

OPTIMASI PENENTUAN ZONA PERMEABILITAS PANASBUMI SORIK MARAPI DENGAN METODE PENGOLAHAN DATA GRAVITASI, *FAULT FRACTURE DENSITY* (FFD), *BAND RATIO*, DAN *LAND SURFACE TEMPERATURE* (LST)

OPTIMIZATION OF DETERMINING THE PERMEABILITY ZONES OF SORIK MARAPI GEOTHERMAL USING GRAVITY DATA PROCESSING, *FAULT FRACTURE DENSITY* (FFD), *BAND RATIO*, AND *LAND SURFACE TEMPERATURE* (LST) METHODS

Muhammad Gussan Rangkuti ¹, Dumex Pasaribu *¹

¹ Program Studi Teknik Geologi, Universitas Pertamina

*EMAIL

dumex.pasaribu@universitaspertamina.ac.id

KATA KUNCI

struktur geologi, permeabilitas, alterasi, panasbumi, Sorik Marapi.

geological structure, permeability, alteration, geothermal, Sorik Marapi.

HISTORI ARTIKEL

Received: 29 August 2024

Accepted: 27 February 2025

CARA MENYITIR

Rangkuti, M. G., Pasaribu., D. (2025). Optimasi penentuan zona permeabilitas panasbumi Sorik Marapi dengan metode pengolahan data gravitasi, *fault fracture density* (ffd), *band ratio*, dan *land surface temperature* (LST). *Subsurface*, 03(01) 37-58.

ABSTRAK

Struktur geologi, suhu permukaan tanah, dan alterasi hidrotermal merupakan beberapa faktor yang dapat mengindikasikan karakteristik permeabilitas panasbumi. Penelitian ini dilakukan pada area Panasbumi Sorik Marapi, Sumatera Utara yang terbentuk pada sistem *pull-apart* Muara Sipongi di zona Sesar Sumatera untuk menentukan struktur geologi bawah permukaan, zona permeabilitas, hubungan sebaran suhu permukaan tanah dan area teralterasi hidrotermal terhadap zona permeabilitas, serta rekomendasi eksplorasi lanjutan panasbuminya. Metodologi yang dilakukan pada penelitian adalah *fault fracture density*, *land surface temperature*, *band ratio*, pengolahan data gravitasi TOPEX, dan integrasi pengolahan data untuk mendapatkan peta integrasi zona permeabilitas panasbumi. Berdasarkan hasil penelitian area dengan tingkat permeabilitas paling tinggi berada pada bagian tengah ke utara area panasbumi. Area tersebut memiliki total nilai kepadatan kelurusan sebanyak 34-54 unit, suhu permukaan tanah 19.1°-27.8°C, berasosiasi dengan sesar permukaan dan bawah permukaan serta arah aliran fluida dan manifestasi permukaan dengan keterdapatan sebaran alterasi hidrotermal disekitarnya. Penelitian ini mengkonfirmasi dan memvalidasi delapan struktur sesar turun dan satu sesar naik bawah permukaan. Area dengan sebaran alterasi hidrotermal dan suhu permukaan tinggi mengindikasikan zona permeabilitas tinggi. Integrasi hasil data menunjukkan bahwa bagian utara area penelitian potensial sebagai area rekomendasi eksplorasi lanjutan

© 2025 SUBSURFACE. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

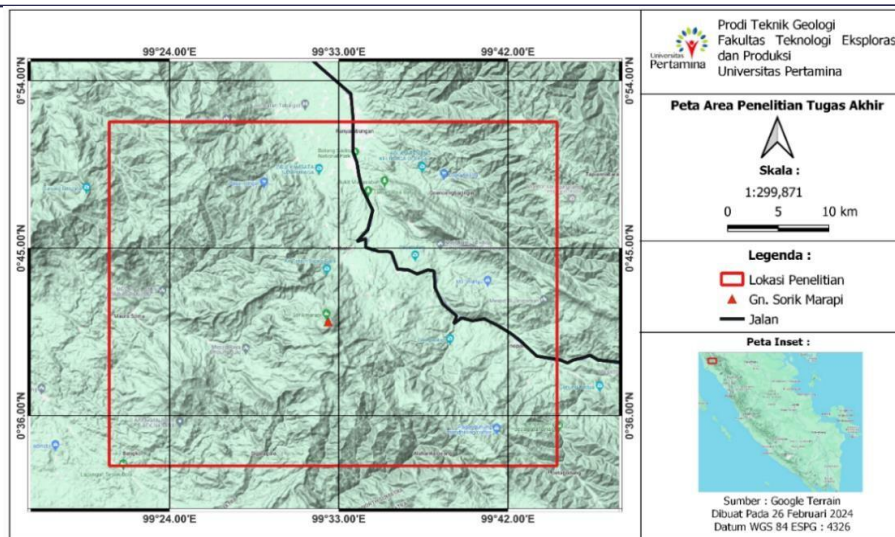
ABSTRACT

Geological structure, land surface temperature patterns, and hydrothermal alteration are key indicators of geothermal permeability. This research investigates the Sorik Marapi geothermal area in North Sumatra, formed in the pull-apart system of Muara Sipongi along the Sumatra Fault Zone. This research aims to identify subsurface geological structures, delineate permeability zones, the relationship of surface temperature and hydrothermal alteration area to the permeability zone, and recommendations for further geothermal exploration. The methodology used includes fault fracture density, land surface temperature, band ratio, TOPEX gravity data processing, and data integration to create a geothermal permeability zone integration map. Results indicate the highest permeability is in the central to the northern geothermal area. The area has a total lineament density value ranging from 34-54 units, land surface temperature of 19,1°-27,8°C, associated with surface and subsurface faults, fluid flow directions, and surface manifestations with hydrothermal alteration distribution. This research confirms and validates eight subsurface normal faults and one thrust fault. Areas with high hydrothermal alteration and surface temperature indicate high permeability zones. The data integration shows that the northern part of the study area is a potential recommendation for further exploration of Sorik Marapi Geothermal.

PENDAHULUAN

Transisi energi merupakan salah satu fenomena utama yang sedang terjadi di Indonesia sebagai upaya mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil dan beralih ke energi baru terbarukan. Energi panasbumi, sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang potensial di Indonesia, memiliki kapasitas mencapai 23.742 Megawatt (MW), namun baru 2.744 MW yang terinstal (Alhusni dkk., 2023). Hal tersebut menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk mengembangkan eksplorasi yang lebih mendalam dan optimal guna meningkatkan kapasitas pemanfaatan energi panasbumi secara ekonomis.

Penelitian ini berfokus pada area Panasbumi Sorik Marapi di Kabupaten Mandailing Natal, Sumatera Utara (**Gambar 1**) yang merupakan wilayah strategis untuk ekplorasi energi panasbumi dengan menggunakan metode Fault Fracture Density (FFD), pengolahan data gravitasi TOPEX, band rasio, dan Land Surface Temperature (LST). Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan peta zona permeabilitas, peta struktur geologi bawah permukaan, serta menganalisa hubungan antara zona teralterasi hidrotermal dan suhu permukaan tanah terhadap zona permeabilitas panasbumi area penelitian. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi area untuk eksplorasi lanjutan, sehingga mendukung pengembangan energi panasbumi yang lebih efisien dan ekonomis pada area Panasbumi Sorik Marapi.



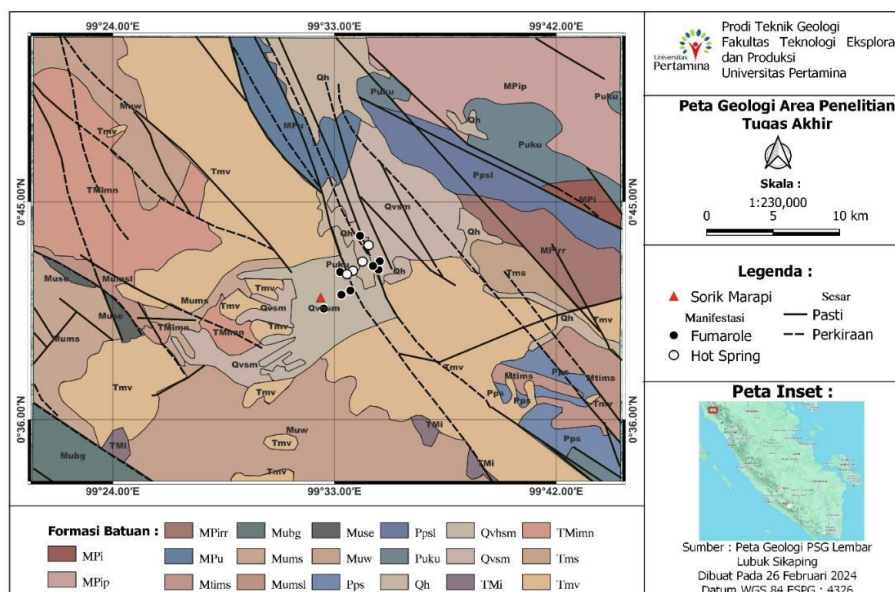
Gambar 1. Lokasi area penelitian.

TINJAUAN PUSTAKA

GEOLOGI AREA PENELITIAN

Sistem Panasbumi Sorik Marapi (**Gambar 2**) merupakan sistem panasbumi yang terbentuk pada *Great Sumatran Fault Zone* (GSFZ), segmen *pull-apart* Muara Sipongi dan graben Panyabungan (Mulyani dkk., 2019). *Great Sumatran Fault* (GSF) merupakan zona pensesaran yang memanjang di Pulau Sumatera dan menjadi pengontrol utama permeabilitas Panasbumi Sorik Marapi. Berdasarkan gambaran umum struktur geologi regional, pada area panasbumi ini dominan berkembang kumpulan sesar percabangan *antithetic* pada arah timur laut-barat daya serta *synthetic* pada arah barat laut-

tenggara yang terjaring dan tersegmentasi dengan perkembangan miring terhadap zona GSF (Sarmiento dkk., 2017). Pada beberapa literatur percabangan sesar utama yang tersegmentasi tersebut dikenal sebagai Sesar Marapi Sumatera Utara, Tengah, dan Selatan dengan dominan struktur berupa sesar mendatar, sesar normal oblique, serta sesar anastomosis (sekunder) (Licup dkk., 2017).



Gambar 2. Geologi area penelitian (dimodifikasi dari Rock dkk., 2011).

Rangkuti & Pasaribu

Area penelitian secara garis besar disusun oleh beberapa kelompok besar formasi seperti yang terlihat pada kolom stratigrafi (**Gambar 3**). Formasi tersebut yaitu Tapanuli (Karbon-Permian Awal), Peusangan (Permian Akhir-Triasik), Woyla (Jurasik-Kapur Awal), Kampar (Oligosen-Miosen), variasi intrusi (Paleozoikum-Kenozoikum) dan endapan dan alluvium (Kuartar) (Rock dkk., 2011).

MASA	ZAMAN	KELOMPOK	FORMASI	INTRUSI	DESKRIPSI
Kenozoikum	Kuartar	Material Sedimen dan Vulkanik	Qb	[Red Block]	Qb : pasir, kerikil, dan lanau
			Qbvs		Qbvs : Lava Andesit
	Qvsm	Qvsm : lahar breksi fragmen vulkanik dan bersifat adesitik			
Neogen	Kampar	Kampar	Tmv	Tmv : Lapisan vulkanik	
			Tms	Tms : konglomerat, arenit, dan batulanau	
Mesozoikum	Kapur	Woyla	Muw	Muw : filit, metavulkanik, slate, metalimestone, sekis hijau, dan metatuff	
			Mubg	Mubg : chert, perselingan argilit-arenit, dan batugamping	
			Mums	Mums : batugamping, batulempung, metavulkanik, sekis hijau, slate, arenit, kalsilit, dan metakonglomerat	
	Jura	Undifferentiated Strata	Mumsl	Mumsl : batugamping dengan sisipan lempung termetamorfosa	
Trias	Peusangan	Peusangan	Mpa	Mpa : metavulkanik hornfel, batuasabak, dan batugamping	
			Pps	Pps & Ppsl : vulkaniklastik, tuff, batugamping, metagamping, dan metavulkanik	
Paleozoikum	Permian	Tapanuli	Puku	[Red Block]	Puku : kuarsit, arenit, metakuarsit, Graywacke, dan slate
	Karbon				

Gambar 3. Stratigrafi area penelitian (dimodifikasi dari Rock dkk., 2011).

REMOTE SENSING

Identifikasi karakteristik permukaan area panasbumi pada dasarnya dapat dilakukan tanpa melakukan kontak langsung dengan memanfaatkan nilai reflektansi elektromagnetik objek yang ada pada area tersebut (Ahmadi & Pekkan, 2021). Nilai reflektansi tersebut digambarkan oleh setiap Digital Number (DN) yang ada pada sebuah citra satelit. Citra satelit Landsat 8 merupakan citra yang cukup baik untuk digunakan dengan 2 sensor, yaitu *Onboard Operational Land Imager* (OLI) yang menghasilkan 9 band multispektral dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) yang menghasilkan 2 band termal (Ihlen, 2019). Kumpulan band tersebut dapat diolah dengan memanfaatkan berbagai pemrosesan citra untuk mendapatkan informasi terkait area permukaan panasbumi.

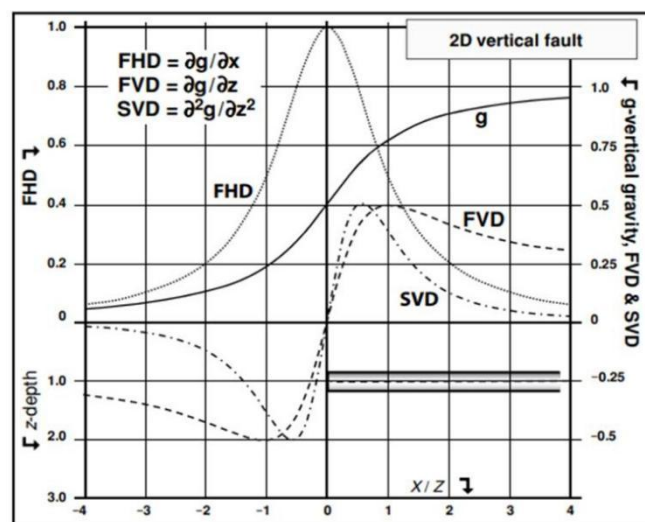
Pemrosesan pada citra satelit dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik. Secara umum pemrosesan tersebut dimulai dengan mengkoreksi citra secara geometrik, radiometric, dan atmosferik sehingga citra lebih tajam (Reddy, 2008). Penajaman citra juga dapat ditingkatkan atau diperhalus dengan transformasi linear dan filter citra, seperti penggunaan *Principal Component Analysis* (PCA), *Directional Filter*, serta *Laplacian Filter* (Farahbakhsh dkk., 2020). Selain penajaman atau penghalusan pemrosesan juga dapat dilakukan dengan mengekstraksi informasi fisik dari citra satelit yang dapat dikorelasikan dengan karakteristik geologis permukaan area panasbumi seperti *Fault Fracture Density* (FFD), *Land Surface Temperature* (LST), dan *band ratio* yang secara berturut-turut dapat mengekstraksi kelurusan/rekahan, suhu tanah, serta jejak pengaruh sirkulasi hidrotermal (Osinowo dkk., 2021).

Tabel 1. Spectral band citra Landsat 8 (Ahmed, 2020).

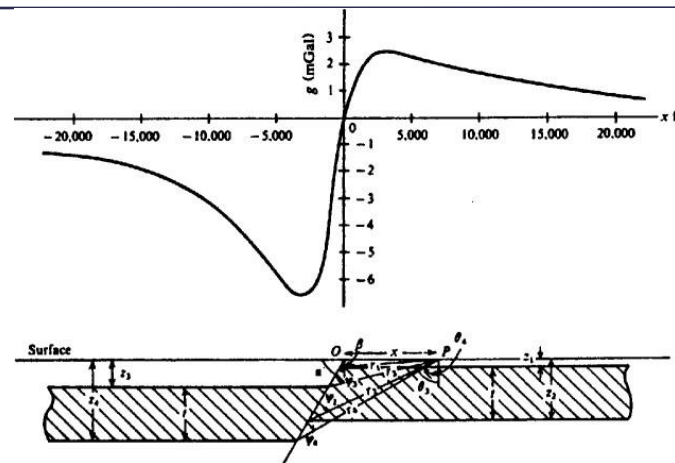
Band	Panjang Gelombang (μm)	Resolusi
Band 1: Aerosol/Coastal	0.435-0.451	30 m
Band 2: Blue	0.452-0.512	30 m
Band 3: Green	0.533-0.590	30 m
Band 4: Red	0.636-0.673	30 m
Band 5: NIR	0.851-0.879	30 m
Band 6: SWIR-1	1.566-1.651	30 m
Band 7: SWIR-2	2.107-2.294	30 m
Band 8: Pan	0.503-0.676	15 m
Band 9: Cirrus	1.363-0.676	30 m
Band 10: TIR-1	10.60-11.19	100 m
Band 11: TIR-2	11.50-12.51	100 m

METODE GRAVITASI

Variasi massa batuan yang ada di bawah permukaan bumi tentunya akan mempengaruhi nilai densitas pada batuan juga (Telford dkk., 2004). Densitas pada dasarnya adalah properti fisik dari batuan yang akan diukur atau diinvestigasi pada metode gravitasi. Hal ini sering disebut “kontras densitas” yang mempengaruhi nilai percepatan gravitasi yang terukur (Alsadi & Baban, 2014). Kontras densitas dapat dihasilkan dari perhitungan matematis data gravitasi (anomali gravitasi), gradien, dan laju perubahan gradien anomali gravitasi yang kemudian divisualisasikan menjadi peta anomali serta pemodelan gravitasi (Hussaini dkk., 2022). Adanya perubahan kontras densitas secara tiba-tiba dapat menunjukkan keberadaan bidang struktur geologi bawah permukaan (Rosid & Siregar, 2017). Keberadaan struktur geologi tersebut dapat diperkirakan dengan melihat pola kontur anomali gravitasi yang keberadaan bidangnya dapat dipertajam melalui nilai maksimum *First Horizontal Derivative* (FHD) pada arah lateral dan nilai 0 *Second Vertical Derivative* (SVD) (**Gambar 4**) pada arah vertikal serta pola grafik/kurva anomali gravitasi (**Gambar 5**) juga dapat mencirikan jenis struktur geologi yang ada di bawah permukaan area pengukuran (Hinze dkk., 2013).



Gambar 4. Pertemuan kurva FHD dan SVD (Telford dkk., 2004).



Gambar 5. Model kurva anomali gravitasi sesar normal (Hinze dkk., 2013).

DATA DAN METODOLOGI

DATA

Pada penelitian ini data yang digunakan berupa data sekunder yang dijadikan sebagai data utama dan pendukung. Adapun data yang digunakan meliputi:

1. Citra Satelit Landsat 8
Data citra multispektral sebanyak 11 band (Koleksi 2, Level 1) yang digunakan dalam analisis Fault Fracture Density (FFD), Land Surface Temperature (LST), dan Band Ratio.
Sumber data: USGS EarthExplorer
Referensi: Ihlen (2019); Reddy (2008).
2. Data Gravitasi Satelit TOPEX
Berupa 450 titik pengukuran yang terdiri atas koordinat, elevasi/topografi, dan nilai gravitasi Free-Air Anomaly (FAA). Data ini digunakan dalam perhitungan Bouger Correction, Complete Bouger Anomaly (CBA), analisis spektral, FHD, SVD, dan pemodelan 2D gravitasi.
Sumber data: NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC).
Referensi: Hinze dkk. (2013); Alsadi & Baban (2014)
3. Digital Elevation Model (DEM) SRTM
Digunakan untuk koreksi medan pada data gravitasi serta untuk kebutuhan morfologi dan pemotongan area penelitian.
Sumber data: USGS EarthExplorer
Referensi: Reddy (2008)
4. Data Pendukung Geologi
Meliputi sebaran formasi batuan, stratigrafi, struktur geologi permukaan, manifestasi permukaan, arah aliran fluida, penampang geologi, serta nilai densitas rata-rata batuan. Data ini diperlukan sebagai constraint interpretasi dan validasi hasil pengolahan citra serta gravitasi.
Sumber data:
 - Peta Geologi Lembar Lubuksikaping, Pusat Survei Geologi (Rock, dkk., 2011)
 - Literatur sistem panasbumi Sorik Marapi (Hidayatullah dkk., 2021; Mulyani dkk., 2019; Sarmiento dkk., 2017)
 - Nilai densitas formasi dari literatur geofisika (Telford dkk., 2004; Alsadi & Baban, 2014)

Seluruh data pendukung yang bersifat analog kemudian dilakukan proses digitasi untuk memperoleh data digital yang dapat diolah lebih lanjut dalam perangkat lunak pengolahan data citra, gravitasi, dan pemetaan.

METODOLOGI

a. *Fault Fracture Density (FFD)*

Band 1-7 citra satelit Landsat 8 OLI/TIR diolah di ENVI menggunakan kalibrasi radiometrik dan koreksi atmosferik FLAASH untuk menghasilkan citra yang lebih tajam. Setelah itu, dilakukan *Principal Component Analysis (PCA)* pada band 2-7, dan PC1, PC2, serta PC3 terpilih sebagai yang paling representatif dengan kumulatif persentase informasi 99.6%. Hasil PCA kemudian difilter menggunakan Directional dan Laplacian Filter untuk memperjelas keberadaan kelurusan. Citra yang telah difilter diolah lebih lanjut di PCI Geomatica menggunakan algoritma LINE Module untuk ekstraksi kelurusan otomatis. Hasil ekstraksi kemudian dibandingkan dengan kondisi geologi area penelitian, yaitu pola struktur geologi berupa kelurusan, sesar, dan zona lemah yang teridentifikasi pada peta geologi regional. Perbandingan ini dilakukan untuk memastikan bahwa lineaments yang terdeteksi secara citra memiliki keterkaitan dengan struktur geologi sebenarnya di lapangan. Selanjutnya dilakukan perhitungan *lineament density* menggunakan ArcGIS, dengan parameter yang dihitung meliputi jumlah kelurusan per satuan luas, panjang total kelurusan per satuan luas, dan orientasi dominan kelurusan. Nilai *density* yang telah dihitung kemudian di-grid menggunakan Surfer untuk menghasilkan peta kontur Fault Fracture Density (FFD).

b. *Land Surface Temperature (LST)*

Band termal, NIR, dan RED yang telah dikoreksi dan dipotong dimasukkan ke dalam ArcGIS. Selanjutnya, perhitungan LST dilakukan menggunakan *tools Raster Calculator* pada ArcGIS dengan beberapa tahapan, yaitu menghitung TOA *spectral radiance*, *Brightness Temperature (BT)*, nilai *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* dan Proporsi Vegetasi (PV), serta nilai emisivitas permukaan tanah (ϵ). Setelah semua langkah tersebut selesai, perhitungan suhu permukaan tanah (LST) dilakukan dengan menggunakan hasil dari tahapan sebelumnya. Terakhir, peta *Land Surface Temperature (LST)* dibuat di ArcGIS dengan mengubah properti raster LST yang telah dihitung.

c. *Band Ratio*

5 band yang telah dikoreksi dan dipotong sebelumnya, yaitu band 2, 4, 5, 6, dan 7 dimasukkan ke dalam ArcGIS. Selanjutnya dengan menggunakan *tools Raster Calculator*, dilakukan perhitungan rasio Sabin dengan membagi band 4/2, 6/7, dan 6/7. Hasil rasio kemudian dikompositkan pada saluran RGB untuk mendapatkan *false color composite* menggunakan *tools Composite Band*. Komposisi band ini kemudian diklasifikasi dengan mempertimbangkan tampilan warna asli dan hubungannya dengan manifestasi permukaan untuk mengidentifikasi klasifikasi warna yang menunjukkan adanya batuan atau area teralterasi hidrotermal. Klasifikasi ini dilakukan dengan menggunakan *tools Image Classification* dengan penggunaan beberapa training sample pada ArcGIS. Setelah itu dilakukan pembuatan peta distribusi area teralterasi hidrotermal.

d. *Pengolahan Data Gravitasi TOPEX*

Data mentah berupa koordinat, elevasi, dan gravitasi (*free air anomaly*) dari TOPEX dimasukkan ke Microsoft Excel untuk mengestimasi densitas rata-rata batuan dan koreksi *bouger*.

Selanjutnya dilakukan koreksi medan menggunakan data DEM SRTM pada Oasis Montaj, menghasilkan koreksi terrain yang ditambahkan dengan koreksi bouger dan dikurangkan dengan anomali udara bebas (FAA) untuk mendapatkan *Complete Bouger Anomaly* (CBA). Kemudian CBA dipisahkan menjadi anomali regional dan residual melalui analisis spektral dan filter spektrum Bandpass pada Oasis Montaj. Hasil analisis spektral juga digunakan untuk memperkirakan kedalaman anomali regional, residual, dan *noise*. Anomali residual difilter lagi dengan FHD dan SVD untuk memperjelas keberadaan struktur geologi bawah permukaan. Hasil filter FHD dan SVD di-overlay dan di-slicing pada Surfer serta diplot pada Microsoft Excel untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan. Struktur yang teridentifikasi dipetakan dan dimodelkan menggunakan *Forward Modelling* 2D di Oasis Montaj berdasarkan profil anomali residual, estimasi kedalaman, stratigrafi, penampang geologi, dan densitas rata-rata formasi hingga mencapai model ideal dengan batas *error* kecil. Nilai *error* yang diperoleh dalam pemodelan 2D gravitasi sebesar 0.864 menunjukkan tingkat akurasi model dengan empat input formasi yang digunakan, yaitu Kuantan, Silungkang, Lapisan Paleozoik dan Mesozoik, serta Lapisan Vulkanik. Error ini menggambarkan seberapa dekat hasil model dengan data yang sebenarnya, dengan nilai yang lebih rendah menunjukkan kesesuaian yang lebih baik antara model dan data observasi

e. Integrasi Pengolahan Data

Hasil pengolahan data citra satelit dan gravitasi diintegrasikan menjadi satu analisis melalui proses *overlay*, korelasi spasial, dan pembobotan antarparameter. Variabel yang digunakan meliputi suhu permukaan tanah (LST), distribusi area teralterasi hidrotermal, *Fault Fracture Density* (FFD), serta anomali gravitasi Bouger. Setiap parameter dinormalisasikan menjadi indeks dengan rentang nilai yang sama agar dapat dibandingkan secara kuantitatif. Selanjutnya seluruh peta parameter diproyeksikan ke sistem koordinat seragam dan ditumpangtindihkan untuk melihat zona yang menunjukkan kesesuaian anomali. Integrasi ini dibantu oleh data pendukung berupa peta geologi regional, DEM, batas morfologi, dan lokasi manifestasi panasbumi, sehingga hasil akhir tetap mengikuti kontrol geologi yang ada.

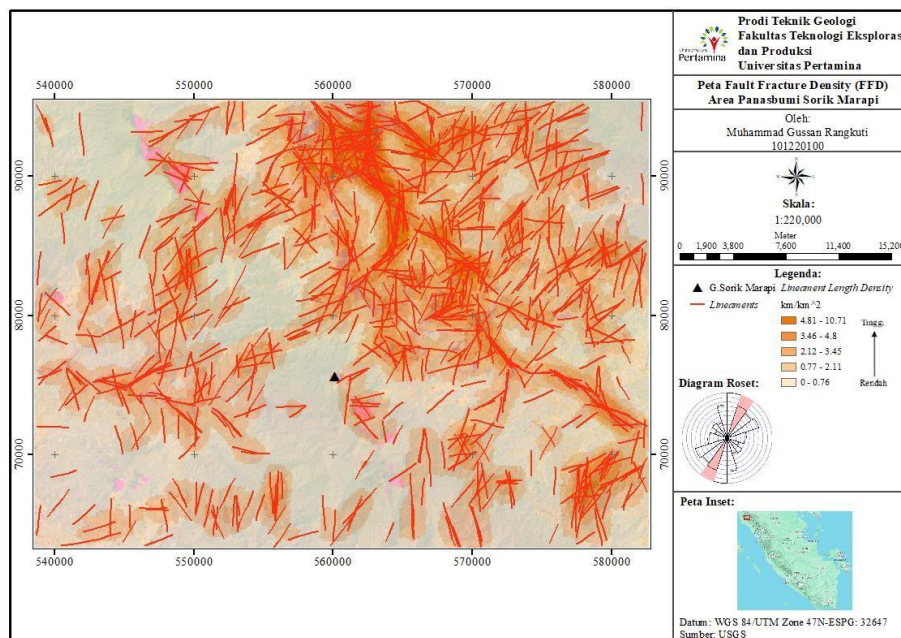
Pada tahap akhir, integrasi tersebut digunakan untuk menilai karakteristik permeabilitas pada area penelitian. Permeabilitas yang dimaksud adalah kemudahan fluida hidrotermal bergerak melalui batuan, yang diestimasi secara tidak langsung dari indikator permukaan dan bawah permukaan. Penilaiannya dilakukan secara kuantitatif berdasarkan nilai FFD (jumlah dan kepadatan kelurusan), nilai intensitas alterasi, elevasi LST, serta zona gaya berat rendah yang mengindikasikan batuan lebih retak atau berpori. Nilai gabungan parameter kemudian dipetakan dalam tiga kelas yaitu tinggi, sedang, dan rendah, yang menunjukkan tingkat potensi jalur aliran fluida panasbumi. Melalui integrasi ini diperoleh gambaran zona dengan permeabilitas paling potensial di daerah Panasbumi Sorik Marapi.

HASIL

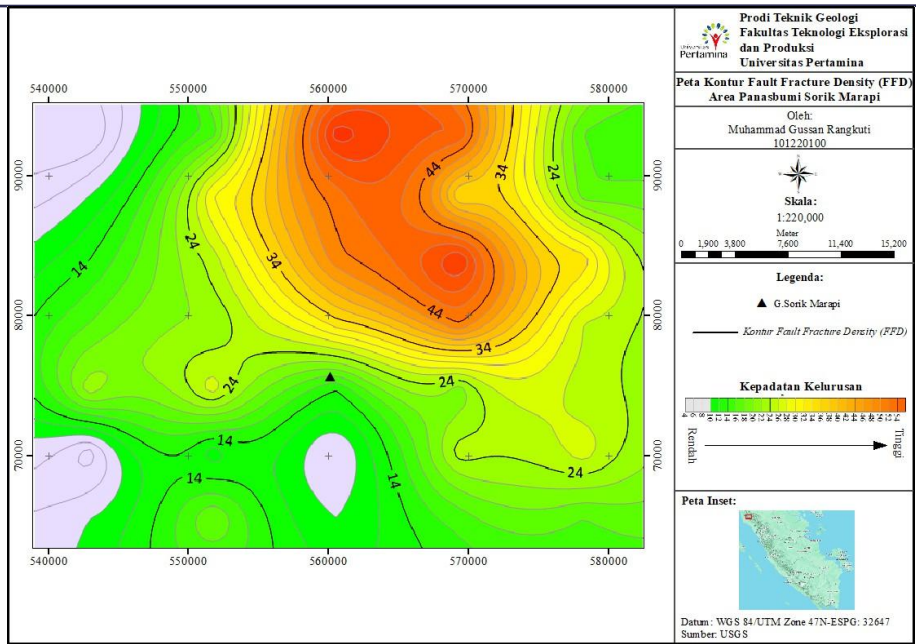
Analisis hasil penelitian ini difokuskan pada karakteristik kelurusan dan distribusi *Fault Fracture Density* untuk mengidentifikasi pola struktur yang berkembang di area penelitian. Interpretasi dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu peta *lineament length density* dan peta kontur FFD, yang digunakan untuk menggambarkan intensitas dan sebaran kelurusan secara kuantitatif maupun spasial.

ANALISIS FAULT FRACTURE DENSITY (FFD)

Pada peta FFD dalam bentuk *lineament length density* orientasi dominan kelurusan adalah timur laut-barat daya. Kepadatan kelurusan dominan berada pada tengah, utara, dan timur laut area penelitian. Total panjang kepadatan kelurusan pada bagian utara yang ditandai warna oranye kemerahan adalah 4.81-10.71 km/km². Lalu pada bagian tengah dan timur laut yang ditandai warna oranye berada pada rentang 3.46-4.8 km/km². Sedangkan total panjang kelurusan pada rentang 0-3.45 km/km² yang ditandai warna oranye terang relatif tersebar pada bagian selatan hingga barat area penelitian (**Gambar 6**). Pada peta kontur FFD, area yang memiliki tingkat kepadatan tinggi adalah area bagian utara penelitian dan berangsur mengecil kebagian lainnya. Rentang total kuantitas kepadatan kelurusan pada bagian utara adalah 44-54 kelurusan dengan warna jingga hingga merah dan berkurang secara perlahan dari nilai 44-4 total kelurusan dengan warna kuning hingga hijau pada arah lainnya (**Gambar 7**). Hasil kedua peta FFD tersebut menunjukkan pola yang sama, yaitu kepadatan kelurusan tinggi berada pada bagian tengah dan utara, menengah pada bagian timur laut, dan rendah pada bagian selatan dan barat area penelitian. Selain itu orientasi persebaran kepadatan tinggi relatif sama menunjukkan arah tenggara-utara pada kedua peta FFD tersebut.



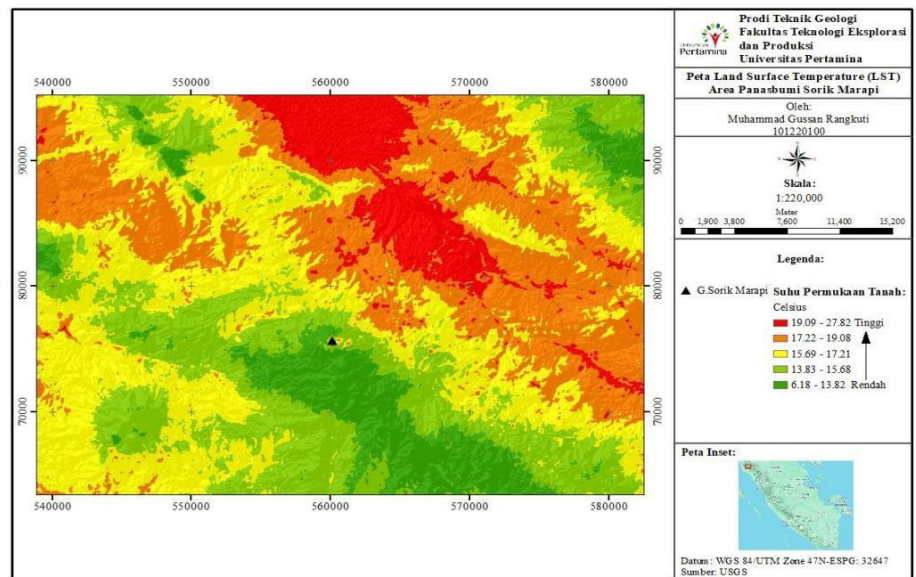
Gambar 6. Peta FFD *lineament length density*.



Gambar 7. Peta kontur FFD.

ANALISIS LAND SURFACE TEMPERATURE (LST)

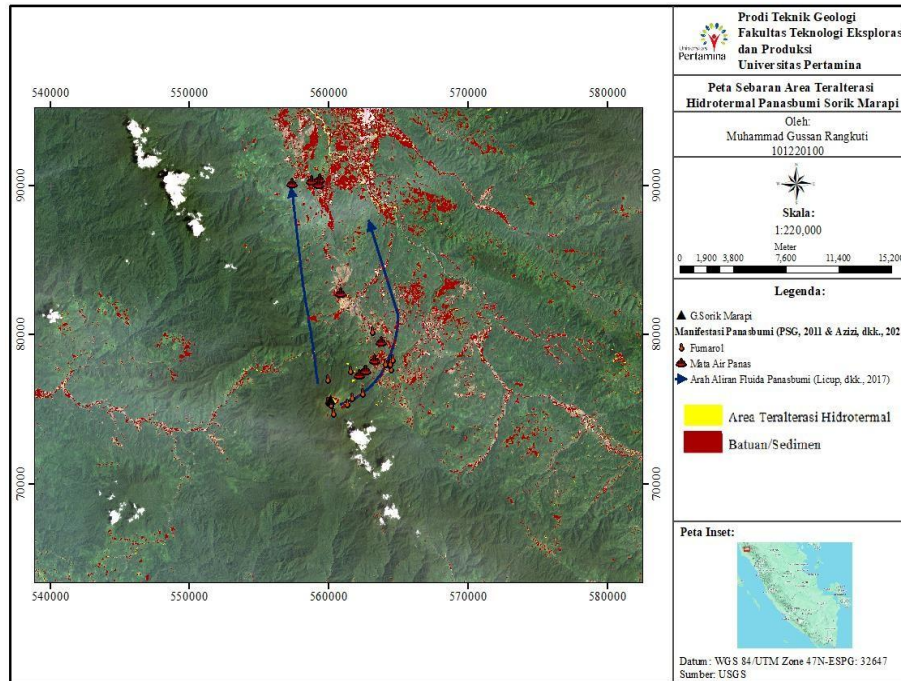
Berdasarkan hasil pengolahan Land Surface Temperature (LST), sebaran suhu permukaan tanah pada area Panas Bumi Sorik Marapi menunjukkan variasi suhu antara 6.18–27.82°C (Gambar 8). Klasifikasi suhu pada peta LST dibagi ke dalam tiga kategori—suhu rendah, menengah, dan tinggi—yang diperoleh melalui metode *natural breaks* (Jenks) pada proses klasifikasi raster (lihat penjelasan pada Metode). Kategori suhu rendah (6.18–15.68°C) ditunjukkan oleh warna hijau dan tersebar pada bagian selatan, timur laut, serta barat laut area penelitian. Suhu menengah (15.69–17.21°C) direpresentasikan dengan warna kuning dan tersebar merata di seluruh area dengan dominasi pada bagian tengah. Adapun suhu tinggi (17.21–27.82°C) ditunjukkan oleh warna merah dan terkonsentrasi di bagian tenggara hingga utara area penelitian.



Gambar 8. Peta Land Surface Temperature (LST).

ANALISIS PETA SEBARAN ALTERASI

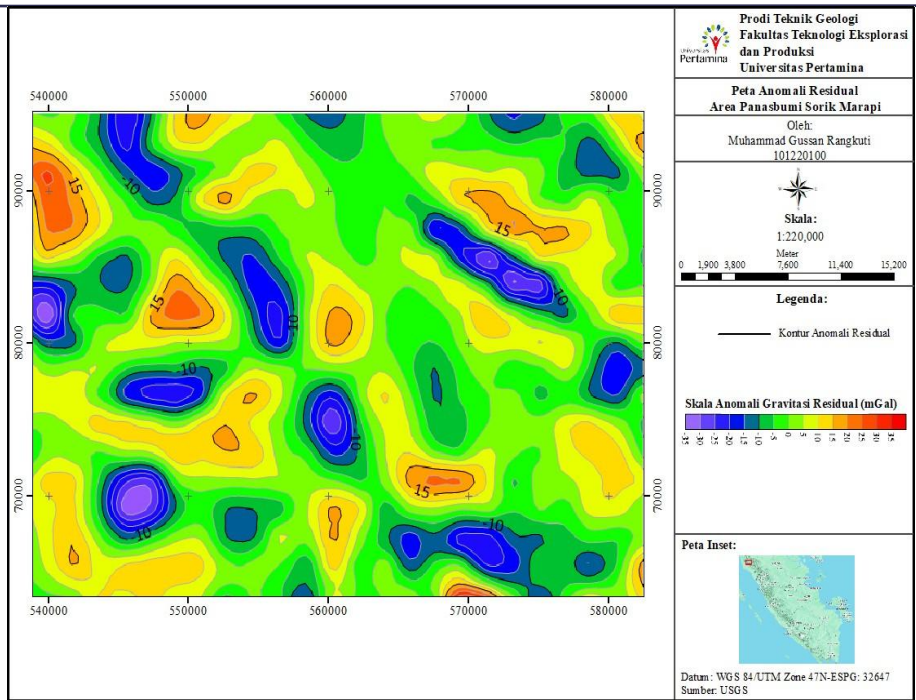
Berdasarkan hasil Peta Sebaran Area Teralterasi Hidrotermal (**Gambar 9**), distribusi area yang diperkirakan terpengaruh oleh aktivitas hidrotermal di permukaan tampak dominan berada pada bagian tengah hingga utara area panasbumi. Area teralterasi yang ditandai warna kuning memperlihatkan orientasi umum tenggara–utara, meskipun sebarannya tidak membentuk pola yang sangat teratur. Pola sebaran ini pada umumnya berada di sekitar zona manifestasi panasbumi dan mengikuti kecenderungan arah aliran fluida ke utara area penelitian.



Gambar 9. Peta distribusi area teralterasi hidrotermal.

ANALISIS ANOMALI REGIONAL DAN RESIDUAL

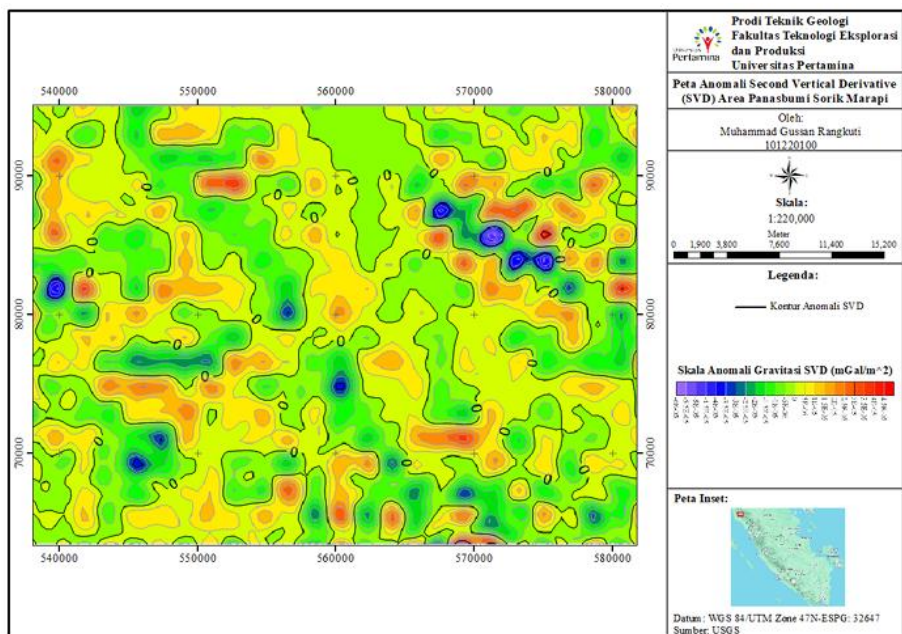
Peta residual merupakan peta yang digunakan untuk mendapat perkiraan struktur geologi bawah permukaan karena sifat anomalnya yang relatif dangkal dengan kedalaman rata-rata anomali yang didapatkan sebesar 1.3 km. Tekstur kontur pada peta ini relatif lebih kasar dibanding regional akibat efek anomali yang relatif lebih dangkal. Hal ini juga dapat dilihat dengan bentuk kontur yang relatif tidak memiliki banyak *closure* lagi (**Gambar 10**). Persebaran anomali juga tampak sudah lebih terspesifikasikan pada seluruh bagian area penelitian. Orientasi anomali relatif masih pada arah barat laut-tenggara dan timur-barat. Rentang anomali tinggi, menengah, dan rendah secara berturut adalah - 35-5 mGal, 5-20 mGal, dan 25-35 mGal. Jika dilihat sebaran kontras anomali rendah dan tinggi berada pada bagian timur laut, tengah, dan barat daya area penelitian dengan orientasi timur-barat dan barat laut-tenggara.



Gambar 10. Peta anomali residual.

Berdasarkan Gambar 11, nilai FHD pada area penelitian terbagi ke dalam tiga kategori—anomali rendah, menengah, dan tinggi—yang ditentukan berdasarkan hasil klasifikasi rentang nilai pada data FHD (lihat penjelasan pada bagian Metode). Rentang nilai anomali rendah berada pada 0–0.012 mGal/m, anomali menengah berada pada 0.014–0.022 mGal/m, dan anomali tinggi berada pada 0.024–0.032 mGal/m.

Anomali tinggi cenderung berasosiasi dengan bagian timur laut, selatan, tengah, barat daya, hingga barat laut area penelitian, dengan kecenderungan orientasi barat laut–tenggara. Area ini mengindikasikan kemungkinan keberadaan struktur geologi yang memengaruhi variasi gradien anomali. Untuk memperkuat interpretasi keberadaan dan ketampakan bidang sesar, dilakukan pula analisis lanjutan menggunakan metode SVD untuk mengidentifikasi anomali dangkal.

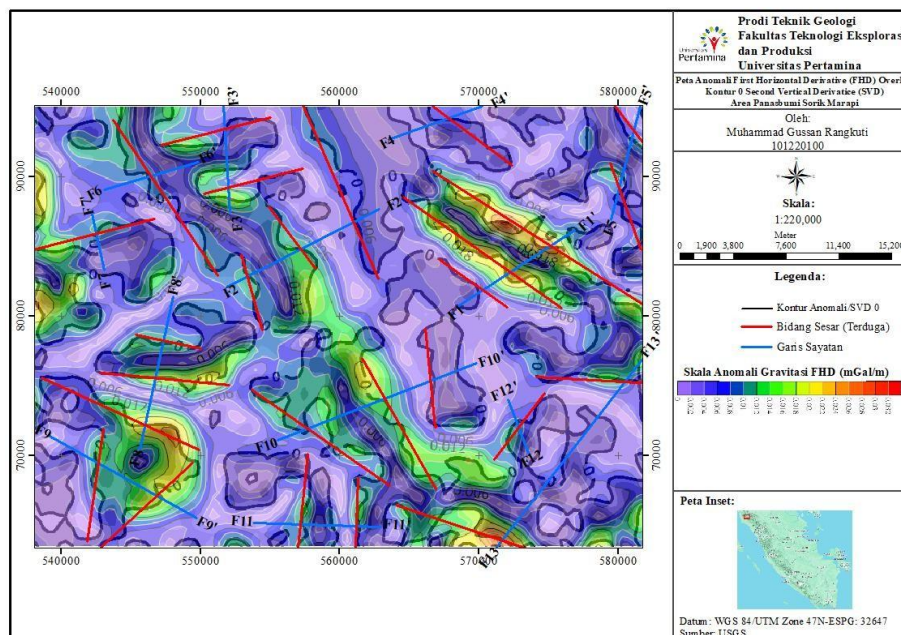


Gambar 11. Peta second vertical derivative area penelitian.

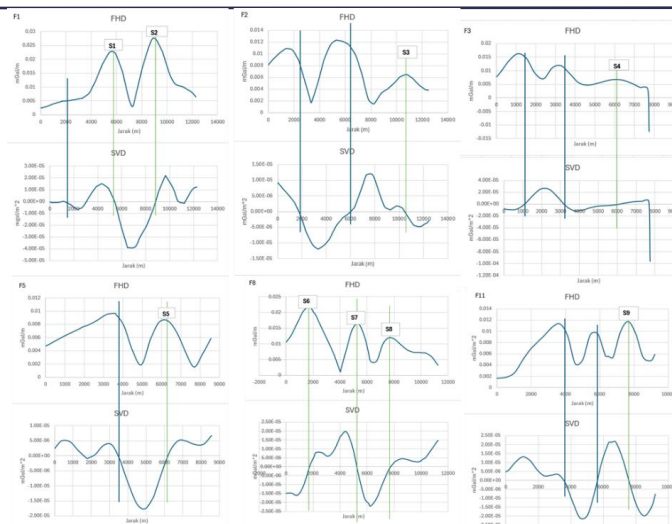
Pada peta SVD (**Gambar 11**) dapat dilihat nilai kontur 0 SVD yang mengindikasikan struktur geologi bawah permukaan memiliki orientasi yang sama dengan dominan anomalnya. Kontur 0 SVD juga tampak cukup tersebar pada seluruh area penelitian. Terdapat 26 bidang struktur geologi yang didapatkan berdasarkan kombinasi nilai maksimum FHD dan kontur 0 SVD. Bidang-bidang tersebut merupakan perkiraan struktur geologi bawah permukaan berupa sesar yang ada pada area penelitian. 26 bidang sesar tersebut memiliki beberapa orientasi, yaitu barat laut-tenggara, utara-selatan, timur laut-barat daya, dan timur-barat dengan arah yang paling dominan adalah NW-SE.

Terdapat 13 sayatan yang digunakan pada 26 bidang sesar (**Gambar 12**). Dari hasil Sayatan tersebut didapatkan 9 bidang patahan yang tervalidasi bertemu pada kurva maksimum FHD dan 0 SVD (**Gambar 13**). Sedangkan 17 bidang lainnya tidak tervalidasi secara kurvatif (**Gambar 14**). Selain validasi keberadaan bidang struktur, pendekatan kurvatif juga dapat memperkirakan jenis sesar. Untuk bidang sesar S1, S2, S3, S5, S6, S7, S8, dan S9 memiliki penunjaman kurva gmin pada laju perubahan gradien (SVD) yang lebih besar dibanding dengan gmaxnya, sehingga diinterpretasikan sebagai sesar turun. Sedangkan untu bidang sesar S4 memiliki penunjaman kurva gmin pada laju perubahan gradien (SVD) lebih kecil dibanding gmaxnya, sehingga diinterpretasikan sebagai sesar naik.

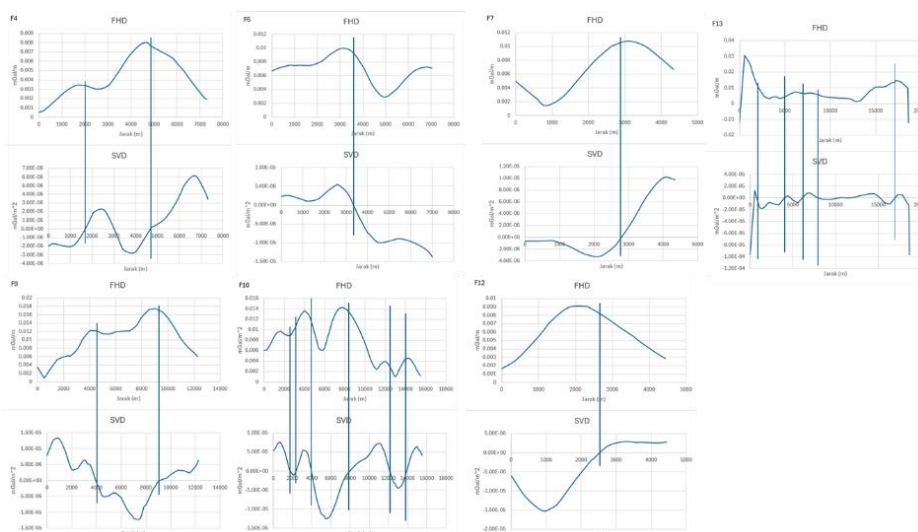
Pada peta sebaran struktur geologi bawah permukaan, terdapat 9 bidang sesar yang tervalidasi dan diketahui jenisnya, yang ditandai dengan garis hitam solid. Namun, pada peta tersebut, terlihat adanya kemiripan pola anomali pada beberapa area, yang kemudian dijadikan acuan untuk memperkirakan keberadaan sesar-sesar lainnya, yang ditandai dengan garis hitam putus-putus (**Gambar 15**). Sesar bawah permukaan yang teridentifikasi memiliki orientasi relatif timur-barat, dengan sesar yang bergerak turun pada arah timur-barat, sementara pada arah utara-selatan, sesar yang terdeteksi adalah sesar yang bergerak naik.



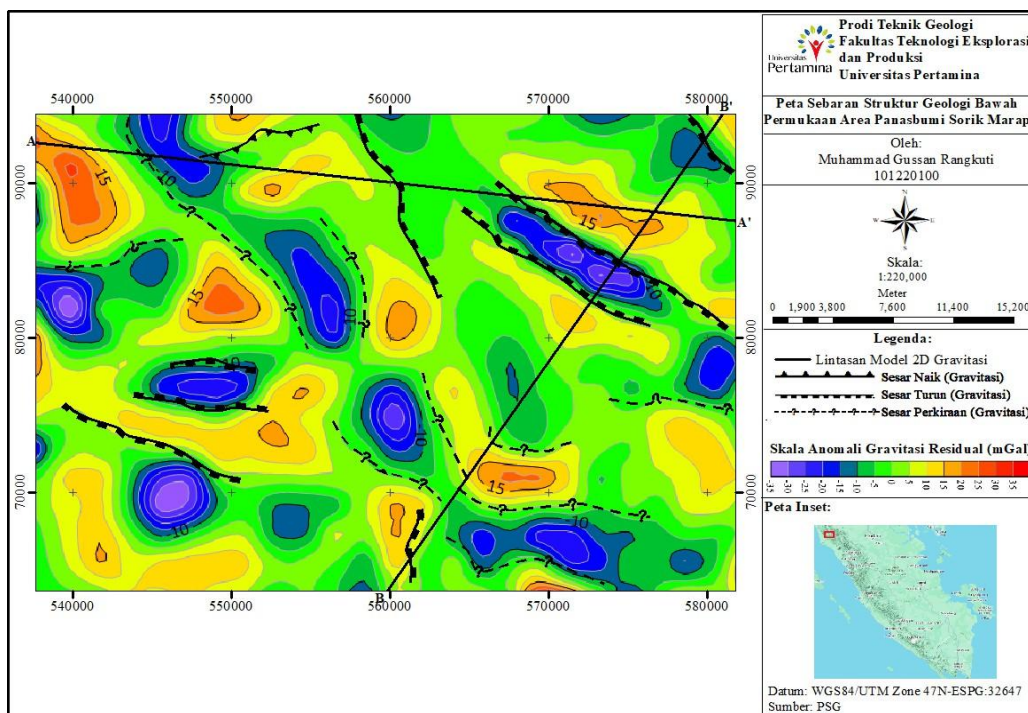
Gambar 12. Overlay FHD dan 0 SVD.



Gambar 13. Bidang sesar tervalidasi kurvatif.

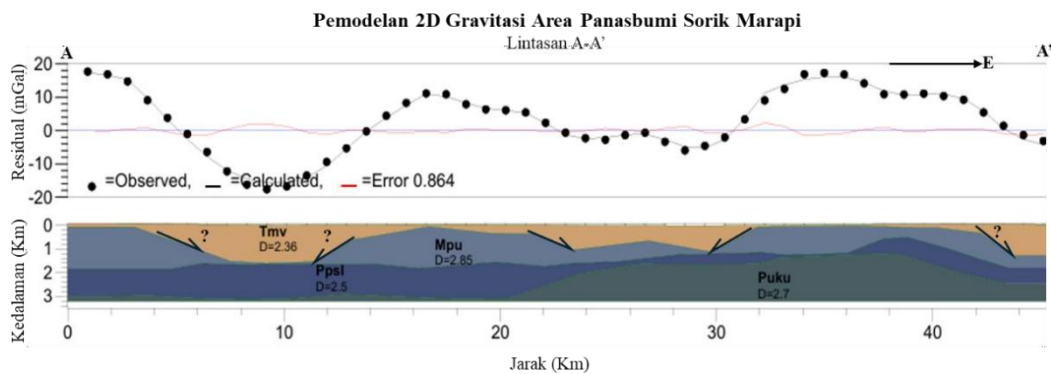


Gambar 14. Bidang sesar tidak tervalidasi kurvatif.

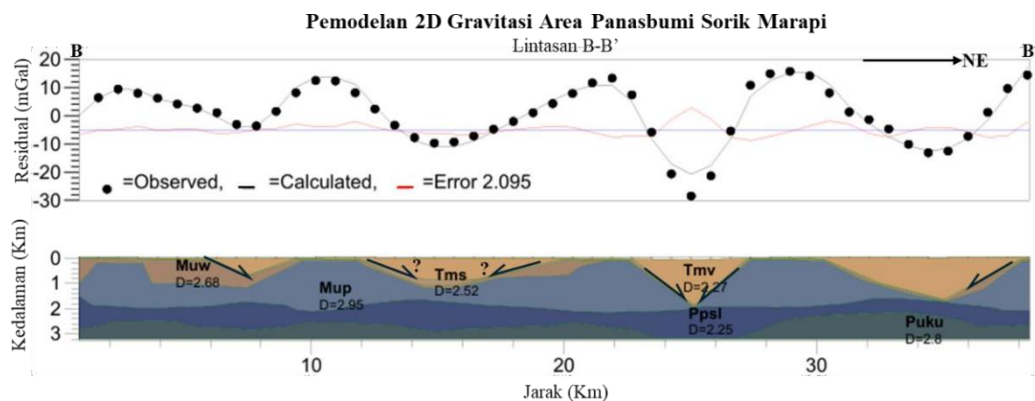


Gambar 15. Peta sebaran struktur geologi bawah permukaan.

Hasil pemodelan 2D gravitasi yang dilakukan pada lintasan A-A' (**Gambar 15**) arah barat-timur di peta sebaran struktur geologi bawah permukaan dengan *error* 0.864 pada empat input formasi, yaitu Kuantan, Silunggang, Lapisan Paleozoik/dan Mesozoik, dan Lapisan Vulkanik (Puku, Ppsl, Mpu, dan Tmv) mengonfirmasi keberadaan bidang sesar yang ditemukan. Hal ini dapat dilihat pada model lintasan A- A' (**Gambar 15**), pada model tersebut ditemukan keberadaan bidang sesar S2 dan S3 serta 3 bidang sesar yang diperkirakan dengan kedalaman rata-rata kemenerusan bidangnya sekitar 1.5 km di bawah permukaan tanah (**Gambar 16**). Kemudian, untuk Lintasan B-B' arah barat daya-timur laut dengan *error* 2.1 pada 6 input formasi, yaitu Kuantan, Silunggang, Lapisan Paleozoik/dan Mesozoik, Woyla, Sihapas dan Lapisan Vulkanik (Puku, Ppsl, Mpu, Muw, Tms, dan Tmv) terlihat keberadaan Sesar S9, S1, S2, dan S5 serta dua bidang sesar yang diperkirakan dengan kedalaman rata-rata kemenerusan bidangnya sekitar 1.3 km di bawah tanah (**Gambar 17**).



Gambar 16. Model 2D gravitasi lintasan A-A'.

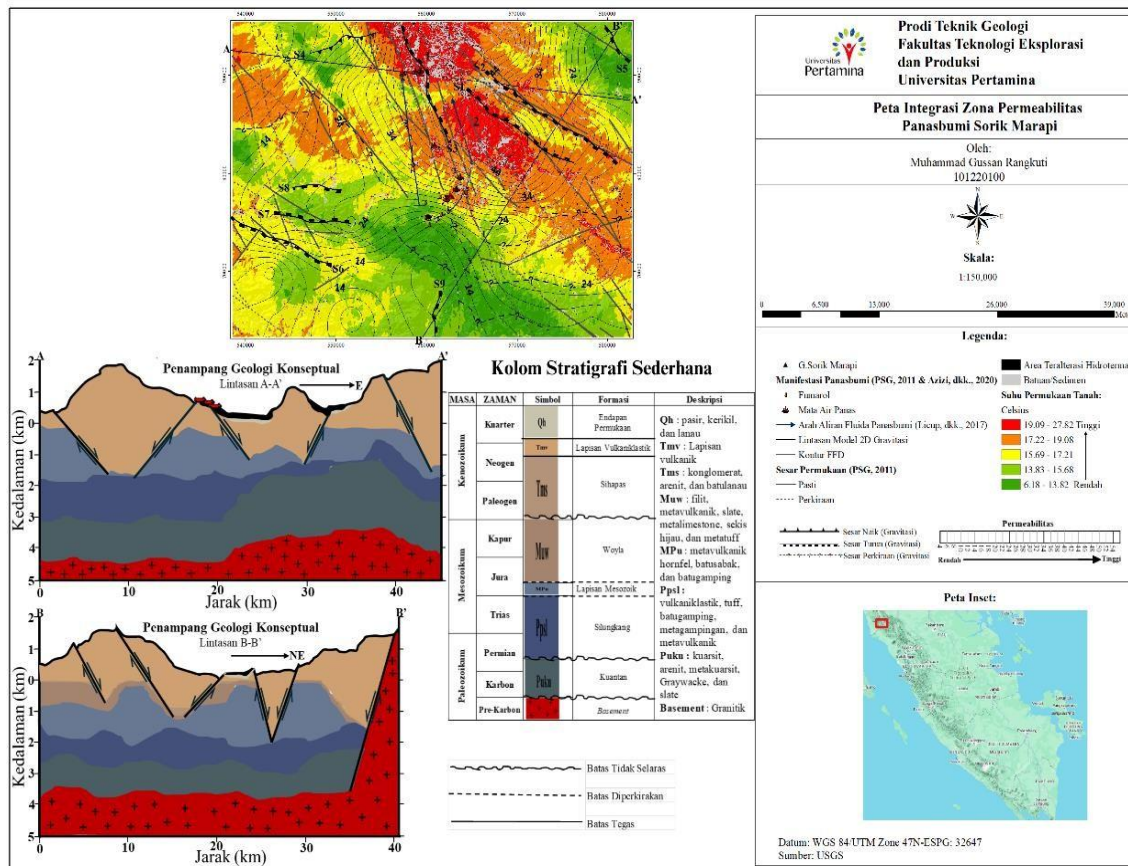


Gambar 17. Model 2D gravitasi lintasan B-B'.

Pada peta integrasi zona permeabilitas panasbumi Sorik Marapi (**Gambar 18**) didapatkan hasil berupa gambaran zona permeabilitas dari aspek permukaan dan juga bawah permukaan. Adapun aspek permukaan berupa kondisi kepadatan rekahan (FFD), suhu permukaan tanah, sebaran area terlaras tri hidrotermal, sebaran struktur geologi permukaan, manifestasi permukaan, dan gerak aliran fluida panasbumi. Karakteristik aspek permukaan yang dimiliki di area ini menunjukkan adanya potensi permeabilitas panasbumi yang tinggi, yang terletak pada bagian tengah hingga utara, dengan tren distribusi yang mengarah ke tenggara-utara. Tren ini menunjukkan arah utama pergerakan panasbumi di area Sorik Marapi.

Hasil dari aspek permukaan yang telah dijelaskan di atas juga didukung oleh aspek bawah permukaan yang didapatkan berupa struktur geologi bawah permukaan seperti sesar pada area panasbumi. Berdasarkan aspek permukaan dan juga bawah permukaan di atas, didapatkan bahwa terdapat 2 domain area yang direkomendasikan untuk proses eksplorasi lanjutan pada area

panasbumi Sorik Marapi, yaitu domain satu dan domain dua yang ditandai angka 1 dan 2 pada peta (Gambar 18).



Gambar 18. Peta integrasi zona permeabilitas Panasbumi Sorik Marapi.

DISKUSI

Hasil dari FFD menunjukkan bahwa kelurusan yang relatif pada bagian utara, tengah, dan timur laut dengan pola pemanjangan kontur menuju ke tenggara ini berhubungan dengan deformasi strike-slip yang mengontrol area penelitian. Berdasarkan teori *Strain Ellipse* (Harding, 1985), arah tersebut merupakan bagian dari bidang *Principal Deformation Zone* (PDZ) yang pada bagian tengahnya berasosiasi dengan *pull-apart* Muara Sipongi dan graben Panyabungon (transtension) hingga di utara.

Penampang geologi yang dibuat berdasarkan data gravitasi 2D dan informasi lapangan menunjukkan pola kelurusan yang mengarah ke tenggara-utara, yang berhubungan dengan deformasi strike-slip. Area dengan permeabilitas tinggi menunjukkan sebaran zona terlarasti hidrotermal dan suhu permukaan yang tinggi, sementara area dengan permeabilitas rendah memiliki suhu yang lebih rendah. Berdasarkan analisis FFD dan penampang geologi yang dihasilkan, kami mengidentifikasi dua domain utama yang memiliki potensi untuk eksplorasi lanjutan di area Panasbumi Sorik Marapi.

Sebaran suhu permukaan tanah dapat diinterpretasikan bahwa kondisi anomali rendah hingga menengah kemungkinan besar berasosiasi dengan tutupan vegetasi yang cukup tinggi dan kurangnya efek sirkulasi hidrotermal panasbumi pada area tersebut. Lalu kondisi anomali tinggi disamping dengan tutupan vegetasi yang rendah kemungkinan besar berasosiasi dengan sirkulasi hidrotermal panasbumi atau manifestasi permukaan panasbumi. Pola sebaran suhu permukaan tanah pada arah tenggara hingga utara yang tinggi relatif memiliki pola pemajangan yang sama

dengan zona FFD tinggi dan keberadaan sesar-sesar permukaan disekitarnya, sehingga hal ini dapat mengimplikasikan bahwa pada area tersebut relatif lebih dominan terpengaruh oleh efek sirkulasi fluida hidrotermal panasbumi dibanding area lainnya (Hidayat dkk., 2023). Sementara itu jika dilihat dari hubungannya terhadap formasi batuan permukaan pada area tersebut merupakan sebaran endapan vulkanik permukaan (Qvsm & Qh) dan lapisan vulkanik (Tmv), sehingga hasil emisivitas tanah yang dihasilkan relatif lebih tinggi dibanding area lainnya. Dengan demikian dapat diinterpretasikan bahwa area dengan kondisi anomali suhu permukaan yang tinggi memiliki potensi permeabilitas yang tinggi akibat pengaruh nilai gradien geotermal tinggi dan efek sirkulasi hidrotermal yang lebih dominan.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dengan menggunakan *Fault Fracture Density* (FFD), zona dengan potensi permeabilitas tinggi berada pada bagian utara area Panasbumi Sorik Marapi. Zona potensi permeabilitas menengah terletak pada bagian tengah dan timur laut, sedangkan zona permeabilitas rendah berada di bagian selatan hingga barat area Panasbumi Sorik Marapi. Hal ini menunjukkan bahwa area dengan warna kuning dan merah pada peta (**Gambar 9**) mengindikasikan keberadaan area batuan yang mengalami alterasi hidrotermal, yang sudah diwujudkan oleh warna kuning.

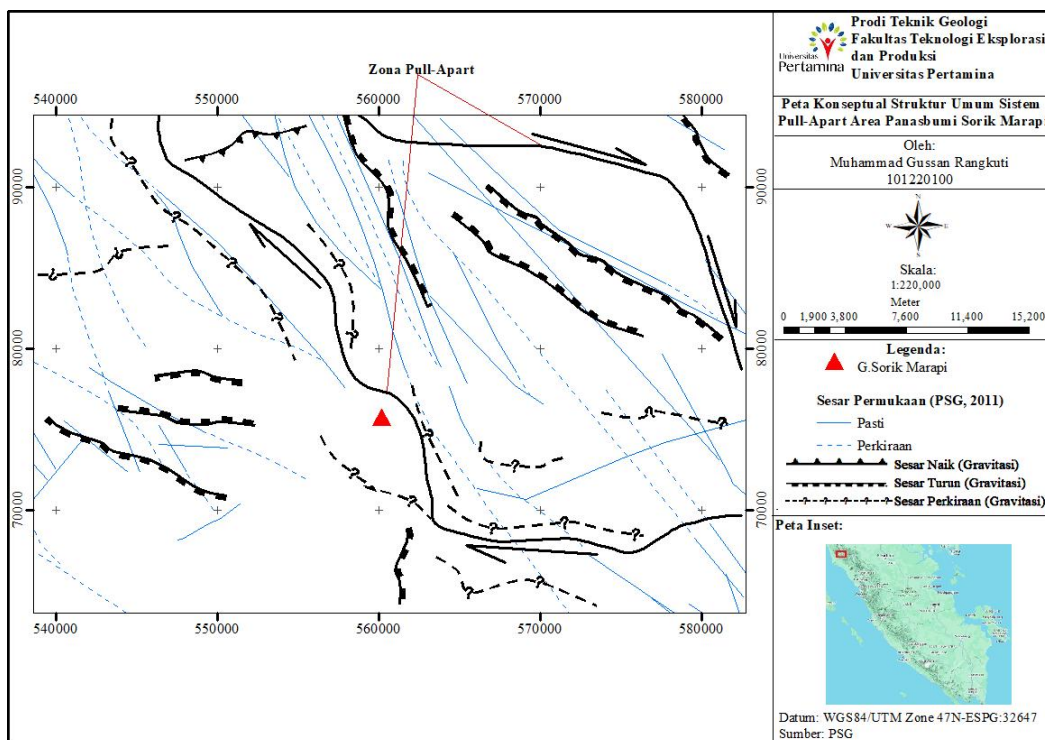
Selain itu, sebaran area terlarastri hidrotermal relatif searah dengan perkiraan zona aliran fluida panasbumi yang mengarah ke tenggara-utara. Zona permeabilitas tinggi, sebaran suhu tinggi, dan pola aliran fluida pada area Panasbumi Sorik Marapi juga relatif memiliki orientasi yang sama. Hal ini dapat dilihat pada peta sebaran area terlarastri hidrotermal yang ditunjukkan dengan warna kuning dan merah, serta sebaran batuan atau sediment yang ditunjukkan dengan warna merah. Meskipun jumlahnya lebih kecil, hal ini menunjukkan adanya hubungan yang erat antara keduanya.

Anomali tinggi pada area Panasbumi Sorik Marapi diperkirakan akibat efek batuan metamorf dan batuan sedimen pada formasi Kuantan, Lapisan Paleozoik/Mesozoik, serta Woyla, dan Sihaaps (Puku, Mpu, dan Mbug, dan Tms). Anomali tersebut juga diperkirakan berhubungan dengan karakteristik struktur geologi seperti sesar, di mana peningkatan suhu dan potensi hidrotermal terjadi pada area yang memiliki nilai anomali tinggi tersebut. Hal ini menunjukkan adanya aktivitas geotermal yang lebih intensif di area yang memiliki anomali tinggi, serta hubungan erat dengan struktur geologi seperti sesar yang berperan dalam meningkatkan pemanasan di kedalaman yang lebih besar. Sedangkan untuk anomali rendah diperkirakan akibat efek formasi Silungkang dan Lapisan Vulkanik (Ppsl, Pps, dan Tmv) dengan batuan penyusun utamanya adalah vulkaniklastik dan batugamping (Hinze dkk., 2013). Sebaran anomali pada peta ini lebih jelas menampilkan keberadaan kontras perubahan nilai anomali baik pada timur, tengah, dan barat area penelitian. Kontras anomali yang cukup jelas pada peta ini diperkirakan mengindikasikan beberapa area yang dapat berasosiasi dengan struktur geologi bawah permukaan (**Gambar 10**).

Ketampakan peta sebaran struktur geologi bawah permukaan (Gambar 14) mengimplikasikan secara tektonik bahwa ketika pada area yang dipengaruhi oleh sesar mendatar dalam hal ini sesar mendatar Sumatra, produk bawah permukaan yang dihasilkan relatif pada arah timur-barat adalah sesar turun sedangkan pada arah relatif utara-selatan adalah sesar naik (Harding, 1985). Jika dilihat dari hubungannya terhadap hasil FFD yang didapatkan dengan dominan arah timur laut-barat daya dapat diperkirakan bahwa fracture yang terbentuk pada area penelitian merupakan rekahan akibat proses ekstensional (NE-SW) yang terjadi pada zona *pull-apart* pada area penelitian dan diperkirakan

Rangkuti & Pasaribu

berkorelasi dengan sesar-sesar normal minor akibat proses bukaan yang terjadi pada zona tersebut (**Gambar 19**). Selain itu dari hasil sebaran sesar yang ditemui *trend* dan pola pemanjangan arah dominan bidang sesar adalah tenggara-utara. Hal ini mengimplikasikan bahwa area tersebut berkorelasi dengan Principal Displacement Zone (PDZ) akibat deformasi sesar mendatar Sumatra dengan keberadaan sesar turun yang menunjukkan produk hasil *transtension* pada arah barat-timur serta keberadaan sesar naik yang menunjukkan *transpression* pada arah utara area penelitian. Sehingga hasil sebaran struktur bawah permukaan yang didapatkan (**Gambar 14**) pada pengolahan data gravitasi satelit pada area Panasbumi Sorik Marapi ini sesuai dengan kondisi atau proses tektonik regional yang bekerja pada area penelitian. Pada kedua lintasan tersebut dijumpai bentukan geometri struktur yang relatif sama berupa graben yang berasosiasi dengan sesar turun di bawah permukaan. Ketampakan graben dan sesar turun tersebut mengimplikasikan bahwa proses *transtension* yang terjadi pada zona *pull-apart* (**Gambar 18**) sangat intensif dan dominan mengontrol tingkat permeabilitas sekunder pada area panasbumi Sorik Marapi.



Gambar 19. Konseptual struktur umum sistem *pull-apart* area Panasbumi Sorik Marapi.

Area dengan potensi permeabilitas panabumi yang paling tinggi pada bagian tengah hingga utara dengan *trend* tenggara-utara di Area Panasbumi Sorik Marapi memiliki karakteristik permukaan paling baik dibanding sekitarnya (**Gambar 17**), yaitu pola kontur kepadatan kelurusan (FFD) tenggara-utara dengan nilai 24-54 total kelurusan yang mengindikasikan tingkat keberadaan dan kepadatan rekahan yang tertinggi dibanding area lainnya. Hal ini juga mengimplikasikan bahwa area ini adalah zona yang paling intensif dipengaruhi oleh proses tektonik maupun vulkanik, di mana struktur geologi menjadi pengontrol permeabilitas sekunder panasbuminya. Berdasarkan teori *Strain Ellipse* (Harding, 1985) diperkirakan bahwa area ini adalah bagian dari *Principal Displacement Zone* (PDZ) dan zona *transtension* yang menghasilkan produk deformasi lebih intensif seperti rekahan pada zona *pull-apart* dibanding area lain. Suhu permukaan tanah di area ini juga menunjukkan anomali tertinggi dengan nilai 17.2-27.80°C dengan pola pemanjangan suhu utara-tenggara. Anomali suhu tersebut diinterpretasikan sebagai pengaruh dari sirkulasi hidrotermal permukaan akibat aktivitas panasbumi yang lebih dominan terjadi pada area tersebut serta menunjukkan bahwa area dengan tingkat

rekahan yang tinggi juga memiliki suhu permukaan tanah yang tinggi. Selain itu area teralterasi hidrotermal dominan tersebar pada bagian ini, menunjukkan bahwa pengaruh sirkulasi hidrotermal yang sampai hingga permukaan dominan terbentuk pada area ini didukung juga dengan pola gerak fluida dan sebaran manifestasi permukaan yang saling berhubungan semakin mengindikasikan bahwa potensi permeabilitas Panasbumi Sorik Marapi yang paling tinggi berada pada area ini. Potensi Permeabilitas tinggi tersebut juga didukung oleh aspek bawah permukaan yaitu pada area penelitian terdapat 8 bidang sesar turun (S1, S2, S3, S5, S6, S7, S8, dan S9), 1 bidang sesar naik (S4), dan 9 bidang sesar perkiraan (inferred). Berdasarkan teori strain ellipse (Harding, 1985) keberadaan bidang sesar turun menunjukkan hasil proses transtension (barat-timur) dan bidang sesar naik menunjukkan hasil proses transpression (utara-selatan) pada sistem deformasi sesar mendatar Sumatra. Pada beberapa bidang sesar bawah permukaan yang ditemukan memiliki korelasi relatif terhadap bidang-bidang sesar permukaan, yaitu bidang S1 bersinggungan, bidang S2, S3, dan S5 berhimpit dengan bidang sesar permukaan dengan *trend* bidang hampir sama (barat laut-tenggara). Lalu untuk S6 relatif berpotongan dan *trend* bidang hampir sama. Kemudian untuk S4, S7, S8, dan S9 tidak menunjukkan hubungan dengan bidang sesar permukaan. Untuk bidang-bidang sesar yang berhubungan dapat mengimplikasikan bahwa bidang sesar permukaan dapat meneruskan hingga kedalaman bidang sesar bawah permukaan. Terdapat satu kemiripan umum antara bidang sesar permukaan maupun bawah permukaan, yaitu *trend* dominan bidangnya barat laut-tenggara dengan kepadatan bidang sesar dominan berada pada bagian tengah-utara area penelitian. Hal tersebut diperkirakan karena area ini merupakan bagian *Principal Displacement Zone* (PDZ) dan transtension (*pull-apart*) dari deformasi sesar mendatar Sumatra (Harding, 1985). Sehingga hasil deformasi berupa struktur geologi baik dipermukaan maupun bawah permukaan akan dominan terbentuk dan relatif lebih intensif pada area ini dibanding area lainnya.

Tabel 2. Perbandingan karakteristik parameter permeabilitas area domain.

Parameter Permeabilitas	Domain	
	1	2
Sesar Bawah Permukaan	Terdapat bidang S3	Terdapat bidang S1
Kepadatan Kelurusan	Berada direntang 50-52 total kepadatan kelurusan	Berada direntang 46-48 total kepadatan kelurusan
Area Teralterasi Hidrotermal	Keterdapatan tinggi	Keterdapatan rendah
Suhu Permukaan Tanah	19.1°-27.8° C	19.1°-27.8° C
Keberadaan Manifestasi Permukaan	Ditemukan pada bidang sesar (S3) dan sesar permukaan	Tidak Ditemukan
Sesar Permukaan	Berhimpit dengan bidang S3	Bersinggungan dengan bidang S1
Arah Aliran Fluida	Melewati domain	Melewati domain

Berdasarkan **Tabel 2** di atas yang menjadi pembeda utama antara 2 area domain tersebut adalah perkiraan kemenerusan bidang sesar permukaan dengan bawah permukaan yang ditandai dengan bidang S3 pada domain 1 lebih kuat asosiasinya dibanding bidang S1 pada domain 2 dengan bidang sesar permukaan. Selain itu juga di sekitar bidang sesar pada area domain satu ditemukan keberadaan manifestasi permukaan mulai dari bagian upflow berupa fumarol hingga outflow berupa mata air panas. Sedangkan pada bidang sesar di domain area 2 manifestasi permukaan tidak ditemukan sama sekali, sehingga hal ini menunjukkan bahwa area domain satu lebih

direkomendasikan untuk proses eksplorasi lanjutan dibanding area domain 2 pada area Panasbumi Sorik Marapi.

KESIMPULAN

Sebaran zona permeabilitas panasbumi pada area Panasbumi Sorik Marapi dapat dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu rendah, menengah, dan tinggi. Zona permeabilitas rendah terletak di bagian selatan hingga barat dengan total panjang kelurusan 0-2 km/km² dan kepadatan 4-24 kelurusan, lalu zona menengah berada di bagian timur laut dengan total panjang kelurusan 2.12-4.8 km/km² dan kepadatan 24-34 kelurusan. Sementara zona dengan permeabilitas tinggi berada di bagian tengah hingga utara dengan total panjang kelurusan 4.81-10.71 km/km² dan kepadatan 34-54 kelurusan.

Pada area penelitian didapati sembilan bidang struktur geologi bawah permukaan yang terdiri dari delapan sesar turun dan satu sesar naik, serta sembilan bidang sesar yang diperkirakan. Area dengan permeabilitas tinggi juga menunjukkan sebaran zona teralterasi hidrotermal dan suhu permukaan tanah yang tinggi, begitu pula sebaliknya. Berdasarkan karakteristik permukaan dan bawah permukaan, metode klasifikasi zona-zona ini dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi kelurusan, kepadatan, serta potensi hidrotermal yang teridentifikasi.

SARAN

Penulis berterimakasih banyak untuk seluruh rekan-rekan maupun jajaran yang berada di Program Studi Teknik Geologi, Universitas Pertamina atas bantuan dan fasilitas yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, H., & Pekkan, E. (2021). Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS—A Review. *Geosciences*, 11(5), 1–31. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>
- Ahmed, A. (2020). Hydrothermal Alteration Mapping for Geothermal Exploration in Manda- Inakir Area, NW of the Republic of Djibouti. *Proceedings World Geothermal Congress*, 1–9.
- Alhusni, H., Satria, T., Perdana, P., Purwanto, E. H., & Setyawan, H. (2023). Geothermal Business Outlook in Indonesia. *Proceedings of the 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, USA*, 6–8.
- Alsadi, H. N., & Baban, E. N. (2014). *Introduction to Gravity Exploration Method*. University of Sulaimani.
- Farahbakhsh, E., Chandra, R., Olierook, H. K. H., Scalzo, R., Clark, C., Reddy, S. M., & Müller, R. D. (2020). Computer vision-based framework for extracting tectonic lineaments from optical remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(5), 1760–1787. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1674462>

- Harding, T. P. (1985). Seismic Characteristics and Identification of Negative Flower Structures, Positive Flower Structures, and Positive Structural Inversion. *AAPG Bulletin*, 69. <https://doi.org/10.1306/AD462538-16F7-11D7-8645000102C1865D>
- Hidayat, M. R., Marin, J., Abdurrahman, R. B., Devienna, S. N., & Fatimah, I. N. (2023). Land Surface Temperature (LST) and Fault Fracture Density (FFD) Analysis in Bukit Kili- Gunung Talang Geothermal Area, West Sumatra. *Journal of Aceh Physics Society*, 12(2), 25–31.
- Hidayatullah, M. S., Haryanto, A. D., Hutabarat, J., & Hidayat, R. (2021). Determination of Geothermal Reservoir Zone of Sorik Marapi, Mandailing Natal, North Sumatra. *Indonesian Association of Geologists Journal*, 1(1), 13–24. <https://doi.org/10.51835/iagij.2021.1.1.24>
- Hinze, W. J., Frese, R. R. B. von, & Saad, A. H. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration, Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.
- Hussaini, A., Idi, B. Y., Ndikilar, C. E., Nasir, M. M., Alhassan, A., Bala, N., Ibrahim, A., Yakubu, N., & Ayuba, I. (2022). Determination of depth to basement using spectral analysis of aeromagnetic data over Azare segment of Chad Basin. *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(4b). <https://doi.org/10.4314/dujopas.v7i4b.20>
- Ihlen, V. (2019). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. U.S. Geological Survey.
- Licup, A. C., Baltasar, A. S. J., & Juandi, D. (2017). Geothermal 3D Subsurface Modeling—A Case Study from Sorik Marapi Field, Indonesia. *Proceedings: The 5th Indonesian International Geothermal Convention and Exhibition (IIGCE)*.
- Maneja, F. C., Omac, X. L., & Villareal, M. J. Z. (2017). Update on the Exploration and Development Drilling at the Sorik Marapi Geothermal Field, North Sumatra, Indonesia. *Proceedings: The 5th Indonesian International Geothermal Convention and Exhibition (IIGCE)*.
- Mulyani, S., Sarmiento, Z., Chandra, V., Hendry, R., Nasution, S., Hidayat, R., Jhonny, J., Sari, P., & Juandi, D. (2019, Maret 22). Calibrated Natural State Model in Sorik Marapi Geothermal Field, Indonesia. Day 3 Thu, March 28, 2019. <https://doi.org/10.2523/IPTC-19221-MS>
- Osinowo, O. O., Gomy, A., & Isseini, M. (2021). Mapping hydrothermal alteration mineral deposits from Landsat 8 satellite data in Pala, Mayo Kebbi Region, Southwestern Chad. *Scientific African*, 11, e00687. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00687>
- Reddy, M. A. (2008). *Remote Sensing and Geographical Information Systems (Third Edition)*. BS Publications.
- Rock, N. M. S., Aldiss, D. T., Aspden, J. A., Clarke, M. C. G., Djunuddin, A., Kartawa, W., Miswar, Thompson, S. J., & Whandoyo, R. (2011). *Sumatra Geologic Map of The Lubuksikaping Quadrangle, Sumatra*. Pusat Survei Geologi.
- Rosid, M. S., & Siregar, H. (2017). Determining fault structure using first horizontal derivative (FHD) and horizontal vertical diagonal maxima (HVDM) method: A comparative study. *International*

Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences 2016 (ISCPMS 2016) AIP Conf. Proc, 1–8. <https://doi.org/10.1063/1.4991275>

Sarmiento, Z. F., Bjornsson, G., Licup, A. C., Esberto, M. B., Indra, T., Baltasar, A. S. J., Omac,

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