

**KARAKTERISASI STRUKTUR PATAHAN PADA LAPANGAN PANAS BUMI X
(SUMATRA) BERDASARKAN PEMETAAN GEOLOGI, PENGINDERAAN JAUH,
DAN DATA GAYA BERAT**

**FAULTS CHARACTERIZATION IN X GEOTHERMAL FIELD (SUMATRA) BASED ON
GEOLOGICAL MAPPING, REMOTE SENSING AND GRAVITY DATA**

Sri Mulyani¹, Yunus Daud¹, Riza G. Pasiki², dan Haris Siagian²

¹Master Program of Geothermal Exploration,
Graduate Study Program of Physical Science, Universitas Indonesia,

²KS ORKA
ydaud@sci.ui.ac.id

ABSTRAK

Struktur patahan mempunyai peran penting dalam suatu sistem panas bumi. Struktur patahan dapat menyediakan zona lemah yang menjadi lokasi terjadinya intrusi yang terkait dengan sumber panas, menyediakan permeabilitas bagi reservoir, dan sebagai jalur aliran fluida menuju ke permukaan yang muncul sebagai manifestasi. Dengan memahami karakterisasi dan persebaran struktur geologi pada lapangan panas bumi, maka model konseptual sistem panas bumi dapat dipahami secara lebih baik, sehingga risiko kegagalan akibat ketidakpastian dalam pengembangan panas bumi di bagian bawah permukaan dapat diminimalisir. Lapangan X berada di Pulau Sumatra, termasuk lapangan panas bumi yang masih terus dikembangkan dan berusaha untuk mendapatkan lokasi sumur optimal untuk diproduksi. Penelitian ini membahas mengenai struktur patahan di lapangan panas bumi X menggunakan analisis data gaya berat, penginderaan jauh dan hasil pemetaan geologi. Secara detail, analisis data gaya berat yang dilakukan meliputi koreksi data pengamatan, pembuatan peta residual dan regional, FHD, SVD, serta pemodelan 3D gaya berat. Data penginderaan jauh yang dianalisis secara *rendering* berupa data LIDAR, adapun hasil pemetaan geologi yang digunakan dalam pemodelan adalah data lokasi serta hasil pengukuran *strike* dari struktur patahan. Hasil dari penelitian ini berupa model dan peta persebaran struktur patahan di lapangan panas bumi X yang dapat digunakan sebagai salah satu referensi dalam memahami sistem panas bumi di lapangan tersebut, serta menjadi dasar dalam penentuan lokasi sumur berikutnya.

Kata kunci: permeabilitas sekunder, koreksi *terrain*, koreksi *bouguer*, metode gaya berat, sistem panas bumi

ABSTRACT

Fault structure plays an important role in a geothermal system. Faults can be weak zones that are the location of intrusions that are related with heat sources, the location of permeability for reservoir, and as the fluid flow path to the surface that appears as manifestation. By understanding the characterization and distribution of geological structures in geothermal fields, the conceptual model of geothermal systems can be better understood, so the risk of counter-inaccuracies in the development of geothermal at the subsurface can be minimized. Field X is located on the Sumatra Island, known as development field that still trying to get the optimal well location for production. This study reveals how to identify faults in Geothermal Field X using gravity data analysis, remote sensing and geological mapping results. In detail, the gravitational data analysis includes checking the quality data, calculating and mapping of the residual and regional data, FHD, SVD, and 3D gravity modelling. Remote sensing data that analysed in the form of LIDAR rendering data, data used from geological mapping results are location and strike of faults. The results of this study are model and map of the faults

distribution in geothermal field X that can be used as reference to understand the geothermal system, as well as the guidance for the well targeting.

Keywords: *secondary permeability, terrain correction, bouguer correction, gravity method, geothermal system*

PENDAHULUAN

Sistem panas bumi terdiri dari beberapa komponen yang meliputi sumber panas, reservoir, batuan penutup dan manifestasi di permukaan. Secara umum, Indonesia dengan sumber panas bumi yang melimpah mempunyai sistem panas bumi yang berkaitan dengan gunung api dan struktur patahan sebagai produk dari aktivitas tektonik. Pada lapangan panas bumi yang dikontrol oleh struktur patahan, maka identifikasi lokasi dan persebaran struktur patahan sangat penting dilakukan. Dalam hal ini, suatu zona patahan dapat berperan dalam menghasilkan permeabilitas sekunder pada batuan ataupun menjadi penyekat aliran fluida yang membentuk pembatas suatu sistem hidrotermal. Persebaran nilai permeabilitas tinggi dapat menunjukkan jalur fluida mengalir dan menghasilkan reservoir panas bumi dengan ukuran ataupun bentuk tertentu (IGA, 2013). Salah satu contoh kasus tentang kegagalan produksi di lapangan panas bumi yang berkaitan dengan permeabilitas adalah lapangan Los Humeros, Mexico. Pada lapangan tersebut, kegagalan produktivitas sumur berkaitan dengan faktor permeabilitas yang rendah. Meskipun temperatur yang diperoleh cukup tinggi, tetapi permeabilitas rendah di bawah permukaan dapat mencegah air masuk ke reservoir yang menyebabkan entalpi tinggi pada sumur produksi dan pada kondisi ekstrim menghasilkan sistem panas bumi yang kering (Aragon, 2017). Dengan demikian, sangat penting untuk mengetahui karakteristik suatu struktur patahan yang ada di suatu lapangan panas bumi karena dapat berkaitan dengan permeabilitas di lapangan tersebut.

Secara umum struktur patahan dapat diidentifikasi secara langsung dengan melakukan suatu pemetaan geologi di lapangan. Data yang diperoleh berupa

koordinat struktur patahan, jurus serta kemiringan bidang lapisan (*strike & dip*). Selain itu, struktur patahan juga dapat diidentifikasi secara tidak langsung menggunakan metode pencitraan jarak jauh dengan menggunakan satelit dan metode geofisika yakni analisis data gaya berat. Pada pemanfaatannya, semua metode tersebut dapat diintegrasikan sehingga didapatkan analisis struktur patahan yang lebih lengkap dan akurat.

Lapangan X berada di Pulau Sumatra, termasuk lapangan panas bumi yang banyak dikontrol oleh struktur patahan. Lapangan ini termasuk dalam fase lapangan panas bumi yang sudah dikembangkan dengan beberapa sumur pemboran. Untuk tahapan berikutnya, dibutuhkan Informasi yang baik mengenai sistem panas bumi di lapangan tersebut sebagai dasar dalam penentuan lokasi untuk sumur pemboran. Oleh sebab itu banyak kajian yang dilakukan untuk mengidentifikasi struktur patahan yang ada di lapangan X, di antaranya adalah melalui pemetaan geologi secara lokal maupun regional, termasuk melalui analisis data dari sumur pemboran.

Penelitian ini dibatasi hanya dengan menggunakan data gaya berat, LIDAR (*Light Detection and Ranging*) dan hasil pemetaan geologi sebagai data utama. Data tersebut akan didukung oleh data lain seperti data geokimia dan peta geologi regional untuk tahap Interpretasi. Berbeda dengan kajian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya, analisis data gaya berat yang dilakukan dalam penelitian ini relatif lengkap karena meliputi pembuatan peta FHD (*First Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derivative*) serta pemodelan 3D dari data gaya berat.

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan karakteristik serta persebaran

struktur patahan di lapangan panas bumi X secara lateral maupun secara vertikal. Hal tersebut akan dicapai dengan pembuatan model struktur patahan 3D yang menunjukkan posisi dan bidang struktur patahan.

METODOLOGI

Secara spasial, area penelitian yang dijadikan batasan dalam pembahasan ini ditunjukkan oleh persegi pada Gambar 1. Area ini mempunyai luas sekitar 20 x 19 km² dan berada di Pulau Sumatra, Indonesia.

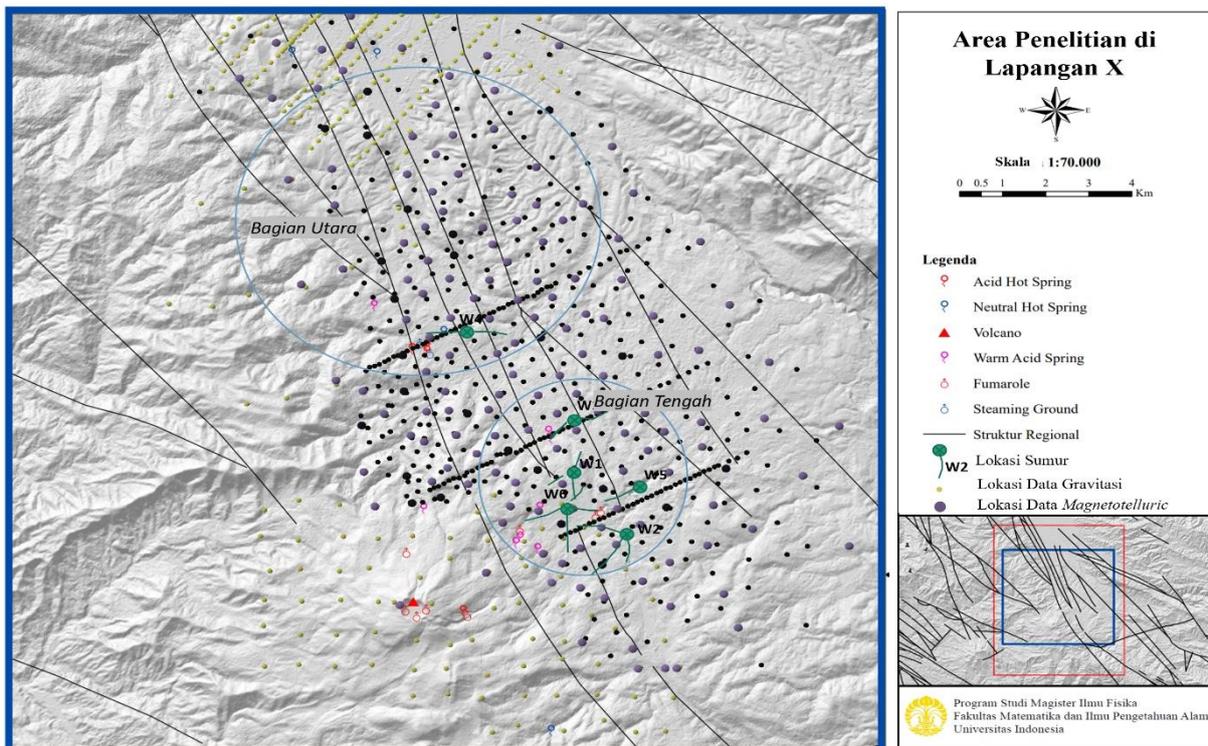
Pelaksanaan penelitian ini meliputi beberapa tahapan yang diawali dengan pengumpulan data, analisis terhadap data serta interpretasi dari hasil yang diperoleh. Secara umum, metode penelitian untuk menentukan karakteristik struktur patahan di lapangan X dapat dibagi menjadi tiga

yakni: analisis LIDAR, data gaya berat, dan hasil pemetaan geologi.

Analisis LIDAR

Interpretasi dari citra satelit sangat berguna dalam membantu seluruh pengamatan di area penelitian, khususnya dalam Penentuan batas satuan batuan dan lokasi struktur geologi (Kurniawan et al, 2020). Data penginderaan jauh yang digunakan dalam penelitian ini berupa LIDAR. Data tersebut dimasukkan ke dalam *software* untuk diproses dengan menggunakan metode *Band Rendering*. Pada proses ini digunakan tipe *render* berupa *hillshade* pada *Band 1*.

Tujuan dari metode ini adalah mendapatkan visualisasi yang dapat menunjukkan kontras pada area struktur patahan dengan memanfaatkan pengaturan arah dan sudut cahaya peninaran.



Sumber: DEM Nasional

Gambar 1. Area lokasi penelitian ditunjukkan oleh persegi berwarna biru, kotak merah menunjukkan area yang digunakan untuk analisis gaya berat

Untuk mengamati struktur patahan utama, arah pencahayaan diatur agar tegak lurus dengan struktur tersebut yakni 45°. Adapun untuk mengamati struktur patahan minor, arah pencahayaan diatur agar sejajar dengan arah struktur patahan utama yakni 330°. Sebagai tambahan, dilakukan pencahayaan dengan arah 150° untuk mengidentifikasi struktur patahan pada arah yang lain. Untuk sudut pencahayaan dipilih 75° untuk semua arah pencahayaan dengan harapan dapat menunjukkan kontras pada lokasi struktur patahan di daerah dengan topografi yang tinggi. Berikutnya dilakukan interpretasi pola kelurusan yang diamati pada masing-masing kenampakan untuk kemudian digabung menjadi satu pola kelurusan dari hasil analisis LIDAR. Pola kelurusan tersebut merupakan bentuk kenampakan yang menunjukkan kemungkinan adanya struktur patahan pada area tersebut.

Analisis Data Gaya Berat

Data Gaya Berat yang digunakan berupa data gaya berat observasi pada 879 titik pengukuran. Jarak antar titik pengukuran bervariasi dari 200 hingga 3000 m. Hal tersebut dikarenakan data yang digunakan berasal dari tiga waktu pengukuran yang berbeda. Oleh sebab itu, hal pertama yang dilakukan adalah melakukan kalibrasi data untuk memastikan bahwa seluruh data mempunyai standar acuan yang sama. Sebagai bukti bahwa seluruh data sudah dikalibrasi dengan benar, maka nilai titik yang berdekatan akan mempunyai nilai yang relatif sama meskipun berasal dari tahun pengukuran yang berbeda. Setelah itu, maka data gaya berat tersebut siap dilakukan koreksi.

Pertama dilakukan koreksi lintang atau koreksi normal berdasarkan koordinat lintang (Telford *dkk.*, 1990) dengan rumus (1) berikut ini:

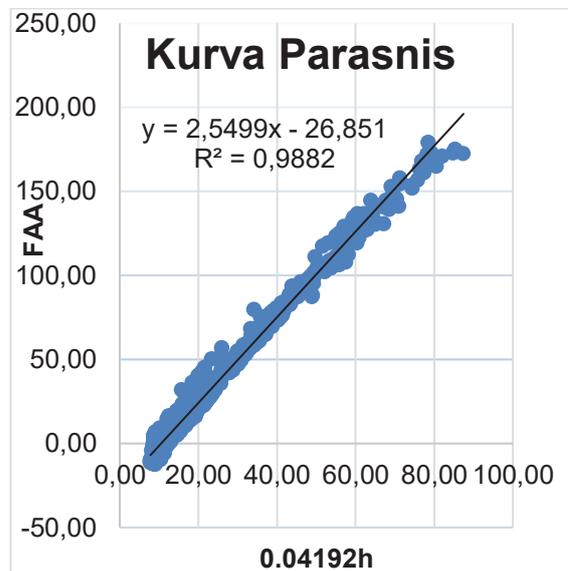
$$g\phi = 978031,846 (1+0,005278895 \sin^2\phi + 0,000023462 \sin^4\phi) \dots\dots\dots (1)$$

Dalam hal ini, ϕ adalah koordinat lintang dalam radian. Berikutnya dilakukan koreksi

free air berdasarkan ketinggian lokasi pengukuran, dengan menggunakan persamaan (2).

$$FAA = gobs - g(R) + 0,3085h \dots\dots\dots (2)$$

FAA menyatakan *Free Air Correction*, gobs adalah percepatan gaya berat observasi, h menunjukkan ketinggian dan g(R) adalah nilai percepatan gaya berat yang sudah dikoreksi dengan koreksi lintang. Pada dasarnya, koreksi udara bebas dilakukan karena adanya pengaruh ketinggian terhadap medan gaya berat bumi (Reynolds, 1997). Nilai FAA yang diperoleh ini dijadikan sebagai sumbu Y dalam pembuatan kurva paransis untuk menentukan nilai densitas rata-rata di daerah penelitian. Nilai sumbu X ditentukan dari hasil kali konstanta $2\pi G$ dengan nilai ketinggian, atau $0,04192 \cdot h$. Kurva paransis ditunjukkan oleh Gambar 2 di bawah ini, dengan nilai densitas rata-rata adalah 2,54 g/cm³.



Gambar 2. Kurva paransis untuk menentukan densitas rata-rata di area penelitian berdasarkan analisa yang telah dilakukan

Menurut Kearey *dkk.*, (2002), koreksi *bouguer* dihitung dengan persamaan (3) yang diperoleh dari suatu pendekatan terhadap suatu lempeng tak berhingga.

$$BC = 2\pi G \rho h \dots\dots\dots (3)$$

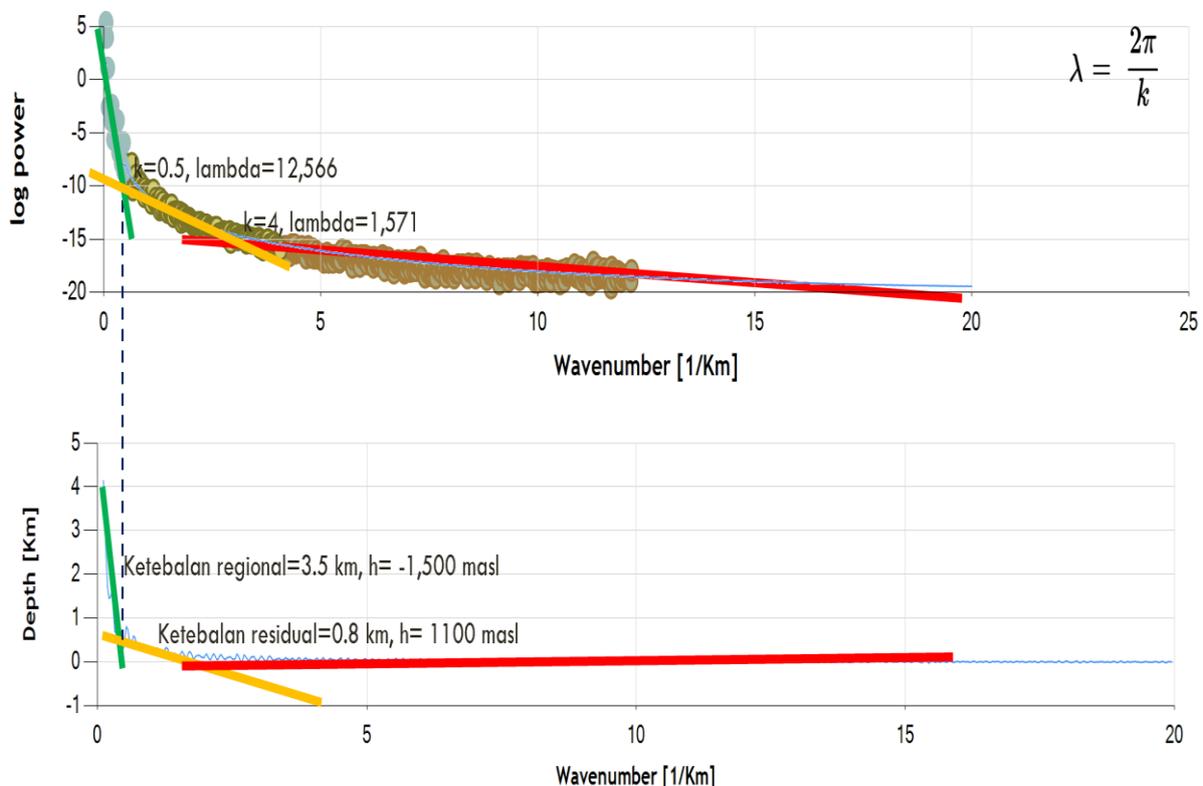
Akibat dari pendekatan *bouguer* ini maka terdapat efek pengurangan pada nilai anomali *bouguer* sederhana, sehingga area dengan topografi yang tidak rata harus ditambahkan koreksi medan (*Terrain Correction*). Jadi, secara lengkap anomali gaya berat Bouguer atau *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) dapat dihitung dengan persamaan (4) di bawah ini (Blakely 1996).

$$CBA = g_{obs} - g_{\phi} + 0,3085h - BC + TC \dots\dots(4)$$

Koreksi medan (*terrain correction*) yang dilakukan dalam penelitian ini memanfaatkan *software* Oasis Montage dengan menggunakan DEM Nasional yang dibangun dari beberapa sumber data meliputi: IFSAR (resolusi 5 m), TERRASAR-X (resolusi 5 m) dan ALOS PALSAR (resolusi 11,25 m). *Outer ring* dan *inner ring* yang digunakan berjarak 5000m & 5000 m, serta densitas 2,54 g/cm³ dari kemiringan kurva paransis. Hal tersebut

yang membedakan metode penelitian ini dari penelitian sebelumnya.

Analisis berikutnya yang dilakukan adalah analisis spektrum untuk menentukan nilai panjang gelombang (*wavelength*) dalam proses filtering anomali regional, residual dan *noise*. Pada dasarnya, analisis spektrum memanfaatkan Transformasi Fourier data pada setiap titik pengukuran. Hasil analisis ini juga dapat digunakan untuk menentukan kedalaman dari anomali regional (Amaliah dkk., 2014). Hasil analisis spektrum pada area penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3. Nilai panjang gelombang yang menjadi *cut off* antara anomali regional dengan residual adalah 12566 sedangkan antara anomali residual dengan *noise* adalah 1571. Ketebalan anomali regional didapatkan 3,5 km, yakni pada kedalaman -1500m dari muka air laut. Adapun ketebalan anomali residual sekitar 800 m, yakni pada kedalaman sekitar 1100 m dari rata-rata muka air laut.



Gambar 3. Analisis spektrum dari data CBA (*Complete Bouguer Anomaly*) berdasarkan proses yang dilakukan dalam penelitian

Nilai panjang gelombang yang diperoleh dari hasil analisis spektrum kemudian digunakan untuk membuat peta anomali regional, residual dan *noise* menggunakan metode *Butterworth Filter*. Peta yang didapatkan kemudian diinterpretasikan untuk mendapatkan pola kelurusan yang menunjukkan struktur regional dan struktur dangkal atau yang berada di atas kedalaman 1100 m.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih detil khususnya untuk struktur patahan dangkal, maka dilakukan analisis untuk menghasilkan peta FHD dan SVD. Secara umum, FHD atau Turunan Mendatar Pertama dapat menunjukkan bagian tepi dari suatu tubuh anomali sehingga akan sesuai untuk menentukan lokasi batas kontak kontras densitas horizontal (Zainuddin *dkk.*, 2013). Nilai kontras lateral tersebut dapat diidentifikasi sebagai lokasi struktur patahan. Analisis SVD ditujukan untuk memunculkan fitur dangkal dari pengaruh anomali regional yang belum bisa didapatkan dari anomali residual (Yulistina 2020). Proses yang dilakukan untuk menentukan nilai SVD adalah dengan membuat turunan kedua dari CBA sehingga diperoleh nilai SVD nol sebagai indikator adanya struktur patahan. Proses pembuatan FHD dan SVD dilakukan secara langsung di dalam *software* Oasis Montage dengan metode *First* dan *Second Derivative Filter*.

Proses terakhir yang dilakukan pada data gaya berat adalah pembuatan model inversi tiga dimensi (*3D Inversion Model*) dengan *software* *GravityDensityModeling*.

Proses ini menggunakan peta CBA (*Complete Bouguer Anomaly*) sebagai input, perkiraan nilai densitas batuan dan nilai standar deviasi. Litologi penyusun daerah penelitian terdiri atas batuan meta sedimen, batuan sedimen tersier, batuan vulkaniklastik kuartar serta intrusi batuan beku. Berdasarkan tabel nilai rata-rata

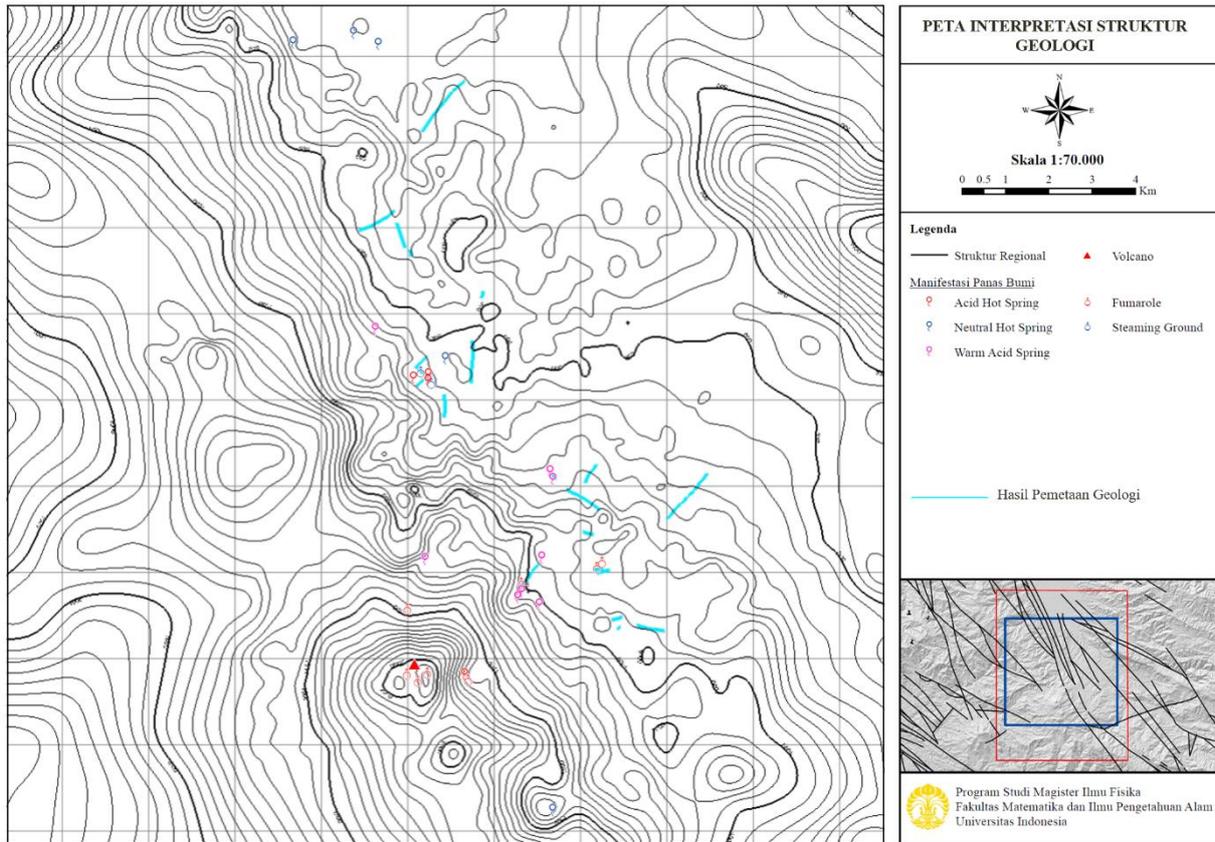
densitas batuan oleh Telford (1990), maka nilai densitas awal yang digunakan adalah 3,10; 2,50; 1,92 dan 2,85 (g/cm³). Standar deviasi ditentukan berdasarkan jarak dari sumber data, semakin jauh dari lokasi pengukuran akan semakin besar nilainya. Hasil persebaran nilai densitas ini dapat digabungkan dengan analisis struktur patahan dari hasil interpretasi pola kelurusan yang telah dilakukan.

Analisis Data Pemetaan Geologi

Data pemetaan geologi yang diperoleh kemudian ditampilkan pada peta dasar di area penelitian. Setiap titik pengukuran struktur patahan digambarkan dengan garis arah jurus (*strike*). Secara umum, struktur patahan yang diamati di lapangan secara langsung (garis biru), menunjukkan arah utama utara-selatan dan sebagian kecil mempunyai arah timur-barat (Gambar 4).

Dalam konteks ilmu geologi, bidang struktur patahan dapat membentuk penyekat yang dikenal dengan istilah sekatan struktur patahan (*fault seal*) ataupun menjadi zona penerus struktur patahan (*leaking*). Zona sekatan struktur patahan ini umumnya digunakan sebagai penentu apakah zona tersebut sebagai dapat berperan sebagai batuan tudung reservoir (Ardiansyah et al, 2018). Komunikasi lateral maupun vertikal sepanjang struktur patahan ini tergantung oleh beberapa proses geologi yang terjadi. Suatu struktur patahan dapat menjadi penyekat (*seal*) akibat beberapa proses seperti adanya penjajaran (*juxtaposition*), batuan *gouge* (*gouges*), lapisan lempung terdeformasi (*clay smears*), proses sementasi, pengurangan ukuran butir litologi batuan atau karena proses diagenesa (Naruk, et al, 2002).

Selain itu, data litologi dianalisis dengan memperhatikan data geologi regional untuk mendapatkan gambaran geologi secara detail di lokasi penelitian.



Gambar 4. Hasil pengukuran struktur patahan secara langsung (garis biru muda) sebagai hasil pemetaan geologi

TINJAUAN PUSTAKA

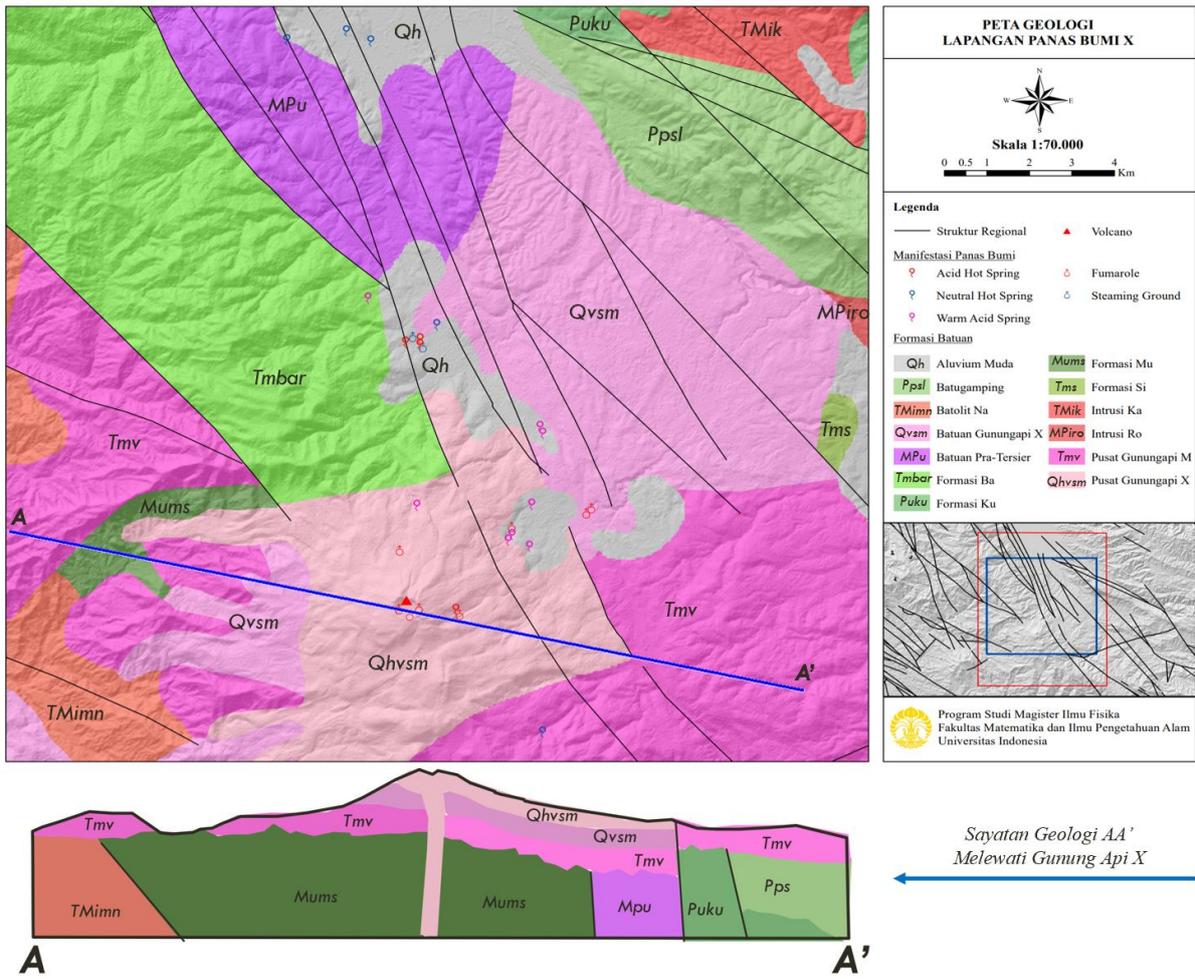
Salah satu informasi penting yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini adalah geologi regional dari daerah penelitian. Berikut ini adalah penjelasan mengenai lithologi dan struktur geologi di lokasi penelitian.

Kondisi Geologi

Geologi regional di lokasi penelitian ditunjukkan oleh Gambar 5. Secara umum terdapat beberapa satuan batuan yang menyusun daerah ini, dengan dominasi batuan gunung api. Secara stratigrafi satuan batuan penyusun di area penelitian dari yang paling tua adalah: batulanau (*siltstone*), polimik dari pusat erupsi (*eruption centre polymict*), polimik vulkaniklastik (*volcaniclastic polymict*), lava dan endapan alluvial.

Batulanau atau *siltstone* termasuk batuan sedimen yang berumur Tersier (Miosen Awal) dan tersingkap di area penelitian. Di atasnya terdapat batuan *polymict* dengan karakteristik sebagai produk dari pusat erupsi gunung api yang berumur Tersier, yakni Miosen Akhir. Berikutnya terdapat batuan gunung api vulkanik *polymict* yang bervariasi dan berumur Kuartar, yakni Plistosen. Adapun batuan paling muda berupa lava dan endapan alluvial yang berumur Kuartar (Holosen).

Secara vertikal, stratigrafi batuan penyusun daerah ini terdiri atas batuan metasedimen dan berbagai jenis intrusi berumur Paleozoikum-Mesozoikum, batuan sedimen dan batuan gunung api berumur Tersier, serta endapan alluvial dan batuan gunung api muda berumur Kuartar (Chandra and Purba., 2016).



Sumber: dimodifikasi dari Rock dkk., 1983
Gambar 5. Persebaran lateral batuan penyusun area penelitian Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Lubuksikaping

Berbagai batuan meta sedimen yang berumur paling tua pada lokasi penelitian ini berupa batugamping ataupun marmar, kuarsit, *slate* yang secara umum menunjukkan tingkat metamorfisme *greenschist* dan *hornfelsed* secara lokal. Adapun berbagai intrusi yang berumur paling tua berupa granit, mikrogranit, diorite, syenite dengan kenampakan foliasi akibat alterasi ataupun proses metamorfisme. Batuan sedimen berumur Tersier antara lain batu pasir, batu lempung karbonatan, batu lanau dan konglomerat. Untuk batuan gunung api dan intrusi pada umur Tersier adalah lava dasit, lava ryolit, piroklastik, endapan epiklastik, serta batuan gunung api yang sudah mengalami alterasi. Batuan berumur Kuartar pada area ini adalah endapan alluvial yang terdiri atas

pasir, lanau dan *gravels* serta lava basalt-andesit, piroklastik, endapan epiklastik dan endapan danau dengan kandungan sulfur yang tinggi.

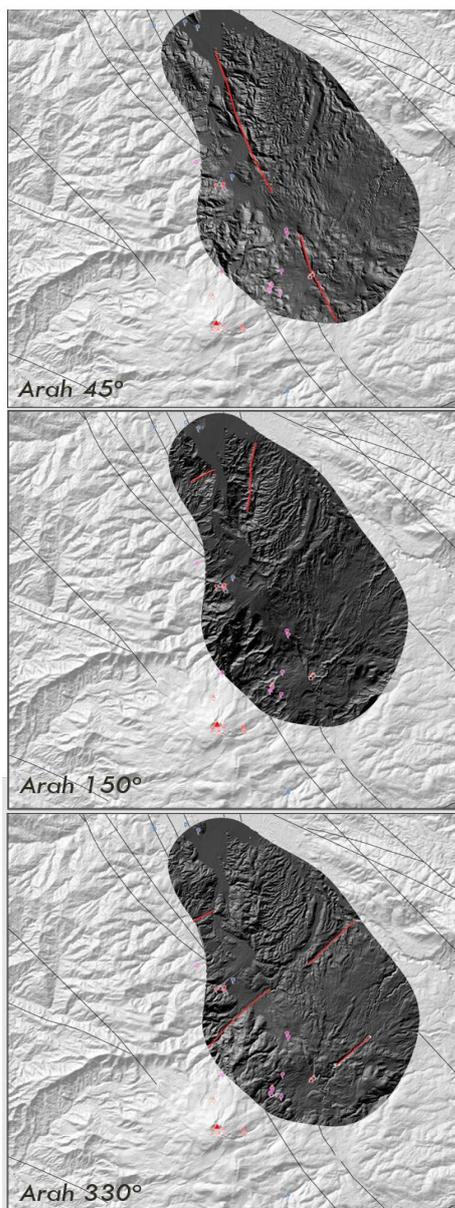
Struktur patahan regional yang berkembang di daerah penelitian mempunyai arah utama relatif Barat laut–Tenggara, dengan beberapa struktur yang mempunyai arah Timur-Barat. Berdasarkan penelitian sebelumnya di lokasi penelitian, persebaran struktur geologi tersebut tidak terlepas dari pengaruh adanya struktur patahan besar Sumatra. Keberadaan struktur tersebut juga dibuktikan dengan adanya manifestasi panas bumi di sepanjang struktur patahan antitetik dari struktur patahan besar tersebut (Sarmiento dkk., 2007).

HASIL

Dari analisis yang dilakukan maka diperoleh hasil berikut ini.

Hasil Analisis Penginderaan Jauh (LIDAR)

Gambar 6 menunjukkan kenampakan LIDAR dengan hasil pencahayaan beberapa arah, serta hasil interpretasi kelurusan yang telah dilakukan.

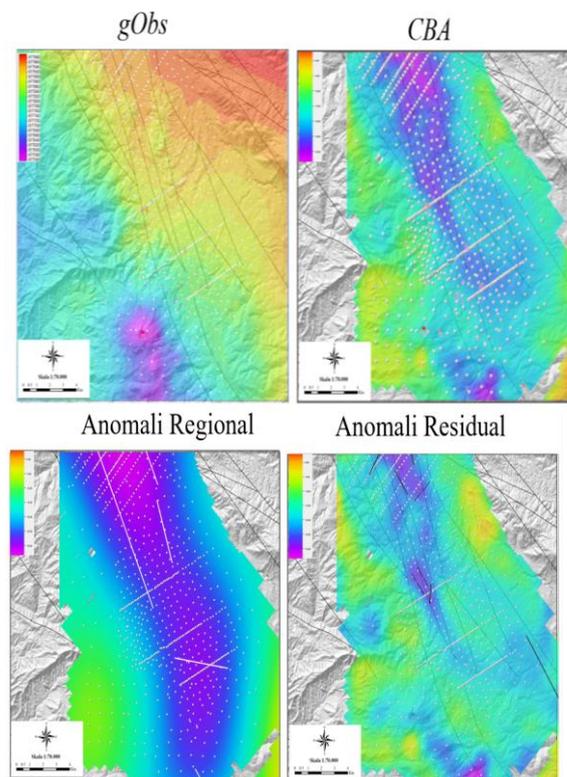


Gambar 6. Posisi *image* LIDAR pada area Penelitian dan hasil analisis struktur patahan (garis merah) dengan *rendering hillshade*

Dalam hal ini, arah struktur utama adalah N 30° W atau 330° dari arah utara. Hasil kelurusan yang diperoleh menggunakan arah pencahayaan berbeda juga menunjukkan pola kelurusan dengan arah N 45° E dan N 30° E. Pola kelurusan N 45° E cukup banyak diidentifikasi pada lokasi penelitian dimana arah tersebut relatif tegak lurus dengan struktur utama.

Peta Anomali Gaya Berat Regional dan Residual

Peta *CBA* (*Complete Bouguer Anomaly*), anomali regional dan residual, serta persebaran nilai gaya berat pengukuran *gObs* dengan lokasi titik pengukuran data gaya berat ditunjukkan oleh Gambar 7.



Gambar 7. Peta *CBA*, Anomali Regional, Residual dan *Noise* dengan lokasi titik pengukuran

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada peta anomali regional, dapat diamati bahwa secara umum terdapat suatu anomali besar di bagian tengah dengan arah NW-SE yang ditunjukkan oleh warna ungu pada peta, struktur tersebut

kemungkinan berkaitan dengan fragmen struktur patahan besar Sumatra. Adapun dari peta residual diamati beberapa anomali kelurusan yang bisa terkait dengan struktur geologi dangkal dan diamati juga area dengan anomali tinggi yang berada di dekat area gunung api.

Peta Persebaran Struktur Patahan

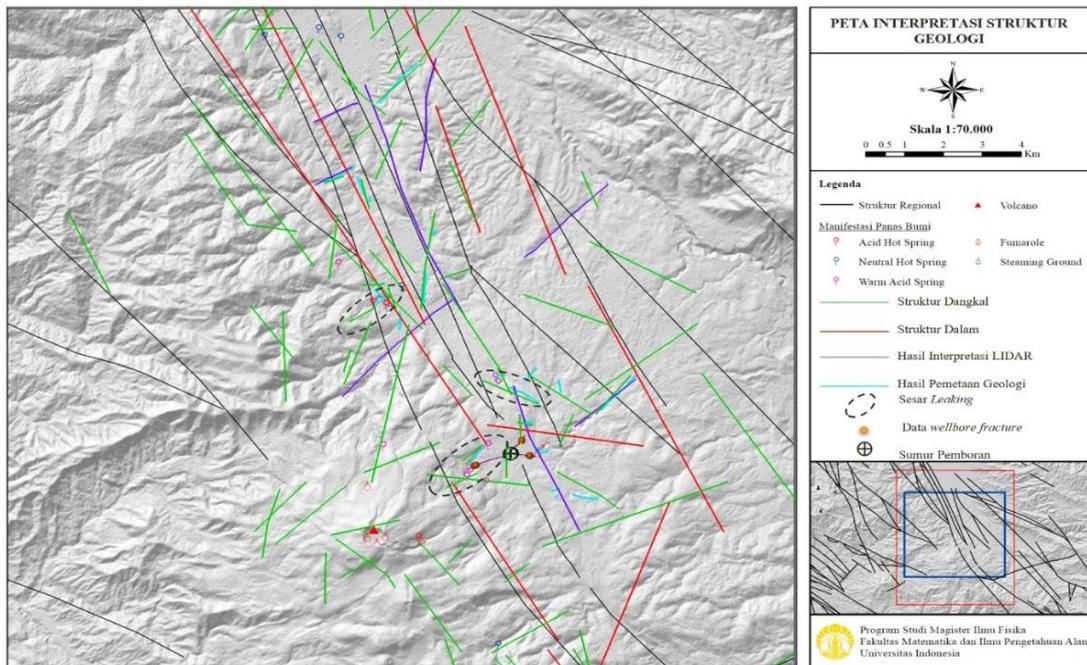
Identifikasi struktur geologi dilakukan dari LIDAR, peta anomali regional, peta anomali residual, FHD, serta SVD. Hasil tersebut kemudian ditampilkan pada peta dasar untuk dikorelasikan dengan struktur patahan yang diamati di lapangan serta lokasi manifestasi panas bumi (Gambar 8).

Pada peta tersebut ditunjukkan hasil interpretasi pola kelurusan dari analisis LIDAR yang berwarna ungu dan cenderung berada di bagian tengah area. Hasil analisis struktur regional yang kedalamannya lebih dari 1100 m ditandai dengan warna merah. Hasil analisis struktur dangkal yang tidak mencapai kedalaman 1100 m ditandai dengan warna hijau, dan mendominasi interpretasi pola kelurusan. Lokasi struktur patahan yang diketahui dari pemetaan geologi ditandai dengan warna biru. Manifestasi panas bumi yang diamati pada

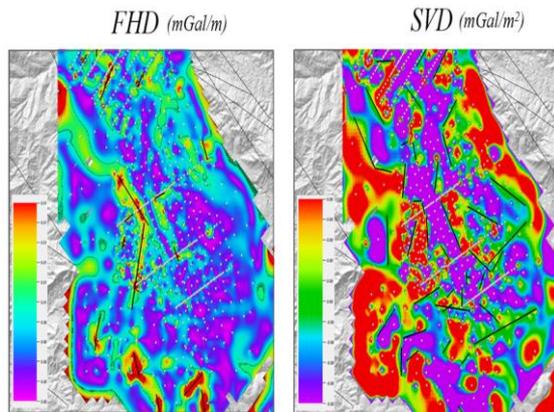
area ini dan berkorelasi dengan keberadaan struktur patahan berupa fumarol, tanah beruap, mata air panas asam, mata air panas netral, dan mata air hangat.

Model Persebaran Struktur Patahan

Berdasarkan pola kelurusan yang diperoleh kemudian dipilih struktur patahan yang akan dimodelkan secara tiga dimensi. Pemilihan struktur patahan tersebut berdasarkan lebih dari satu hasil analisis yang mendukung. Sebagai contoh, suatu pola kelurusan dipilih untuk dimodelkan karena berhasil diidentifikasi menggunakan analisis SVD dari data gaya berat serta sesuai dengan lokasi struktur hasil pengamatan di lapangan. Adapun peta nilai *FHD* dan *SVD* ditunjukkan oleh Gambar 9. Struktur geologi pada *FHD* diidentifikasi pada lokasi dengan nilai *FHD* tinggi (warna merah pada peta), adapun pada *SVD* diidentifikasi pada titik dengan nilai 0 yakni warna hijau pada peta. Struktur geologi yang didelineasi menunjukkan beberapa kesesuaian dengan struktur yang diamati pada peta residual maupun regional. Struktur yang diamati pada *SVD* termasuk struktur yang cukup dangkal dan menunjukkan lokasi yang sesuai dengan posisi manifestasi panas bumi di permukaan.

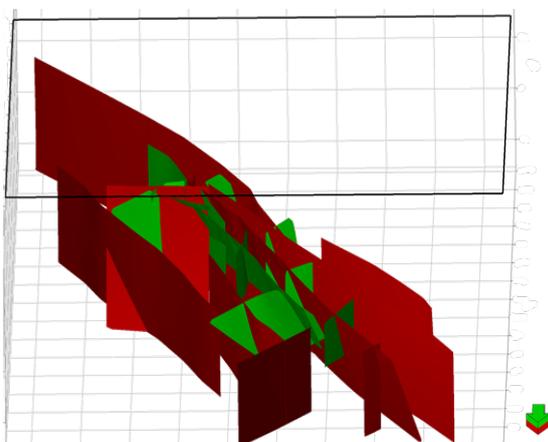


Gambar 8. Peta persebaran struktur patahan terhadap lokasi manifestasi panas bumi



Gambar 9. Peta FHD (*First Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derivative*)

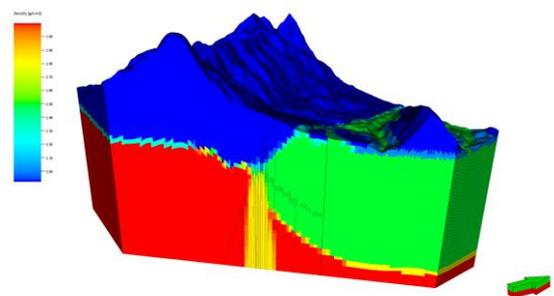
Dalam hal ini, data struktur patahan dari peta geologi regional juga digunakan sebagai salah satu sumber data. Adapun kemiringan dari bidang struktur patahan mempunyai ketidakpastian yang tinggi karena tidak adanya data, sehingga ditentukan oleh peneliti dengan asumsi bidang struktur patahan yang cenderung vertikal untuk struktur regional. Model persebaran struktur patahan secara tiga dimensi ditunjukkan oleh Gambar 10. Metode yang digunakan untuk membuat model tersebut adalah *structural modeling* pada *software* pemodelan bawah permukaan yakni Petrel® (Akar dkk., 2011). Struktur patahan dangkal dimodelkan sampai pada kedalaman 1100 m sedangkan struktur patahan dalam dimodelkan sampai kedalaman -1500 m dari muka air laut.



Gambar 10. Model persebaran struktur patahan di lokasi penelitian

Model Inversi Gaya Berat 3D

Hasil inversi 3D data gaya berat dapat dilihat pada Gambar 11. Nilai gaya berat paling tinggi ditunjukkan oleh warna merah yang berkaitan dengan batuan *metasediment* di paling bawah. Selain itu dapat diamati adanya litologi berupa intrusi yang berwarna kuning menerobos batuan lainnya dengan indikasi nilai densitas yang kontras. Adapun nilai gaya berat sedang dan rendah ditunjukkan oleh warna hijau dan biru yang berkaitan dengan batuan sedimen dan vulkaniklastik di bagian paling atas. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa hasil model tersebut menunjukkan kaitan yang erat dengan persebaran litologi di area penelitian. Dalam hal ini, adanya korelasi yang sangat jelas antara batas litologi dan nilai gaya berat tersebut dapat dikarenakan data yang dijadikan sebagai dasar utama adalah data litologi. Secara umum nilai gaya berat tersebut relatif sama pada litologi yang sejenis, dan mengalami perubahan secara gradual pada lokasi yang berada di antara batas litologi.



Gambar 11. Hasil pemodelan inversi data gaya berat tiga dimensi pada lokasi penelitian

PEMBAHASAN

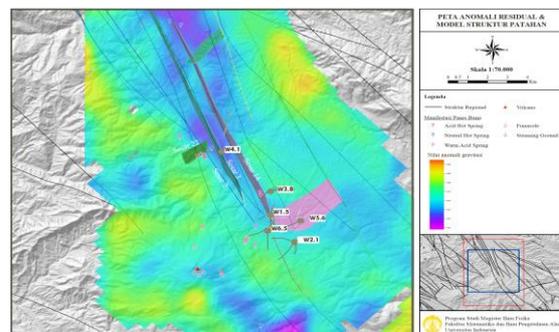
Secara umum struktur patahan dapat dikategorikan sebagai struktur patahan yang *sealing* dan struktur patahan yang bersifat *leaking*. Pada struktur patahan yang bersifat *sealing*, struktur tersebut akan menahan laju aliran fluida, porositas dan permeabilitasnya sangat kecil, sehingga bidang struktur patahan tersebut membentuk suatu penyekat hidrolik dan dikenal dengan istilah sekatan struktur

patahan atau *fault seal* (Ardiansyah dkk., 2018). Adapun pada lapangan panas bumi, struktur patahan yang ditemukan umumnya termasuk struktur yang bersifat *leaking* dengan permeabilitas yang tinggi sehingga bisa mengalirkan fluida. Namun pada kondisi tertentu, struktur patahan tersebut justru bersifat *sealing* dan menjadi batas suatu sistem panas bumi. Dengan mengetahui karakteristik tipe patahan tersebut, maka dapat dijadikan salah satu justifikasi dalam penentuan sumur pengeboran termasuk untuk menentukan strategi pola injeksi (Alfredo dan Sulistyanto, 2015). Struktur patahan normal merupakan fitur umum yang ditemukan di lapangan panas bumi. Lokasi dari struktur patahan ini umumnya ditentukan berdasarkan analisis FHD dan SVD, adapun jenis dan arah struktur patahan dapat dilakukan dengan membuat model inversi gaya berat 3D sebagaimana yang dilakukan dalam penelitian ini. Dari analisis tersebut banyak ditemukan struktur geologi berupa dua struktur patahan yang membentuk struktur *graben* dan diinterpretasikan sebagai struktur yang mengontrol sistem panas bumi (Latuconsina et al, 2019). Graben sendiri merupakan blok batuan yang turun diantara dua bidang struktur patahan normal sejajar. Salah satu bentukan ini di lapangan penelitian ditunjukkan oleh Gambar 14, struktur graben diinterpretasikan berada pada suatu sistem *pull apart basin*.

Dalam penelitian ini, struktur patahan yang mempunyai korelasi dengan munculnya manifestasi berupa mata air panas dapat diasumsikan sebagai jenis patahan *leaking* karena membentuk zona permeabilitas tinggi. Berdasarkan interpretasi struktur patahan dan lokasi manifestasi yang ditunjukkan oleh Gambar 9, struktur patahan dengan karakteristik *leaking* merupakan struktur patahan dangkal (garis hijau) dengan arah tegak lurus atau menyudut terhadap arah struktur patahan besar di area penelitian. Beberapa struktur patahan dangkal yang diduga bersifat *leaking* ditunjukkan oleh lingkaran hitam pada Gambar 9. Secara jumlah, jenis

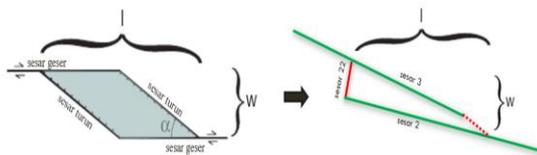
struktur patahan ini banyak mendominasi di bagian tengah area terutama di sekitar struktur patahan utama. Struktur patahan dangkal tersebut kemungkinan berupa struktur patahan antitetik, yakni cabang struktur patahan yang turun dan berlawanan arah dengan struktur patahan utama. Menurut Twiss dan Moores (1992), struktur patahan normal listrik dapat disertai struktur patahan normal antitetik pada blok *hanging wall* sehingga menghilangkan *gap* pada struktur patahan tersebut. Struktur patahan listrik merupakan struktur patahan normal dengan satah (permukaan) yang menjadi datar di bagian dalam bumi. struktur patahan listrik ini juga dikaitkan dengan struktur patahan tumbuh (*growth fault*), di mana pengendapan dan pergerakan struktur patahan berlaku secara serentak.

Struktur patahan besar dapat diidentifikasi secara jelas dari peta anomali regional yang juga sesuai dengan data struktur patahan dari peta geologi regional. struktur patahan ini saling sejajar satu sama lain di bagian tengah area penelitian, memanjang dengan arah barat laut-tenggara. Secara vertikal, struktur patahan tersebut dimodelkan sampai pada kedalaman - 3000m di bawah muka air laut dan umumnya memiliki kemiringan yang relatif vertikal. Hasil pemodelan struktur patahan besar ini menunjukkan kesesuaian dengan lokasi anomali rendah dari peta gaya berat residual. Gambar 12 menunjukkan lokasi anomali rendah berwarna ungu pada peta residual yang dibatasi oleh struktur Patahan 3 dan struktur Patahan 14.



Gambar 12. Anomali rendah di bagian utara area penelitian yang dikontrol oleh struktur patahan yang saling sejajar

Adanya anomali rendah yang diapit oleh struktur patahan yang saling sejajar ini semakin menguatkan interpretasi adanya fitur geologi berupa *pull apart basin*. Fitur ini merupakan suatu zona turunan (*depression*) yang dibatasi oleh dua atau lebih struktur patahan geser di bagian sisi nya serta dibatasi oleh struktur patahan diagonal di bagian ujung nya (Gurbuz 2010). Bentuk geometri dari *pull apart basin* ditunjukkan oleh Gambar 13, dengan *l* (*length*) dan *w* (*width*) adalah panjang dan lebar dari fitur geologi ini serta kenampakan fitur ini pada struktur Patahan 22 di area penelitian.

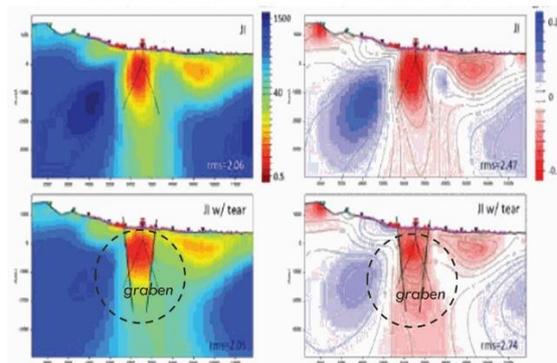
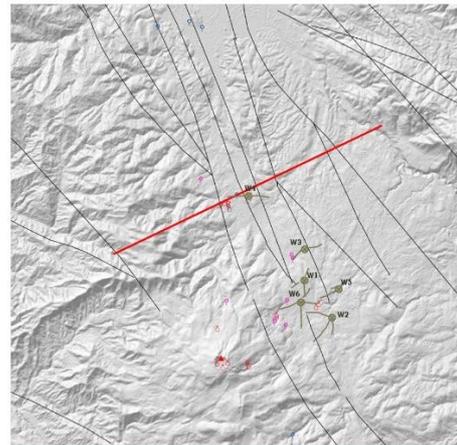


Sumber: dimodifikasi dari Gurbuz A., 2010
Gambar 13. Geometri *pull apart basin*

Pull apart basin ini umumnya memiliki geometri yang dalam dengan bentuk sesuai struktur patahan geser. Hal ini sesuai dengan peta anomali regional yang juga menunjukkan anomali rendah di lokasi tersebut. Sistem panas bumi di Sumatra dapat dibagi menjadi dua, yaitu yang berlokasi di lereng tubuh gunung api dengan tipe fluida dominan berupa uap air dan sistem panas bumi dominan air netral yang berkaitan dengan *pull apart basin*. Pada sistem panas bumi yang berkaitan dengan *pull apart basin*, umumnya dekat dengan kluster gunung api yang menyediakan sumber panas, terdapat gaya ekstensional yang menghasilkan reservoir dengan struktur geologi masif dan permeabilitas tinggi, serta bagian struktur patahan normalnya dengan konsentrasi gaya ekstensional yang menjadi area *discharge* (Muraoka et al, 2010).

Penelitian lain juga mendukung adanya fitur *pull apart basin* pada lokasi penelitian. Soyer dkk., (2020) melakukan proses *joint magnetotelluric* dan *gravity inversion* dengan *constrain cross gradient* antara parameter yang digunakan termasuk

menggunakan lokasi struktur patahan yang dimodelkan dengan kemiringan 80° dan kedalaman 3000m. Hasil ini menunjukkan adanya nilai resistivitas rendah dan anomali negatif pada area yang diinterpretasikan sebagai *graben* pada *pull apart basin* (Gambar 14).



Sumber: Soyer et al, 2020
Gambar 14. Hasil *joint inversion* MT dan Gaya berat berupa blok turun (*graben*) di tengah sayatan pada zona *pull-apart basin* sepanjang garis sayatan merah di lokasi penelitian.

Berdasarkan kenampakan kontras nilai resistivitas yang jelas pada zona turunan ini terhadap batuan di sekitarnya, dapat diinterpretasikan bahwa struktur patahan geser pada area tersebut kemungkinan bersifat *sealing* karena menahan laju aliran fluida di sekitar struktur patahan. Adapun struktur patahan normal yang menjadi bagian dari *pull apart basin* kemungkinan bersifat *leaking* karena berkorelasi dengan lokasi manifestasi mata air panas di permukaan yang ditunjukkan sebelumnya pada Gambar 12.

Dalam hal ini, nilai resistivitas dari MT juga dapat digunakan untuk menunjukkan batuan dengan alterasi argilik yang berperan sebagai *clay cap* pada sistem geothermal (Daud et al, 2019). Pada Gambar 14 kemungkinan batuan tudung (*clay cap*) dari lokasi tersebut berada di bagian kanan sumur, dengan ditunjukkan oleh nilai resistivitas yang relatif rendah.

KESIMPULAN

Berdasarkan tujuan awal dari penelitian ini dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa struktur patahan tersebar secara lateral di bagian tengah area penelitian dengan arah relatif barat laut-tenggara, serta secara vertikal struktur patahan tersebut mempunyai kedalaman 1100m sampai dengan -1500m. Karakteristik struktur patahan pada area penelitian menunjukkan jenis patahan yang *leaking* (mengalirkan fluida) terutama pada struktur patahan kecil yang memotong arah struktur patahan utama, serta struktur patahan yang *sealing* (menahan aliran fluida) pada struktur patahan utama berupa struktur patahan geser dengan fitur *pull apart basin*. Dalam pengembangan lapangan X dan penentuan lokasi target pengeboran maka dapat diasumsikan bahwa struktur patahan antitetik struktur patahan utama akan memberikan permeabilitas lebih baik sehingga diharapkan mendapatkan hasil produksi yang lebih tinggi. Hal ini juga perlu didukung oleh informasi mengenai ketersediaan panas dan kondisi fluida di area tersebut, sehingga dapat disusun rencana pengembangan dan pengeboran yang komprehensif.

Dengan mempertimbangkan bahwa permeabilitas utama di area penelitian dipengaruhi oleh patahan antitetik, maka rekomendasi target pengeboran sumur adalah pada patahan tersebut. Pada kasus ini, salah satu patahan tersebut adalah struktur Patahan 22. Saran lain yang dapat diberikan untuk penelitian ini adalah menambahkan data sumur pemboran dan analisis *magnetotelluric*, untuk mengetahui lokasi pasti keberadaan struktur patahan di

bawah permukaan serta gambaran aliran fluida panas bumi di bawah permukaan, sehingga karakteristik struktur patahan di lapangan X akan lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terimakasih sebanyak-banyaknya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan khususnya kepada pihak management KS ORKA serta Program Magister Eksplorasi Panas Bumi FMIPA Universitas Indonesia.

DAFTAR REFERENSI

- Akar, S., Atalay, O., Kuyumcul, C., Solarog'lul, U.Z.D., Colpan, B., and Arzuman, S. 2011. 3D Subsurface Modeling of Gümüşköy Geothermal Area, Aydın, Turkey. *GRC Transactions*, Vol. 35
- Alfredo dan Sulistyanto, D., 2015, Analisis Sifat Patahan (Sealing-Leaking) Berdasarkan Data Tekanan, Decline Curve, Dan Connectivity Injection Pada Lapangan Dima, Seminar Nasional Cendekiawan 2015, ISSN:2460-8696
- Amaliah, R., Hamzah, M., Maria, dan Aswad, S., 2014, Pemodelan Anomali Gravitasi Menggunakan Metode Inversi Dua Dimensi Pada Area Prospek Panas Bumi Lapangan "A", Hasanuddin University Repository.
- Aragon AA, Montalvo IG, Blanco LS, and Gomez GV. (2017). *Analysis Of Heterogeneous Characteristics In A Geothermal Area With Low Permeability And High Temperature*. *Geoscience Frontier* 8 (2017) 1039-1050.
- Ardiansyah, A.G., Sapto, B., Haerudin, N., dan Purba, H., 2018, Karakterisasi Sesar *Sealing* Dan *NonSealing* Dengan Metode Seismik Inversi Impedansi Akustik Dan Shale Gouge Ratio Pada Lapangan Teapot Dome U.S.A, Repositori LPPM Universitas Lampung.

- Blakely, R.J., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge University Press, New York, 441 p
- Chandra, V.R. dan Purba, D., 2016, *Conceptual Model of Sorik Marapi Geothermal System Based on 3-G Data Interpretation*, Conference paper April 2016
- Daud, Y., W. A. Nuqramadha, F. Fahmi, R. S.Seseseqa, Fitrianita, S. A. Pratama, A. and Munandar, 2019, *Resistivity characterization of the Arjuno-Welirang volcanic geothermal system (Indonesia) through 3-D Magnetotelluric inverse modeling*. Elsevier Ltd, Journal of Asian Earth Sciences.
- Gurbuz, A., 2010, Geometric Characteristics of Pull-Apart Basin, LITHOSPHERE; v. 2; no.3; p. 199-206
- [IGA], International Geothermal Association (2013), *Geothermal Exploration Best Practices: A Guide to Resource Data Collection, Analysis, And Presentation For Geothermal Projects*, Bochum University of Applied Sciences (Hochschule Bochum) Lennerhofstr. 140, D-44801 Bochum, Germany.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Publishing, Third Edition, page 137.
- Kurniawan A., Daud Y., Tifani M.A., Latuconsina N., and Maulana F., 2020, *Interpretation of Surface Geological Conditions Based on Landsat-8 Data, DEM and Field Geological Data in The Tulehu Geothermal Prospect Area*, Maluku Province, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 538 012075
- Latuconsina N., Daud Y., Sulisty A., Yunus F.M., and Kurniawan A., 2019, *Geological Structure Identification in Tulehu Geothermal Prospect Area Using Gravity Data Analysis*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 538 (2020) 012006
- Muraoka, H., Takahashi, M., Sundhoro, H., Dwipa, S., Soeda, Y., Momita, M., and Shimada, K., 2010, *Geothermal Systems Constrained by the Sumatran Fault and Its Pull-Apart Basins in Sumatra, Western Indonesia*, Proceeding World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25 – 29 April 2010
- Naruk, S.J., Dula, W.F., Busch, J.P., Couzens-Schultz, B.A., Garmezny, L., Griffiths, H. Gunst, A.M., Hedlund, C.A., McAllister, E. Onyeagoro, U.O., Ozumba, B.M., and Younes, A., 2002. Common Characteristics of Proven Sealing and Leaking Faults, AAPG Search and Discovery Article #90009@2002 AAPG Hedberg Research Conference, December 1-5, 2002, Barossa Valley, South Australia
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys. D. A., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Reynolds, J.M., 1997. *An introduction to applied and enviromental geophysics*, John Wiley & Sons, NY, 806 pp.
- Rock, N.M.S., Aldiss, D.T., Aspden, J.A., Clarke, M.C.G., Djunuddin, A., Kartawa, W., Miswar, Thompson, S.J., dan Whandoyo, R., (1983), *Peta Geologi Lembar Lubuksikaping, Sumatra*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (PPPGe).
- Sarmiento, Z.F., Bjornsson, G., Licup, A.C., dkk., 2017, *Update on the Exploration and Development Drilling at the Sorik Marapi Geothermal Field, North Sumatra, Indonesia*, Proceedings The 5th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2017
- Soyer, W., Mackie, R., Hallinan, S., Miorelli, F., and Siagian, H., 2020, *3D MT and Gravity Joint Inversion Modeling of Graben-Hosted High Temperature Geothermal Fields*, European Association of Geoscientists & Engineers, Conference Proceedings, 1st Geoscience & Engineering in Energy Transition

- Conference, Nov 2020, Volume 2020, p.1 - 5
- Twiss, R.J. and Moores, E.M. (1992) *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company, New York, 532.
- Yulistina, S., (2020). *Studi Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Untuk Mengetahui Sistem Sesar Berdasarkan Analisis First Horizontal Derivative (FHD), Second Vertical Derivative (SVD), Dan 2,5D Forward Modelling Di Daerah Manokwari Papua Barat*. Jurnal Geofisika Eksplorasi Vol. 4/No. 2, DOI:10.23960/jge.v4i2.15.
- Zaenudin, A., Sarkowi, M., dan Suharno. 2013. *Pemodelan Sintetik Gradien Gayabarat Untuk Identifikasi Sesar*, Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik, UNILA.

Diterima	: 29 Juli 2021
Direvisi	: 14 September 2021
Disetujui	: 31 Agustus 2022