for CC' anomaly map.

4.2. Spectrum Analysis

The spectrum analysis process is carried out to determine the depth of regional and residual anomalies obtained by converting spatial data into frequencies. Therefore, a trajectory (grid) is made that crosses the Bouguer anomaly map of Sukabumi district. The grid is created in a direction perpendicular to the faults and includes all color indicators.

The results of the spectrum analysis of Sukabumi district Figure 2 shows the estimated regional depth on the AA' grid is 18,113 meter and the residual depth is 289.41 m. For the BB' track, the regional depth is 35,936 meter and the residual depth is 690.26 meter. As for the CC' track, the regional depth is 19,228 meter and the residual depth is 298.17 m. So, if we take the average regional depth and residual from the three grids in the Sukabumi district, we get an average regional depth of around 24,425.67 meter and the residual is 426.08 meter.

4.3. Derivative Analysis

FHD shows the change in the value of the gravity anomaly from one point to another horizontally with a

certain distance, which can be used to indicate the boundary of a geological structure based on the gravity anomaly. Meanwhile, SVD was carried out to reveal the shallow effect of the regional influence which was used to detect the type of normal fault structure or rising fault. The SVD anomaly map used in this study is SVD with a Rosenbach filter. The results of the SVD Rosenbach filter in Sukabumi district can be seen in Figure 3.

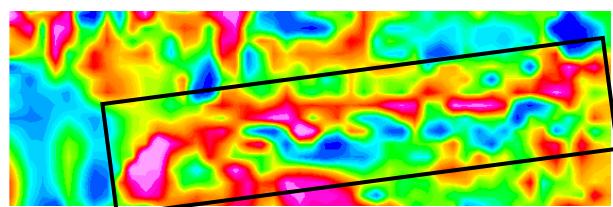


Figure 3. Map with filter SVD Rosenbach. The area in the box is the area of interest.

4.4. Fault Analysis

Analysis on gravity data that has gone through Bouguer correction to terrain which is needed because often the

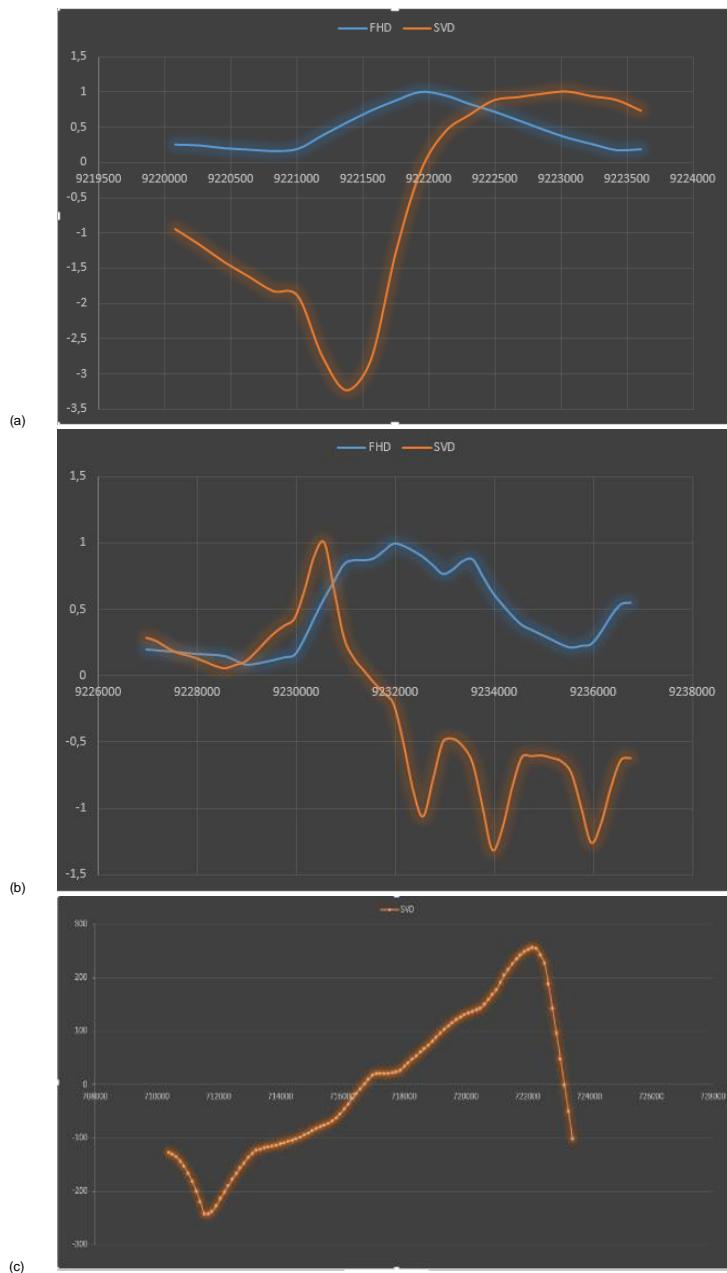


Figure 4. Grid AA' (a) shows SVDmin (blue) > SVDmax (orange) as well as grid BB' (b) which indicates a reverse-slip fault structure. While the CC' (c) grid shows SVDmin (lowest point) = SVDmax (highest point) which indicates a strike-slip fault structure.

reality in the field has an uneven topography such as valleys and hills. So if only the Bouguer correction is made, the results will be incomplete (Reynolds, 2011). Through the analysis of derivatives on the data, the researcher was able to construct a fault reconstruction (Figure 4) which was made based on the analysis on the Rosenbach SVD contour map. The fault contact area on the FHD is at a minimum or maximum value and is at a zero value on the SVD contour.

From the results of the derivative analysis and modeling, it is proven that in the Sukabumi Regency area, a reverse-slip fault structure has been identified with a northeast-north direction for the AA' grid and BB', while the CC' grid identified a strike-slip fault structure with a southwest-northeast direction. Based on the analysis of geological data, the three faults are located on the Cimandiri fault, which is thought to represent the Cimandiri

segment, the Nyalindung-Cibeber segment, and the Rajamandala segment.

4.5. Slope Analysis

From the analysis of the slope map of Sukabumi Regency can be seen in Figure 5 that in the northern area of Sukabumi Regency has slopes with a slope between 30-45 degrees, while in the fault zone that is trending northeast, the distribution of the slope varies between 21.8 degrees to 45 degrees. Based on the results of the literature study, it is certain that the angle will landslide if the triggering factors such as an earthquake or an increase in the water content in the pores are 45 degrees.

4.6. Land Cover Analysis

Analysis of the land cover parameter, a land cover map of Sukabumi Regency by using sentinel2A imagery for

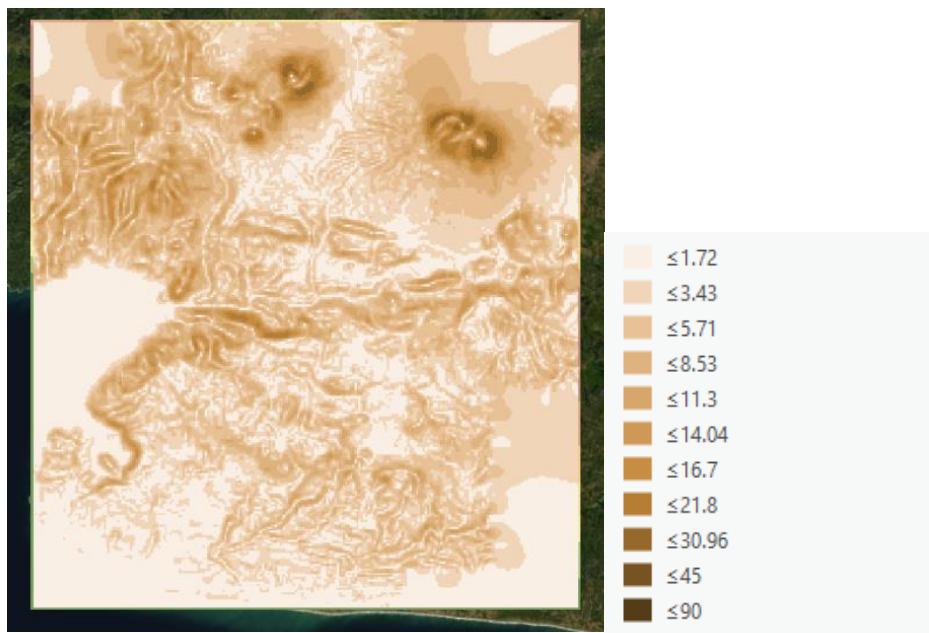


Figure 5. Slope map of Sukabumi district.

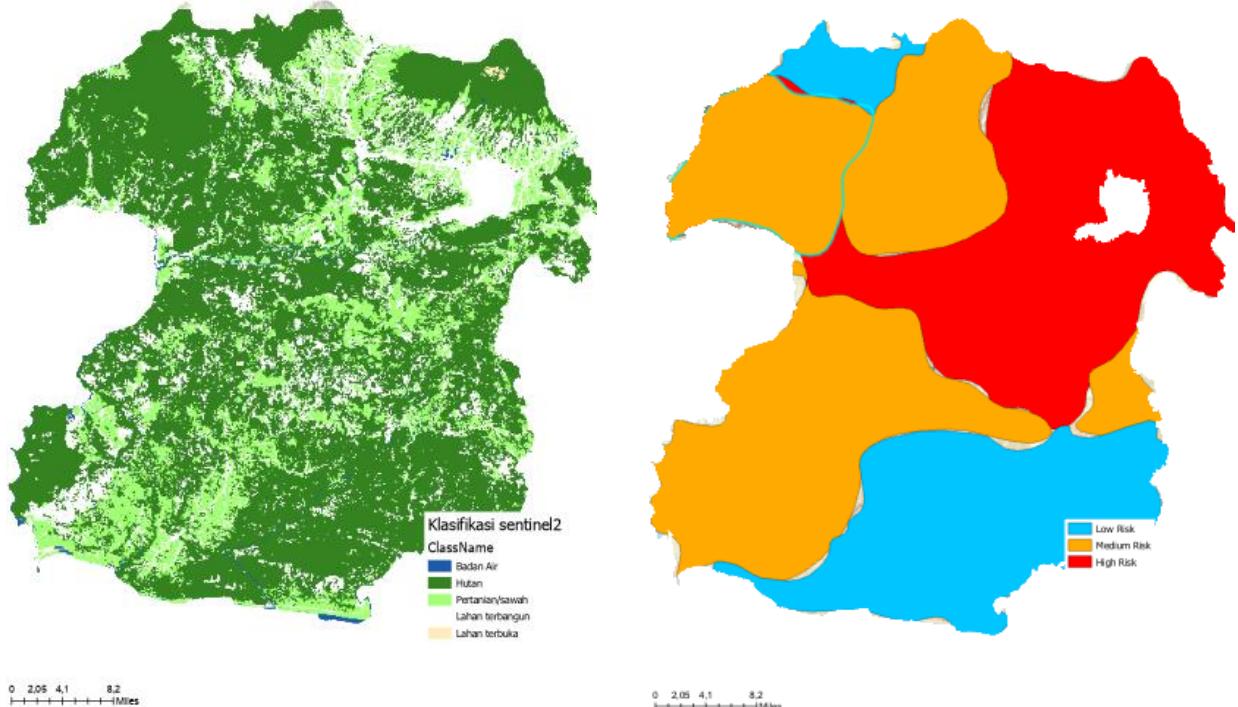


Figure 6. SVM Classification on Sentinel 2-A image.

Figure 7. Landslide potential distribution map in Sukabumi Regency.

comparison. Sentinel 2A images must be improved in pixel quality through pansharpening, this process includes image fusion in the remote sensing field aimed at facilitating the analysis steps that require detailed extraction of image objects (Silvester et al., 2013). Then classification is carried out on the ArcGIS Pro 10.2 software in a supervised manner (Supervised) with the Support Vector Machine (SVM) method. The Support Vector Machine (SVM) method is a one-class machine learning method with an artificial neural network method that can recognize patterns from the input or examples given. SVM is used to find the best hyperplane by maximizing the distance between classes. Hyperplane is a function that can be used for separators

between classes, in 2D maps the function used for classification between classes is called line whereas. The results of the SVM classification can be seen in Figure 6.

4.7. Landslide Potential Distribution Map

Modeling the distribution map of the potential for landslides in the Sukabumi Regency in this study is based on 3 (three) parameter that have been discussed in previous chapters, namely the parameter of the vibration source, slope and land cover. Each parameter has a score against the size of the parameter measured to be able to produce a map of the distribution of the potential for landslides.

Table 1. Vulnerability to landslide parameters.

No.	Parameter	Quantity	Category	Score
1	Vibration source(fault)	Very close	Very high	4
		Near	High	3
		Middle	Middle	2
		Far away	Low	1
2	Slope	> 45°	Very high	4
		25-44°	High	3
		15-24°	Middle	2
		< 15°	Low	1
3	Land Cover	Building	Very high	4
		Open field	High	3
		Agriculture	Middle	2
		Forest	Low	1

These values will be added up based on each region in Sukabumi Regency and classified the potential for landslides based on the table below.

Table 2. Scoring parameter.

Score	Landslide Potential
10-12	High
5-9	Middle
3-4	Low

The landslide potential map generated based on the classification of these three parameter can be seen in Figure 7.

The area with small landslide potential is 1,018 km² spread over the northern and southern regions of Sukabumi Regency, then the area with moderate landslide potential is 1,751 km² while the area with high landslide potential is 1,766 km².

5. Conclusion

From the results of gravity data processing and satellite imagery which were analyzed through spectrum analysis, derivatives and faults in gravity data processing and slope analysis and land cover in satellite image data processing, several conclusions were obtained, which are:

1. Fault identification has been successfully carried out. From the results of derivative analysis and fault modeling, it is proven that in the Sukabumi Regency area, a reverse fault structure has been identified with a northeast-north direction for the AA' (Cimandiri segment) and BB' (Nyalindung-Cibeber segment) grids and a stick-slip fault structure with a southwest-northeast direction for the CC' grid (Rajamandala segment).
2. Through the land cover classification method SVM obtained information in the form of land cover Kab. Sukabumi is dominated successively by forest vegetation, agriculture/rice fields and built-up land.
3. Through the analysis of three parameter, a map of the distribution of landslide potential in Kab. Sukabumi, namely the area with a small landslide potential is 1,018 km² spread over the northern and southern regions of

Sukabumi Regency, then the area with moderate landslide potential is 1,751 km² while the area with high landslide potential is 1,766 km².

References

- Adhiperdana, B.G. (2018). *Sedimentological study of a fluvial succession of the Eocene-Oligocene Bayah Formation, West Java: Reconstruction of paleohydrological features of an ancient fluvial system using empirical equations developed from modern fluvial systems in the Indonesian islands*. Chiba University, Japan. (Unpublished Doctoral Dissertation)
- Hartati, A. (2012). *Identifikasi Struktur Patahan berdasarkan Analisis Derivative Metode Gaya Berat di Pulau Sulawesi*. Depok: Universitas Indonesia (Unpublished Thesis).
- Imam, S. & Supriyadi. (2014). Unnes Physics Journal. *Unnes Physics Journal* 3(1).
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Oxford: Wiley-Blackwell
- Sarkowi, M. (2012). Identifikasi Struktur Daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung* 8(2).
- Silvester, S.S. et al. 2013. Kajian Penggunaan Metode Penajaman Citra (PanSharpening) Worldview-2 (Studi Lokasi: Kabupaten Jombang). Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang
- Supartoyo. (2019). Analisis Morfotektonik dan Pemetaan Geologi pada Identifikasi Sesar Permukaan di daerah Plampang, Pulau Ngali dan Pulau Rakit, Provinsi Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 21(1), 45 – 52
- Telford, M.W., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., & Keys, D.A. (1990). *Applied Geophysics* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.s
- Van Bemmelen, R.W. 1949. The Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes, General Geology. Martinus Nijhoff The Hague, Vol. IA: 25-28
- Wachidah, N. & Minarto, E. (2018). Identifikasi Struktur Lapisan Bawah Permukaan Daerah Potensial Mineral dengan Menggunakan Metode Gravitasi di Lapangan "A", Pongkor, Jawa Barat. *Jurnal Sains dan Seni ITS* 7(1), 32-37.

Identifikasi Potensi Panas Bumi Menggunakan Teknologi Pengindraan Jauh di Daerah XY, Sukabumi, Jawa Barat

Muthia Mahira^{1*}, Dyah Nindita Sahdarani¹, Indah Prasasti²

¹Program Studi Geologi, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok

²Pusat Pemanfaatan Pengindraan Jauh LAPAN, Jakarta Timur

*Narahubung: mahiramuthia@gmail.com

Abstrak

Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar dan tersebar di berbagai wilayah, salah satunya di daerah XY yang terletak di Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa Barat. Daerah ini berada di bagian selatan Pulau Jawa, dekat dengan zona subduksi yang menghasilkan aktivitas vulkanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik spasial XY sebagai daerah potensi panas bumi yang ditunjukkan dengan keberadaan manifestasi permukaan. Penelitian ini dilakukan menggunakan data citra satelit Landsat 8 dan *Digital Elevation Model Nasional* (DEMNAS). Parameter yang diturunkan dari data pengindraan jauh adalah indeks vegetasi, temperatur permukaan, kerapatan kelurusan, dan karakteristik geomorfologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah potensi panas bumi XY didominasi oleh geomorfologi perbukitan struktural dengan kemiringan lereng curam dan pola aliran *rectangular*. Hal ini mengindikasikan keberadaan struktur sesar sebagai jalur keluar fluida panas bumi. Daerah manifestasi panas bumi memiliki karakteristik indeks vegetasi yang cenderung rendah, temperatur permukaan yang tinggi, dan nilai kerapatan kelurusan yang sedang hingga tinggi.

Kata Kunci: Landsat 8, Indeks Vegetasi, Kerapatan Kelurusan, Temperatur Permukaan

1. Pendahuluan

Secara geologi, daerah XY didominasi oleh batuan vulkanik berupa breksi, lava, andesit, basal, dasit, dan tuf, serta sebagian anggota batu gamping (Sujatmiko & Santosa, 1992). Perbukitan tinggi dengan elevasi mencapai 1.163 mdpl ini berada pada Zona Bandung berdasarkan zona fisiografi Jawa Barat (van Bemmelen, 1949). Struktur geologi yang ditemukan berupa sesar berorientasi timur laut–barat daya dan utara–selatan yang menjadi jalur keluar fluida panas bumi (Kementerian ESDM, 2017).

Pengindraan jauh merupakan metode mengumpulkan data suatu objek atau wilayah melalui analisis jarak jauh menggunakan alat sensor sehingga dapat meningkatkan pemahaman mengenai sistem bumi secara luas (Lillesand et al., 2015). Penggabungan data pengindraan jauh dengan data geo-spasial lainnya akan menghasilkan banyak informasi yang akurat dan dapat diaplikasikan di berbagai bidang keilmuan seperti tata guna lahan, geologi, geomorfologi, vegetasi, dan tanah (Campbell & Wynne, 2011).

Daerah XY yang berada di daerah vulkanisme aktif memiliki potensi panas bumi yang dapat dimanfaatkan secara langsung maupun tidak langsung. Kegiatan eksplorasi awal panas bumi dapat memanfaatkan metode pengindraan jauh yang terbilang cukup efisien untuk mendelineasi zona potensi panas bumi. Tujuan utama dari penelitian ini adalah membuat peta potensi panas bumi berdasarkan parameter pengindraan jauh di daerah penelitian.

Data pengindraan jauh yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra satelit Landsat 8 yang diolah untuk mendapatkan nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Land Surface Temperature* (LST) untuk mengetahui persebaran indeks vegetasi dan

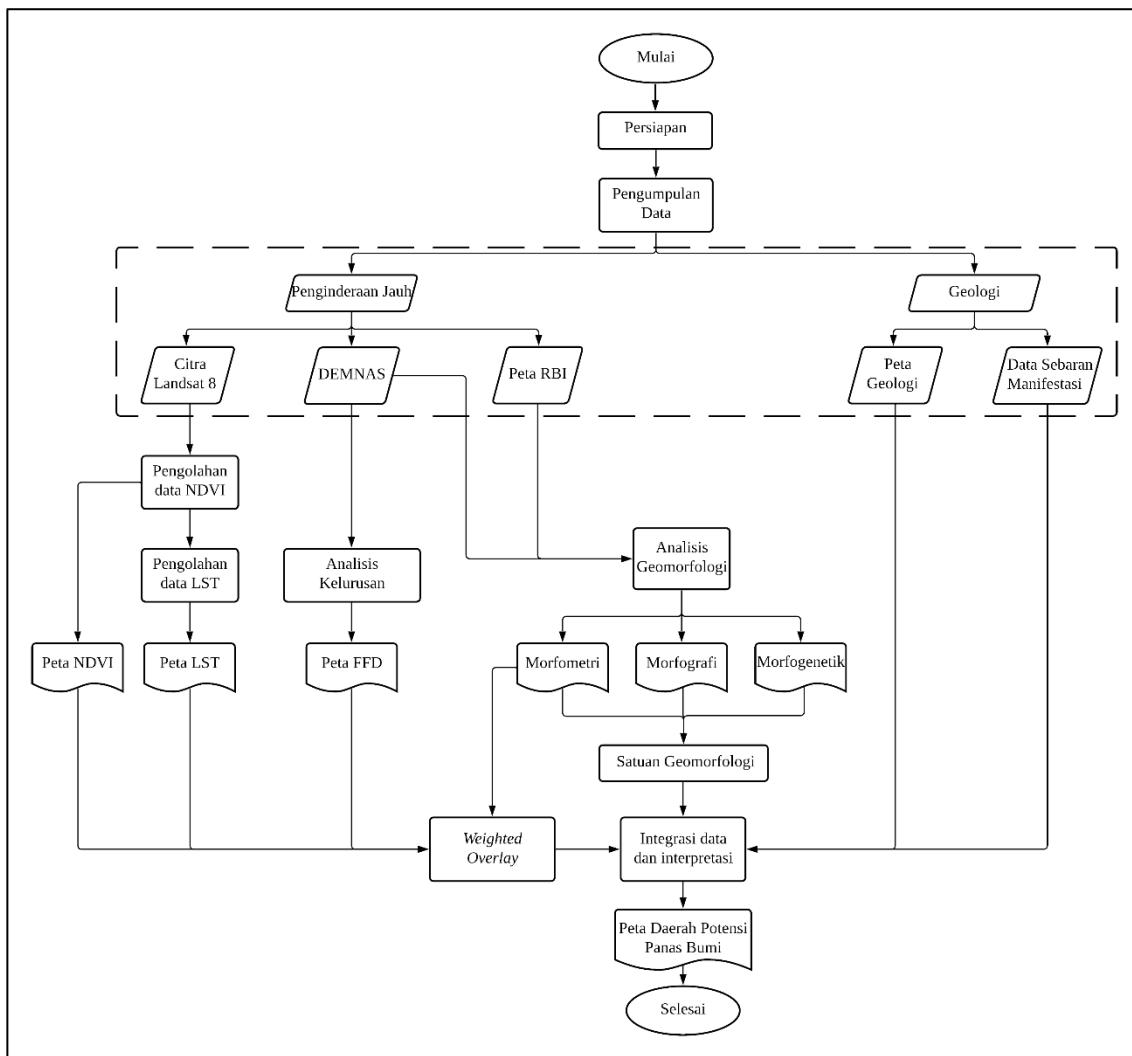
temperatur permukaan tanah. Metode lain yang digunakan adalah *Fault Fracture Density* (FFD) untuk mengetahui kerapatan kelurusan suatu daerah sehingga didapatkan zona indikasi sesar atau rekahan yang berhubungan dengan keberadaan manifestasi panas bumi. Analisis geomorfologi dilakukan menggunakan data DEMNAS untuk menggambarkan keadaan bentuk lahan di area manifestasi panas bumi. Dengan mengetahui titik potensi panas bumi, diharapkan pemanfaatan energi panas bumi di daerah XY dapat dilaksanakan secara maksimal.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada objek spasial daerah XY dengan parameter dari data pengindraan jauh. Data yang dikumpulkan untuk menunjang penelitian ini merupakan data sekunder dari berbagai sumber, diantaranya data citra satelit Landsat 8, data DEM, peta geologi regional, peta rupa bumi Indonesia (RBI), dan data persebaran manifestasi permukaan (Gambar 1). Adapun perangkat lunak yang digunakan dalam proses pengumpulan, pengolahan, dan analisis data, yaitu ArcGIS 10.3, Global Mapper 17, Google Earth Engine, dan Dips 5.1.

Pada penelitian ini, data citra Landsat 8 didapatkan dari katalog *Google Earth Engine* (GEE). Jenis data yang digunakan adalah Landsat 8 *Surface Reflectance* yang telah terkoreksi secara atmosferik dan terkalibrasi secara radiometrik. Selanjutnya, dilakukan *cloud masking* untuk mengurangi efek bayangan awan. Kemudian, dilakukan perhitungan NDVI, fraksi vegetasi, dan emisivitas hingga didapatkan nilai LST menggunakan persamaan yang dituliskan dalam bahasa pemrograman *JavaScript* pada GEE.

Kondisi kerapatan vegetasi suatu daerah dapat dianalisis melalui citra satelit dengan metode *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Persamaan yang digunakan untuk menghitung indeks vegetasi



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

digambarkan sebagai berikut (Avdan & Jovanovska, 2016):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

Keterangan:

NIR: panjang gelombang inframerah dekat (kanal 5)
Red: panjang gelombang merah (kanal 4)

Nilai NDVI digunakan untuk menghitung nilai fraksi vegetasi yang dapat menurunkan nilai emisivitas dari setiap piksel dalam citra untuk mengoreksi kanal merah dan inframerah dekat secara atmosferik (Chan et al., 2018). Fraksi vegetasi didapatkan melalui persamaan (Carlson & Ripley, 1997) sebagai berikut:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (2)$$

Keterangan:

P_v: fraksi vegetasi
NDVI: nilai indeks vegetasi
NDVI_{min}: nilai NDVI minimum
NDVI_{max}: nilai NDVI maksimum

Selanjutnya, dilakukan perhitungan emisivitas menggunakan persamaan berikut (Avdan & Jovanovska,

2016; Sobrino et al., 2004; Qin et al., 2015; Gemitz et al., 2020):

$$\varepsilon = \varepsilon_{v\lambda} P_v + \varepsilon_{s\lambda} (1 - P_v) + C_\lambda \quad (3)$$

Keterangan:

ε : emisivitas objek
 ε_v : emisivitas vegetasi (0.973)
 ε_s : emisivitas tanah (0.966)
P_v: fraksi vegetasi
C_λ: konstanta (0.005)

Nilai emisivitas ini digunakan untuk mengestimasi nilai LST untuk mendapatkan persebaran nilai temperatur permukaan di daerah penelitian melalui persamaan berikut (Avdan & Jovanovska, 2016; Gemitz et al., 2020):

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\lambda \frac{BT}{hc} \ln \varepsilon \right)} - 273.15 \quad (4)$$

Keterangan:

LST: temperatur permukaan tanah (°C)
BT: temperatur kecerahan (K)
 λ : panjang gelombang emisi radian kanal 10 (11.5 μm)
 ε : emisivitas objek
h: tetapan Planck (6.626×10^{-34} Js)
c: tetapan kecepatan cahaya (2.998×10^8 m/s)
σ: tetapan Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

Data DEM diolah dengan perangkat lunak ArcGIS 10.3 menggunakan *hillshade* sehingga memiliki efek tiga dimensi untuk menganalisis aspek geomorfologi berdasarkan van Zuidam (1985). Data DEM direklasifikasi berdasarkan elevasi untuk mendapatkan kelas morfografi. Data kemiringan lereng terbagi menjadi enam kelas berdasarkan aspek morfometri didapatkan melalui analisis kelerengan menggunakan *slope* pada *raster surface 3D analyst tool*. Nilai kerapatan kelurusuan didapatkan menggunakan metode *Fault Fracture Density* (FFD). Penarikan pola kelurusuan dilakukan secara manual dengan sudut pencahayaan semu yang berbeda (Soengkono, 2000) yaitu azimut 45°, 135°, dan 225° pada *altitude* 45° menggunakan perangkat lunak Global Mapper 17. Penarikan kelurusuan ini ditargetkan pada zona lemah yang diindikasi sebagai sesar maupun rekahan.

Data pengindraan jauh berupa indeks vegetasi, temperatur permukaan, kerapatan kelurusuan, dan kemiringan lereng diintegrasikan menggunakan metode *weighted overlay* pada perangkat lunak ArcGIS 10.3. *Weighted overlay* merupakan salah satu metode Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menggabungkan dan menganalisis berbagai informasi spasial secara efektif dalam kegiatan eksplorasi panas bumi (Zhang et al., 2012), dengan memasukkan nilai bobot untuk setiap kriteria. Pembobotan dalam penelitian ini menggunakan teknik *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang dapat menggambarkan besar pengaruh dari masing-masing kriteria terhadap kemungkinan keberadaan manifestasi sebagai indikasi wilayah potensi panas bumi (Saaty, 1980). Setiap kriteria diberikan skor berdasarkan tingkat kepentingan dari 1–9 dalam sebuah matriks perbandingan dan dilakukan perhitungan nilai *eigen* sebagai bobot akhir. Kemudian, kriteria yang telah dilakukan reklassifikasi menggunakan *reclassify tool* pada ArcGIS yang dimasukkan ke dalam *weighted overlay tool* dengan nilai bobot yang telah dihitung. Hasil *overlay* menunjukkan empat kelas zona potensi panas bumi, yaitu sangat rendah, rendah, tinggi, dan sangat tinggi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Geomorfologi

Satuan geomorfologi di daerah XY terbagi menjadi Satuan Dataran Rendah Denudasional Landai, Satuan Perbukitan Struktural Landai hingga Agak Curam, dan Satuan Perbukitan Tinggi Struktural Curam. Daerah XY didominasi oleh Satuan Perbukitan Tinggi Struktural Curam berada di bagian selatan yang memiliki elevasi 500–1.163 mdpl. Bentuk lembah dari satuan ini adalah V tajam, sesuai dengan kemiringan lereng pada satuan ini yang cenderung curam. Indikasi adanya sesar yang mengontrol daerah penelitian juga ditunjukkan dari keberadaan pola aliran sungai *rectangular*. Proses endogen yang mendominasi satuan ini adalah tektonisme, sedangkan proses eksogen yang berperan adalah erosi dan pelapukan.

3.2. Indeks Vegetasi

Pengolahan NDVI di daerah penelitian menunjukkan indeks vegetasi berada pada rentang nilai minimum -0,15 dan maksimum 0,90 (Gambar 2). Pada daerah penelitian, lokasi potensi panas bumi berada di bagian timur laut dan selatan, ditunjukkan oleh area anomali NDVI rendah berwarna merah hingga kuning yang dikelilingi oleh area anomali NDVI tinggi berwarna hijau dengan tutupan lahan hutan dan perkebunan. Keberadaan anomali NDVI yang rendah ini diduga terjadi akibat adanya manifestasi panas bumi bertemperatur mencapai titik didih sehingga memengaruhi kesuburan vegetasi di sekitarnya.

3.3. Temperatur Permukaan

Hasil pengolahan data LST di daerah penelitian menunjukkan temperatur minimum sebesar 12°C (berwarna biru) dan temperatur maksimum sebesar 30,8°C (berwarna merah) (Gambar 3). Persebaran temperatur permukaan kemudian dilakukan tumpang susun dengan peta tutupan lahan untuk mengetahui perkiraan sumber panas di daerah penelitian. Dilihat dari jenis tutupan lahan, anomali temperatur di daerah penelitian didominasi oleh kawasan pemukiman yang padat, terutama pada bagian selatan dengan morfologi dataran rendah.

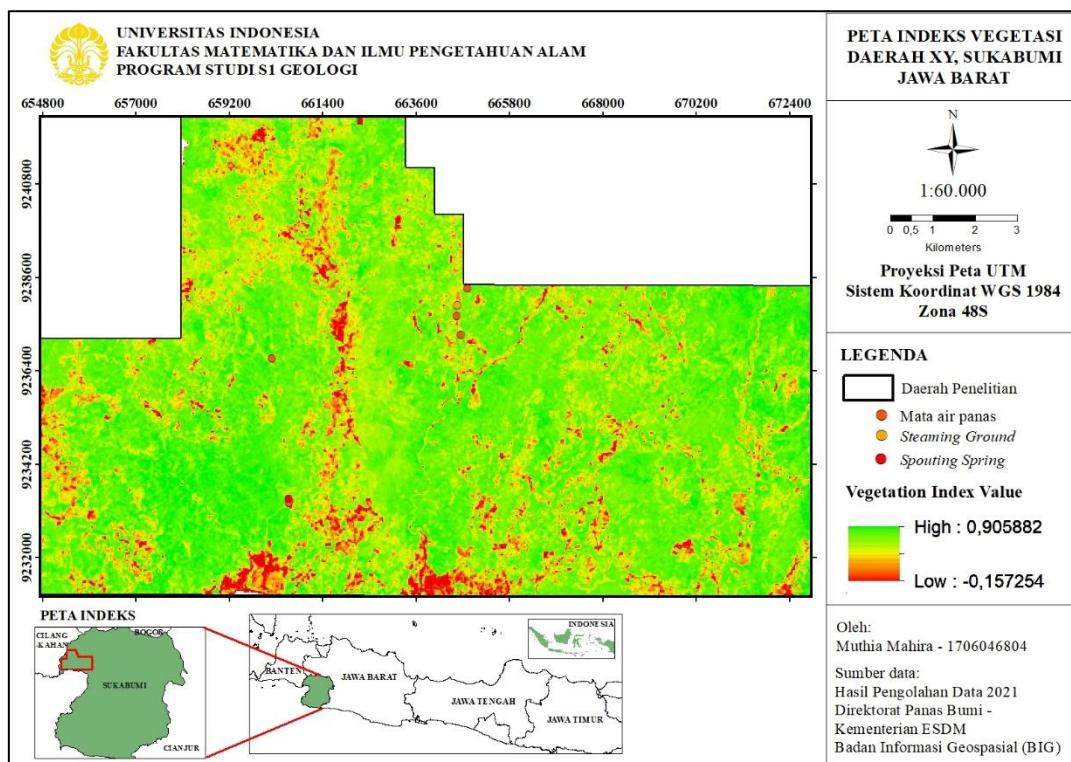
Pada daerah penelitian, anomali LST berwarna merah banyak ditemukan di bagian selatan dengan elevasi yang lebih rendah dibandingkan bagian utara. Selain itu, keberadaan jenis tutupan lahan pemukiman menunjukkan bahwa anomali LST sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia. Kegiatan seperti pemanasan dan pembangunan menyebabkan kurangnya lahan vegetasi hijau sehingga menghasilkan temperatur permukaan yang tinggi.

Untuk memperkuat analisis anomali LST yang berasosiasi dengan aktivitas panas bumi, dilakukan *plotting* lokasi manifestasi bertemperatur >40°C pada peta LST (Gambar 3). Anomali LST di bagian selatan cenderung lebih tinggi karena berada pada elevasi yang lebih rendah dan sedikit vegetasi, sedangkan bagian timur laut berada pada elevasi tinggi dan lebih banyak vegetasi.

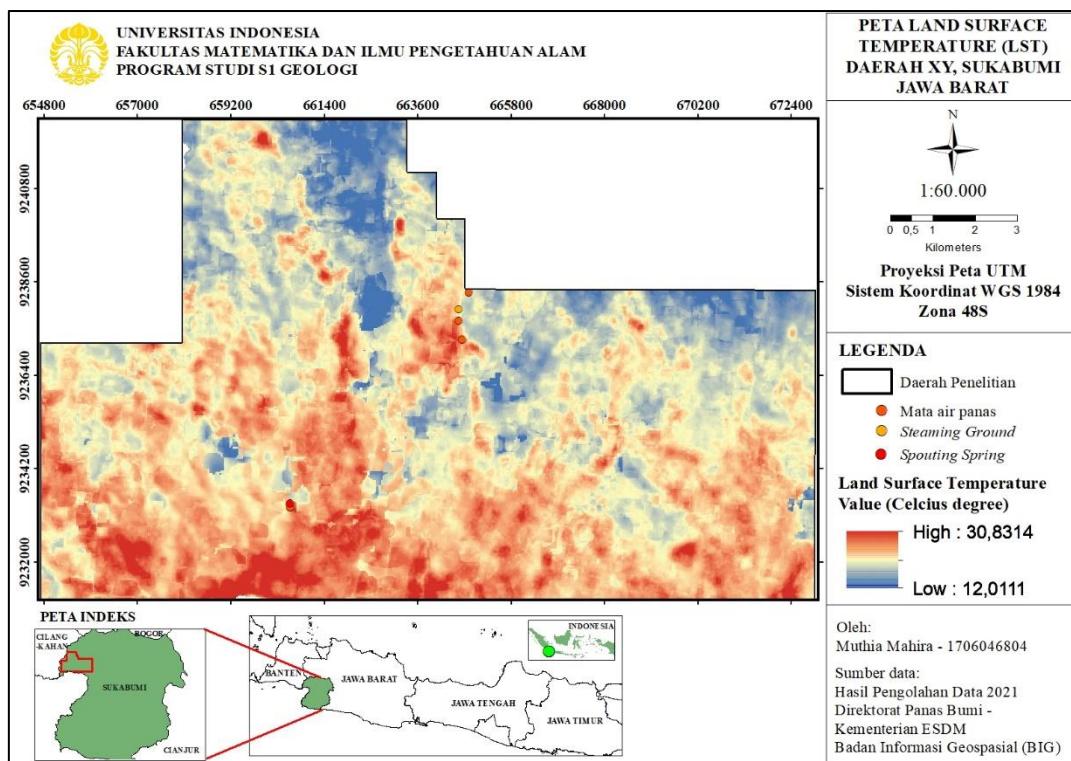
3.4. Kerapatan Kelurusuan

Berdasarkan pengolahan data kelurusuan, dihasilkan Peta Kerapatan Kelurusuan dari daerah penelitian yang terdiri dari lima kelas (Gambar 4). Hasil penarikan kelurusuan pada daerah penelitian menunjukkan arah kelurusuan dominan timur laut-barat daya pada kelurusuan dengan azimut 45° dan 225°, sedangkan pada kelurusuan dengan azimut 135° menunjukkan arah barat laut-tenggara. Zona FFD sangat tinggi dikelilingi oleh zona bernilai FFD tinggi sampai sedang yang mendominasi bagian tengah daerah penelitian.

Secara morfologi, zona FFD yang tinggi merupakan sungai yang mengisi lembahan dan relief dengan perbedaan elevasi yang signifikan. Dilihat dari kemiringan lerengnya, zona FFD tinggi di daerah penelitian berada pada transisi kemiringan lereng sangat curam menuju landai hingga datar dengan dominasi pola aliran *rectangular*. Hal ini mengindikasikan kedua zona tersebut dipengaruhi oleh aktivitas tektonik yang membentuk zona sesar.



Gambar 2. Peta indeks vegetasi.



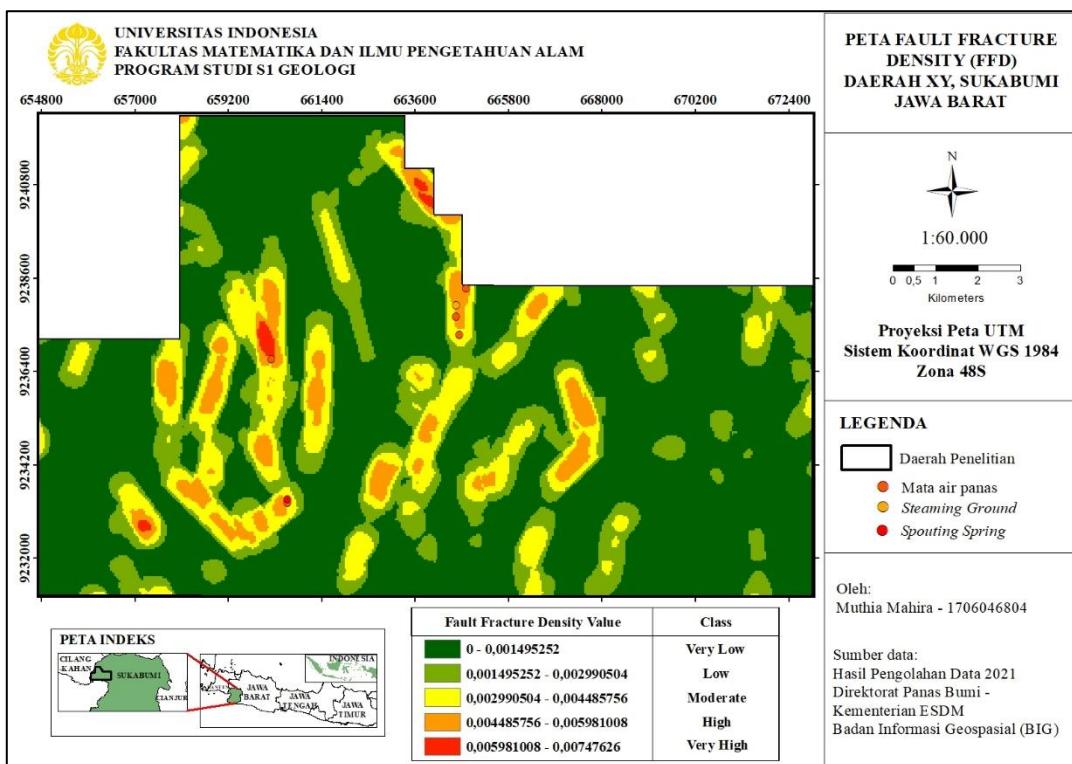
Gambar 3. Peta temperatur permukaan.

3.5. Zona Potensi Panas Bumi

Zonasi potensi panas bumi berdasarkan pengindraan jauh dilakukan menggunakan teknik *weighted overlay* dari parameter indeks vegetasi, temperatur permukaan, kerapatan kelurusan, dan kemiringan lereng. Setiap parameter dilakukan reklassifikasi ke dalam lima kelas dan diberikan skor pada matriks perbandingan sehingga menghasilkan nilai

bobot yang menggambarkan besar pengaruh parameter terhadap daerah potensi panas bumi (Tabel 1).

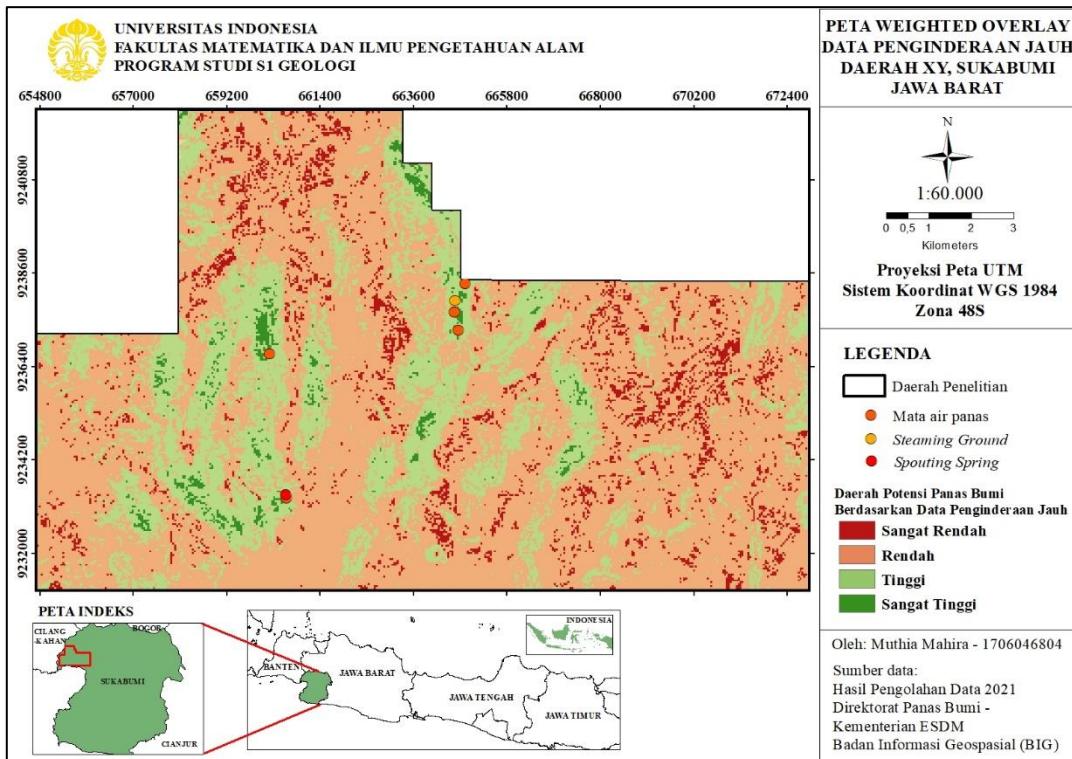
Hasil *overlay* menunjukkan zona potensi panas bumi di daerah penelitian terdiri dari empat kelas, yaitu zona potensi sangat rendah (merah), zona dengan potensi rendah (merah muda), zona dengan potensi tinggi (hijau muda), dan zona dengan potensi sangat tinggi (hijau) (Gambar 5). Zona potensi panas bumi diperkuat dengan *plotting* lokasi manifestasi



Gambar 4. Peta kerapatan kelurusan.

Tabel 1. Hasil reclasifikasi dan pembobotan.

Value	NDVI	LST	FFD	SLOPE
1	0,809 - 0,905	12,011 - 22,565	0 - 0,001	2 - 7
2	0,743 - 0,809	22,565 - 25,074	0,001 - 0,002	7 - 13
3	0,651 - 0,743	25,074 - 26,034	0,002 - 0,004	13 - 20
4	0,513 - 0,651	26,034 - 26,919	0,004 - 0,005	20 - 55
5	-0,157 - 0,513	26,919 - 30,831	0,005 - 0,007	55 - 140
Bobot (%)	5	15	40	40



Gambar 5. Peta weighted overlay.

sehingga didapatkan fokus zona potensi berada di bagian tengah, timur laut, dan selatan daerah penelitian dengan value 4–5 atau tinggi sampai sangat tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa daerah penelitian memiliki zona potensi panas bumi yang didominasi oleh indeks vegetasi rendah, temperatur permukaan tinggi, dan nilai kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi. Berdasarkan hasil pembobotan, kemiringan lereng dan kerapatan kelurusan memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap indikasi keberadaan manifestasi panas bumi.

- Soengkono, S. (2000). Assessment of Faults and Fractures at the Mokai Geothermal Field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *Proceedings World Geothermal Congress*, 1771–1776.
- Sujatmiko & Santosa, S. (1992). *Peta Geologi Lembar Leuwidamar*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- van Bemmelen, R. W. (1949). *The Geology of Indonesia*. Batavia: Departemen Energi Tranportasi dan Pertambangan.
- van Zuidam, R. A. (1985). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*. The Hague: Smits Publisher ITC.
- Zhang, N., Qin, Q., He, L., & Jiang, H. (2012). Remote sensing and GIS based geothermal exploration in southwest Tengchong, China. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, July, 5364–5367. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352395>.

Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih kepada Direktorat Panas Bumi Kementerian ESDM yang telah memberikan izin dan kesempatan penulis untuk menggunakan data-data yang mendukung penelitian ini, Pusfatja LAPAN yang telah memfasilitasi penulis dalam mengolah data pengindraan jauh, Ibu Dyah Nindita Sahdarani, S.Si, M.Energy dan Ibu Dr. Ir. Indah Prasasti, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk membimbing penulis sehingga proses penyusunan skripsi ini dapat berjalan dengan baik.

Daftar Referensi

- Avdan, U. & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016, ID:1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>.
- Campbell, J. B. & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th Edition). New York: The Guilford Press.
- Carlson, T. N. & Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing Environment*, 62, 241–252.
- Chan, H. P., Chang, C. P., & Dao, P. D. (2018). Geothermal Anomaly Mapping Using Landsat ETM+ Data in Ilan Plain, Northeastern Taiwan. *Pure and Applied Geophysics*, 175(1), 303–323. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1690-z>.
- Gemitzi, A., Dalampakis, P., & Falalakis, G. (2020). Detecting geothermal anomalies using Landsat 8 thermal infrared remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 96.
- Kementerian ESDM. (2017). *Potensi Panas Bumi Indonesia (Jilid I)*. Jakarta: Ditjen EBTKE.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th Edition). New York: John Wiley and Sons.
- Qin, Z., Wang, F., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sensing Journal*, 7, 4268–4289.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill International Book Company
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440.

Karakteristik Batu Bara di Daerah Bayah Bagian Selatan, Provinsi Banten Berdasarkan Analisis Proksimat, Ultimat, dan Maserl

Abriyanto Putra Setiawan Nugraha* dan Felix M. H. Sihombing

Program Studi Geologi, Departemen Geosains, FMIPA, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia

*Narahubung: Abriyanto.putra@ui.ac.id

Abstrak

Batu bara sebagai sumber daya energi yang keberadaannya melimpah di Indonesia memiliki estimasi cadangan 26,2 ton menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Namun, batu bara memiliki nilai harga yang rendah (81,84 dolar per ton) yang membuat peningkatan permintaan batu bara dalam pemanfaatannya di industri energi. Dalam pemanfaatannya, mengetahui kualitas batu bara menjadi salah satu faktor yang penting. Penelitian yang dilakukan pada daerah Bayah bagian selatan ini difokuskan untuk mengetahui dua rumusan masalah peneliti yaitu mengenai karakteristik maseral dan perbandingan analisis proksimat, ultimat, dan maseral pada batu bara di daerah Bayah bagian selatan. Berdasarkan hasil analisis, maseral yang terdapat pada batu bara di daerah penelitian didominasi oleh maseral vitrinit. Submaseral vitrinit yang terkandung pada batu bara antara lain desmocollinite dan telocollinite. Selain vitrinit, maseral yang dominan terkandung yaitu inertinite. Selain itu, hasil analisis proksimat pada penelitian menunjukkan batu bara daerah penelitian didominasi kandungan abu yang dominan pada 6 sampel, kecuali pada 2 sampel lainnya. Terakhir, kadar sulfur yang didapat dari hasil analisis ultimat batu bara ada yang aman untuk digunakan pada industri dan ada yang tidak aman.

Kata Kunci: Petrografi; Lombok; Pasir

Abstract

Coal is an energy resource which is abundant in Indonesia with reserves estimation 26.2 ton, refers to data of Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), but has a low-price value (81,84 dollars per ton) which increased coal demand for utilization in the energy industry. In its utilization, knowing the quality of coal is an important factor. This research which was conducted in the Southern Bayah area aims to answer two research questions, firstly, maceral characteristics of coal and secondly, comparison between proximate, ultimate, and maceral analysis of coal in the South Bayah area. Based on the results of the analysis, the maceral found in the coal in the research area was dominated by vitrinite maceral. The sub-maceral of vitrinites contained in coal are desmocollinite and telocollinite. Apart from vitrinite, the dominant maceral contained is inertinite. Meanwhile, the results of the proximate analysis in the study showed that the coal in the study area was dominated by the dominant ash content which found in all 6 samples, except for 2 samples. Finally, the sulfur content obtained from the ultimate analysis of coal determined some coal sample safe to be used in industry.

Keywords: Coal characteristics; Proximate; Ultimate; Maceral

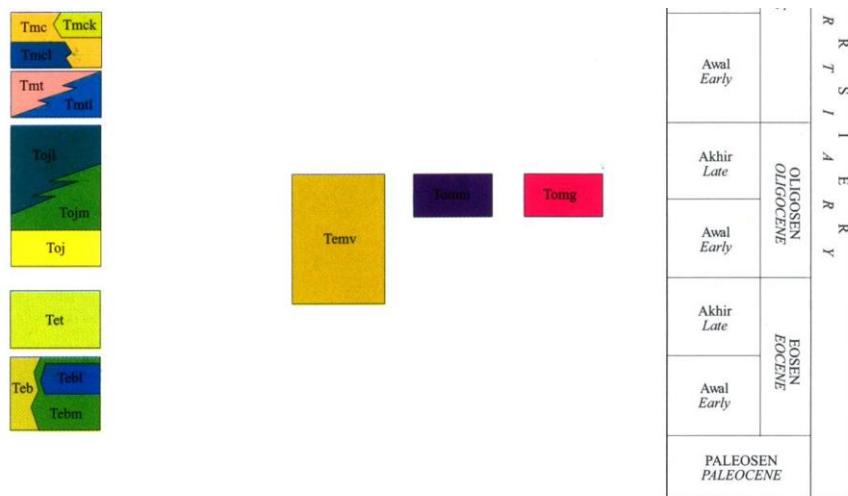
1. Pendahuluan

Batu bara merupakan salah satu kekayaan sumberdaya alam di Indonesia yang keberadaannya tergolong melimpah. Persentase pemanfaatan batu bara untuk penggunaannya di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat akan energi. Batu bara dipilih karena dinilai masih merupakan sumberdaya energi yang keberadaannya melimpah dengan harga yang relatif rendah yaitu 81,84 dolar per ton (Dewan Energi Nasional, 2019). Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada bulan Maret 2018, cadangan batu bara di Indonesia diperkirakan mencapai 26,2 miliar ton. Dalam pemanfaatan batu bara, salah satu tahapan awal yang diperlukan adalah mengetahui kualitas batu bara, salah satunya adalah batu bara di Formasi Bayah. Formasi ini dapat diteliti karena mengandung lapisan batu bara di lapisan berumur Tersier yang saat ini masih minim eksplorasi dan eksloitasi.

Pada daerah penelitian yang difokuskan pada daerah Bayah Bagian Selatan ini, lapisan batu bara termasuk pada

Formasi Bayah yang berumur Eosen dan terendapkan di lingkungan *paralic-neritic* (Santoso, 2010). Keberadaan batu bara di daerah ini kebanyakan berada di bawah permukaan tanah dan memiliki banyak lokasi pertambangan dengan metode *underground*. Kurangnya penelitian tentang batu bara di daerah ini menjadi salah satu alasan penulis memilih daerah penelitian. Penelitian ini dipusatkan pada kualitas batu bara dengan komparasi hasil analisis batu bara menggunakan analisis proksimat, analisis ultimat, dan studi maseral. Dalam melakukan penelitian ini, penulis merumuskan masalah antara lain:

- Bagaimana karakteristik maseral batu bara di daerah Bayah bagian selatan?
- Bagaimana kualitas batu bara di daerah penelitian?
- Bagaimana kaitan antara hasil analisis proksimat dan ultimat dengan studi maseral pada batu bara daerah penelitian?



Gambar 1. Kolom stratigrafi batuan yang terdapat pada daerah penelitian (Sujatmiko & Santosa, 1992).

Secara administratif, daerah penelitian berada di Kecamatan Bayah, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Secara geografis, daerah penelitian berada pada koordinat S 06° 54.006'–S 06° 57.951' dan E 106° 09.174'–E 106° 20.094'. Lokasi daerah penelitian berada sekitar 177 km di barat daya dari Jakarta. Batas administratif lokasi penelitian yaitu:

- Utara : Kecamatan Cibeber
- Timur : Kecamatan Cilograng
- Selatan : Samudera Hindia, Australia
- Barat : Kecamatan Panggarangan

2. Tinjauan Teoretis

Banten dan Jawa Barat adalah daerah yang menandakan transisi antara zona frontal subduksi yang berada di bawah Pulau Sumatera, bagian sebelah barat Bayah. Daerah ini terus menerus aktif sejak *rifting* saat pada Kala Eosen. Daerah penelitian ini terdiri atas perbukitan, dataran rendah, dan pantai yang didominasi oleh daerah hutan tropis dan perkebunan. Bagian pegunungan dan puncak gunung di daerah ini umumnya masih tertutup hutan lindung dan hutan tropika. Bagian pegunungan, lereng gunung, dan perbukitan pada daerah ini umumnya tertutup oleh perkebunan, reboisasi, rerumputan, dan lahan pertanian (Sujatmiko & Santosa, 1992). Gambar 1 menunjukkan tatanan stratigrafi daerah penelitian yang terdapat pada lembah Leuwidamar, Jawa Barat:

- a. Tmc (Formasi Cimapag): sedimen gunung api yang terdiri atas alas breksi atau konglomerat dengan komponen dari rombakan batuan yang lebih tua, urat kuarsa, lava, dan batuan terubah yang terendapkan pada lingkungan laut-darat.
- b. Tmcl (Anggota Batugamping Formasi Cimapag): terdiri atas batugamping, napal, dan batu lempung dan berada di bagian bawah Formasi Cimapag)
- c. Tmt (Anggota Tufa Formasi Citarate): terdiri atas breksi tufa gampingan, batupasir, konglomerat, batugamping, dan tufa, terletak di bagian atas Formasi Citarate.

- d. Tmtl (Anggota Batugamping Formasi Citarate): terdiri atas batugamping, napal dan batupasir, terletak di bagian bawah Formasi Citarate
- e. Toj (Anggota Batupasir Formasi Cijengkol): terdiri dari batupasir, konglomerat, breksi, tufa dan batu bara, berumur Oligosen Awal, terendapkan pada lingkungan paralik, bercirikan sedimen epiklastik kasar dengan alas konglomerat, tersingkap di daerah selatan lembah geologi.
- f. Teb (Anggota Konglomerat Formasi Bayah): terdiri dari konglomerat, batupasir kuarsa, batu lempung, tuf dan batu bara. Satuan ini berumur Eosen dan diendapkan pada lingkungan paralik.

Batu bara adalah suatu sedimen (padatan) yang terbentuk dari bahan organik purba. Bahan organik berasal dari sisa tumbuh-tumbuhan purba yang telah mengalami pembusukan (Stach, 1975). Sejak pengendapannya, batu bara mengalami perubahan sifat fisika dan kimia yang mengakibatkan kandungan karbon tururai (Peter, 1984).

Proses pembentukan batu bara diawali dengan proses penggambutan (*peatification*) dan berlanjut ke proses pembatubaraan (*coalification*). Terdapat empat faktor dalam proses pembentukan batu bara (*coalification*) yang dapat mempengaruhi peringkat dan kualitas dari batu bara yaitu suhu, waktu, tekanan, dan radioaktif (Thomas, 2013). Lingkungan pengendapan batu bara terdiri dari *barrier*, *back barrier*, *lower delta plain*, *upper delta plain-fluvial*, dan transisi *lower delta plain*. Lingkungan pengendapan batu bara dapat ditentukan dengan menggunakan parameter nilai perhitungan *Tissue Preservation Index* (TPI) dan *Gelification Index* (GI) (Diessel, 1992).

Batu bara dapat dideskripsikan secara kasat mata (makroskopis) untuk menentukan litotipe dari batu bara. Litotipe batu bara terdiri dari *earthy-brown or fibrous lignites*, *woody or xylitic lignites*, *amorphous brown coals*, dan *black lignites*. Batu bara memiliki komponen basis khusus untuk menyatakan kondisi kandungan air, abu, zat terbang, dan karbon tetap. Komponen basis batu bara antara lain *as received*, *air dried*, *dry*, *dry ash free*, dan *dry mineral matter free* (Thomas, 1992).

Analisis maseral adalah analisis yang dilakukan dengan cara mengamati kandungan-kandungan material organik dan material mineral yang terkandung di dalam batu bara. Analisis maseral dianalogikan sebagai analisis petrografi mineral pada batuan non-batu bara yang lain. Maseral merupakan sisa material organik penyusun tumbuhan yang membentuk batu bara. Terdapat 3 kelompok maseral yaitu:

- a. Huminit atau vitrinit berasal dari serat kayu seperti batang, dahan, akar, dan daun. Ketika dilihat dari sayatan poles memiliki warna pantul yang lebih terang dari liptinit dan lebih gelap dari inertinit, yaitu berada di zona berwarna abu-abu terang hingga abu-abu tua. Semakin tinggi tingkat batu bara maka warna abu yang dihasilkan akan relatif lebih ke abu-abu terang. Memiliki kandungan hidrogen yang rendah. Hidrogen yang rendah membuat hidrokarbon sulit untuk terbentuk.
- b. Liptinit atau eksinit berasal dari tumbuhan tingkat rendah seperti spora, ganggang, kutikula, resin, dan alga. Ketika dilihat pada sayatan poles, akan terlihat berwarna abu-abu tua hingga hitam dan dengan sinar putih akan memiliki warna kuning muda hingga kuning tua. Memiliki kandungan hidrogen paling tinggi dibanding kelompok maseral lainnya.
- c. Inertinit berasal dari proses oksidasi tumbuhan yang disebabkan adanya jamur dan bakteri. Ketika dilihat pada sayatan poles akan terlihat sangat terang hingga putih atau reflektansi yang sangat tinggi. Memiliki kandungan hidrogen sangat rendah dibanding kelompok maseral lainnya.

Selain tersusun atas maseral, batu bara juga mengandung mineral yang dapat terbentuk karena pengaruh transportasi. Untuk batu bara *allochtonous* seperti mineral kuarsa yang terbawa ketika banjir, pada saat pengendapan batu bara bersama koloid (partikel-partikel tidak dapat terlarut sempurna dalam zat pelarutnya secara sempurna dan mengalami efek Tyndall akibat tersebar dalam zat pelarut) selama tahap biokimia sehingga membentuk mineral yang nodular, ataupun setelah tahap pembatubaraan dengan sifat mineral yang mengisi rekahan (*cleat*) seperti mineral pirit, kalsit, dan siderit.

Selama proses pembatubaraan, dapat terbentuk hidrokarbon berupa minyak atau gas yang berasal dari material organik atau maseral yang mengalami perubahan karena adanya pengaruh biokimia. Kelompok maseral dapat dikelompokan menjadi 4 tipe kerogen yang mana didasari dari komposisi kimia yaitu kandungan karbon, hidrogen, dan oksigen (Krevelen, 1993).

Analisis proksimat merupakan analisis yang digunakan untuk menentukan kandungan kelembaban, zat terbang, abu dan juga karbon tetap yang ada pada sampel batu bara. Kelembaban batu bara adalah kandungan air yang menguap dari batu bara saat dipanaskan dengan suhu 105°C–110°C. Pengaruh kandungan air yang berlebih akan mempengaruhi nilai kalori dan suplai panas karena penguapan dan pemanasan berlebih dari uap, serta

membantu radiasi transfer panas. Kandungan air dapat dibedakan antara lain:

- a. Kandungan air bebas (*free moisture*) adalah air yang diserap pada permukaan batu bara. Kandungan air ini dapat dihilangkan dengan cara dikeringkan. Kandungan air ini berasal dari uap di lingkungan sekitar, air hujan dan lain-lain.
- b. Kandungan air bawaan (*inherent moisture*) terikat secara kimiawi dan fisika pada batu bara.
- c. Kandungan air total (*total moisture*) merupakan banyaknya kandungan air dalam batu bara. Kandungan air total mempengaruhi kondisi pengeringan dan hasil pengeringan akan berpengaruh terhadap nilai kalori. Semakin banyak kandungan air, nilai kalori akan semakin buruk karena air bersifat menyerap panas.

Abu adalah material residu material anorganik setelah pembakaran. Kandungan abu akan terbawa bersama gas pembakaran dalam bentuk *fly ash* yang jumlahnya mencapai 30% dan abu dasar sebesar 10%. Semakin tinggi kadar abu akan semakin mempengaruhi tingkat pengotoran, keausan dan korosi peralatan.

Zat terbang merupakan komponen batu bara yang terbentuk pada suhu tinggi. Karbon tetap pada batu bara merupakan jumlah karbon yang tersisa di dalam batu bara setelah zat-zat terbang telah menguap. Kandungan zat terbang ini dapat berasal dari material organik batu bara dan sedikit dari kandungan mineralnya.

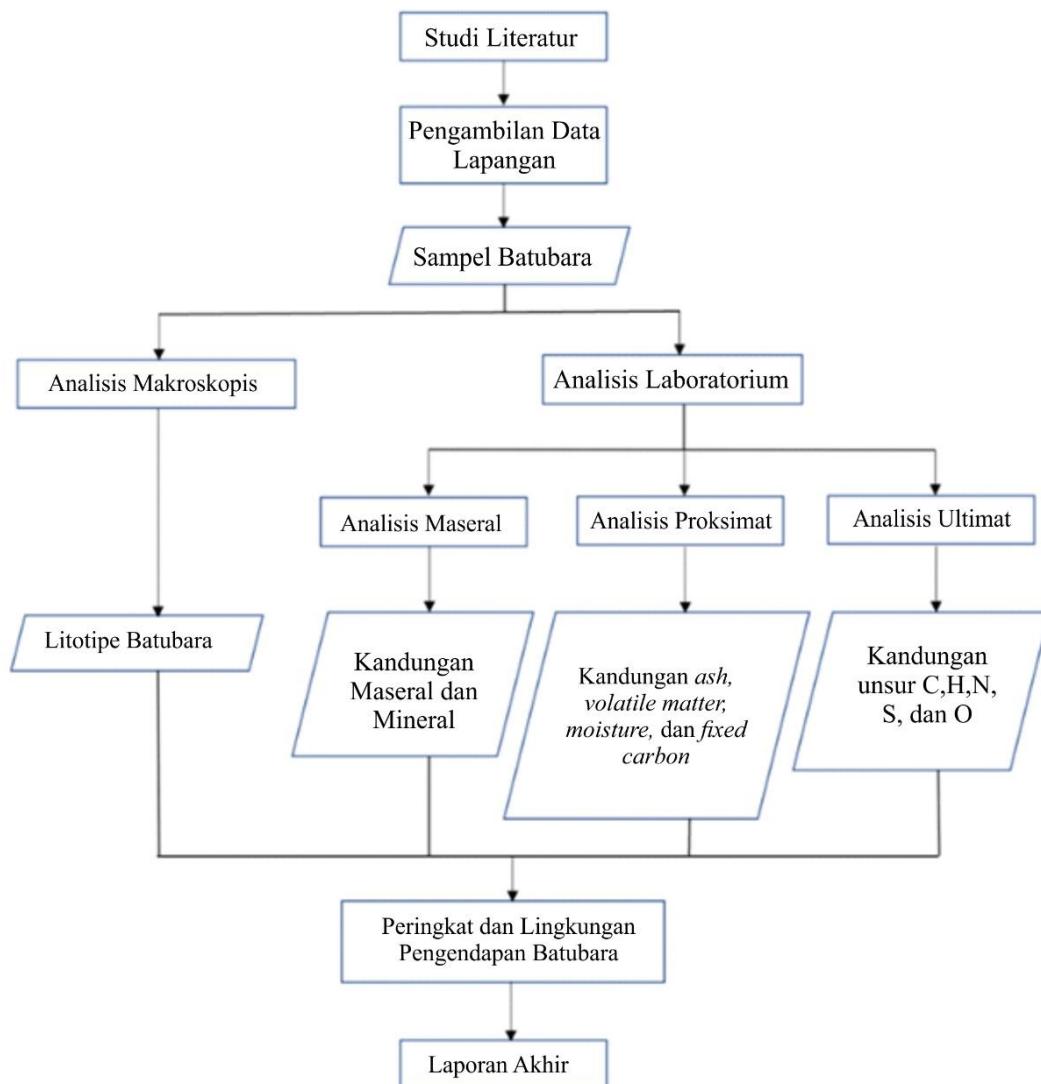
Karbon tetap (*fixed carbon*) merupakan karbon yang ditemukan sebagai residu yang tersisa setelah bahan volatil dibebaskan. Karbon tetap tidak ditentukan secara langsung, tetapi perbedaannya terlihat dalam batu bara yang dikeringkan di udara, antara persentase total dari komponen lain, yaitu moisture content, abu dan bahan volatile.

Analisis ultimat adalah analisis yang terdiri dari penentuan karbon dan hidrogen sebagai produk gas dari pembakaran lengkapnya, penentuan sulfur, nitrogen dan abu dalam material secara keseluruhan, dan estimasi oksigen berdasarkan perbedaan.

3. Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa Peta Geologi Regional Lembar Leuwi Damar skala 1:100.000 (Sujatmiko & Santosa, 1992) dan sampel batu bara yang diambil dari lapangan penelitian. Penelitian ini dilakukan penulis (Gambar 2) dengan cara pengambilan sampel batu bara di Bayah bagian selatan lebih tepatnya di Formasi Bayah dengan metode pengambilan pada singkapan dan *underground* pada lokasi tambang-tambang rakyat yang berada pada lokasi penelitian. Lalu melakukan *plotting* di daerah pengambilan sampel guna mengetahui posisinya. Setelah itu sampel batu bara dibawa ke laboratorium untuk selanjutnya dilakukan preparasi sampel untuk analisis proksimat, ultimat, dan maseral.

Pengujian dengan proses analisis proksimat dilakukan dengan cara memasukkan sampel yang sudah dilakukan



Gambar 2. Diagram alir penelitian

preparasi ke dalam alat untuk selanjutnya dilakukan pembakaran secara bertahap oleh alat tersebut secara otomatis untuk mengetahui kadar air/kelembapan, abu, zat terbang, dan karbon sisa. Hasil dari analisis ini akan langsung terbaca pada alat tersebut untuk setiap parameter. Pengujian untuk analisis ultimatum sama seperti proksimat yaitu memasukkan sampel batu bara yang sudah dipreparasi ke dalam alat, kemudian alat tersebut secara otomatis akan membaca unsur-unsur berupa belerang, karbon, hidrogen, nitrogen, dan oksigen. Hasil dari analisis akan terbaca pada alat. Untuk analisis maseral dilakukan secara manual dengan melihat di bawah mikroskop. Hasil dari ketiga data analisis tersebut kemudian akan dielaborasikan guna mendapatkan kualitas dari batu bara yang diuji.

4. Hasil Penelitian

Penelitian batu bara ini menggunakan 8 sampel dengan kode sampel A, B, C, D, E, F, G, dan H. Hal pertama yang dilakukan pada sampel batu bara adalah analisis maseral. Analisis ini dilakukan dengan melakukan pengamatan di

bawah mikroskop untuk melihat kandungan maseral atau kandungan organik di dalam batu bara. Hasil analisis maseral menunjukkan batu bara memiliki kandungan vitrinit yang dominan (Tabel 1). Vitrinit yang dominan ini disertai oleh sedikit inertinit dan material mineral lain. Kandungan yang tinggi ini mengindikasikan batu bara terbentuk pada lingkungan yang lembab (ICCP, 1994).

Dari hasil analisis sub maseral, diketahui jenis maseral vitrinit yang terkandung dalam batu bara rata-rata adalah tellocolinite dan desmocolinite (Tabel 2 dan Tabel 3). Hal ini menunjukkan batu bara tersusun atas material sel tumbuhan yang terawetkan (tellocolinite) dan material sisa-sisa tumbuhan yang mengalami fragmentasi dan terawetkan (desmocolinite). Ditemukan juga inertinit yaitu sclerotinit yang terbentuk dari hasil resin (getah) yang teroksidasi sebelum proses pengawetan. Sclerotinit yang terkandung masuk ke dalam jenis funginite. Kandungan pengotor berupa mineral dalam batu bara terkandung pengotor berupa mineral pirit.

Berdasarkan hasil analisis proksimat, dari 8 sampel yang diuji menunjukkan 6 sampel didominasi oleh kadar

Tabel 1. Data hasil analisis maseral

Analisis Maseral Maseral	Sampel (%Vol)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Vitrinite	89,4	85	87,2	84,6	97,2	99,4	97,4	82,2
Liptinite	0	0	0	0	0	0	0	0
Inertinite	9,4	0	7,2	0	2,4	0,6	1,6	0,4
Mineral Matter	1,2	15	5,6	15,4	0,4	0	1	17,4

Tabel 2. Data hasil analisis sub-maseral

Analisis Maseral Maseral	Sub Maseral	Sampel (%Vol)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Vitrinite	Telovitrinite	19,4	85	20,6	7	23,6	15	11	
	Detrovitrinite	70	0	66,6	77,6	73,6	84,4	86,4	
	Gelovitrinite	0	0	0	0	0	0	0	
Liptinite		0	0	0	0	0	0	0	
Inertinite	Telo-inertinite	9,4	0	7,2	0	2,4	0,6	1,6	
	Detro-inertinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Gelo-inertinite	0	0	0	0	0	0	0	
Mineral Matter		1,2	15	5,6	15,4	0,4	0	1	

Tabel 3. Data hasil analisis 28 maseral.

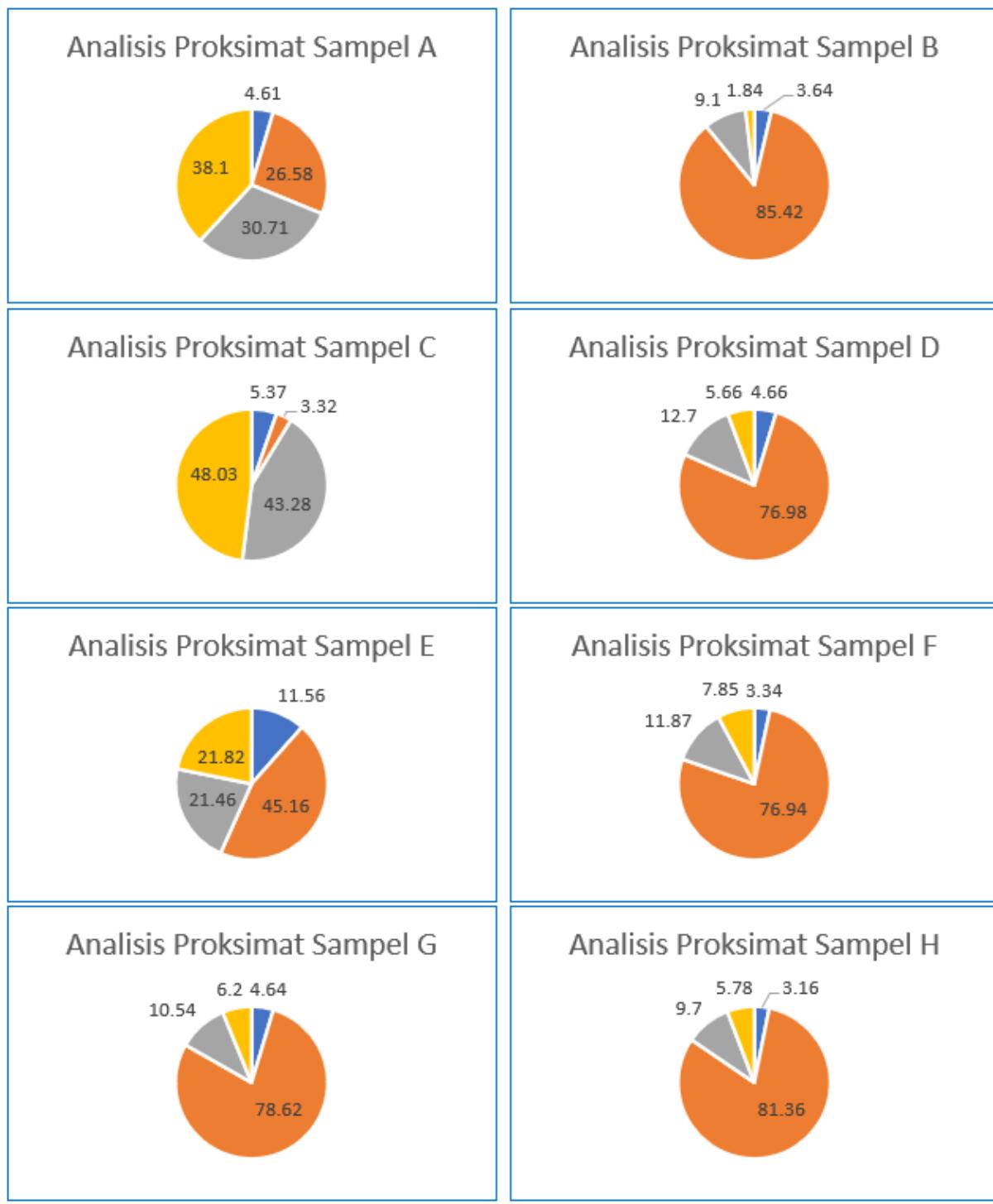
Analisis Sub Maseral	Maseral	Sampel (%Vol)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Telovitrinite	Textinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Texto-ulminite	0	0	0	0	0	0	0	
	E-ulminite	0	0	0	0	0	0	0	
	Telocollinite	19,4	0	20,6	7	23,6	15	11	
Detrovitrinite	Attrinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Densinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Desmocollinite	70	85	66,6	77,6	73,6	84,4	86,4	
Gelovitrinite	Corpogelinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Porigelinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Eugelinite	0	0	0	0	0	0	0	
Liptinite	Sporinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Cutinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Resinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Liptodetrinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Alginite	0	0	0	0	0	0	0	
	Suberinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Fluorinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Exsudatinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Bituminite	0	0	0	0	0	0	0	
Telo-inertinite	Fusinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Semifusinite	1	0	1,6	0	0	0	0	
	Sclerotinite	8,4	0	5,6	0	2,4	0,6	1,6	
Detro-inertinite	Inertodetrinite	0	0	0	0	0	0	0	
	Micrinite	0	0	0	0	0	0	0	
Gelo-inertinite	Macrinite	0	0	0	0	0	0	0	
Mineral Matter	Oksida	0	0	0	0	0	0	0	
	Pirit	1,2	15	5,6	15,4	0,4	0	1	
	Clay	0	0	0	0	0	0	0	

abu yang tinggi. Kadar abu yang tinggi ini dapat disebabkan oleh adanya pengotor saat terjadinya proses pengendapan batu bara. Dapat dilihat dalam data, kadar abu sampel A, C, dan E lebih sedikit daripada sampel lainnya. Apabila dikorelasikan dengan lingkungan pengendapan, ketiga sampel tersebut terendapkan di lingkungan pengendapan rawa-rawa (*marsh*). Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan

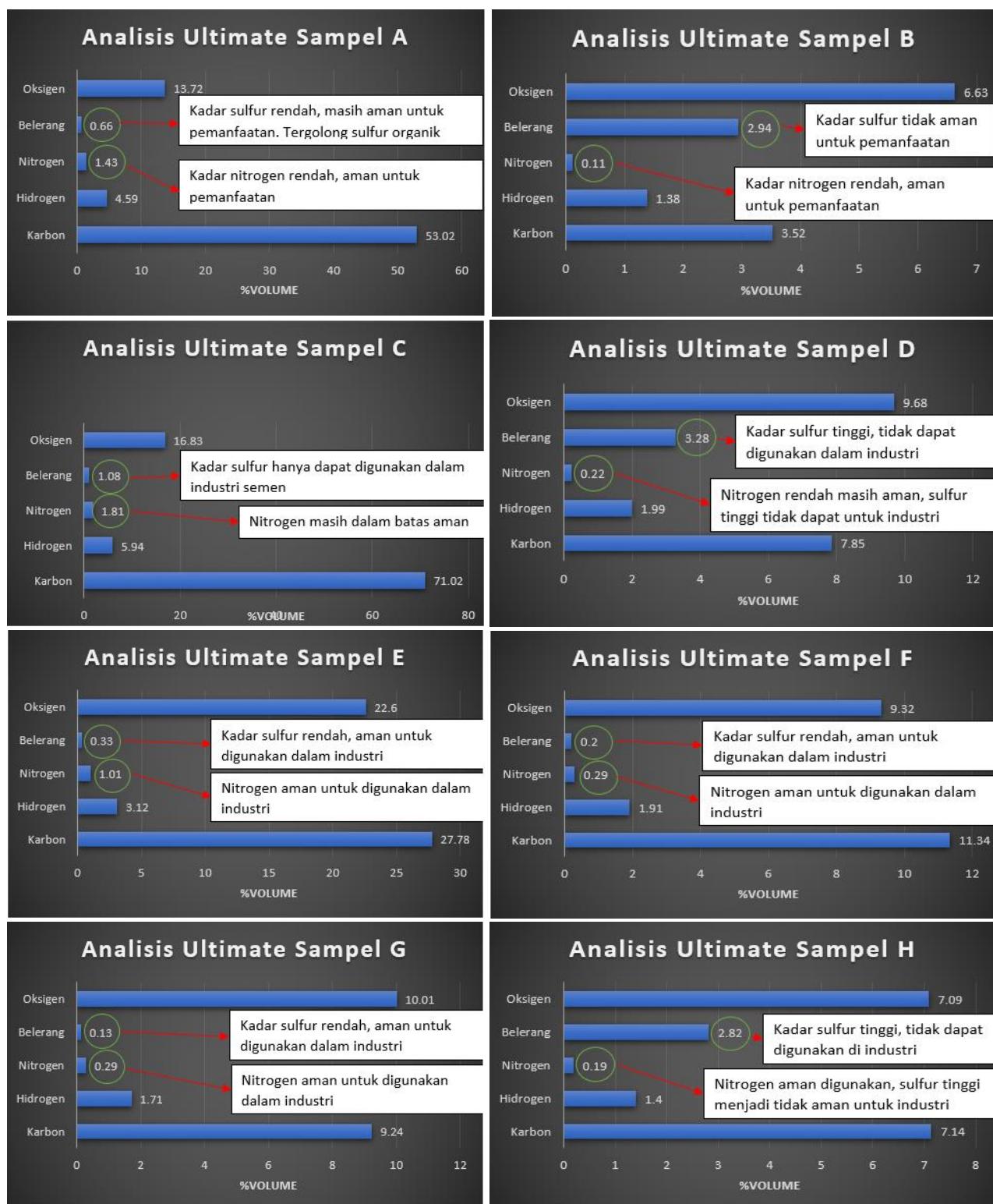
limnic lebih banyak pengotor dibandingkan dengan rawa-rawa (*marsh*).

4.1. Hasil Penentuan Peringkat Batu Bara

Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan peringkat batu bara A, B, C, D, E, F, dan G berada pada peringkat antara *high-volatile B bituminous* sampai dengan *lignite B*.



Gambar 3. Diagram hasil analisis proksimat.



Gambar 4. Diagram hasil analisis ultimat.

Sedangkan batu bara H berada pada peringkat *high-volatile A bituminous* (Gambar 3 dan Gambar 4). Untuk peringkat lebih detailnya, diperlukan analisis reflektansi vitrinit untuk mendapatkan nilai CV dari sampel batu bara.

4.2. Hasil Analisis Lingkungan Pengendapan

Dari semua sampel, didapatkan ada 2 lingkungan pengendapan yaitu *limnic* dan *marsh*. Kedua lingkungan pengendapan tersebut mengindikasikan batu bara

terendapkan di lingkungan yang berdampingan. Sampel batu bara A, C, dan E berada di lingkungan rawa-rawa yang lebih tinggi dibandingkan lingkungan sampel lain yang berada di *limnic*. Lingkungan *limnic* batu bara penelitian mengindikasikan lingkungan *limnic* sudah menuju ke arah pengendapan *marine*.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Maseral yang terdapat di batu bara daerah penelitian didominasi oleh maseral vitrinit. Vitrinit yang terkandung antara lain desmocollinite dan telocollinite. Selain vitrinit, maseral yang dominan terkandung yaitu inertinite. Inertinit yang terkandung adalah sub-maseral sclerotinit. Hasil klasifikasi peringkat batu bara menunjukkan batu bara daerah penelitian adalah batu bara dengan kualitas rendah yaitu *high-volatile B bituminous* sampai *lignite B*. Dari total 8 sampel, hanya 1 sampel yang memiliki kualitas batu bara *high-volatile A bituminous*.
2. Berdasarkan hasil penentuan lingkungan pengendapan, diketahui terdapat 2 tipe lingkungan pengendapan terbentuknya batu bara yaitu *limnic* dan *marsh*. Hal ini menjelaskan bahwa batu bara terbentuk di dua area yang sangat berbeda.
3. Hasil analisis proksimat pada penelitian menunjukkan batu bara daerah penelitian didominasi kandungan abu yang dominan pada 6 sampel, kecuali pada sampel A dan C. Pada sampel A kandungan abu (*ash*), zat terbang (*volatile matter*), dan karbon padat (*fixed carbon*) memiliki persentase yang seimbang. Sedangkan pada sampel C didominasi oleh zat terbang dan karbon padat yang tinggi.
4. Batu bara daerah penelitian termasuk kedalam kategori buruk karena banyaknya kandungan pengotor berupa abu (*ash*). Pengotor ini didukung dengan adanya keberadaan kadar sulfur yang tinggi di beberapa sampel batu bara.
5. Tidak semua batu bara dapat digunakan dalam industri listrik, semen, ataupun logam. Batu bara B, D, dan H tidak dapat digunakan dalam semua industri. Batu bara C dan F dapat digunakan untuk industri pembangkit listrik dan semen. Sedangkan batu bara A, E, dan G bisa digunakan dalam semua industri. Hal ini didasarkan acuan dari Thomas, 2013.

6. Saran

Setelah didapatkan kesimpulan penelitian, maka saran dari penelitian ini adalah :

1. Melakukan analisis reflektansi vitrinit untuk mengetahui peringkat yang lebih detail dari batu bara daerah penelitian
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang stratigrafi daerah penelitian untuk mengetahui detail umur dari batu bara
3. Melakukan analisis sulfur untuk mengetahui jenis kandungan sulfur yang lebih detail.

Daftar Referensi

- Dewan Energi Nasional. (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019*. Secretary general national energy Council. ISSN 2527-3000.
- Diessel, C.F.K. (1992). *Coal-bearing depositional systems*. Springer Science & Business Media.
- ICCP: International Committee for Coal and Organic Petrology. (1998). The New Vitrinite Classification (ICCP Systems 1994). *Fuel* 77, 349-358.
- Peter, J. (1984). *The Future of Coal* (2nd ed.). California: Palgrave Macmillan.
- Santoso, B. (2010). Mining Petrographic Properties of Palaeogene Southern Banten Coals Seams with Regard to Geologic Aspects. *Indonesian Mining Journal* 13(2), 75-82.
- Stach, E., (1975). *Coal Petrology, Second Completely Revised Edition*. Berlin-Stuttgart: Gebruder Borntraeger
- Sujatmiko & Santosa, S. (1992). *Peta Geologi Regional Leuwidamar, Banten Skala 1:100.000*. Bandung: Pusat Survei Geologi.
- Thomas, L. (2013). *Coal Geology*. UK: Wiley-Blackwell.
- Van Krevelen, D.W., (1993). *Coal. 3rd edition*. Amsterdam: Elsevier Science.

Variasi Komposisi Pasir Pantai Pulau Lombok Menggunakan Analisis Petrografi

Ahmad Rizky Reynda* dan Felix M. H. Sihombing

Geology Study Program, FMIPA, Universitas Indonesia, Kampus UI Depok, Depok 16424, Indonesia

*Narahubung: Ahmad.rizky51@ui.ac.id

Abstrak

Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat merupakan pulau yang kaya akan ragam pada sektor geologi pegunungan vulkanik seperti Gunung Rinjani yang aktif hingga saat ini mengeluarkan berbagai macam mineral yang akhirnya terendapkan. Pulau Lombok juga memiliki berbagai macam warna pasir yang tersebar di seluruh penjuru pulau, mulai dari yang berwarna gelap pada bagian utara, putih pada bagian selatan, dan merah muda pada bagian tenggara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui variasi komposisi mineral pasir pantai Pulau Lombok. Penelitian dimulai dengan pengambilan dua belas sampel pasir pantai dari seluruh Pulau Lombok, yang kemudian diolah menjadi sayatan tipis untuk dianalisis menggunakan metode petrografi. Berdasarkan kandungan mineral, ukuran butir dan bentuk butir, pasir pantai Pulau Lombok dapat dibedakan menjadi 4 jenis. Kelompok 1 didominasi oleh mineral mafik dan fragmen litik, memiliki ukuran butir pasir halus hingga sangat kasar, serta memiliki derajat kebundaran *angular* hingga *subangular*. Kelompok 2 didominasi oleh mineral intermediat hingga felsik dan fragmen litik memiliki ukuran butir pasir sangat halus hingga sangat kasar, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*. Kelompok 3 didominasi oleh mineral kalsit, memiliki ukuran butir pasir sangat halus hingga sangat kasar, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*. Kelompok 4 didominasi oleh mineral kalsit dan litik, memiliki ukuran butir pasir sangat halus hingga sangat kasar, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*.

Kata Kunci: Petrografi; Lombok; Pasir

Abstract

Lombok Island, West Nusa Tenggara is an island with high diversity in the geological sector. Volcanic mountains such as Mount Rinjani, which are active until now, release various kinds of minerals which are eventually deposited. Lombok Island also has various kinds of sand colors scattered throughout the island, ranging from dark in the north, white in the south and pink in the southeast. This study aims to determine the variation of the mineral composition of beach sand on the Island of Lombok. The study began by taking twelve samples of beach sand from all over Lombok Island, which were then processed into thin section for analysis using the petrographic method. Based on the mineral content, grain size and grain shape, Lombok Island beach sand can be divided into 4 groups; Group 1 is dominated by mafic minerals and lithic framments, has fine to very coarse sand grain sizes, and has a degree of roundness from angular to subangular. Group 2 is dominated by intermediate to felsic minerals and lithic fragments; It has a very fine to very coarse sand grain size and a degree of roundness from subangular to subrounded. Group 3 is dominated by the mineral calcite; It has a very fine to very coarse sand grain size and a degree of roundness from subangular to subrounded, and Group 4 which is dominated by calcite and lithic minerals, has a very fine to very coarse sand grain size, and a degree of roundness from subangular to subrounded.

Keywords: Petrography; Lombok; Sand

1. Pendahuluan

Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat memiliki berbagai macam warna pasir yang disebabkan oleh aktivitas geologi. Perbedaan pada pasir tersebut di seluruh penjuru pulau, mulai dari yang berwarna gelap pada bagian utara pulau, berwarna putih pada bagian selatan pulau, dan berwarna merah muda pada tenggara pulau.

Dalam penelitian ini, penulis akan mencari variasi komposisi pasir pantai berdasarkan kandungan mineral dan material organik pada beberapa pantai di Pulau Lombok menggunakan metode petrografi/sedimentografi. Metode ini dilakukan dengan cara membuat sayatan tipis dari setiap sampel yang telah diambil kemudian dianalisis melalui mikroskop polarisasi menggunakan metode *point-counting* dan menghitung persentase kandungannya.

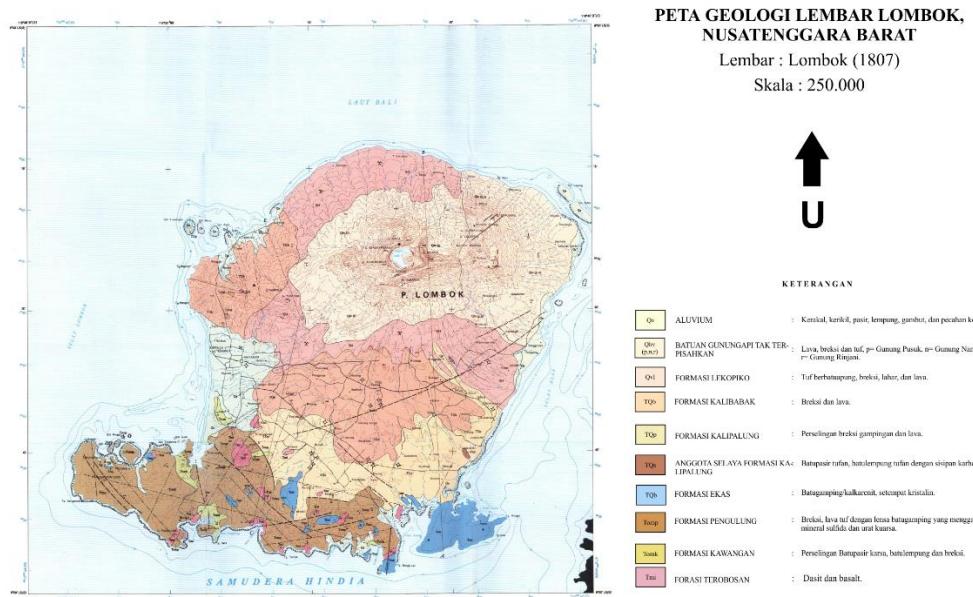
2. Stratigrafi Pulau Lombok

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Lombok (Mangga et al., 1994) pada Gambar 1, batuan pada Pulau Lombok memiliki rentang umur dari Oligosen Tengah sampai

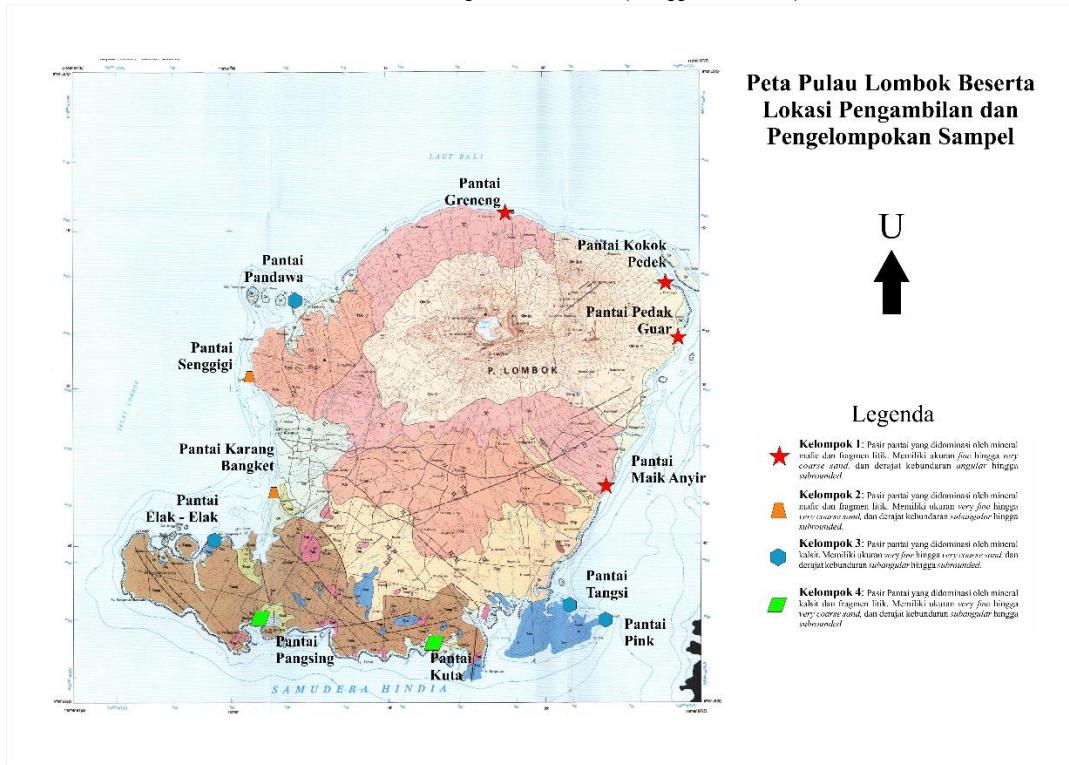
dengan Holosen dan secara garis besar, batuan pada Pulau Lombok terdiri dari batuan sedimen, batuan gunung api, serta batuan beku terobosan. Satuan batuan yang terdapat pada daerah penelitian berjumlah sepuluh satuan. Apabila diurutkan dari tua ke muda, sepuluh satuan tersebut terdiri dari Batuan Terobosan (Tmi), Formasi Kawangan (Tomk), Formasi Penggulung (Tomp), Formasi Ekas (Tme), Anggota Selayar Formasi Kalipalung (TQs), Formasi Kalipalung (TQp), Formasi Kalibabak (TQb), Formasi Lekopiko (Qvl), Batuan Gunung Api Tak Terpisahkan (Qhr), dan Aluvium (Qa)

3. Metodologi

Penelitian ini dilakukan melalui tahapan studi literatur dan perencanaan lapangan yang dilakukan sebelum penelitian lapangan. Pengambilan dua belas (12) sampel pasir di Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat pada Pantai Karang Bangket yang dapat disingkat menjadi (K.B), Elak-elak (E.E.), Pasing (P.S.G), Kuta (K.T.A), Pantai Pink (P.P), Tangsi (T.S.I), Maik Anyir (M.A), Pedak Guar (P.G.), Kokok Pedek (K.P), Greneng (G.R.N), Pandawa (P.D.W), dan



Gambar 1. Peta Geologi Lembar Lombok (Mangga et al., 1994).



Gambar 2. Lokasi pengambilan sampel yang sudah kelompokkan berdasarkan karakteristik pasir pantai. Peta geologi berdasarkan Mangga et al. (1994).

Senggigi (S.G.G). Pengambilan sampel ini dilakukan selama empat hari. Lokasi pengambilan dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengolahan data lanjutan dilakukan di laboratorium yang dimulai dengan pemrosesan sampel pasir yang terlebih dahulu harus dikompaksi dalam resin dan kemudian dijadikan sayatan tipis.

Hasil dari sayatan tipis kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan pengamatan petrografi untuk mengidentifikasi jenis mineral, ukuran butir, dan bentuk butir dari sampel pasir. Penghitungan persentase jenis mineral menggunakan metode *point counting* yaitu berupa grid

yang membantu penghitungan mineral secara acak. Pada tahap interpretasi data, hasil perhitungan mineral dengan cara *point counting* dimasukkan ke dalam tabel, kemudian ditampilkan sebagai histogram untuk memudahkan analisis data akhir.

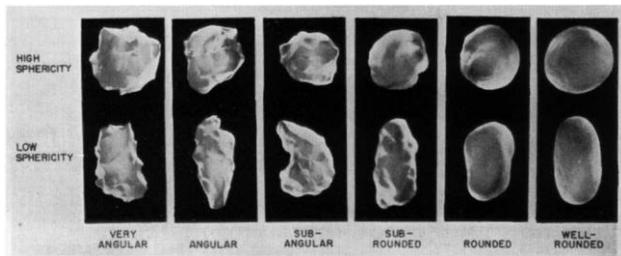
Tahapan penulisan jurnal merupakan kegiatan yang dilakukan guna menyusun keseluruhan informasi dari hasil kegiatan penelitian secara tertulis, yang merupakan kesimpulan dari hasil penelitian. Tahapan ini meliputi pembahasan mengenai variasi komposisi pasir pantai Pulau Lombok.

Tabel 1. Data variasi sampel pasir di beberapa lokasi pantai Pulau Lombok.

No.	Nama Sampel	Lokasi di Pulau Lombok	Warna Pasir	Kandungan dan Persentase Mineral (%)	Ukuran Mineral (mm)	Bentuk Butir
1	Pantai Kuta (K.T.A)	Selatan	Putih kecokelatan	Kalsit Lithic Kuarsa Glaukonit Plagioklas K-felspar Opak	0.15 – 1.19 fine sand - very coarse sand	Subangular - subrounded
2	Pantai Elak-elak (E.E)	Barat Daya	Putih kecokelatan dengan bercaek hitam	Kalsit Kuarsa K-felspar Lithic Pyroxene	0.10 – 1.22 very fine sand - very coarse sand	Subangular - subrounded
3	Pantai Pasing (P.S.G)	Barat Daya	Abu – abu kecokelatan	Kalsit Kuarsa K-felspar Litik Plagioklas Glaukonit	0.06 – 1.02 very fine sand - very coarse sand	Subangular - rounded
4	Pantai Karang Bangket (K.B)	Barat	Hitam dengan bercaek kristal yang mengkilap	Kuasa K-felspar Biotit Lithic Plagioklas Opak Piroxene	0.07 – 1.84 very fine sand - very coarse sand	Subangular - subrounded
5	Pantai Maik Anyir (M.A)	Timur	Hitam keabu – abuan dengan bercaek kristal yang mengkilap	Kalsit Kuarsa K-felspar Biotit Lithic Plagioklas Opak Pyroxene	0.18 – 1.25 fine sand - very coarse sand	Angular - subangular
6	Pantai Pedak Guar (P.G)	Timur Laut	Hitam dengan bercaek putih dan kristal yang mengkilap	Kalsit Kuarsa K-felspar Biotit Lithic Plagioklas Opak Pyroxene	0.35 – 1.25 medium sand - very coarse sand	Angular - subrounded
7	Pantai Kokok Pedek (K.P)	Timur Laut	Hitam keabuan dengan bercaek putih dan kristal yang mengkilap	Kalsit Kuarsa K-felspar Biotit Lithic Plagioklas Opak Piroksen Glauconite	0.15 – 0.84 fine sand - coarse sand	Angular - subangular
8	Pantai Greneng (G.R.N)	Utara	Hitam keabu-abuan dengan bercaek kristal yang mengkilap	Kuarsa K-felspar Biotit Lithic Plagioklas Opak Piroksen	0.06 – 0.81 very fine - coarse sand	Angular - Subangular
9	Pantai Pandawa (P.D.W)	Barat Laut	Putih kecokelatan dengan sedikit bercaek hitam	Kalsit Lithic Plagioklas	0.16 – 2.02 fine - very coarse sand	Subrounded
10	Pantai Senggigi (S.G.G)	Barat Laut	Hitam keabu-abuan dengan bercaek kristal yang mengkilap	Kalsit K-feldspar Biotit Lithic Plagioklas Opak Piroksen	0.24 – 1.29 fine - very coarse sand	Angular – Subangular
11	Pantai Tangsi (T.S.I)	Tenggara	Putih kecokelatan dengan bercaek hitam dan sedikit bercaek merah kecokelatan	Kalsit Kuarsa K-felspar Biotite Lithic Plagioklas Opak Piroksen	0.07 – 0.58 very fine - very coarse sand	Subangular - subrounded
12	Pantai Pink (P.P)	Tenggara	Putih dengan bercaek warna merah muda kecokelatan	Kalsit Quarsa K-felspar Biotit Lithic Plagioklas opak	0.11 – 1.01 very fine - very coarse sand	Subangular - subrounded

3.1. Analisis Makroskopis

Sampel pasir yang ada dilihat secara makroskopis terutama pada warna fisik pasir, bentuk butir diklasifikasikan menggunakan klasifikasi Powers (1952) yang tertera pada Gambar 3 dan ukuran butir diklasifikasikan menggunakan klasifikasi Wentworth (1922 dalam Boggs, 2006) yang tertera pada Gambar 4.



Gambar 3. Klasifikasi bentuk/kebundaran butir mineral oleh Powers (1952).

	U.S. standard sieve mesh	Millimeters	Phi (ϕ) units	Wentworth size class
GRAVEL	4096	4096	-12	
	1024	1024	-10	Boulder
	256	256	-8	
	64	64	-6	Cobble
	16	16	-4	
	4	4	-2	Pebble
	3.36		-1.75	
	2.83		-1.5	
	2.38		-1.25	Granule
	2.00	2	-1.0	
SAND	1.68		-0.75	
	1.41		-0.5	Very coarse sand
	1.19		-0.25	
	1.00	1	0.0	
	0.84		0.25	
	0.71		0.5	Coarse sand
	0.59		0.75	
	0.50	1/2	1.0	
	0.42		1.25	
	0.35		1.5	Medium sand
MUD	0.30		1.75	
	0.25	1/4	2.0	
	0.210		2.25	
	0.177		2.5	Fine sand
	0.149		2.75	
	0.125	1/8	3.0	
	0.105		3.25	
	0.088		3.5	Very fine sand
	0.074		3.75	
	0.0625	1/16	4.0	
SILT	0.053		4.25	
	0.044		4.5	Coarse silt
	0.037		4.75	
	0.031	1/32	5.0	
	0.0156	1/64	6.0	Medium silt
CLAY	0.0078	1/128	7.0	Fine silt
	0.0039	1/256	8.0	Very fine silt
	0.0020		9.0	
	0.00098		10.0	Clay
	0.00049		11.0	
	0.00024		12.0	
	0.00012		13.0	
	0.00006		14.0	

Gambar 4. Klasifikasi ukuran butir mineral oleh Wentworth (1922 dalam Boggs, 2006).

3.2. Analisis Petrografi

Analisis petrografi digunakan untuk mengidentifikasi jenis mineral menggunakan sifat optik mineral yang ada. Sifat optik mineral dapat dibedakan menjadi dua: (1) sifat optik mineral menggunakan pengamatan nikol sejajar yang terdiri dari relief, pleokroisme, belahan, pecahan dan (2) bentuk mineral, sifat optik mineral menggunakan pengamatan nikol silang yang terdiri dari warna interferensi, sifat kembar, dan sudut pemadaman.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karakteristik Pasir Pantai

Seluruh data karakteristik pasir pantai disajikan pada Tabel 1.

4.2. Pengelompokan Jenis Pasir Pantai

Peta pengelompokan pasir pantai dapat dilihat pada Gambar 2. Pantai bagian timur, utara, hingga barat daya Pulau Lombok seperti Pantai Karang Bangket, Pantai Maik Anyir, Pantai Pedak Guar, Pantai Kokok Pedek, Pantai Greneng, dan Pantai Senggigi memiliki jenis mineral yang lebih beragam yaitu kalsit, kuarsa, K-felspar, biotit, litik, plagioklas, opak, dan piroksen.

Pantai pada bagian timur hingga utara Pulau Lombok didominasi oleh fragmen litik dan mineral mafik dengan ukuran butir *fine sand* hingga *very coarse sand* dan juga memiliki derajat kebundaran dari *angular* hingga *subangular*. Kecuali pada daerah barat dan barat daya, Pantai Pandawa memiliki pasir pantai yang didominasi oleh mineral kalsit dan sedikit fragmen litik.

Pada bagian barat Pulau Lombok, Pantai Senggigi dan Karang Bangket memiliki kandungan mineral yang serupa dengan pasir pantai bagian utara, tetapi memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand* dan derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*.

Pantai pada bagian selatan Pulau Lombok seperti Pantai Elak-elak, Pantai Pasing, Pantai Kuta, Pantai Tangsi, dan Pantai Pink memiliki jenis mineral yang lebih sedikit ragam jenis mineral terutama berkurangnya mineral mafik sampai intermediat, mineral yang terkandung pada pasir pantai selatan adalah kalsit, kuarsa, K-felspar, fragmen litik plagioklas, dan glaukonit dengan sedikit mineral biotit dan piroksen.

Pantai bagian selatan dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pasir pantai yang didominasi oleh mineral kalsit dan pantai yang di dominasi oleh kalsit dan fragmen litik seperti pada Pantai Pasing dan Pantai Kuta. Untuk ukuran dan derajat kebundaran butir pasir pantai selatan Lombok memiliki ukuran yang lebih halus, yaitu *very fine* hingga *very coarse sand* dan memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*.

Kelompok 1

Kelompok 1 terletak pada bagian timur hingga utara Pulau Lombok, terdiri dari Pantai Greneng, Kokok Pedek, Pedak Guar, dan Maik Anyir. Kelompok ini memiliki kandungan mineral kalsit, kuarsa, K-felspar, biotit, litik, plagioklas, opak, dan piroksen, didominasi oleh mineral mafik serta fragmen litik. Kelompok 1 memiliki ukuran butir *fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *angular* hingga *subangular* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.

Secara geologi, pantai-pantai tersebut masuk ke dalam atau berdekatan dengan (1) Formasi Lekopiko (Qvl) yang terdiri dari tuf berbatuapung, breksi lahar dan lava, (2) Formasi Batuan Gunungapi Tak Terpisahkan (Qhv (p,n,r)) yang terdiri dari lava, breksi, dan tuf yang berasal dari Gunung Pusuk, Gunung Nagi, dan Gunung Rinjani, serta (3) Formasi Aluvium (Qa) yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut, dan pecahan koral.

Berdekatannya lokasi pantai dengan formasi Qvl, Qhv, dan Qa menjadi alasan mengapa pasir pantai Kelompok 1 memiliki karakteristik yang didominasi mineral mafik dan fragmen litik, berukuran *fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran yang *angular* hingga *subangular*. Berdasarkan Deret Reaksi Bowen ketika proses kristalisasi magma mineral mafik lebih dahulu

terbentuk yang menyebabkan mineral mafik paling dahulu terkena proses pelapukan. Karena berdekatan dengan sumber yang kaya akan mineral mafik dan litik seperti Formasi Qvl dan Qhv, mineral mafik dan fragmen litik akan memiliki kesempatan lebih besar untuk hadir pada pasir sebelum akhirnya lapuk.

Kelompok 2

Kelompok 2 terletak pada bagian barat Pulau Lombok terdiri dari Pantai Senggigi dan Pantai Karang Bangket, memiliki kandungan mineral kalsit, kuarsa, K-felspar, biotit, litik, plagioklas, opak, dan piroksen, didominasi oleh mineral intermediat hingga felsik dan fragmen litik. Kelompok 2 memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.

Secara geologi, pantai-pantai tersebut masuk ke dalam atau berdekatan dengan (1) Formasi Kalibalak (TQb) yang terdiri dari breksi dan lava, (2) Formasi Kawangan (Tomk) yang terdiri dari perselingan batupasir, kuarsa, batuempung dan breksi, serta (3) Formasi Aluvium (Qa) yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut, dan pecahan korral.

Berdekatannya Pantai Senggigi dan Pantai Karang Bangket dengan muara Sungai Kokok Jangkok dan Kokok Sesaat yang melewati formasi TQb, Tomp, dan Qa menjadi alasan mengapa pasir pantai Kelompok 2 memiliki karakteristik yang didominasi mineral intermediat hingga felsik dan fragmen litik berukuran *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran yang *subangular* hingga *subrounded*. Mirip dengan Kelompok 1, menurut Deret Reaksi Bowen, ketika proses kristalisasi magma mineral mafik lebih dahulu terbentuk yang menyebabkan mineral mafik paling dahulu terkena proses pelapukan. Tetapi karena pantai Kelompok 2 berdekatan dengan formasi yang berumur lebih tua yaitu Tersier sehingga memiliki lebih sedikit kandungan mineral mafik dan lebih banyak mineral intermediat hingga felsik serta fragmen litik. Untuk kandungan kalsit yang terdapat pada Pantai Senggigi kemungkinan besar berasal dari Pulau Gili Air, Gili Meno, dan Gili Trawangan yang berada di sebelah utara pantai.

Kelompok 3

Pantai-pantai Kelompok 3 terletak lebih terpencar dibandingkan dengan kelompok lainnya: Pantai Pandawa pada bagian barat laut, Pantai Elak-elak pada bagian barat daya, Pantai Tangsi dan Pantai Pink pada bagian tenggara Pulau Lombok. Pasir pada pantai-pantai ini memiliki kandungan mineral kalsit, kuarsa, K-felspar, biotit, fragmen litik, plagioklas, mineral opak, dan piroksen, didominasi oleh mineral kalsit. Kelompok 3 memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7.

Secara geologi, masing-masing pantai masuk ke dalam atau berdekatan dengan formasi yang berbeda-beda, Pantai Pandawa masuk ke dalam Formasi Aluvium (Qa) yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut, dan pecahan korral. Pantai Elak-elak masuk dan berdekatan

dengan Formasi Aluvium (Qa), Formasi Pengulung (Tomp) yang terdiri dari breksi, lava, tuf dengan lensa batugamping yang mengandung mineral sulfida dan urat kuarsa, kemudian Formasi Ekas (Tme) yang terdiri dari batugamping/kalkarenit, setempat kristalin, kemudian Pantai Tangsi dan Pantai Pink yang masuk ke dalam Formasi Ekas (Tme) dan dekat dengan Formasi Aluvium (Qa).

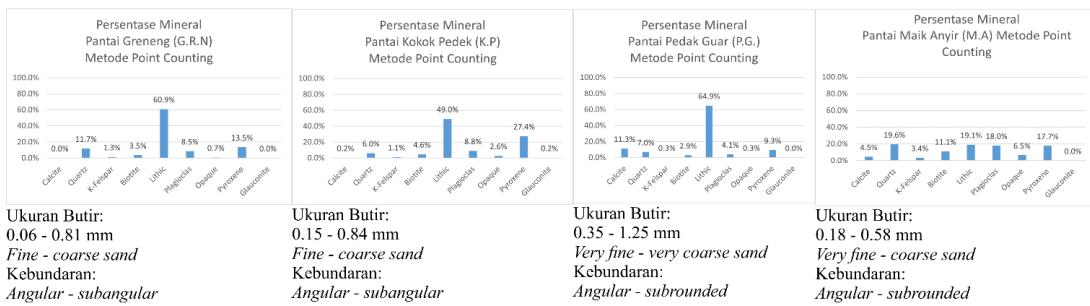
Pantai-pantai tersebut walaupun terpencar di penjuru pulau memiliki kesamaan yaitu masuk atau mendekati Formasi Aluvium (Qa) dan atau masuk ke dalam Formasi Ekas (Tme). Pantai Pandawa yang berada pada barat laut Pulau Lombok terletak pada tanjung yang dikelilingi oleh banyak pulau yang dipenuhi korall seperti Gili Meno, Gili Air, dan Gili Trawangan. Pantai Elak-elak yang berada pada sebelah barat daya Pulau Lombok dikelilingi oleh pulau-pulau kecil penuh korall yang disebut gili (Gili Tangkok, Gili Suda, dan Gili Labur). Pantai Tangsi dan Pantai Pink berada di dekat perbukitan batugamping dan dekat dengan daerah yang dipenuhi korall pada bagian utara daerah tersebut.

Kelompok 4

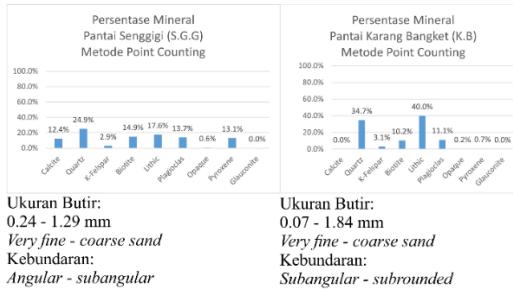
Kelompok 4 terletak pada bagian selatan Pulau Lombok dan terdiri dari Pantai Pasing dan Pantai Kuta. Pantai ini memiliki kandungan mineral kalsit, mineral kuarsa, mineral K-feldspar, mineral biotit, fragmen litik, mineral plagioklas, mineral opak, mineral piroksen dan mineral glaukonit, didominasi oleh mineral kalsit dan litik. Kelompok 4 memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8.

Secara geologi, Pantai Pasing dan Pantai Kuta masuk ke dalam dan/atau berdekatan dengan (1) Formasi Pengulung (Tomp) yang terdiri dari breksi, lava, tuf dengan lensa batugamping yang mengandung mineral sulfida dan urat kuarsa, (2) Batuan Terobos (Tmi) yang terdiri dari dasit dan basalt, (3) Formasi Kawangan (Tomk) yang terdiri dari yang terdiri dari perselingan batupasir, kuarsa, batuempung dan breksi, (4) Formasi Ekas (Tme) yang terdiri dari batugamping/kalkarenit, setempat kristalin, serta (5) Formasi Aluvium (Qa) yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut, dan pecahan korral.

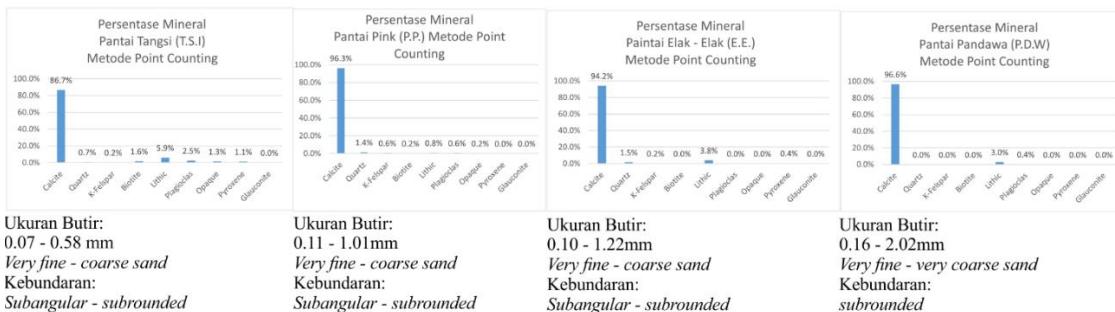
Kelompok 4 merupakan kelompok gabungan dari kelompok yang didominasi oleh mineral kalsit serta fragmen litik. Apabila dilihat pada peta geologi yang dibuat oleh Mangga et al. (1994), bagian selatan Pulau Lombok dilindungi oleh daerah korall yang membentang dari bagian barat daya pulau hingga bagian tenggara pulau yang menyebabkan pasir pantai pada daerah selatan memiliki banyak kandungan kalsit. Sedangkan untuk banyaknya kandungan fragmen litik dikarenakan dekatnya dengan Formasi Pengulung (Tomp) yang terdiri dari breksi, lava, tuf dengan lensa batugamping yang mengandung mineral sulfida dan urat kuarsa. Kedua pantai ini memiliki perbedaan walaupun sama-sama didominasi oleh mineral kalsit dan fragmen litik: Pantai Pasing memiliki kandungan litik lebih banyak dari pada mineral kalsit, sedangkan Pantai Kuta sebaliknya. Banyaknya fragmen litik pada Pantai Pasing bisa disebabkan oleh dekatnya lokasi pantai dengan Formasi Batuan Terobos (Tmi) dan Formasi



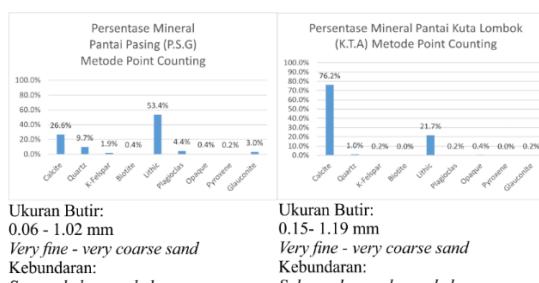
Gambar 5. Variasi komposisi mineral pada pantai-pantai Kelompok 1 dalam bentuk histogram.



Gambar 6. Variasi komposisi mineral pada pantai-pantai Kelompok 2 dalam bentuk histogram.



Gambar 7. Variasi komposisi mineral pada pantai-pantai Kelompok 3 dalam bentuk histogram.



Gambar 8. Variasi komposisi mineral pada pantai-pantai Kelompok 4 dalam bentuk histogram.

Kawangan (Tomk) sedangkan Pantai Kuta memiliki posisi lebih dekat dengan Formasi Aluvium (Qa) dan Formasi Penggulung (Tomk).

5. Kesimpulan

Berdasarkan variasi warna, ukuran butir, bentuk butir, dan kandungan mineral, pasir pantai Pulau Lombok dapat dibagi menjadi 4, yaitu: Kelompok 1 memiliki warna umum hitam dengan bercak kristal mengkilap, didominasi oleh mineral mafik serta fragmen litik, memiliki ukuran butir *fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *angular* hingga *subangular*, serta dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik. Kelompok 2 memiliki warna umum keabuan dengan bercak mengkilap, didominasi oleh mineral intermediat hingga felsik dan fragmen litik, memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded* dan dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik. Kelompok 3 memiliki warna umum putih kecokelatan dengan bercak hitam dan merah, didominasi oleh mineral kalsit, memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*, serta dipengaruhi oleh aktivitas erosi karang penghalang pada bagian selatan. Kelompok 4 memiliki warna umum putih

vulkanik. Kelompok 2 memiliki warna umum hitam keabuan dengan bercak mengkilap, didominasi oleh mineral intermediat hingga felsik dan fragmen litik, memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded* dan dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik. Kelompok 3 memiliki warna umum putih kecokelatan dengan bercak hitam dan merah, didominasi oleh mineral kalsit, memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*, serta dipengaruhi oleh aktivitas erosi karang penghalang pada bagian selatan. Kelompok 4 memiliki warna umum putih

keabu-abuan, didominasi oleh mineral kalsit dan litik, memiliki ukuran butir *very fine* hingga *very coarse sand*, serta memiliki derajat kebundaran *subangular* hingga *subrounded*, serta dipengaruhi oleh aktivitas erosi batuan vulkanik dan erosi karang penghalang pada bagian selatan.

Sumber sedimentasi pasir pantai dapat berasal dari batuan sekitar lokasi pengambilan maupun material organik dari laut.

Daftar Pustaka

- Boggs, S. (2006). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. 4th ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson Prentice Hall.
- Mangga, S. A., Atmawinata, S., Hermanto, B., Setyogroho, B. & Amin, T.C. (1994). *Peta Geologi Lembar Lombok*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Powers, M.C. (1953). A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 23. <https://doi.org/10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D>

Pemantauan Perubahan Tahanan Jenis Listrik Tanah Akibat Pemberian Pupuk Jenis NPK, Urea, ZA dan ZK pada Lahan Pertanian Terkondisi Menggunakan Alat Geolistrik Sederhana

Mujahid Najib Robbani* dan Supriyanto

Program Studi Geofisika, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia
*Narahubung: mujahid.najib@gmail.com

Abstrak

Sebagai negara agraris, perkembangan pertanian di Indonesia semakin maju. Dampak buruk dari kemajuan pertanian ini adalah terjadinya degradasi lahan. Salah satu penyebab degradasi lahan adalah pemakaian pupuk yang berlebih pada lahan. Metode geofisika dapat digunakan dalam bidang lingkungan dan pertanian. Penelitian ini menggunakan metode tahanan jenis listrik untuk memantau perubahan nilai tahanan jenis listrik tanah akibat pemberian pupuk jenis NPK, Urea, ZA, dan ZK ke dalam tanah. Penelitian ini menggunakan konfigurasi Wenner dengan panjang lintasan 3 meter, menggunakan 16 elektroda dengan jarak antar elektroda 20 cm. Penelitian ini menggunakan lahan pertanian di daerah Magetan, Jawa Timur dengan ukuran 4,5 m x 8,5 m. Lahan tersebut dibagi menjadi 4 area/blok kemudian masing-masing area akan diberikan empat jenis pupuk yang berbeda. Keempat jenis pupuk dilarutkan dalam air dengan perbandingan 1 gram pupuk : 10 ml air. Pengukuran tahanan jenis listrik dilakukan 5 kali yaitu sebelum pemberian pupuk serta 3 hari, 5 hari, 7 hari, dan 10 hari setelah pemberian pupuk. Pengukuran tahanan jenis listrik ini menggunakan alat geolistrik sederhana dengan menggunakan dua buah multimeter untuk mengukur arus dan tegangan dengan sumber tegangan 12 V. Hasil pengolahan data resistivitas dalam penampang 2 dimensi menunjukkan dalam rentang waktu 10 hari nilai resistivitas tanah mengalami penurunan.

Kata kunci: Geolistrik; Tahanan jenis listrik; *Agricultural geophysics*

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai negara tropis dan agraris menjadikan sektor pertanian menjadi salah satu sektor unggulan pembangunan di Indonesia (Warsani, 2013). Revolusi hijau pada 1970 mengubah teknik pertanian dengan mengganti tanaman lokal dengan tanaman tipe baru yang lebih produktif dan tahan dengan hama penyakit (Sumarno, 2006). Perkembangan yang masif di bidang pertanian memiliki dampak negatif terhadap lahan salah satunya terjadinya degradasi lahan di Indonesia.

Di Indonesia luas wilayah yang mengalami degradasi sekitar 48,2 juta ha atau 25,1% dari luas wilayah Indoensia (Wahyunto & Dariah, 2014). Salah satu penyebab degradasi lahan adalah penggunaan pupuk anorganik dan pestisida yang berlebihan. Dua tersebut dapat mematikan organisme tanah sehingga kesuburan alami biologi tanah menurun (Minarsih & Hanudin, 2020).

Untuk mengidentifikasi keberadaan zona degradasi lahan dapat menggunakan beberapa metode salah satunya menggunakan metode geofisika (geolistrik). Metode geofisika termasuk dalam salah satu metode baru yang digunakan dalam pertanian dan lingkungan (Picuno et al., 2015).

Sudah banyak penelitian yang dilakukan untuk aplikasi dibidang tersebut diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Turki et al. (2019) menggunakan Electrical Resistivity Tomography (ERT) untuk mengakaracterisasi tanah pertanian setelah dilakukan pemupukan dan penelitian Santoso et. al. (2015), yang mengidentifikasi perubahan nilai resistivitas listrik tanah gambut akibat penyemprotan herbisida. Metode geolistrik juga digunakan untuk mengidentifikasi polutan di daerah pertanian dan

perkebunan misalnya mengidentifikasi sebaran limbah kelapa sawit di daerah Kalimantan Barat dengan metode geolistrik (Suryani et. al., 2020).

Penggunaan metode geolistrik seringkali dianggap sebagai metode yang membutuhkan biaya yang mahal dalam eksplorasi geofisika. Dalam menjalankan eksplorasi geolistrik dengan menggunakan alat resistivitas komersial dapat menghabiskan biaya sebesar \$600 atau sekitar Rp8.000.000 untuk sekali eksplorasi. Sedangkan dengan menggunakan alat geolistrik sederhana, hanya menghabiskan biaya sebesar \$50–100 atau sekitar Rp700.000–1.500.000 untuk sekali eksplorasi (Bevan, 2002). Harga instrumen geolistrik dapat berkisar diantara \$5000–20,000, sedangkan alat geolistrik sederhana memiliki harga <\$250 (Clark & Page, 2011). Oleh karena itu, penulis mencoba menggunakan alat geolistrik sederhana dalam penelitian ini.

1.1. Tujuan Penelitian

- Mengetahui perubahan nilai tahanan jenis listrik tanah sebelum dan sesudah pemberian pupuk NPK, Urea, ZA, dan ZK.
- Mengetahui faktor-faktor yang menyebabkan perubahan nilai tahanan jenis listrik tanah akibat pemberian pupuk.
- Mengetahui waktu yang dibutuhkan pupuk untuk bereaksi secara optimal dengan tanah berdasarkan nilai tahanan jenis listrik tanah.

1.2. Lokasi Penelitian dan Geologi Regional

Lokasi penelitian dilakukan pada lahan pertanian terbuka yang berada di Kel. Sampung, Kec. Kawedanan,

Kabupaten Magetan, Jawa Timur. Pengambilan data dilakukan selama 14 hari dengan periode 21 Mei 2021–4 Juni 2021. Berdasarkan kondisi geologi, Kabupaten Magetan terletak pada zona tengah yang terbentuk akibat pergerakan Lempeng Eurasia yang menumbuk Lempeng Pasifik. Sehingga pada zona tengah terbentuk banyak gunung api besar. Gunung Lawu menjadi salah satu gunung yang terbentuk pada zona tengah, dan termasuk dalam gunung api kuarter yang berbentuk strato. Kabupaten Magetan berada di daerah sisi timur Gunung Lawu, dengan topografi pegunungan dan berbukit pada sisi barat dan dataran rendah pada daerah timur. Daerah penelitian berada pada daerah timur Kabupaten Magetan dan berada pada dataran rendah (Dinas Sumber Daya Alam Magetan, 2018).

Lokasi penelitian terletak pada Formasi Lahar Lawu dengan jenis batuan andesit basalt, batuapung beragam ukuran yang bercampur dengan pasir gunung api. Selain itu, lokasi penelitian terletak di utara dari Formasi Nglanggran yang berumur Miosen awal dengan dominasi andesit-basalt, diduga terbentuk di lingkungan darat hingga peralihan laut dangkal yang tersebar di daerah Pacitan dan Surakarta.

Berdasarkan pengamatan langsung di lapangan, wilayah penelitian memiliki jenis tanah grumosol. Buringh (1983) dalam Mulyanto (2013) mendefinisikan tanah grumosol adalah jenis tanah yang berupa tanah liat yang memiliki keadaan liat >30% dan memiliki warna yang gelap. Buol et. al. (2013) dalam Mulyanto (2013) juga menjelaskan ciri tanah grumosol memiliki jenis liat dengan mineral montmorinolith yang memiliki sifat mengembang saat basah dan mengkerut saat kering sehingga tanah menjadi sangat lengket ketika musim penghujan dan menjadi keras dan timbul retakan saat musim kemarau.

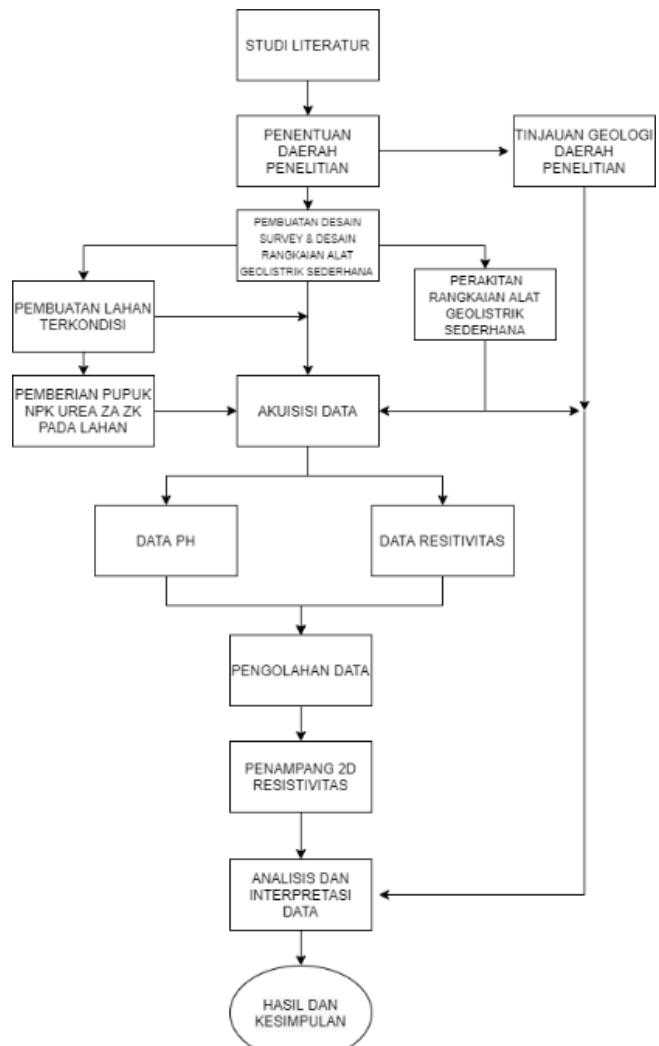
2. Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1, secara garis besar dimulai dari studi literatur, akuisisi data, pengolahan data, analisis dan interpretasi data. Proses akuisisi data mengambil 2 parameter yaitu tahanan jenis listrik dan juga pH tanah. Tahanan jenis listrik diperoleh dengan menggunakan alat geolistrik sederhana dan pH diperoleh dari alat pengukur pH tanah. Desain pengukuran dalam penelitian ini menggunakan lahan $4.5\text{ m} \times 8.5\text{ m}$ yang terbagi dalam empat area (blok) penelitian (Gambar 2). Pengukuran metode tahanan jenis dilakukan sebanyak 5 kali pengukuran yaitu sebelum pemberian pupuk, dan pada hari ke-3, ke-5, ke-7 dan ke-10 setelah pemberian pupuk.

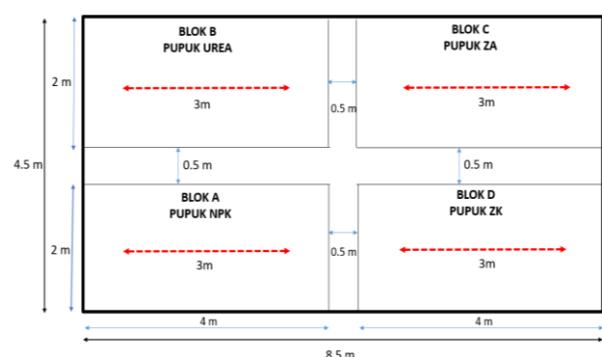
Pada penelitian ini menggunakan metode tahanan jenis dua dimensi konfigurasi Wenner. Panjang lintasan adalah 300 cm atau 3 m dengan jarak spasi antar elektroda adalah 20 cm dengan menggunakan 16 elektroda dan diukur menggunakan metode *single channel* dengan jumlah titik datum 35. Pemilihan panjang lintasan dan jarak spasi tersebut dilakukan karena kedalaman target pengukuran diperkirakan <1 meter.

Pupuk yang digunakan dalam penelitian yaitu pupuk NPK, Urea, ZA, dan ZK dilarutkan dalam air dengan perbandingan konsentrasi 1 gram pupuk : 10 ml air. Pupuk

NPK, Urea, ZA, dan ZK sebanyak 1 kg dicampurkan ke dalam 10 liter air, kemudian pupuk diaduk hingga larut dan disiramkan pada area yang telah dibuat sebelumnya.



Gambar 1. Metodologi penelitian.



Gambar 2. Desain survei penelitian.

2.1. Metode Tahanan Jenis Listrik

Metode tahanan jenis listrik merupakan salah satu jenis metode dalam geolistrik untuk mengukur tahanan jenis suatu benda dan material di bawah permukaan. Prinsip metode tahanan jenis yaitu menginjeksi aliran arus listrik pada bawah permukaan tanah dengan menggunakan dua

elektroda arus kemudian diukur nilai beda potensial menggunakan dua elektroda potensial. Dari nilai kuat arus dan beda potensial inilah akan dapat diketahui nilai resistivitas semu dari suatu benda.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Keterangan:

ρ : Resistivitas semu

K : Faktor geometri dari konfigurasi yang digunakan

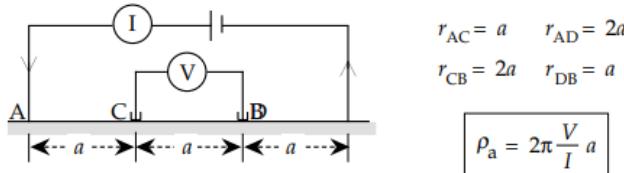
ΔV : Beda potensial yang terukur

I : kuat arus yang mengalir

2.2. Konfigurasi Wenner

Pada penelitian ini menggunakan metode tahanan jenis konfigurasi Wenner. Konfigurasi Wenner memiliki jarak yang sama antara elektroda potensial dan elektroda potensial arus yaitu sebesar a , dan memiliki faktor geometri $K=2\pi a$ (Gambar 3). Alasan penggunaan konfigurasi ini adalah memudahkan dalam proses akuisisi data dengan menggunakan metode *single channel*, memiliki resolusi vertikal yang baik, dan sensitivitas perubahan lateral yang baik. Mengingat kedalaman objek pengukuran <1 meter.

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} a \quad (2)$$



Gambar 3. Konfigurasi Wenner (Lowrie, 2007).

2.3. Kelistrikan Batuan

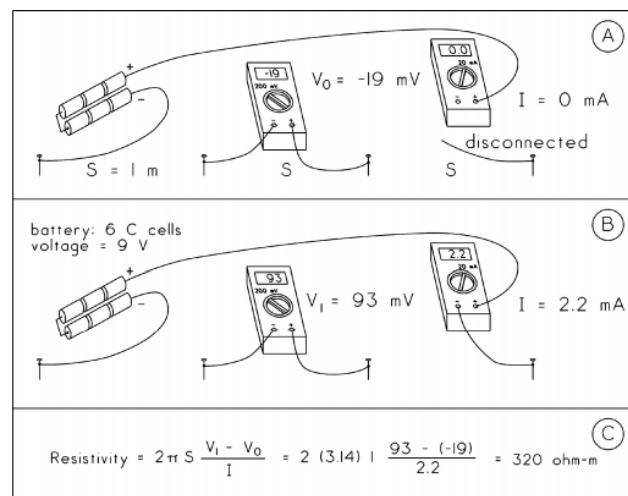
Arus listrik yang mengalir dalam suatu bahan dan material disebabkan oleh 3 jenis konduksi yaitu konduksi elektronik, konduksi dielektrik, dan konduksi elektrolitik. Konduksi elektronik merupakan konduksi yang terjadi di batuan, logam atau kristal yang memiliki jumlah elektron bebas yang banyak. Hal tersebut menyebabkan arus listrik lebih mudah mengalir pada material tersebut. Konduksi dielektrik merupakan konduksi yang terjadi dalam suatu bahan yang memiliki jumlah elektron bebas yang sedikit bahkan hampir tidak ada. Konduksi ini terjadi akibat pengaruh dari medan listrik luar sehingga memungkinkan terjadi polarisasi yang menyebabkan arus listrik dapat mengalir. Konduksi elektrolitik merupakan konduksi yang biasa terjadi pada wujud fluida ataupun *liquid*. Faktor yang berpengaruh adalah jenis dan volume fluida serta susunan dari pori-pori batuan (Telford et al., 1990).

Faktor yang dapat mempengaruhi nilai tahanan jenis listrik menurut Prasetyawati (2004) dalam Hurriyah & Jannah (2015) sebagai berikut: (1) Komposisi mineral batuan, semakin tinggi kandungan mineral lempung maka resistivitas semu semakin rendah; (2) Kandungan air dapat menurunkan nilai resistivitas; (3) Ukuran butir penyusun batuan, karena semakin besar butir maka nilai resistivitas makin kecil; (4) Kepadatan, semakin padat maka nilai resistivitas semakin besar; (5) Kelarutan garam yang dapat

meningkatkan kadar ion dalam air dan menurunkan nilai resistivitas.

2.4. Alat Geolistrik Sederhana

Bevan (2002) dalam penelitiannya mengenai alat geolistrik sederhana menggunakan 2 buah multimeter untuk mengukur tegangan dan arus listrik. Kemudian menggunakan dua pasang elektroda (empat buah elektroda) yang berfungsi sebagai elektroda arus dan elektroda potensial yang dihubungkan dengan kabel dengan baterai sebagai sumber tegangan dan arus. Pengukuran nilai potensial dilakukan dua kali yaitu sebelum dialiri oleh arus listrik (V_0) dan saat dialiri arus listrik (V_1) sehingga ketika $V_1 - V_0$ akan menghasilkan ΔV . Besarnya nilai ΔV akan digunakan untuk menghitung nilai resistivitas semu seperti pada Persamaan 2. Pengukuran arus listrik dilakukan satu kali saat dialiri oleh arus listrik (Bevan, 2002). Ilustrasi penggunaan alat geolistrik sederhana seperti terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi alat geolistrik sederhana (Bevan, 2002).

2.5. Jenis Pupuk

Pupuk NPK merupakan suatu pupuk majemuk karena pupuk NPK mengandung dua jenis atau dari lebih unsur hara. Kandungan unsur hara dalam pupuk NPK adalah nitrogen (N) sebesar 16% dalam NH_3 , kemudian fosfor (P) sebesar 16% dalam senyawa P_2O_5 , serta mengandung Kalium (K) sebesar 15% dalam K_2O . Pupuk urea dengan senyawa kimia $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) merupakan pupuk kimia yang mengandung unsur Nitrogen (N) yang kandungannya 46% (Purwanto et al., 2014).

Pupuk Zwavelzure Ammoniak (ZA) dengan senyawa kimia $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ atau bisa disebut ammonium sulfat adalah pupuk nitrogen berkendar rendah, memiliki unsur nitrogen lebih rendah daripada urea. Pupuk ZA mengandung nitrogen 21% dan sulfur 24%. Pupuk ZA bersifat mudah larut dalam air dan dapat diaplikasikan pada semua jenis tanaman. (Purwanto et al., 2014). Pupuk Zwavel Kalium (ZK) dengan senyawa kimia (K_2SO_4) atau disebut sebagai kalium sulfat bisa juga disebut sebagai SOP merupakan jenis pupuk yang memiliki kandungan K_2O sebesar 48-52%. Sifat dari pupuk ZK adalah dapat mudah larut dengan air dan tidak mudah terbakar.

3. Hasil

3.1. Hasil Pengukuran pH & Moisture Air Tanah

Sebelum dilakukan pengukuran, peneliti terlebih dahulu mengukur pH tanah dan *moisture* tanah. Sebelum dilakukan pemberian pupuk, hasil pengukuran pH tanah masing-masing petak blok bernilai 7 kemudian setelah diberikan pupuk nilai pH menurun seperti terlihat pada Tabel 1.

Sedangkan pengukuran *moisture* tanah menunjukkan hasil yang sama, yaitu bernilai 10 pada hari ke-0 dan tidak mengalami perubahan hingga hari ke-10 pemberian pupuk. Pengukuran pH dan *moisture* tanah ini menggunakan alat ukur pH dan *moisture* tanah yang digunakan dalam pertanian.

Tabel 1. Hasil pengukuran pH dan *moisture* tanah.

	pH Tanah				Moisture Tanah			
	A (NPK)	B (UREA)	C (ZA)	D (ZK)	A (NPK)	B (UREA)	C (ZA)	D (ZK)
SEBELUM KONDISI	7	7	7	7	10	10	10	10
+ 3 hari	6	7	7	7	10	10	10	10
+ 5 hari	6	6	7	6	10	10	10	10
+ 7 hari	5	6	6	6	10	10	10	10
+ 10 hari	5	5.5	5	5	10	10	10	10

3.2. Hasil Resistivitas Tanah Pupuk NPK

Berdasarkan gambar penampang pada Gambar 5a, terlihat terjadi penurunan resistivitas dari sebelum pemberian pupuk NPK hingga hari ke-7, dan terjadi kenaikan resistivitas dari hari ke-7 hingga hari ke-10 setelah pemupukan.

Berdasarkan Gambar 5b, sebaran data kuantitatif nilai resistivitas tanah pada pupuk NPK secara rata-rata mengalami penurunan. Penurunan nilai resistivitas yang cukup signifikan terjadi pada hari ke-5 hingga hari ke-7 sebesar 3 Ωm. Hal tersebut menunjukkan bahwa pupuk NPK pada hari ke-5 hingga hari ke-7 bereaksi secara optimal dengan tanah.

3.3. Hasil Resistivitas Tanah Pupuk Urea

Berdasarkan gambar penampang pada Gambar 5c, terlihat terjadi penurunan resistivitas dari sebelum pemberian pupuk urea hingga hari ke-7, dan terjadi sedikit kenaikan resistivitas dari hari ke-7 hingga hari ke-10 setelah pemupukan.

Berdasarkan Gambar 5d, sebaran data kuantitatif nilai resistivitas tanah pada pupuk Urea secara rata-rata mengalami penurunan pada hari ke-3, ke-5, dan ke-7. Penurunan nilai resistivitas yang cukup signifikan terjadi pada hari ke-3 hingga hari ke-5 sebesar 3 Ωm. Hal tersebut menunjukkan bahwa pupuk Urea pada hari ke-3 hingga hari ke-5 bereaksi secara optimal dengan tanah.

3.4. Hasil Resistivitas Tanah Pupuk ZA

Berdasarkan Gambar 5e, pada penampang terlihat terjadi penurunan resistivitas dari sebelum pemberian pupuk ZA hingga hari ke-7, dan terjadi sedikit kenaikan resistivitas dari hari ke-7 hingga hari ke-10 setelah pemupukan.

Berdasarkan Gambar 5f, sebaran data kuantitatif nilai resistivitas tanah pada pupuk ZA secara rata-rata mengalami penurunan pada hari ke-3, ke-5, dan ke-7.

Penurunan nilai resistivitas yang cukup signifikan terjadi pada hari ke-5 hingga hari ke-7 sebesar 4 Ωm, hal tersebut menunjukkan bahwa pupuk ZK pada hari ke-5 hingga hari ke-7 bereaksi secara optimal dengan tanah berdasarkan nilai resistivitasnya.

3.4. Hasil Resistivitas Tanah Pupuk ZK

Berdasarkan Gambar 5g, pada penampang nilai resistivitas mengalami kenaikan pada hari ke-3 setelah pemberian pupuk, kemudian mengalami penurunan pada hari ke-5, ke-7, dan ke-10.

Berdasarkan Gambar 5h, sebaran data kuantitatif nilai resistivitas tanah, pada hari ke-3 setelah pemberian pupuk ZK nilai rata-rata resistivitas mengalami kenaikan dibandingkan sebelum pemberian pupuk ZK. Penurunan nilai resistivitas yang cukup signifikan terjadi pada hari ke-7 hingga hari ke-10 sebesar 8 Ωm, hal tersebut menunjukkan bahwa pupuk ZK pada hari ke-7 hingga hari ke-10 bereaksi secara optimal dengan tanah berdasarkan nilai resistivitasnya.

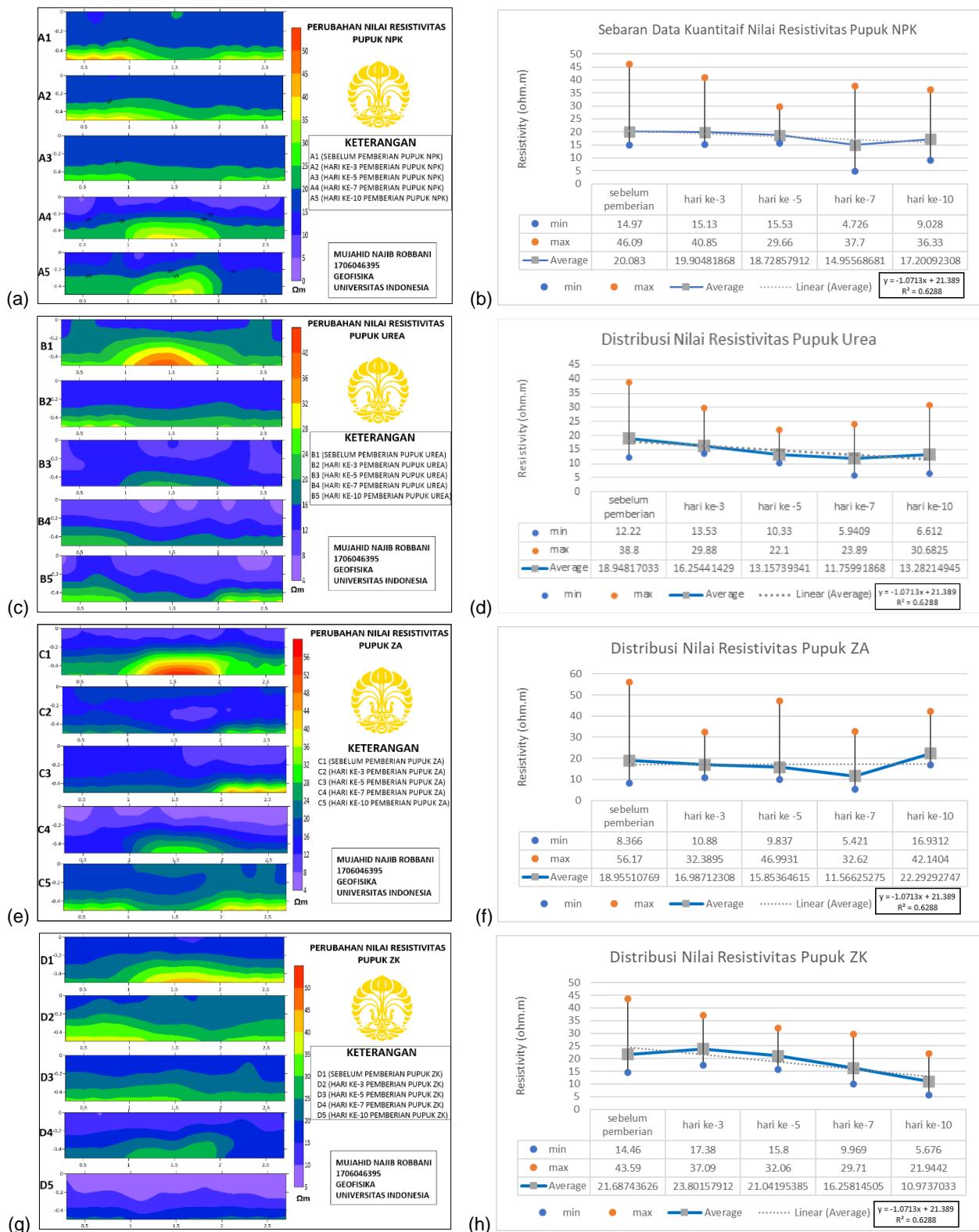
4. Pembahasan

Pemberian pupuk NPK, Urea, ZA dan ZK pada tanah menyebabkan penurunan nilai pH tanah. Pupuk NPK dapat menurunkan pH tanah karena sulfur yang terkandung dalam pupuk ini akan bereaksi dengan oksigen, karbondioksida, dan molekul air didalam lahan sawah (tanah) akan menghasilkan ion-ion sulfat dan sejumlah ion-ion H⁺ sehingga dapat menurunkan pH dalam tanah. Strasast et al. (2003) dalam Kaya (2014) juga menjelaskan bahwa pemberian pupuk majemuk jenis NPK dapat menurunkan pH tanah disebabkan pupuk ini mengandung sulfur dan ammonium yang akan terhidrolisis menghasilkan ion H⁺ dan menyebabkan pH tanah menurun (Kaya, 2014).

Pemberian pupuk urea dalam tanah dapat mengakibatkan penurunan nilai pH. Foth (1995), dalam Firmansyah & Sumarni (2013) menjelaskan bahwa pupuk yang terdapat nitrogen dalam bentuk amonia dapat berubah menjadi suatu nitrat yang mengakibatkan penurunan pH tanah. Nitrifikasi berperan dalam memproduksi ion-ion hidrogen H⁺ dan berpotensi untuk meningkatkan kemasaman dalam tanah. Hal tersebut juga berlaku pada pupuk ZA karena pupuk ZA juga mengandung nitrogen dan sulfur sama seperti NPK dan urea.

Dengan kedalaman lapisan pengukuran resistivitas sekitar 0.5 m maka jenis lapisan tanah dianggap sebagai 1 jenis lapisan homogen. Perbedaan nilai resistivitas bukan disebabkan karena perbedaan jenis litologi maupun struktur dari bawah permukaan. Sehingga, perbedaan nilai resistivitas pada penelitian ini lebih dapat disebabkan oleh kepadatan, kadar air, dan kelarutan kimia (larutan pupuk NPK, Urea, ZA, dan ZK).

Pengukuran *moisture* tanah menggunakan alat pengukur *moisture* yang dilakukan pada sebelum pemberian pemupukan hingga hari ke-10 setelah pemberian pupuk menunjukkan hasil yang sama yaitu bernilai 10 yang berarti tanah pada level yang basah. Oleh karena itu, kadar air dalam tanah dianggap pada level yang sama, sehingga perubahan nilai resistivitas pada sebelum pemupukan hingga hari ke-10 setelah pemupukan lebih



Gambar 5. Penampang perubahan nilai resistivitas tanah pada pupuk (a) NPK, (c) Urea, (e) ZA, dan (g) ZK dan sebaran data kuantitatif nilai resistivitas tanah pupuk (b) NPK, (d) Urea, (f) ZA, dan (h) ZK.

disebabkan akibat larutan pupuk NPK, Urea, ZA dan ZK. Akan tetapi, kadar air tetap berpengaruh pada perubahan nilai resistivitas ini mengingat pengambilan data dilakukan pada lahan terbuka serta tidak diketahui secara akurat kadar air dalam tanah, mulai sebelum pemberian pupuk hingga hari ke-10 pemberian pupuk.

Pemberian pupuk yang mengandung urea/nitrogen dalam tanah dapat meningkatkan reaksi nitrifikasi dalam

tanah dengan membebaskan ion hidrogen sehingga pH tanah menjadi turun dan terbentuk nitrat yang tinggi. Akan tetapi, berlaku sebaliknya untuk nilai daya hantar listrik (*conductivity*), ketika pupuk bereaksi maka nitrat yang merupakan anion dari asam kuat bila dalam jumlah yang banyak dapat menghantarkan listrik yang ditandai dengan nilai konduktivitas yang tinggi (Nainggolan et al., 2009). Resistivitas berbanding terbalik dengan konduktivitas,

maka ketika pupuk telah bereaksi menghasilkan nitrat maka nilai resistivitas atau tahanan jenis akan menjadi turun/rendah.

Pupuk ZA (ammonium sulfat) dan pupuk ZK (kalium sulfat) juga termasuk dalam garam anorganik sehingga dapat digolongkan dalam larutan elektrolit kuat karena larutan tersebut menghasilkan ion-ion yang terurai secara sempurna. Larutan tersebut akan menghasilkan ion positif dalam bentuk kation dan ion negatif dalam bentuk anion yang dapat mengantarkan arus listrik.

Konduksi arus listrik yang memungkinkan terjadi adalah konduksi elektrolitik yang terjadi pada fluida/*liquids*. Jika dalam batuan terdapat pori-pori yang terisi larutan elektrolitik, arus listrik akan mengalir akibat adanya ion-ion tersebut (Telford et al., 1990). Oleh karena itu, keberadaan ion-ion dalam tanah yang mengisi ruang antar pori tanah dapat bergerak bebas, dan memungkinkan tanah untuk mengalirkan arus listrik sehingga konduktivitas tanah meningkat. Hasilnya adalah nilai resistivitas tanah akan menurun ketika pupuk bereaksi dengan tanah.

5. Kesimpulan

Setelah pemberian pupuk NPK, Urea, ZA, dan ZK dalam rentang 10 hari, nilai resistivitas tanah cenderung mengalami penurunan jika dibandingkan dengan sebelum pemberian pupuk NPK, Urea, ZA, dan ZK.

Perubahan nilai resistivitas tanah diakibatkan oleh reaksi antara pupuk NPK, Urea, ZA, dan ZK dengan tanah yang menghasilkan ion-ion positif dan negatif dalam bentuk anion-kation. Larutan pupuk tersebut kemudian mengisi ruang antarpori dalam tanah yang menyebabkan konduktivitas listrik tanah meningkat dan akibatnya resistivitas tanah menjadi turun.

Berdasarkan tingkat nilai penurunan resistivitas, pupuk NPK bereaksi optimal dengan tanah pada 5-7 hari setelah pemberian pupuk. Pupuk urea bereaksi optimal dengan tanah pada 3-5 hari setelah pemberian pupuk. Pupuk ZA bereaksi optimal dengan tanah pada 5-7 hari setelah pemberian pupuk. Pupuk ZK bereaksi optimal dengan tanah pada 7-10 hari setelah pemberian pupuk.

Daftar Pustaka

- Clark, A.J., & Page, R. (2011). Inexpensive Geophysical Instruments Supporting Groundwater Exploration in Developing Nations. *Journal of Water Resource and Protection*, 3(10), 768-780.
- Dinas Sumber Daya Alam Magetan. (2018). *Sumber Daya Alam Kabupaten Magetan Dalam Angka*. Magetan: Sekertariat Daerah Kabupaten Magetan.
- Bevan, B.W. (2002). *A Simple Resistivity Meter*. Weems, Virginia: Geosight Technical Report No. 8.
- Firmansyah & Sumarni. (2013). Pengaruh Dosis Pupuk N dan Varietas Terhadap pH Tanah, N-Total Tanah, Serapan N, dan Hasil Umbi Bawang Merah (*Allium ascalonicum L.*) pada Tanah Entisols-Brebes Jawa Tengah. *J. Hort.* 23(4).
- Hurriyan & Jannah, R. (2015). Analisis Struktur Lapisan Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geolistrik (Studi Kasus Pada Kampus iii IAIN Imam Bonjol Padang Di Sungai Bangek Kecamatan Koto Tangah. *Jurnal Spasial*, 28-39.
- Kaya, E. (2014). Pengaruh Pupuk Kandang dan Pupuk NPK Terhadap pH dan K-Tersedia Tanah Serta Serapan K, Pertumbuhan dan Hasil Padi Sawah (*Oryza Sativa L.*). *Agrinimal Jurnal Ilmu Ternak dan Tanaman*, 4(2), 45-52.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Zurich: Cambridge University Press.
- Minarsih, S. & Hanudin, E. (2020). Kualitas Tanah pada Beberapa Tipe Penggunaan Lahan. *Prosiding Seminar Nasional Pertanian Peternakan Terpadu ke-3*.
- Mulyanto, B.S. (2013). *Skripsi Kajian Rekomendasi Pemupukan Berbagai Jenis Tanah Pada Tanaman Jagung, Padi dan Ketela Pohon di Kabupaten Wonogiri*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Nainggolan, G.D., Suwardi, & Darmawan. (2009). Pola Pelepasan Nitrogen dari Pupuk Tersedia Lambat (Slow Release Fertilizer) Urea-Zeolit-Asam Humat. *Jurnal Zeolit Indonesia* 8(2), 94.
- Picuno, P., Sica, C., Tortora, A., & Statuto, D. (2015). New Technologies for the Sustainable Management and Planning of Rural Land and Environment. In A. V. (ed.), *The Sustainability of Agro-Food and Natural Resource Systems* (p. 321). Potenza, Italy: Springer.
- Purwanto, I., Suharti, E., & Sumantri, E. (2014). Menghitung Takaran Pupuk Untuk Percobaan Kesuburan Tanah. In B. P. Pertanian, *Petunjuk Teknis Pelaksanaan Penelitian Kesuburan Tanah* (p. 91).
- Santoso, P., Arman, Y., & Iwan, A. (2015). Identifikasi Perubahan Nilai resistivitas Tanah Gambut Akibat Penyemprotan Herbisida Sistem Kontak Memgunakan Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Dipole-Dipole. *Prisma Fisika* 3(3), 87-92.
- Sumarno. (2006). *Teknologi revolusi Hijau Lestari Untuk Ketahanan Pangan Nasional di Masa Depan*. Bogor: Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian.
- Suryani, Muliadi, & Zulfian. (2020). Identifikasi Sebaran Limbah Kelapa Sawit Di Dusun Panepat Desa Kuala Mandor A Menggunakan Metode Geolistrik. *Prisma Fisika* 8(1), 92-98.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Turki, N., Elaoud, A., Trabelsi, H. G., & Ismail. (2019). Agricultural Soil Characterization using 2D electrical resistivity tomography (ERT) after direct and intermittent digastate application. *Arabian Journal of Geosciences*, 423.
- Wahyunto & Dariah, A. (2014). Degradasdi Lahan di Indonesia: Kondisi Existing, Karakteristik, dan Penyeragaman Definisi Mendukung Gerakan Menuju Satu Peta. *Jurnal Sumberdaa Lahan* 8(2), 81-93.
- Warsani, H. (2013). *Kajian Pemanfaatan Lahan Sawah di Kecamatan Kuantan Tengah Kabupaten Kuantan Singigi*. Universitas Pendidikan Indonesia

Pemanfaatan Model Singkapan Geologi Virtual untuk Menggantikan Kuliah Lapangan di Cipamingkis, Kabupaten Bogor

Felix M. H. Sihombing*, Dwiky Guruh Augusty, Elisha Christy Rotua Tobing, dan Emir Rakhim

Program Studi Geologi, Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia,
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia
*Narabung: felix.sihombing@ui.ac.id

Abstrak

Kuliah lapangan penting dilakukan dalam kuliah geologi struktur. Dalam berbagai kondisi, kegiatan kuliah lapangan tidak dapat dilakukan dan perlu digantikan oleh objek studi pengganti. Salah satu cara untuk menggantikan keberadaan singkapan sebagai objek studi adalah dengan membuat model singkapan geologi virtual. Akan tetapi, efektivitas penggunaan model singkapan virtual dalam kuliah lapangan sebenarnya masih belum diketahui dengan pasti. Studi ini akan memberikan komentar terhadap penggunaan model singkapan geologi virtual dalam kegiatan kuliah lapangan geologi struktur. Model dibuat berdasarkan singkapan geologi di Cipamingkis, Jawa Barat menggunakan metode fotogrametri. Model-model yang dihasilkan kemudian dibagikan ke kelompok mahasiswa untuk diinterpretasi. Interpretasi dari tiap kelompok kemudian dibandingkan untuk memahami manfaat penggunaan model singkapan digital dalam kegiatan kuliah lapangan virtual untuk mata kuliah geologi struktur. Hasil pengukuran dan interpretasi yang dilakukan oleh kelompok mahasiswa menunjukkan variasi yang lazim ditemukan pada pengukuran sebenarnya di lapangan. Hal ini diduga akibat adanya perbedaan ketelitian dalam melakukan observasi dan interpretasi geologi, yang lazim terjadi dalam kegiatan kuliah lapangan geologi struktur konvensional. Untuk itu dapat disimpulkan bahwa model singkapan digital dapat digunakan dalam kuliah lapangan geologi struktur virtual. Akan tetapi, dibutuhkan studi lebih lanjut untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan dari penggunaan metode ini.

Kata kunci: Cipamingkis; Geologi struktur; Fotogrametri; Model 3D

1. Pendahuluan

Kuliah lapangan merupakan aspek penting dalam kuliah geologi struktur. Hal ini dikarenakan disiplin geologi struktur sangat membutuhkan pemahaman informasi spasial secara tiga dimensi dari singkapan. Dibandingkan dengan pengamatan singkapan di lapangan, informasi yang berasal dari foto dua dimensi ini tidak akan mendapatkan hasil yang optimal.

Dalam berbagai situasi yang tidak diinginkan seperti pandemi atau bencana alam, kegiatan kuliah lapangan dapat terganggu atau dihentikan sama sekali. Hal ini akan menyulitkan kegiatan pembelajaran mengingat singkapan lapangan belum dapat digantikan oleh foto dua dimensi (2D). Untuk itu, diperlukan suatu media pembelajaran lain untuk mensubstitusi observasi singkapan secara tiga dimensi (3D) di lapangan secara langsung, seperti penggunaan model singkapan geologi virtual. Akan tetapi, efektivitas penggunaan model ini belum diketahui dengan baik.

Model singkapan geologi virtual merupakan suatu model 3D dari singkapan yang dapat ditemukan di permukaan. Model ini dapat dimanfaatkan untuk pendidikan, riset, dan diseminasi informasi ke publik dikarenakan model ini merekam informasi geometri dan tekstur dari singkapan sebenarnya (Roach & Scott, 2016). Model ini umumnya dibuat menggunakan metode fotogrametri (Jhonson et al., 2014; Aber et al. 2019) menggunakan foto yang diambil oleh *drone* ataupun kamera tangan. Model 3D lalu dikalibrasi agar orientasinya sesuai dengan orientasi di lapangan. Setelah itu, akan dilakukan pengukuran bidang-bidang perlapisan dan struktur geologi yang dapat diukur dari model 3D yang telah dihasilkan.

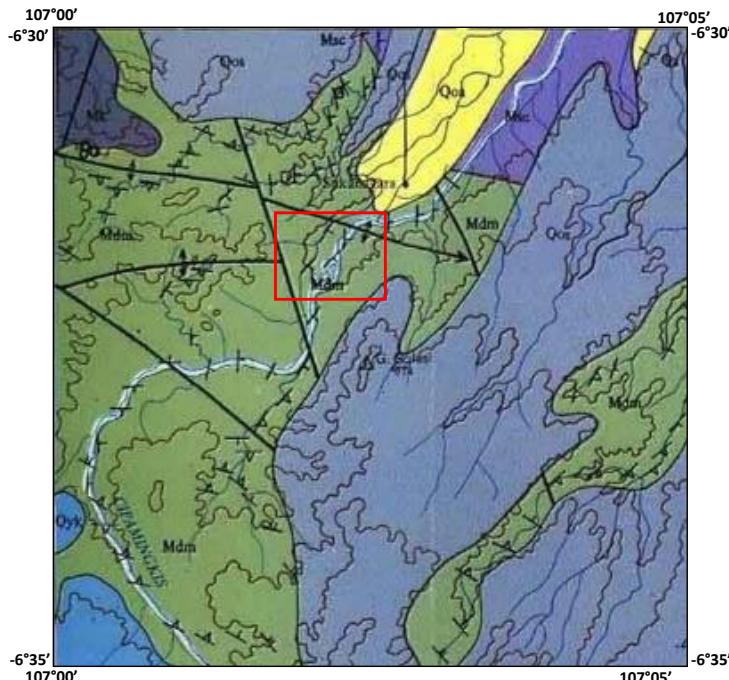
Studi ini bertujuan untuk menilai manfaat penggunaan model singkapan digital sebagai substitusi dari observasi di lapangan secara langsung. Model diberikan kepada beberapa kelompok mahasiswa, lalu tiap kelompok diminta untuk melakukan pengukuran bidang perlapisan dan struktur geologi dari model yang dibuat. Hasil pengukuran kemudian diplot menjadi pola jurus perlapisan dan hasil interpretasinya dibandingkan satu dengan yang lainnya. Pada akhirnya, hasil perbandingan ini dapat menentukan efektivitas penggunaan model singkapan 3D dalam kegiatan kuliah lapangan geologi struktur virtual.

Lokasi penelitian merupakan lokasi kuliah lapangan geologi struktur yang berada di Sungai Cipamingkis, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Lokasi ini dipilih untuk kegiatan kuliah lapangan geologi struktur dikarenakan dimensi batuan yang tersingkap luas serta dapat ditemukan berbagai fitur struktur geologi seperti bidang perlapisan, sesar, dan kekar yang idealnya dapat diselesaikan selama satu hari kegiatan lapangan.

2. Kondisi Geologi

Lokasi penelitian merupakan lokasi kuliah lapangan geologi struktur yang berada di Sungai Cipamingkis, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Daerah penelitian termasuk dalam zona fisiografi Bogor (van Bemmelen, 1949; Martodjojo, 2003) di mana pada zona ini dapat ditemukan antiklinorium Bogor.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Cianjur (Sudjatmiko, 1972), daerah penelitian merupakan bagian dari Anggota Napal dan Batupasir Kuarsa dari Formasi Jatiluhur. Pada anggota ini dapat ditemukan napal berwarna abu-abu tua, batulempung napalan, dan serpih lempungan. Dapat ditemukan pula sisipan-sisipan berupa batupasir kuarsa,



Gambar 1. Daerah penelitian dalam Peta Geologi Lembar Cianjur (kotak merah; dimodifikasi dari [6]). Mdm: Formasi Jatiluhur Anggota Napal dan Batupasir Kuarsa; Qos: Batupasir Tufaan dan Konglomerat; Msc: Formasi Subang, Anggota Batulempung; Qoa: Aluvium Tua; Mk: Batu Gamping Klapanunggal; Qyk: Breksi dan Lava di daerah Gunung Limo.

kuarsit, dan batu gamping napalan. Formasi Jatiluhur atau yang lebih dikenal sebagai Formasi Cibulakan ini memiliki umur Miosen Tengah (Koesoemadinata, 2020). Formasi bagian bawah kemungkinan terendapkan pada lingkungan laguna (*lagoon*) maupun *tidal flat*, sementara pada bagian tengah dan atas terendapkan pada lingkungan neritik (Martodjojo, 2003).

Daerah penelitian termasuk dalam daerah struktur Krawang Selatan (Martodjojo, 2003). Secara spesifik, daerah penelitian merupakan bagian dari suatu sayap antiklin yang berarah barat-barat laut-timur tenggara (Gambar 1), dengan *dip* mengarah ke barat daya (van Bemmelen, 1949). Meskipun demikian, pada area penelitian dan sekitarnya tercatat keberadaan perlapisan yang berarah cenderung utara-selatan. Selain dari itu terdapat sesar menganan (*dextral fault*) berarah timur laut-tenggara. Umur dari sesar dan antiklin di Krawang Selatan diperkirakan terbentuk pada umur N19 (Martodjojo, 2003).

3. Metode

Untuk menjawab permasalahan yang telah dideskripsikan sebelumnya, maka kegiatan penelitian dibagi menjadi tiga tahapan utama: pembuatan model singkapan tiga dimensi, interpretasi model tiga dimensi oleh mahasiswa, dan evaluasi interpretasi serta komentar terhadap efektivitas penggunaan model dalam kuliah lapangan virtual. Mahasiswa dibagi menjadi delapan kelompok yang terdiri dari 5 orang.

3.1. Pembuatan Model Singkapan Tiga Dimensi

Pembuatan model diawali dengan pengumpulan foto dua dimensi (Roach et al., 2020). Foto dikumpulkan menggunakan *drone* DJI Phantom Pro 4+. *Drone*

diterbangkan mengitari objek singkapan dan melakukan pengambilan foto dengan interval tiap dua detik. Selain itu, foto juga diambil dengan berbagai sudut inklinasi terhadap objek. Untuk mendapatkan tampilan singkapan secara menyeluruh, pada penelitian ini, foto diambil dengan inklinasi landai (20° – 45°), sedang (45° – 70°), dan curam (70° – 90°). Pada setiap objek, minimal diambil 80 foto dengan tingkat saling tindih sebesar 80% untuk setiap foto yang diambil. Foto yang diambil menggunakan *drone* sudah memiliki informasi geolokasi. Pada beberapa situasi, foto diambil menggunakan kamera digital biasa, tanpa menggunakan *drone*. Rata-rata pada tiap singkapan diambil foto sebanyak 116 buah dengan resolusi masing-masing 19,9 MP (megapiksel) dengan format JPEG. Ukuran foto bervariasi dari 7,5 MB (megabita) hingga 9 MB. Total foto yang dikumpulkan berukuran 11,3 GB (gigabita) untuk membuat model 12 singkapan.

Setelah foto dikumpulkan, dilakukan pembuatan model menggunakan aplikasi Agisoft Metashape dengan mengikuti langkah dalam buku petunjuk (Agisoft, 2021). Langkah pertama dalam membuat model adalah dengan memasukkan foto ke dalam perangkat lunak Agisoft Metashape. Selanjutnya adalah tahap penyusunan foto yang dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak Agisoft Metashape, didasarkan pada posisi titik ikat dan sudut pandang dari titik ikat tersebut sehingga foto dapat otomatis tersusun.

Langkah selanjutnya pada Agisoft Metashape adalah pembuatan *point cloud*, *mesh*, dan *texture* (Agisoft, 2021). *Point cloud* merupakan kumpulan data ketinggian (elevasi) yang digunakan untuk membangun *mesh*. *Mesh* yang dihasilkan dari *point cloud* merupakan bentuk geometri 3D dari objek yang dimodelkan. Akan tetapi, *mesh* yang dibuat

belum memiliki tekstur dari objek, sehingga setelah *mesh* telah jadi, proses dilanjutkan dengan pembuatan tekstur dari model.

Model singkapan digital yang telah dihasilkan sering kali membutuhkan data tambahan seperti koordinat untuk mengkalibrasi skala dari model yang dibuat (Roach et al., 2020). Hal ini diperlukan agar model memiliki skala dan orientasi yang lebih akurat menyerupai singkapan asli yang ditemukan di lapangan. Proses ini dapat dilakukan dengan memasukkan informasi tambahan berupa *ground control point* (GCP) (Roach et al., 2020). Teknik GCP didapat dengan melakukan pengukuran koordinat pada tiga titik terpisah, atau minimal dua titik. Akan tetapi, data foto yang diambil sepenuhnya menggunakan *drone* tidak memerlukan GCP dikarenakan foto telah memiliki informasi geolokasi yang cukup akurat.

Setelah model selesai dikalibrasi menggunakan Agisoft Metashape, model dieksport dengan menggunakan format '.kmz', dan kemudian dikalibrasi kembali menggunakan software GeoVis3D (<https://www.ausgeol.org/geovis3d/>) dengan membandingkan nilai dari pengukuran bidang perlapisan di perangkat lunak dengan di lapangan. Proses ini penting dilakukan untuk meminimalkan kesalahan dari orientasi bidang dari model yang dihasilkan oleh perangkat lunak. Pada penelitian ini digunakan batas toleransi 10° untuk nilai *strike* dan *dip*.

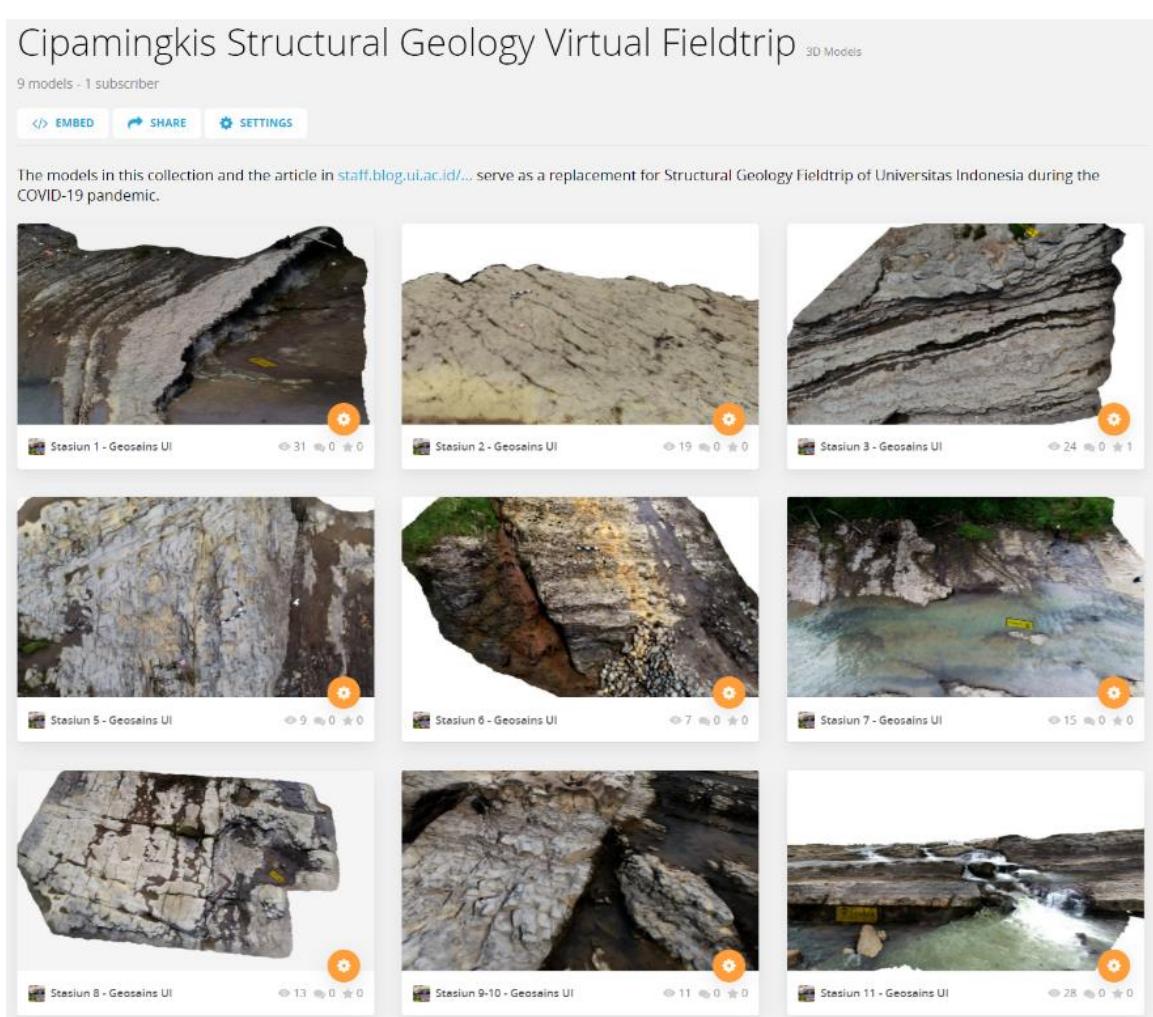
3.2. Interpretasi Model Tiga Dimensi

Interpretasi model tiga dimensi dilakukan dengan memanfaatkan aplikasi GeoVis3D. Selain interpretasi, berbagai pengukuran struktur geologi, seperti pengukuran bidang dan pengukuran lineasi (*lineation*) dapat dilakukan dengan aplikasi tersebut. Struktur geologi yang diamati adalah bidang perlapisan dan bidang sesar. Informasi yang dihasilkan tidak akan serupa antara satu kelompok dengan kelompok yang lain, namun diharapkan masih tetap dalam rentang yang sama.

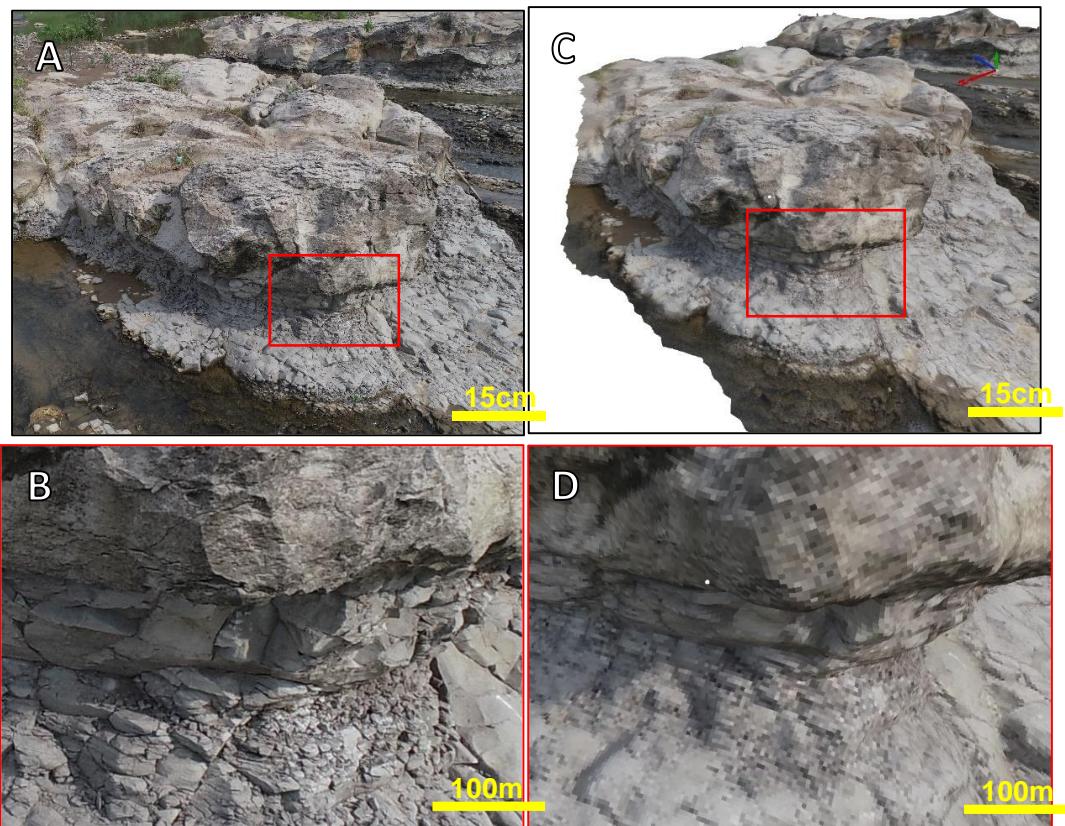
Setiap hasil pengukuran kemudian dicantumkan pada peta dasar agar proses interpretasi pola jurus perlapisan dapat dilakukan. Perbedaan interpretasi dari setiap kelompok akan menghasilkan peta yang berbeda-beda, namun masih dalam batas wajar.

3.3. Evaluasi

Semua peta pola jurus yang dihasilkan kemudian dipelajari lebih lanjut. Dilakukan evaluasi terhadap persamaan dan perbedaan serta karakteristik umum dari hasil interpretasi yang telah dibuat. Evaluasi terhadap hasil interpretasi perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa efektifnya penggunaan kuliah lapangan virtual dalam membantu mahasiswa geologi menginterpretasi kondisi geologi dari daerah yang diberikan.



Gambar 2. Tangkapan layar dari model singkapan tiga dimensi yang telah diunggah di situs web sketchfab.com.



Gambar 3. Foto dua dimensi (A) dan contoh ketika gambar diperbesar (B) dibandingkan dengan model tiga dimensi pada lokasi yang sama (C) dan contoh tekstur model ketika diperbesar (D). Kotak merah pada gambar A dan B menunjukkan lokasi pembesaran untuk gambar B dan D.

4. Hasil & Diskusi

4.1. Model Singkapan Virtual

Dari sepuluh stasiun pengamatan yang akan dibuat model digitalnya, sembilan di antaranya berhasil dibuat menjadi model singkapan digital. Salah satu singkapan mengalami kegagalan, yang diduga diakibatkan oleh banyaknya vegetasi dan sulitnya pengambilan foto pada stasiun tersebut. Model yang telah selesai dibuat dan dikalibrasi dapat diakses secara terbuka pada laman <https://sketchfab.com/felixsihombing/collections/cipamingkis-structural-geology-virtual-fieldtrip> (Gambar 2).

Komparasi antara foto dengan model dua dimensi menunjukkan perbedaan yang signifikan di antara keduanya. Model digital menunjukkan resolusi gambar yang jauh lebih rendah ketimbang foto. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, di mana foto asli (Gambar 3A) berasal dari foto dengan resolusi 9,4 MP, sementara untuk menggambar analog model 3D-nya pada Gambar 3C, hanya dibutuhkan tekstur berjumlah sekitar 1,5 MP. Demikian juga saat dilakukan perbesaran, Gambar 3B digambarkan oleh foto dengan resolusi 0,5 MP, sementara model 3D ditampilkan oleh tekstur dengan resolusi yang lebih rendah, yaitu sekitar 0,2 MP. Akan tetapi, model digital mampu memvisualisasikan informasi singkapan secara tiga dimensi dengan baik.

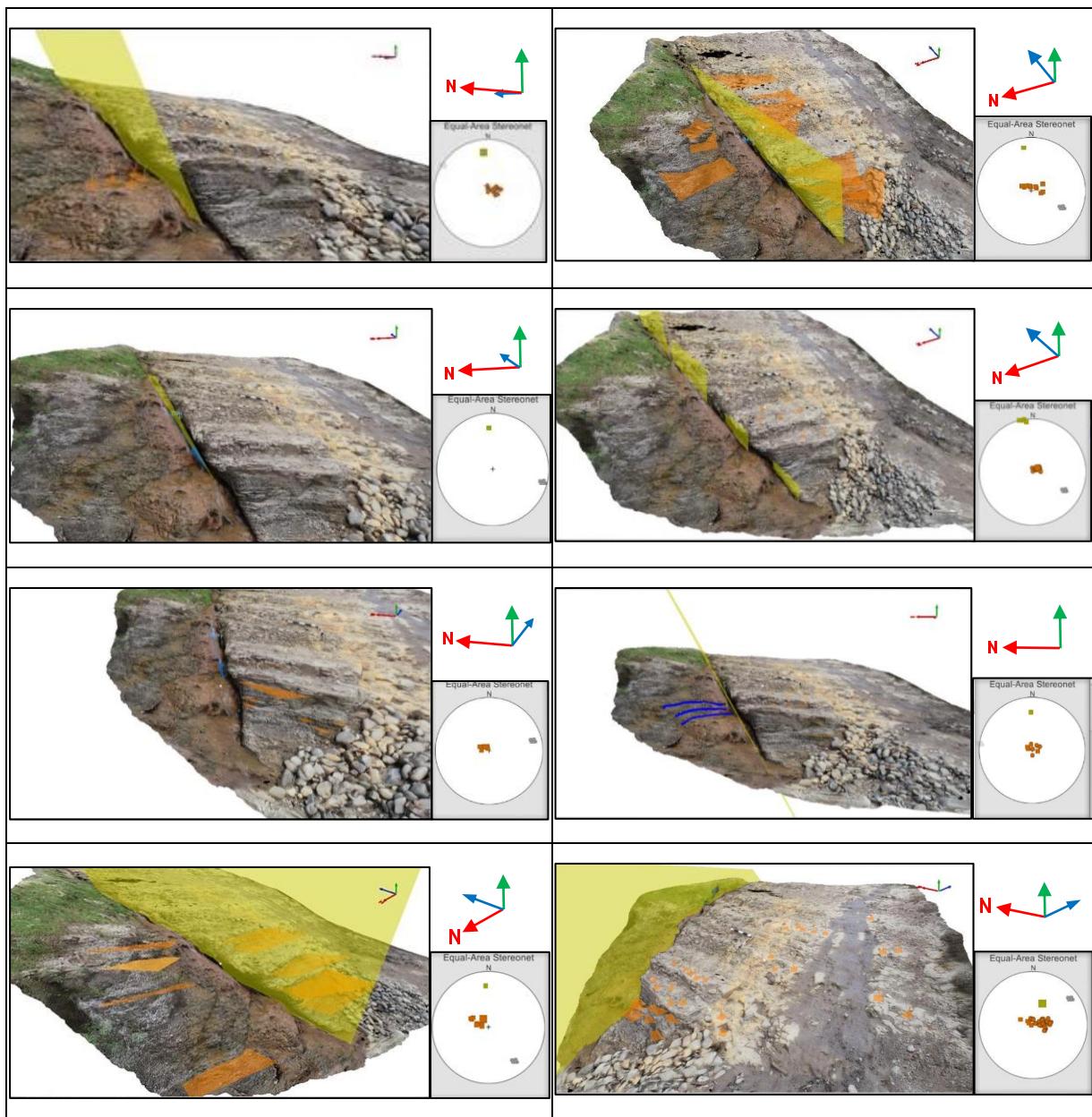
4.2. Observasi dan Interpretasi Model

Setiap kelompok mahasiswa menghasilkan observasi yang berbeda-beda dalam satu singkapan. Terlihat pada

salah satu contoh singkapan (Gambar 4), tiap kelompok akan melakukan pengukuran pada tiap titik yang berbeda. Dari delapan kelompok yang dicontohkan, semua kelompok dapat mengidentifikasi keberadaan sesar (bidang warna kuning), dan terdapat satu kelompok yang tidak melakukan pengukuran terhadap perlapisan batuan. Orientasi kekar dan perlapisan batuan pada stereonet dari tiap hasil observasi (Gambar 4) memiliki hasil yang bervariasi. Untuk keperluan kuliah lapangan, variasi yang ditemukan masih dapat ditoleransi mengingat tujuan utama kegiatan ini adalah untuk belajar.

Peta pola jurus versi pertama dan kedua dibuat oleh kelompok A dan B (Gambar 5). Dapat dilihat pada kedua versi ini, pola jurus perlapisan memiliki tren utara timur laut-selatan barat daya. Semua pola jurus tersegmentasi diakibatkan adanya sesar mendatar. Semua perlapisan memiliki arah umum *dip* konsisten ke tenggara. Pada peta A, terdapat tiga sesar mendatar berarah hampir barat-timur, sementara pada sisi utara terdapat sesar mendatar berarah timur laut-barat daya. Di kedua peta dapat dilihat keberadaan pola jurus yang tidak didukung dengan keberadaan data pengamatan perlapisan.

Pada peta yang dibuat oleh kelompok C dan D (Gambar 6), terdapat kemiripan tren dari pola jurus, di mana pada sisi barat daerah penelitian, pola jurus cenderung berarah utara-selatan, meskipun tetap memiliki pola umum timur laut-barat daya. Pada sisi timur, pola jurus ini berubah arah menjadi hampir barat-timur. Pada peta kelompok C, diinterpretasi keberadaan dua sesar mendatar dan satu



Gambar 4. Delapan tangkapan layar yang menunjukkan contoh perbedaan interpretasi pada tiap kelompok pada satu stasiun yang sama. Steronet ditampilkan data sisi kanan bawah di tiap tangkapan layar. Panah merah menandakan arah utara. Panah biru menandakan arah timur. Panah hijau menandakan arah vertikal.

sesar normal. Sementara itu pada peta kelompok D, diinterpretasi keberadaan satu sesar mendatar dan dua sesar normal. Sangat disayangkan pada kedua kelompok ini interaksi antara pola jurus dengan sesar tidak diinterpretasi dengan baik. Interaksi cenderung ‘dijauhi’ dengan tidak mengadakan perpotongan pada tiap pola jurus.

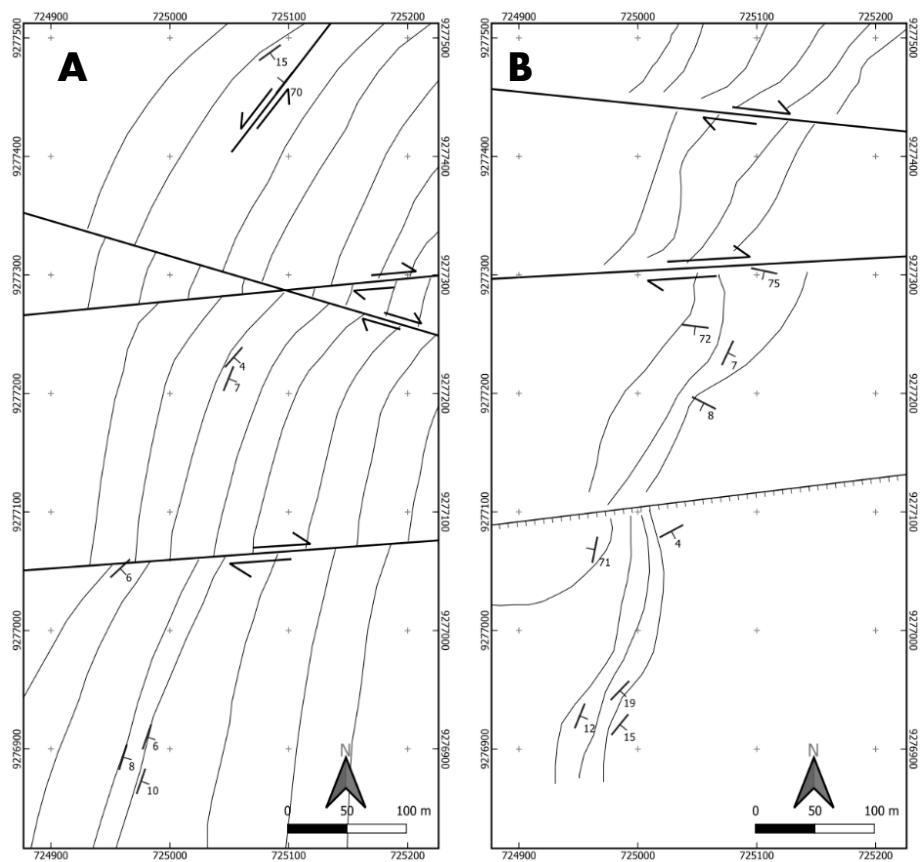
Peta kelompok E dan F (Gambar 7) memiliki kemiripan dengan peta dari kelompok C dan D (Gambar 6). Kedua gambar tersebut cenderung memiliki arah kemenerusan perlapisan (*strike*) utara-selatan di sisi barat dan hampir barat-timur di sisi timur. Pada peta kelompok E ditemukan masing-masing satu sesar mendatar, sesar normal, dan sesar naik. Sementara itu pada kelompok F ditemukan dua sesar *oblique* dan satu sesar yang pergerakannya belum dapat ditentukan. Kedua peta pola jurus memiliki

kekurangan pada pola jurus yang tidak terpotong oleh sesar.

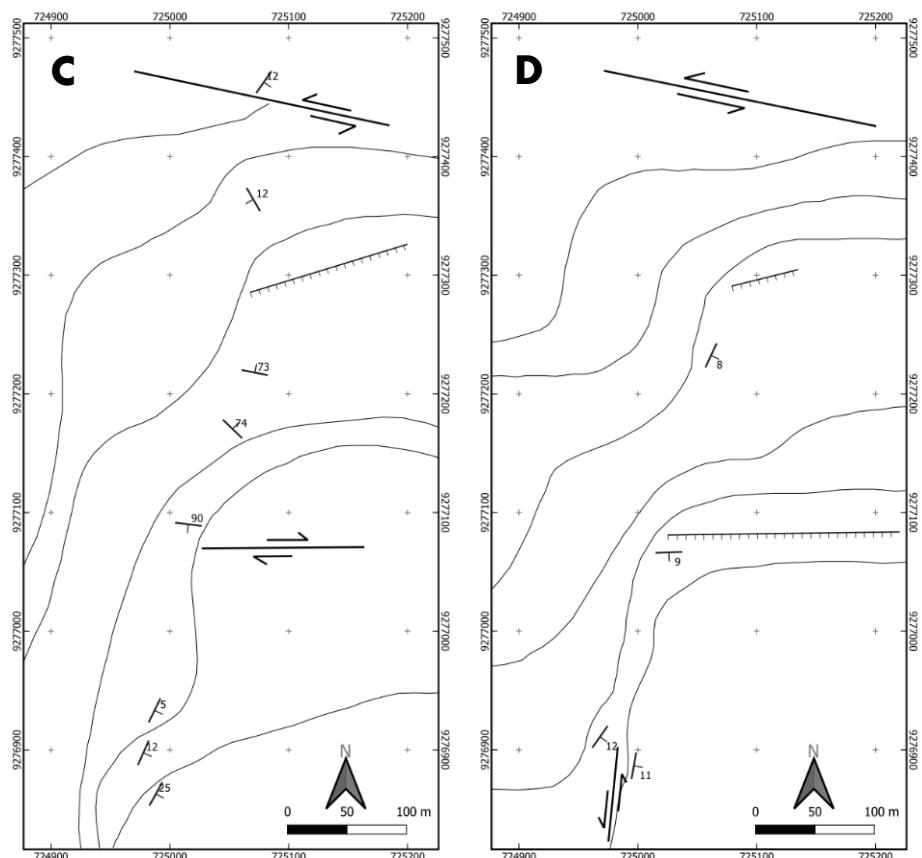
Pada peta G dan H (Gambar 8), orientasi kedudukan perlapisan memiliki kemiripan dengan peta-peta lainnya. Akan tetapi pada peta G, tiap pola jurus seakan berhenti tepat ketika mendekati keberadaan sesar, meskipun tetap memiliki pola umum timur laut-barat daya. Demikian pula sesarnya, meskipun dapat diinterpretasi dengan baik, sesar tidak diinterpretasi lebih jauh lagi. Hal ini menyebabkan interpretasi yang tidak menerus. Pada peta H, meskipun orientasi perlapisan dapat diidentifikasi dengan baik, mahasiswa terlalu yakin membuat pola jurus yang terlalu mengikuti pola aliran sungai.

4.3. Diskusi

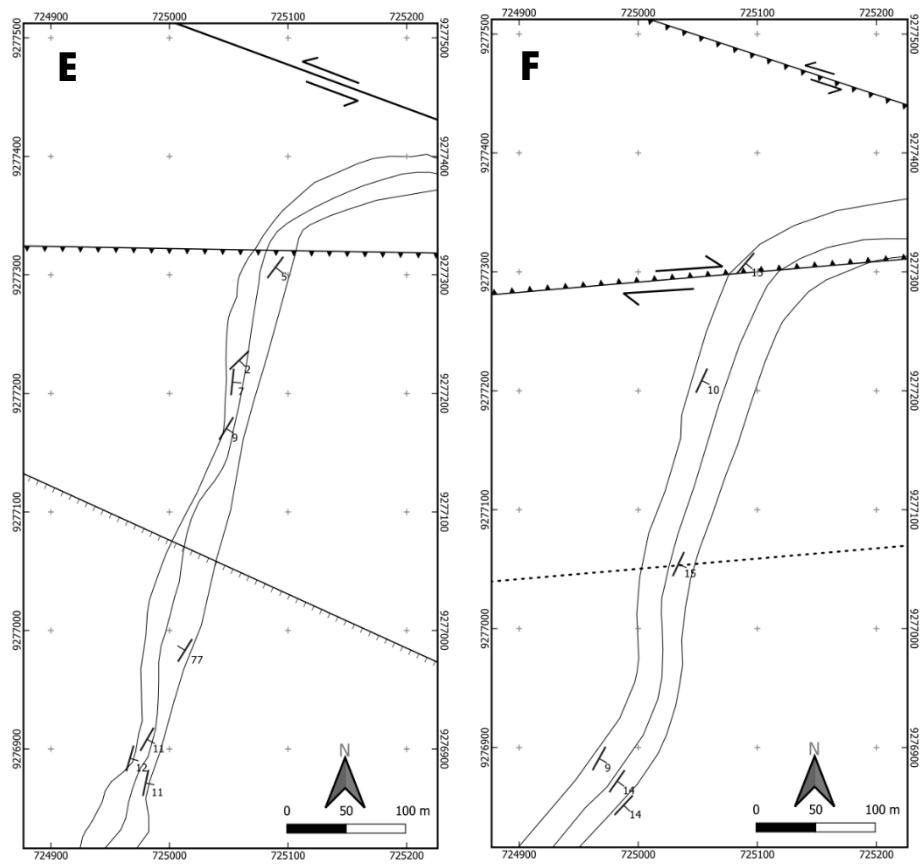
Ringkasan dari variasi tiap interpretasi ditampilkan



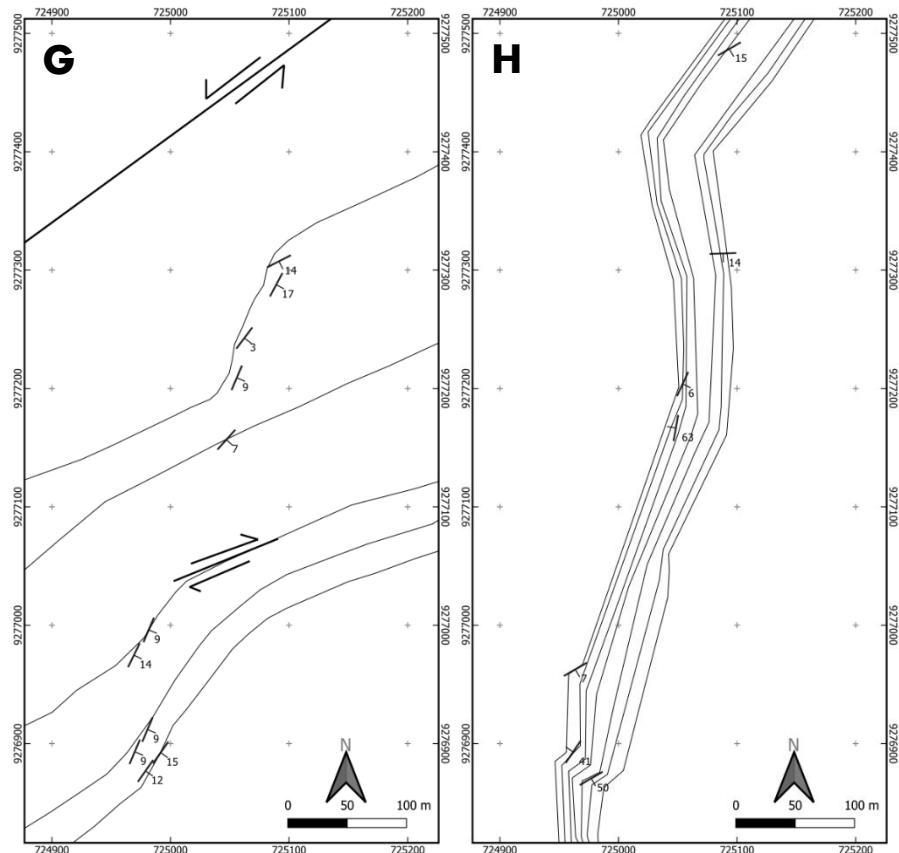
Gambar 5. Dua versi peta pola jurus yang diinterpretasi oleh kelompok A (kiri) dan B (kanan).



Gambar 6. Dua versi peta pola jurus yang diinterpretasi oleh kelompok C (kiri) dan D (kanan).



Gambar 7. Dua versi peta pola jurus yang diinterpretasi oleh kelompok E (kiri) dan F (kanan).



Gambar 8. Dua versi peta pola jurus yang diinterpretasi oleh kelompok G (kiri) dan H (kanan).

Tabel 1. Ringkasan perbandingan antara berbagai versi peta yang diinterpretasi menggunakan bantuan model singkapan tiga dimensi.

Versi Peta	Total jumlah					Tren pola jurus	Tren sesar	Keterangan
	kedudukan perlapisan	sesar naik	sesar normal	sesar dekstral	sesar sinistral			
A	7	0	0	3	1	Timur Laut-Barat Daya	Barat-Timur	Beberapa pola jurus diinterpretasi tanpa adanya data pendukung
B	10	0	0	0	0	Timur Laut-Barat Daya	Barat-Timur	Terdapat tiga sesar dengan pergerakan relatif tidak diketahui
C	8	0	1	1	1	Timur Laut-Barat Daya	Barat-Timur	Pola jurus tidak berinteraksi dengan sesar
D	4	0	2	0	2	Timur Laut-Barat Daya	Barat-Timur, kecuali 1 sesar Utara-Selatan di selatan	Pola jurus tidak berinteraksi dengan sesar
E	7	1	1	0	1	Timur Laut-Barat Daya	Barat-Timur dan Timur Laut-Barat Daya	Pola jurus yang terpotong oleh sesar tidak menunjukkan adanya penyesaran; Pola jurus terlalu tidak beraturan
F	4	0	0	1	1	Timur Laut-Barat Daya	Timur Laut-Barat Daya, kecuali 1 sesar Barat Laut-Tenggara di utara	Terdapat satu sesar dengan pergerakan relatif tidak diketahui. Pola jurus yang terpotong oleh sesar tidak menunjukkan adanya penyesaran
G	11	0	0	1	1	Timur Laut-Barat Daya	Timur Laut-Barat Daya	Pola jurus tidak berinteraksi dengan sesar
H	8	0	0	0	0	Timur Laut-Barat Daya	-	Pola jurus yang terlalu mengikuti pola aliran sungai

dalam Tabel 1. Dapat dilihat bahwa tiap peta interpretasi pola jurus memiliki kesamaan orientasi timur laut–barat daya. Akan tetapi terdapat perbedaan orientasi perlapisan pada tiap peta. Variasi interpretasi pola jurus yang didapatkan oleh tiap kelompok masih dapat diterima, kecuali interpretasi yang dilakukan oleh kelompok H pada Gambar 8.

Terdapat variasi interpretasi sesar yang cukup bervariasi antarkelompok. Meskipun demikian, perbedaan interpretasi tersebut juga terjadi dalam kuliah lapangan yang sebenarnya. Identifikasi sesar akan lebih sulit ketimbang identifikasi perlapisan dan juga pola jurus. Dengan demikian, perbedaan interpretasi sesar juga masih dapat dimaklumi.

Perbedaan interpretasi dalam kuliah lapangan geologi struktur di atas dapat diterima dalam suatu kuliah lapangan geologi struktur yang diadakan untuk mahasiswa tahun kedua. Perbedaan interpretasi kemungkinan menunjukkan perbedaan ketelitian dalam observasi dan interpretasi informasi geologi yang dimiliki. Akan tetapi, studi ini belum dapat melakukan perbandingan kelebihan dan kekurangan penggunaan singkapan geologi virtual jika dibandingkan dengan penggunaan singkapan konvensional. Untuk itu perlu dilakukan studi lanjutan yang membahas masalah tersebut.

5. Kesimpulan

Dari studi ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan singkapan geologi virtual cukup efektif untuk menggantikan singkapan geologi sebenarnya dalam kuliah lapangan geologi struktur. Perbedaan observasi dan interpretasi yang dilakukan oleh mahasiswa dapat dipahami dan merupakan hal yang lazim terjadi pada kuliah lapangan geologi struktur pada umumnya. Dengan demikian, penggunaan singkapan geologi virtual ini dapat digunakan manakala terdapat kendala untuk mendatangi lokasi

kegiatan kuliah lapangan. Akan tetapi, masih perlu dilakukan studi lanjutan untuk meneliti kekurangan dan kelebihan dari penggunaan singkapan geologi virtual ini.

Daftar Pustaka

- Aber, J.S., Marzolff, I., Ries, J.B., & Aber, S.E.W. (2019). Chapter 3 - Principles of Photogrammetry, Small-Format Aerial Photography and UAS Imagery -Principles, Techniques, and Geoscience Applications, Academic Press
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812942-5.00003-3>
- Agisoft. (2021). Agisoft Metashape User Manual Professional Edition Version 1.7, Agisoft LLC, diakses pada 1 Agustus 2021, dari https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf
- GeoVis3D - freeware for analysis and annotation of virtual 3D geological models. (t.t.). <https://www.ausgeol.org/>. Diakses pada 11 Juni 2021, dari <https://www.ausgeol.org/geovis3d/>
- Jhonson K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, J.R., McGarey, P., Scherer, K.M., Williams, P., & Blisniuk, K. (2014). Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere* 10(5), 969–986.
<https://doi.org/10.1130/GES01017.1>.
- Koesoemadinata, R.P. (2020). *An Introduction Into The Geology of Indonesia*. Bandung: Ikatan Alumni Geologi Indonesia
- Martodjojo, S. (2003). *Evolusi Cekungan Bogor Jawa Barat*. Bandung: Penerbit ITB Bandung.
- Roach, M., McLaren, S., Welsh, K., Verdel, C., Cox, S., King, P., & George, A. (2020). *Immersive visualisation for field-based sciences*. Canberra: Australian Government Department of Education, Skills and Employment. Diakses pada 1 Agustus 2021, dari https://tr.edu.au/resources/ID14-3628_Roach_Report_2020.pdf
- Roach, M. & Scott, R. (2016). Interactive Structural Analysis of Virtual Geological Outcrops [abstrak], 35th International Geological Convention, Cape Town, August 2016.
<https://www.americangeoosciences.org/igc/14036>
- Sudjatmiko. (1972). *Peta Geologi Lembar Cianjur, Jawa*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
- van Bemmelen, R.W. (1949). *The geology of Indonesia 1, A. General geology of Indonesia and adjacent archipelagoes*. US Government Printing Office.