



KONTROL STRUKTUR GEOLOGI TERHADAP KEMUNCULAN MANIFESTASI PANAS BUMI DI DAERAH MUARO PAITI, SUMATRA BARAT

Arif Rahmatullah ¹⁾, Yogie Zulkurnia Rochmana ^{1*)}, Budhi Setiawan ¹⁾, Endang Wiwik Dyah Hastuti ¹⁾, Lano Adhitya Permana ²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

²⁾ Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

*E-mail: yogie.zrochmana@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK

Struktur geologi memiliki peranan penting terhadap sirkulasi fluida panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pola umum serta distribusi struktur geologi yang berperan sebagai media keluarnya air panas dari reservoir. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui zona permeabilitas tinggi sebagai implikasi dari reservoir yang baik. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pemetaan geologi dan analisis kelurusan. Pemetaan geologi bertujuan untuk mengetahui kondisi litologi dan struktur geologi di daerah penelitian. Sedangkan analisis kelurusan bertujuan untuk mengetahui pola umum struktur geologi dan indikasi zona permeabilitas tinggi. Berdasarkan hasil pemetaan geologi, terdapat dua formasi di daerah penelitian, yaitu Formasi Menggala dan Formasi Telisa. Formasi Menggala tersusun oleh litologi berupa batupasir, batupasir kerikilan, dan konglomerat. Formasi Telisa tersusun oleh litologi berupa batulempung dan napal secara lokal. Daerah penelitian mempunyai enam struktur geologi yang berkembang, yaitu lima sesar dan satu lipatan. Dari enam struktur geologi yang ditemukan, Sesar Patamuan dan Sesar Batangkapugadang diinterpretasikan menjadi struktur yang berperan sebagai jalur keluarnya air panas dari reservoir. Keberadaan manifestasi ini muncul di sekitar perpotongan kedua struktur tersebut. Pada peta densitas kelurusan, perpotongan kedua struktur tersebut berada pada area dengan densitas kelurusan yang rapat. Area tersebut diinterpretasikan sebagai zona hancuran yang diindikasikan sebagai zona permeabilitas tinggi.

Kata Kunci: kelurusan, manifestasi, muaro paiti, sesar, struktur.

ABSTRACT

Geological structures have an important role in the circulation of geothermal fluids. This study aims to determine the general pattern and distribution of geological structures that act as a pathway for the release of hot water from the reservoir. This research also aims to determine the high permeability zone as an implication of a good reservoir. The methods used in this research are geological mapping and lineament analysis. Geological mapping aims to determine the condition of lithology and geological structures in the research area. While the lineament analysis aims to determine the general pattern of geological structures and indications of high permeability zones. Based on the results of geological mapping, there are two formations in the study area, namely Menggala Formation and Telisa Formation. The Menggala Formation is composed of lithologies such as sandstone, pebbly sandstone, and conglomerate. The Telisa Formation is composed of lithologies such as mudstone and marl locally. The study area has six developed geological structures, namely five faults and a fold. Of the six geological structures found, the Patamuan fault and the Batangkapugadang fault are interpreted to be structures that act as pathways for the release of hot water from the reservoir. The existence of this manifestation appears around the intersection of the two structures. On the lineament density map, the intersection of the two structures is in an area with a dense lineament density. The area is interpreted as a destruction zone which is indicated as a high permeability zone.

Keywords: fault, lineament, manifestation, muaro paiti, structure.

I. PENDAHULUAN

Struktur geologi memainkan peran penting dalam sirkulasi fluida reservoir panas bumi (Chen et al., 2021). Struktur sesar dan rekahan diasumsikan sebagai bidang lemah yang menjadi jalur mobilisasi bagi fluida termal, sehingga dapat menjadi petunjuk keberadaan zona *steam reservoir* (Wibowo, 2010). Aliran fluida termal dari reservoir menghasilkan manifestasi panas bumi di permukaan. Kehadiran manifestasi panas bumi mengindikasikan adanya transmisi fluida dalam sistem panas bumi melalui struktur geologi berupa rekahan dan sesar (Siler et al., 2019). Keberadaan manifestasi panas bumi yang berasosiasi dengan struktur geologi dapat ditemukan di Daerah Muaro Paiti, Kabupaten Limapuluh Kota, Kecamatan Kapur IX, Sumatra Barat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui geometri serta distribusi rekahan dan sesar yang berperan sebagai media keluarnya air panas dari reservoir. Selain itu, analisis kelurusan juga dilakukan untuk mengetahui pola struktur dan zona permeabilitas tinggi sebagai implikasi dari reservoir yang baik.

Keberadaan sistem panas bumi non-vulkanik dapat diidentifikasi dengan analisis kelurusan serta densitas sesar dan rekahan (Nahli et al., 2016; Suryantini, 2013). Kelurusan merupakan setiap fitur linier alami di permukaan bumi yang umumnya berkaitan dengan adanya ekstensi, kompresi, dan *strike-slip fault* (Prost, 2013). Analisis kelurusan dilakukan untuk menafsirkan struktur dengan skala regional hingga sub-regional dari penginderaan jauh (Dasgupta & Mukherjee, 2019). Tingkat kelurusan yang rapat dapat memberikan gambaran mengenai area dengan permeabilitas tinggi (Arrofi et al., 2022; Grant et al., 1982). Mengidentifikasi zona dengan permeabilitas tinggi akan membantu mengidentifikasi daerah reservoir panas bumi yang baik (Arrofi et al., 2022).

Daerah Muaro Paiti secara fisiografis merupakan bagian dari Cekungan Sumatra Tengah. Secara regional, cekungan ini memiliki dua pola struktur utama, yaitu pola yang cenderung berarah Utara-Selatan dan pola yang cenderung berarah Barat Laut – Tenggara (Mertosono & Nayoan, 1974; Van Gorsel, 2018). Secara geometri dan kinematika, perkembangan struktur di Sumatra Tengah dibagi menjadi empat episode tektonik utama, keempat episode tersebut dinotasikan dengan F0, F1, F2, dan F3 (Heidrick dan Aulia, 1993). Fase F0 merupakan fase deformasi yang terjadi pada pra-tercier. Fase ini menghasilkan patahan dan lipatan pada batuan dasar dengan arah Utara-Selatan. Pada fase F1 terjadi ekstensional dengan arah ekstensi Barat – Timur. Fase ini terjadi pada Kala Eosen – Oligosen. Fase F2 merupakan fase amblasan dan transtensional. Fase ini terjadi pada kala Miosen Awal – Miosen Tengah. Pada fase ini mulai terjadi pembentukan sesar manganan secara regional dan juga terbentuknya zona hancuran transtensional. Sedangkan fase F3 merupakan fase kompresional, yang terjadi pada Akhir Miosen hingga Resen. Pada fase ini terjadi aktivitas tektonik yang menyebabkan terbentuknya sesar geser manganan di sepanjang Bukit Barisan. Pada fase ini juga terjadi kompresi di sepanjang Cekungan Sumatra Tengah dan Cekungan Sumatra Utara dengan arah tegasan Timur Laut – Barat Daya (Heidrick & Aulia, 1993).

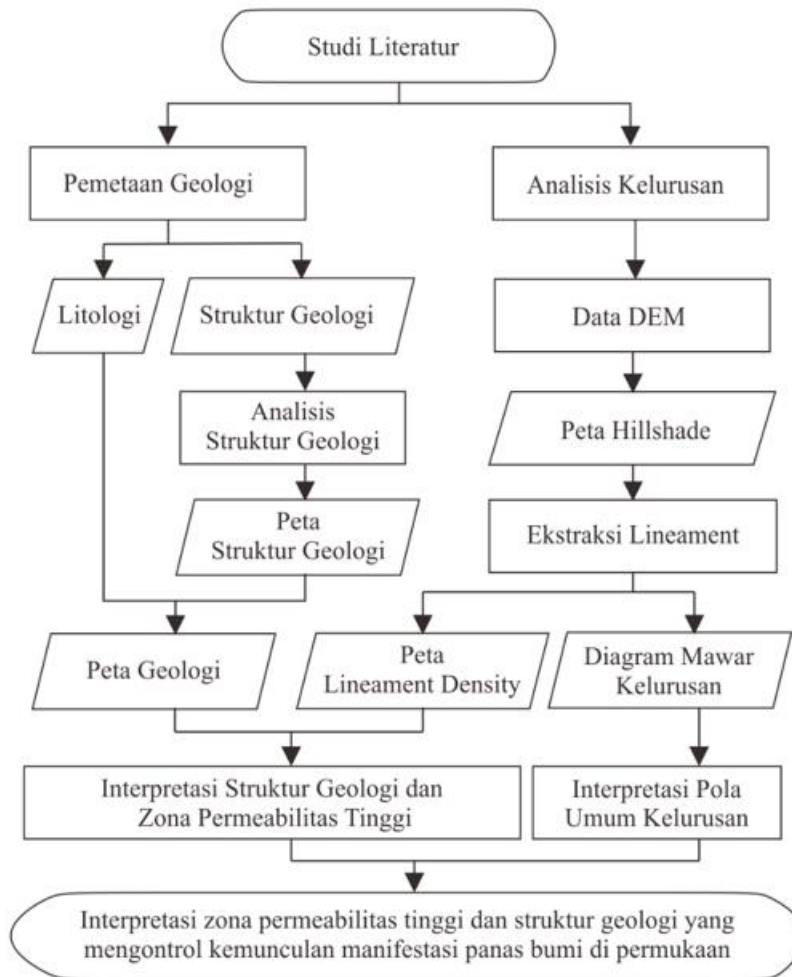
Struktur geologi di Sumatra dipengaruhi oleh tegasan regional yang cenderung berarah Timur Laut – Barat Daya (Tingay et al., 2012). Tegasan tersebut menghasilkan struktur-struktur geologi yang mengontrol keberadaan sistem panas bumi di Sumatra. Salah satu struktur geologi yang dipengaruhi oleh tegasan maksimum berarah Timur Laut – Barat Daya tercermin pada lapangan panas bumi di Daerah Sarulla, Sumatra Utara. Struktur tersebut menghasilkan manifestasi panas bumi berupa fumarol dan mata air panas (Hickman et al., 2004). Sistem panas bumi di Muara Laboh juga dikontrol oleh struktur geologi yang dipengaruhi oleh tegasan maksimum berarah Timur Laut – Barat Daya (GMI, 2013; Stimac et al., 2019), struktur tersebut menghasilkan manifestasi panas bumi berupa mata air panas, sinter silika, dan fumarol. Karakteristik geokimia air panas di Daerah Muaro Paiti telah dianalisis oleh Almuhsinin & Putra (2019). Namun, struktur geologi yang mengontrol keluarnya fluida panas bumi dari reservoir masih belum diketahui. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai geometri, distribusi, dan pengaruh struktur geologi terhadap keluarnya air panas dari reservoir.

II. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode pemetaan geologi dan analisis kelurusan. Penelitian ini mengintegrasikan dua sumber data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pemetaan geologi, yaitu data litologi dan struktur geologi. Sedangkan data sekunder diperoleh dari data *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS). Hasil pemetaan geologi berguna untuk mengetahui karakteristik litologi dan struktur geologi yang mengontrol munculnya manifestasi di permukaan. Sedangkan analisis kelurusan berguna untuk mengetahui pola umum struktur geologi dan area yang diinterpretasikan sebagai zona permeabilitas tinggi. Keberadaan struktur geologi umumnya dicirikan dengan densitas kelurusan yang rapat. Densitas kelurusan yang cenderung rapat umumnya menunjukkan area dengan permeabilitas tinggi (Arrofi et al., 2022; Grant et al., 1982). Untuk mengetahui densitas kelurusan pada suatu area dilakukan dengan mencari *Fault Fracture Density* (FFD) dari peta kelurusan.

Tingkat kerapatan kelurusan yang didapat dari peta *Fault Fracture Density* (FFD) dapat digunakan untuk mengetahui daerah dengan permeabilitas tinggi pada suatu sistem panas bumi (Darmawan et al., 2021; HiDayat et al., 2023; Iqbal & Juliarka, 2019; Oktoberiman et al., 2015; Wibowo, 2010). Pemetaan geologi struktural lapangan meliputi analisis kekar (Hancock, 1985), analisis bidang sesar (Means, 1987), dan pemetaan stratigrafi berdasarkan peta geologi dari survei geologi setempat (Clarke et al., 1982).

Data kekar dan sesar kemudian dilakukan analisis stereografis untuk mengetahui geometri, kinematika dan dinamikanya. Sedangkan data DEM dibuat menjadi peta *hillshade* dengan azimuth pencahayaan 0°, 45°, 90° dan 135°, sehingga kelurusan yang terdapat di daerah penelitian dapat diekstraksi. Hasil ekstraksi kelurusan tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam diagram mawar sesuai dengan nilai arah kelurusannya. Pengelompokan data kelurusan dibuat menjadi beberapa interval dengan kelipatan arah sebesar 10° dan nilai arah yang berkisar antara 0-360°. Dari arah rata-rata yang ditampilkan pada diagram mawar, dapat diketahui pola umum kelurusan yang terdapat di daerah penelitian. Densitas kelurusan pada peta juga dilakukan perhitungan untuk mendapatkan peta *Lineament/Fault-Fracture Density*. Perhitungan densitas kelurusan dilakukan berdasarkan tingkat kerapatan kelurusan pada suatu area, dan diolah menggunakan software PCI Geomatica 2014. Hasil pengolahan data kelurusan pada peta *Lineament/Fault-Fracture Density* kemudian diintegrasikan dengan data struktur geologi yang sudah dianalisis, sehingga didapatkan integrasi antara area dengan densitas kelurusan yang rapat, sebaran struktur geologi, dan keberadaan manifestasi air panas di daerah penelitian. Hasil akhir dari penelitian ini bertujuan untuk mengetahui zona dengan permeabilitas tinggi dan struktur geologi yang berperan dalam kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan (Gambar 1).

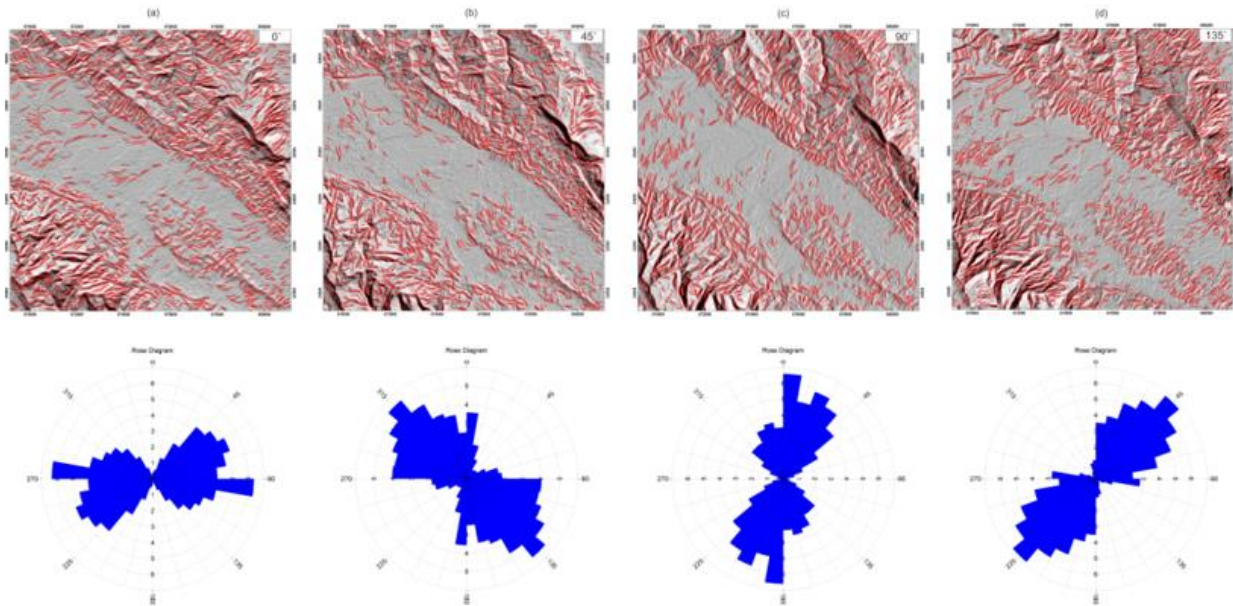


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Interpretasi Kelurusan

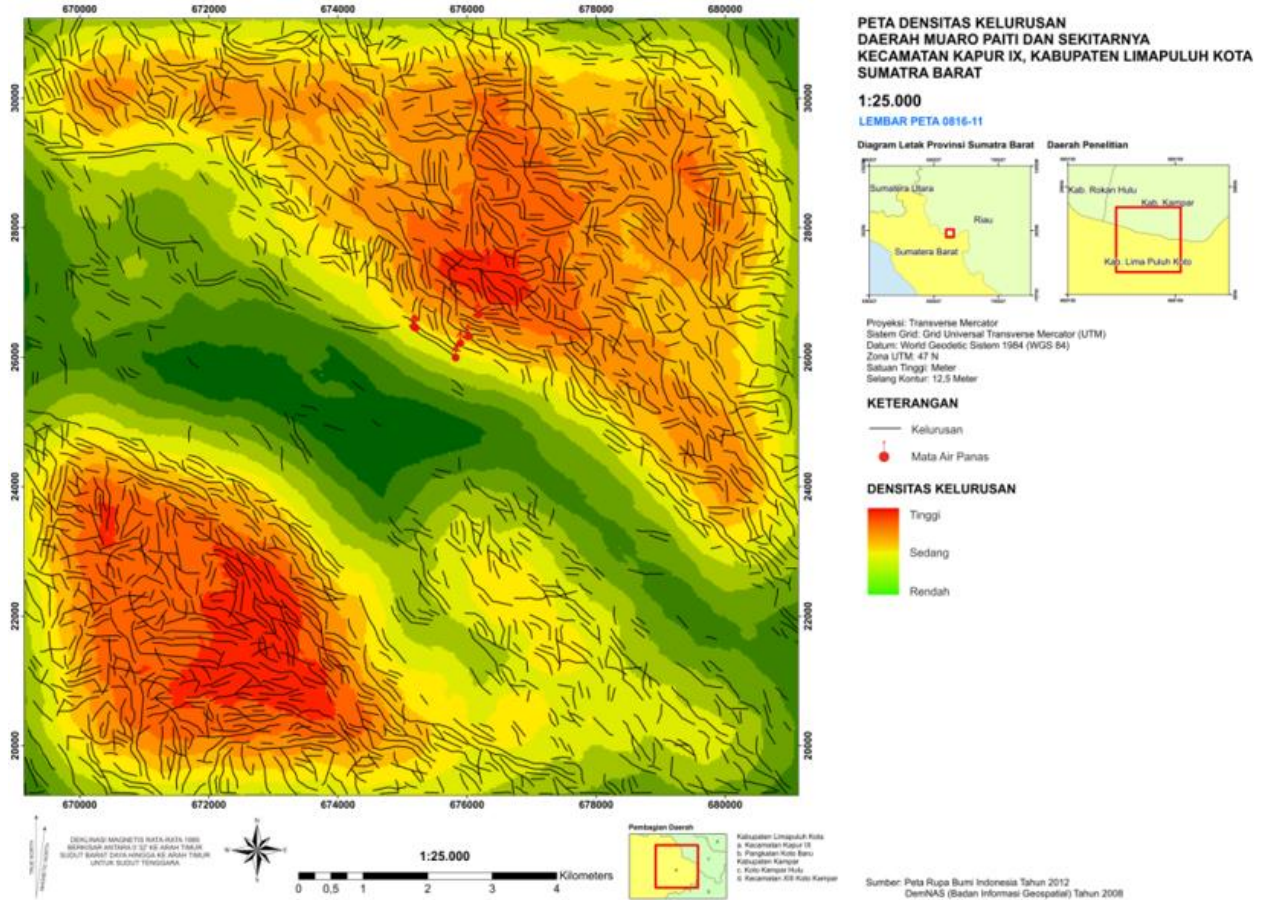
Daerah penelitian memiliki dua pola umum struktur, yaitu struktur yang cenderung berarah Barat Laut – Tenggara dan struktur yang cenderung berarah Timur Laut – Barat Daya. Pola struktur tersebut terjadi akibat tegasan yang berarah Timur Laut - Barat Daya. Struktur tersebut merupakan produk dari aktivitas tektonik pada fase ketiga yang terjadi pada akhir miosen hingga resen. Berdasarkan hasil penarikan kelurusan pada peta Digital Elevation Model (DEM) dan perhitungan arah kelurusan menggunakan diagram mawar, terdapat empat pola kelurusan yang terdapat di daerah penelitian. Pada kelurusan dengan azimuth pencahayaan 0° , fitur-fitur kelurusan cenderung berarah Barat – Timur hingga Timur Laut – Barat Daya. Pada azimuth pencahayaan 45° , dominasi kelurusan cenderung berarah Barat Laut – Tenggara. Pada kelurusan dengan azimuth pencahayaan 90° , pola kelurusan struktur cenderung berarah Utara Timur Laut – Selatan Barat Daya. Pada azimuth pencahayaan 135° , fitur-fitur kelurusan cenderung berarah Timur Laut – Barat Daya (Gambar 2).



Gambar 2. Peta Pola Kelurusan Daerah Penelitian

Secara keseluruhan, struktur geologi yang berada di daerah penelitian memiliki pola yang cenderung berarah Barat Laut – Tenggara hingga Timur Laut – Barat Daya. Struktur-struktur geologi yang berarah Barat Laut – Tenggara diantaranya Sinklin Paiti dan Sesar terduga Batuputih. Struktur geologi yang berarah Utara Timur Laut – Selatan Barat Daya diantaranya Sesar sinistral Batangkapugadang. Sedangkan sesar yang berarah Timur Laut – Barat Daya yaitu Sesar dextral Batangpaiti dan Sesar sinistral Batangbatiung. Berdasarkan hasil analisis streografis pada masing-masing struktur geologi, dapat diketahui bahwa keberadaan struktur-struktur geologi di daerah penelitian dipengaruhi oleh tegasan kompresional yang berarah Timur Laut – Barat Daya.

Selain analisis pola umum kelurusan, analisis densitas kelurusan turut dilakukan untuk mengetahui zona lemah yang terdapat di daerah penelitian. Keberadaan zona lemah dapat dijadikan salah satu indikasi dalam menentukan area dengan permeabilitas tinggi. Struktur geologi baik berupa sesar maupun rekahan dapat dianggap sebagai zona lemah yang menjadi media mobilisasi bagi fluida panas bumi (Bujung et al., 2011). Fitur yang mewakili zona lemah struktural pada permukaan bumi dapat dilihat dari fitur-fitur berupa kelurusan (*lineament*). Kelurusan tersebut dapat berupa kelurusan sungai maupun kelurusan morfologi, seperti lembah dan punggung. Intensitas *lineament* tidak sama di setiap tempat. Umumnya, zona hancuran di suatu daerah dicirikan oleh intensitas kelurusan yang lebih rapat. Penentuan zona permeabilitas dapat didasarkan pada peta densitas kelurusan. Densitas kelurusan yang rapat dapat menjadi indikasi adanya zona hancuran. Di daerah penelitian, keberadaan manifestasi air panas berasosiasi dengan area yang memiliki densitas kelurusan yang rapat (Gambar 3).



Gambar 3. Peta *Lineament/Fault-Fracture Density (FFD)*

3.2. Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian memiliki enam struktur geologi yang berkembang, yaitu struktur F1, F2, F3, F4, F5 dan F6 (Gambar 10). Struktur F1 merupakan sesar normal yang ditemukan di Sungai Patamuan (Gambar 4). Pada sesar ini ditemukan bidang sesar dengan kedudukan $N136^{\circ}E/67^{\circ}$ dan nilai pitch $89^{\circ}SW$. Berdasarkan hasil analisis stereonet, sesar ini berjenis Normal Slip Fault (Rickard, 1972) (Tabel 1).

Tabel 1. Data Struktur F1

Normal Fault Patamuan (F1)	
Bidang Sesar	$N136^{\circ}E/67^{\circ}$
Netslip	$67^{\circ}, N224^{\circ}E$
Rake	89°
σ_1	$68^{\circ}, N049^{\circ}E$
σ_2	$01^{\circ}, N316^{\circ}E$
σ_3	$22^{\circ}, N226^{\circ}E$
Normal Slip Fault (Rickard, 1972)	

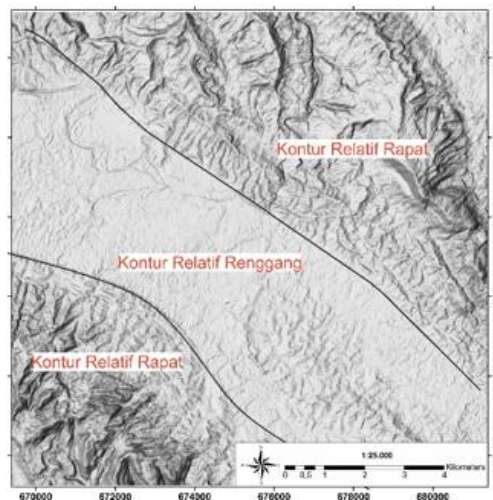


Gambar 4. Kenampakan cermin sesar F1 di lapangan

Struktur F2 yaitu Sinklin Paiti yang merupakan lipatan skala regional. Sinklin ini memiliki sumbu yang berarah BaratLaut – Tenggara. Pada kenampakan peta, lipatan ini dicirikan oleh adanya perulangan pola kontur yang relatif rapat dengan kontur yang relatif renggang (Gambar 5). Analisis stereonet dilakukan menggunakan kedudukan sayap rata-rata pada kedua sisi lipatan. Berdasarkan hasil analisis stereonet, kedudukan *hinge surface* Sinklin Paiti yaitu $N313^{\circ}E/83^{\circ}$ dengan kedudukan *hinge line* 07, $N132^{\circ}E$. Lipatan ini berjenis *Horizontal Upright Fold* (Fossen, 2010) (Tabel 2).

Tabel 2. Data Struktur F2

Sinklin Paiti (F2)	
Southern Limb	$N326^{\circ}E/27^{\circ}$
Northern Limb	$N124^{\circ}E/40^{\circ}$
Hinge Surface	$N313^{\circ}E/83^{\circ}$
Hinge Line	07, $N132^{\circ}E$
σ_1	07° , $N223^{\circ}E$
σ_2	07° , $N132^{\circ}E$
σ_3	80° , $N356^{\circ}E$
Interlimb Angle	114° (Open)
Horizontal Upright Fold (Fossen, 2010)	

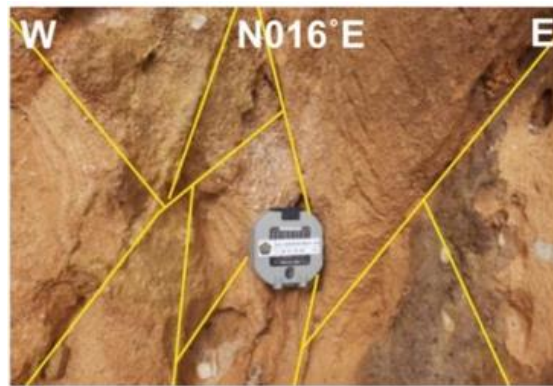


Gambar 5. Pola perulangan kontur dari peta Citra pada Sinklin F2

Struktur F3 merupakan sesar geser sinistral yang berarah Timur Laut – Barat Daya. Sesar ini dicirikan dengan keberadaan kekar-kekar gerus dan ditemukan di sekitar Sungai Batangbatiung (Gambar 6). Berdasarkan hasil analisis stereonet, kedudukan bidang sesar F3 yaitu N225°E/83° dengan nilai *pitch* 44°N. Sesar ini berjenis *Reverse Left-Slip Fault* (Rickard, 1972) (Tabel 3).

Tabel 3. Data Struktur F3

Sesar Sinistral Batangbatiung (F3)	
Bidang Sesar	N225°E/83°
Kekar Gerus 1	N197°E/61°
Kekar Gerus 2	N146°E/46°
Netslip	44°, N038°E
Rake	44°
σ_1	16°, N340°E
σ_2	46°, N232°E
σ_3	39°, N083°E
Reverse Left-Slip Fault (Rickard, 1972)	

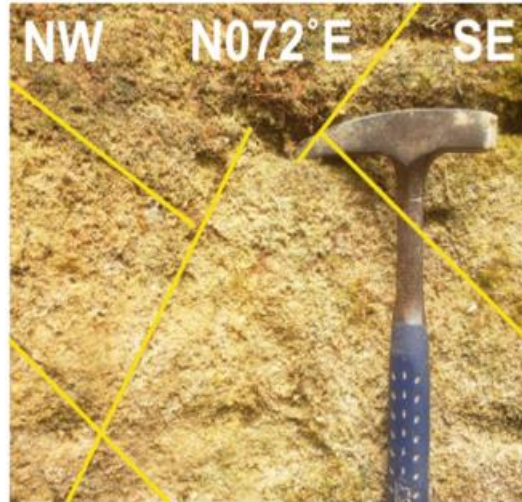


Gambar 6. Kenampakan kekar gerus F3 di lapangan.

Sesar F4 merupakan sesar geser dextral yang berarah Timur Laut - Barat Daya. Sesar ini dicirikan dengan keberadaan kekar-kekar gerus dan kelurusan kontur (Gambar 7). Berdasarkan hasil analisis stereonet, kedudukan bidang sesar yaitu N041°E/49° dengan nilai *pitch* 23°NE. Sesar ini termasuk *Reverse Right-Slip Fault* (Rickard, 1972) (Tabel 4).

Tabel 4. Data Struktur F4

Sesar Dextral Batangpaiti (F4)	
Bidang Sesar	N041°E/49°
Kekar Gerus 1	N078°E/44°
Kekar Gerus 2	N142°E/70°
Netslip	17°, N056°E
Rake	23°
σ_1	23°, N277°E
σ_2	44°, N163°E
σ_3	37°, N026°E
Reverse Right-Slip Fault (Rickard, 1972)	

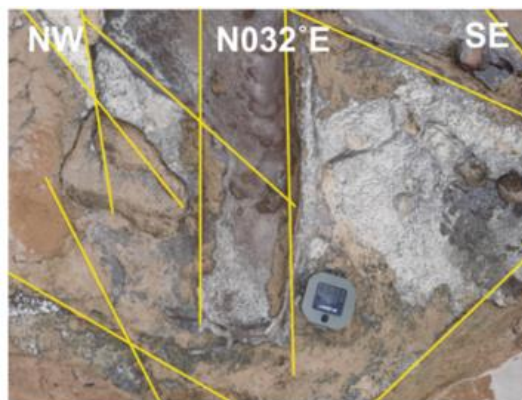


Gambar 7. Kenampakan kekar gerus F4 di lapangan.

Sesar F5 merupakan sesar yang relatif berarah Utara Timur Laut – Selatan Barat Daya dan ditemukan di sepanjang Sungai Batangkapugadang. Sesar F5 dicirikan dengan keberadaan kekar gerus dan kelurusan sungai yang memotong bidang perlapisan (Gambar 8). Pada kelurusan sesar F5, ditemukan manifestasi panas bumi berupa mata air panas. Sesar ini diinterpretasikan menjadi salah satu struktur yang berperan sebagai media keluarnya air panas dari reservoir. Berdasarkan hasil analisis stereonet, didapatkan kedudukan bidang sesar N018°E/63° dengan nilai *pitch* 6°SW. Sesar ini termasuk *Left-Slip Fault* (Rickard, 1972) (Tabel 5).

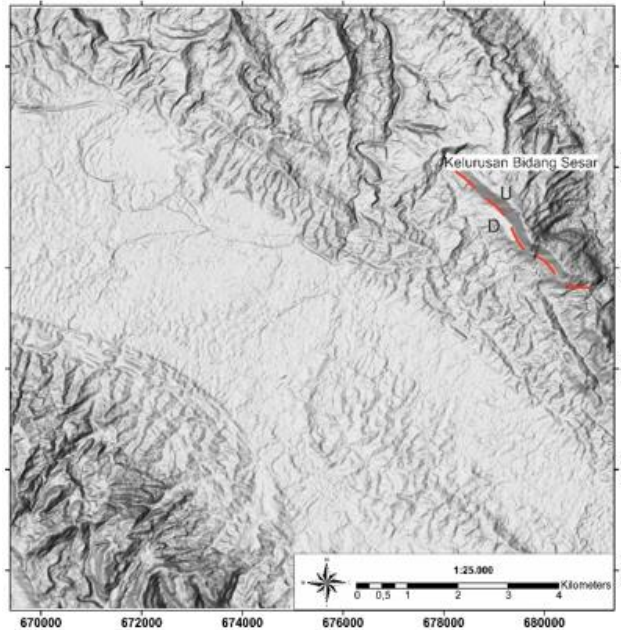
Tabel 5. Data Struktur F5

Sesar Sinistral Batangkapugadang (F5)	
Bidang Sesar	N018°E/63°
Kekar Gerus 1	N042°E/67°
Kekar Gerus 2	N338°E/65°
Netslip	05°, N196°E
Rake	6°
σ_1	02°, N189°E
σ_2	62°, N096°E
σ_3	28°, N281°E
Left-Slip Fault (Rickard, 1972)	



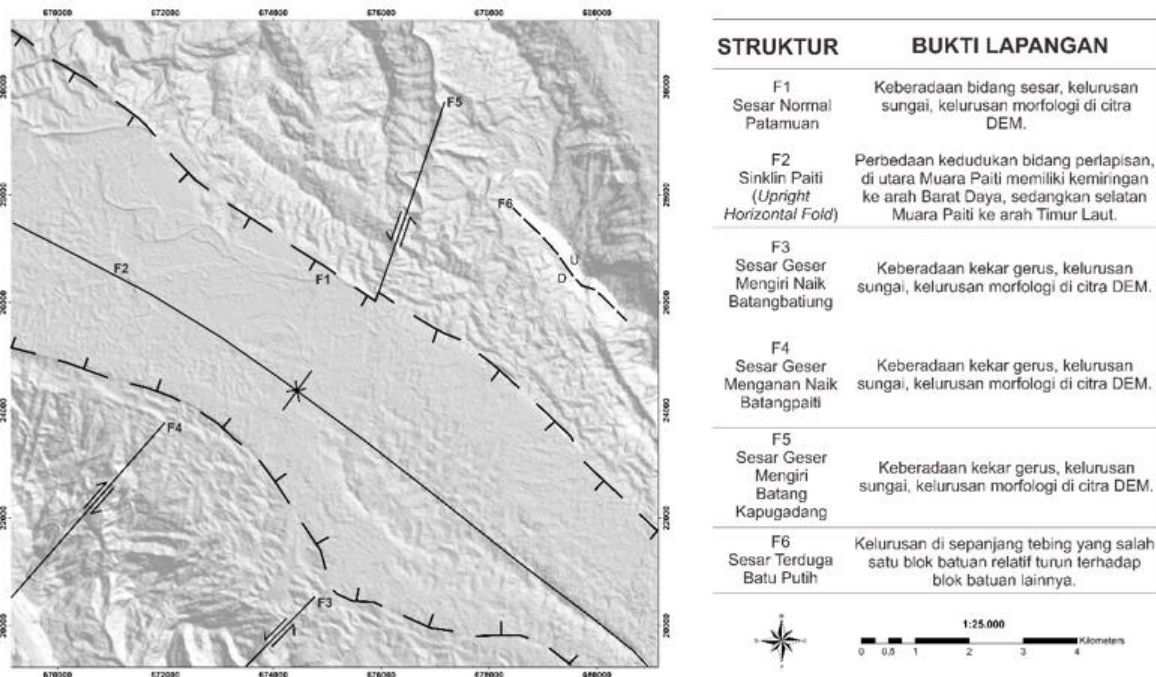
Gambar 8. Kenampakan kekar gerus F5 di lapangan.

Sesar F6 merupakan sesar perkiraan yang berada di bagian Timur Laut daerah penelitian. Sesar ini dicirikan oleh kelurusan di sepanjang tebing yang mana salah satu blok batuan relatif turun terhadap blok batuan lainnya (Gambar 9).



Gambar 9. Kelurusan sesar terduga F6 pada peta Citra.

Dari enam struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian, terdapat dua struktur geologi yang diinterpretasikan sebagai media keluarnya air panas dari reservoir ke permukaan, yaitu Sesar normal Patamuan dan Sesar geser sinistral Batangkapugadang. Hal ini dapat diketahui dari keberadaan manifestasi panas bumi di lapangan yang berasosiasi dengan struktur-struktur geologi tersebut.



Gambar 10. Peta Struktur Geologi daerah penelitian.

Lokasi penelitian tersusun oleh dua Formasi, yaitu Formasi Telisa dan Formasi Menggala. Formasi Telisa terendapkan secara selaras di atas Formasi Menggala. Formasi Telisa tersusun oleh litologi berupa batulempung dan sisipan napal secara lokal. Batulempung di Formasi Telisa memiliki ciri berwarna segar abu-abu, warna lapuk abu kecoklatan, dan secara keseluruhan bersifat non karbonatan (Gambar 11). Formasi ini diendapkan di lingkungan *marine* – transisi (Natasia et al., 2017).

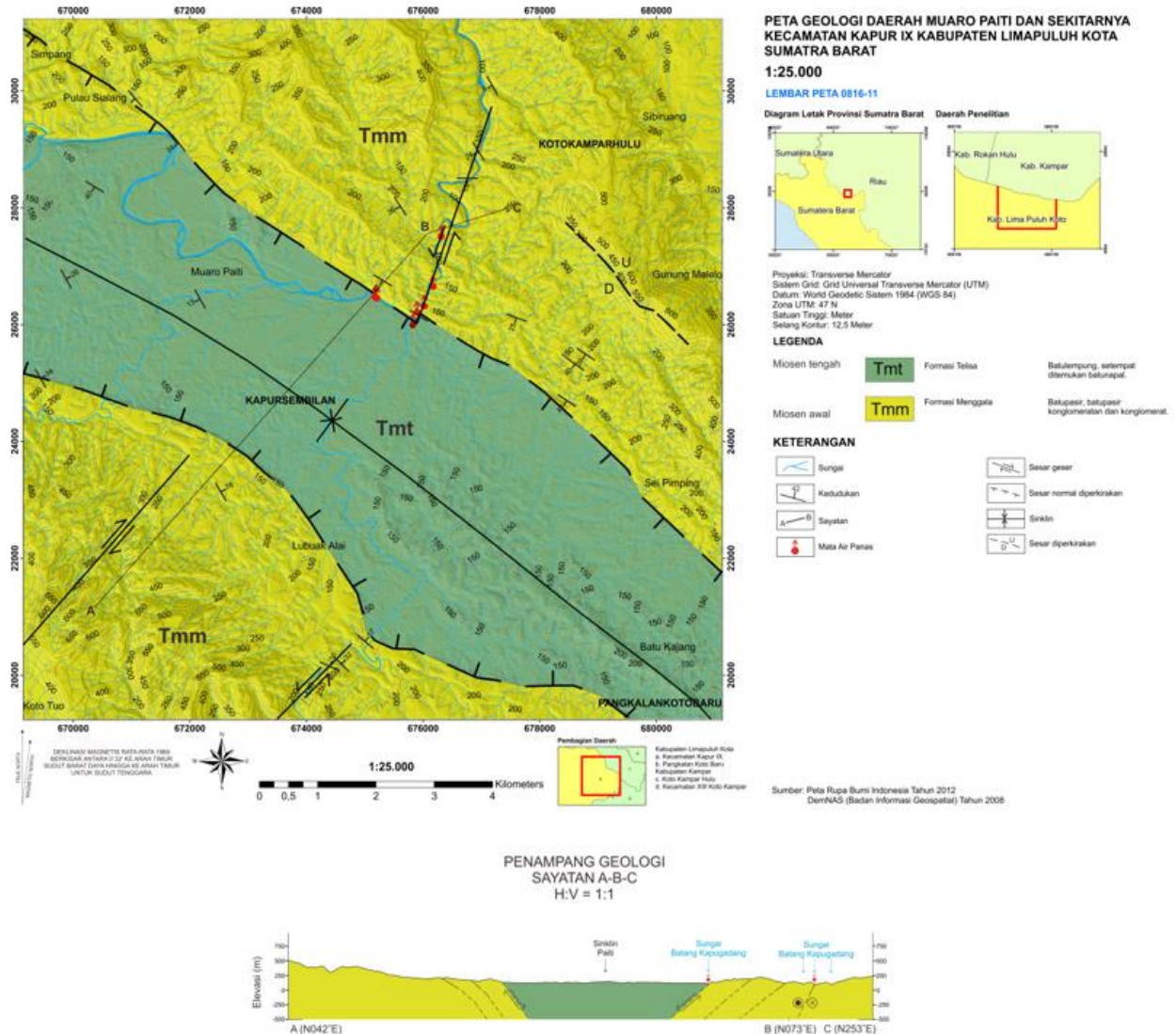


Gambar 11. Satuan Batulempung Formasi Telisa.

Formasi Menggala tersusun oleh litologi berupa batupasir, batupasir kerikilan dan konglomerat, dengan litologi batupasir yang lebih dominan. Satuan batupasir pada Formasi Menggala memiliki ciri berwarna lapuk putih kecoklatan dan berwarna segar putih, berukuran butir sedang-kasar, sortasi baik-sedang, derajat pembundaran *sub-rounded*, kemas tertutup, dan bersifat non karbonatan. Pada batupasir Formasi Menggala, ditemukan struktur sedimen berupa *cross lamination*, *herringbone* dan *channel* (Gambar 12). Formasi ini diendapkan pada awal miosen di lingkungan *fluviodeltaic* (Natasia et al., 2017). Sebaran litologi di daerah penelitian disusun dalam bentuk peta geologi (Gambar 13).



Gambar 12. Satuan Batupasir Formasi Menggala.

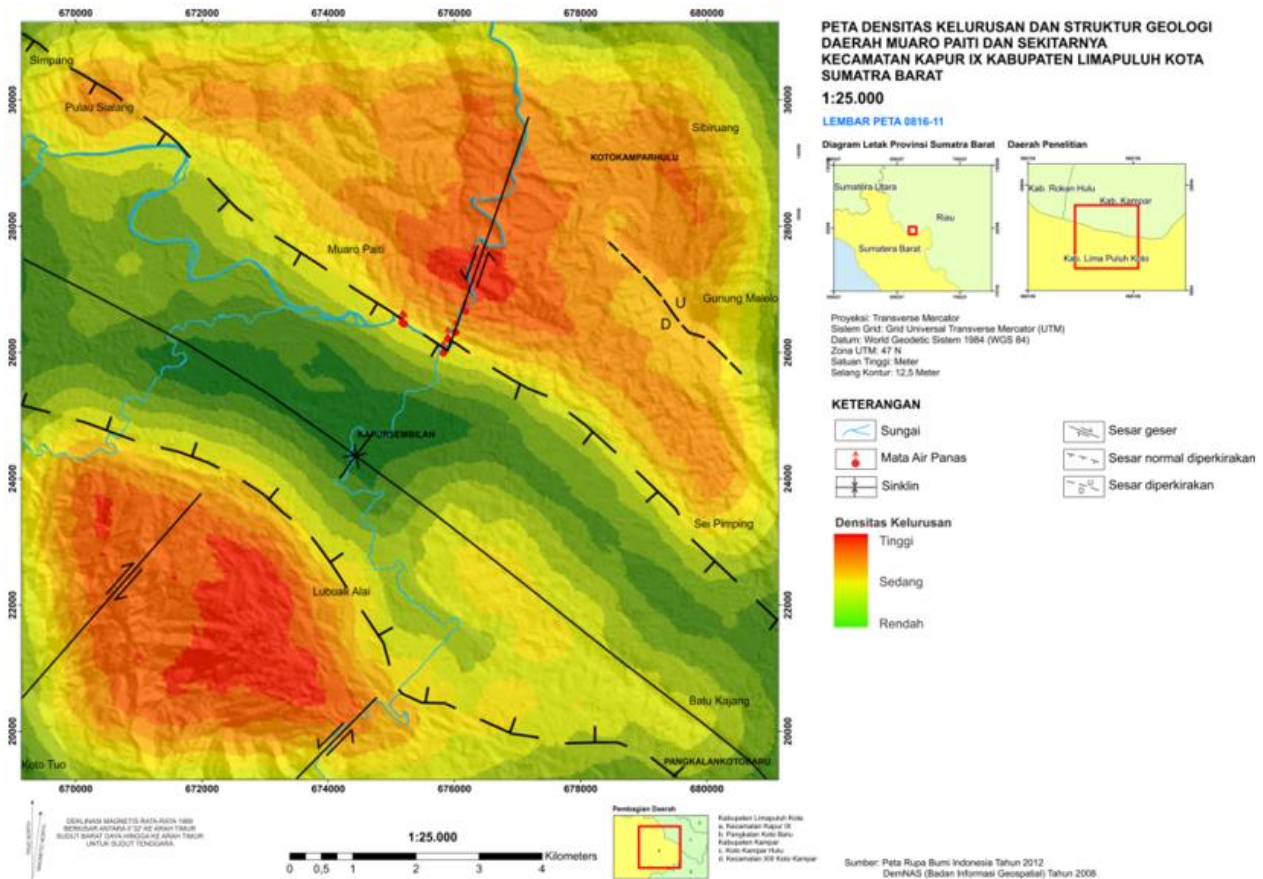


Gambar 13. Peta Geologi Daerah Penelitian

3.3. Diskusi

Daerah penelitian mempunyai enam struktur geologi yang berkembang, yaitu lima sesar dan satu lipatan. Dari lima sesar yang terdapat di daerah penelitian, tiga diantaranya tidak berasosiasi dengan keberadaan manifestasi panas bumi. Sedangkan dua diantaranya berasosiasi dengan keberadaan manifestasi air panas, yaitu Sesar Patamuan dan Sesar Batangkapugadang. Keberadaan manifestasi air panas ditemukan di sekitar perpotongan Sesar Patamuan dengan Sesar Batangkapugadang. Sesar Patamuan memiliki orientasi yang cenderung berarah Barat Laut – Tenggara. Di sepanjang sesar ini ditemukan manifestasi panas bumi berupa mata air panas. Selain itu, manifestasi air panas juga ditemukan di sepanjang Sesar Batangkapugadang. Sesar ini memiliki orientasi yang cenderung berarah Utara Timur Laut – Selatan Barat Daya. Kedua sesar tersebut dipengaruhi oleh tegasan maksimum yang berarah Timur Laut – Barat Daya. Hasil tersebut memiliki kesamaan dengan hasil penelitian di Daerah Sarulla, Sumatra Utara, yang mana pada daerah tersebut keberadaan struktur geologi yang mengontrol keberadaan sistem panas bumi dipengaruhi oleh tegasan maksimum yang berarah Timur Laut – Barat Daya (Hickman et al., 2004). Struktur ini menghasilkan manifestasi panas bumi berupa fumarol dan mata air panas (Hickman et al., 2004). Di bagian Selatan dari daerah penelitian, terdapat pula sistem panas bumi Muara Laboh, Sumatra Barat, yang dipengaruhi oleh struktur geologi dengan tegasan utama berarah Timur Laut – Barat Daya (GMI, 2013; Stimac et al., 2019). Arah tegasan tersebut sesuai dengan tegasan regional di Sumatra yang cenderung berarah Timur Laut – Barat Daya (Tingay et al., 2012). Hasil integrasi antara data struktur geologi dan densitas kelurusan pada peta *fault fracture density* menunjukkan

bahwa kemunculan manifestasi air panas berada di sekitar perpotongan dua struktur geologi, yaitu Sesar Patamuan dan Sesar Batangkapugadang. Perpotongan antara sesar normal dan sesar geser merupakan lingkungan struktural yang menguntungkan bagi sirkulasi fluida panas bumi (Baroek et al., 2018; Faulds et al., 2013). Perpotongan antara Sesar Patamuan dan Sesar Batangkapugadang menghasilkan area dengan densitas kelurusan yang rapat. Area dengan densitas kelurusan yang rapat umumnya berasosiasi dengan zona hancuran yang merupakan akibat dari keberadaan struktur geologi (Arrofi et al., 2022; Grant et al., 1982). Sehingga, apabila peta *fault fracture density*, struktur geologi, dan lokasi kemunculan mata air panas diintegrasikan, maka dapat diinterpretasikan bahwa struktur geologi yang terdapat di daerah penelitian berperan terhadap kemunculan manifestasi air panas di permukaan. Adapun struktur yang paling berperan sebagai media keluarnya air panas dari reservoir yaitu Sesar normal Patamuan dan Sesar geser sinistral Batangkapugadang. Pada perpotongan kedua struktur ini ditemukan manifestasi berupa mata air panas yang menguatkan interpretasi bahwa kedua struktur ini merupakan struktur yang paling berperan sebagai media keluarnya air panas dari reservoir (Gambar 14).



Gambar 14. Peta *Lineament Density* dan Struktur Geologi daerah penelitian.

IV. KESIMPULAN

Daerah penelitian memiliki dua pola struktur yang dominan, yaitu pola yang cenderung berarah Barat Laut – Tenggara dan pola yang cenderung berarah Timur Laut – Barat Daya. Hal ini diketahui dari pola kelurusan yang didapat dari Peta *Digital Elevation Model* (DEM). Dominasi pola umum struktur tersebut dipengaruhi oleh tegasan kompresional yang berarah Timur Laut – Barat Daya. Dari enam struktur yang berkembang di daerah penelitian, terdapat dua struktur geologi yang diinterpretasikan sebagai struktur yang paling berperan terhadap kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan, yaitu Sesar normal Patamuan dan Sesar geser sinistral Batangkapugadang. Sesar normal Patamuan memiliki orientasi Barat Laut – Tenggara, di sepanjang kelurusan ini ditemukan manifestasi berupa mata air panas. Selain itu, di sepanjang Sesar geser sinistral Batangkapugadang juga ditemukan beberapa titik munculnya manifestasi panas bumi berupa mata air panas. Pada peta *lineament density*, perpotongan kedua struktur tersebut menghasilkan area dengan densitas kelurusan yang rapat, yang juga menjadi area munculnya manifestasi

berupa mata air panas di Daerah Muaro Paiti. Sehingga dapat diinterpretasikan bahwa kedua struktur ini menjadi jalur keluarnya air panas dari reservoir ke permukaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas bumi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang telah berkontribusi dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Almuhsinin, & Putra, A. (2019). Klasifikasi Mata Air Panas Berdasarkan Diagram Segitiga Fluida di Batu Balang dan Muaro Paiti, Kabupaten 50 Kota. *Jurnal Fisika Unand*, 8(4), 394–400.
- Arrofi, D., Mahfouz, I. S. A., & Prayudi, S. D. (2022). Investigating high permeable zones in non - volcanic geothermal systems using lineament analysis and fault fracture density (FFD): northern Konawe Regency , Indonesia. *Geothermal Energy*. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00241-3>
- Baroek, M., Stimac, J., Sihotang, A. M., Putra, A. P., & Martikno, R. (2018). Formation and fracture characterization of the Muara Laboh geothermal system, Sumatera, Indonesia. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 42(October), 1289–1315.
- Bujung, C. A. N., Singarimbun, A., Muslim, D., Hirnawan, F., & Sudradjat, A. (2011). Identifikasi Prospek Panas Bumi Berdasarkan Fault and Fracture Density (FFD): Studi kasus Gunung Patuha , Jawa Barat. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 2(1), 67–75.
- Chen, B. C., Perdana, T., & Kuo, L. W. (2021). Fluid flow and fault-related subsurface fractures in slate and metasandstone formations: A case study of the Jentse Geothermal Area, Taiwan. *Geothermics*, 89(300), 101986. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101986>
- Clarke, M. C. G., Kartawa, W., Djunuddin, E., Suganda, & Bagdja, M. (1982). *Geologic Map of The Pakan Baru Quadrangle (0816; Scale 1:250.000), Sumatra, Indonesia*. Geological Research and Development Centre.
- Darmawan, I. G. B., Fahlevi, D. I., Yassar, M. F., & Pramudya, F. A. (2021). Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Berdasarkan Analisis Fault Fracture Density Citra Digital Elevation Model Alos Palsar Di Gunung Rajabasa. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(2), 119–131. <https://doi.org/10.47599/bsdg.v16i2.315>
- Dasgupta, S., & Mukherjee, S. (2019). Remote Sensing in Lineament Identification: Examples from Western India. In *Problems and Solutions in Structural Geology and Tectonics* (1st ed., Vol. 5). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814048-2.00016-8>
- Faulds, J. E., Hinz, N. H., Dering, G. M., & Siler, D. L. (2013). The hybrid model - The most accommodating structural setting for geothermal power generation in the Great Basin, western USA. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 37(PART 1), 3–10.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511777806>
- Grant, M. A., Donaldson, I. G., & Bixley, P. F. (1982). *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press.
- Hancock, P. L. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 7(3–4), 437–457. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3)
- Heidrick, T. L., & Aulia, K. (1993). A structural and tectonic model of the Coastal Plains Block, Central Sumatra Basin, Indonesia. *Proceeding Indonesian Petroleum Association*, 22nd Annua. <https://doi.org/10.29118/ipa.572.285.317>
- Hickman, R. G., Dobson, P. F., Gerven, M. Van, Sagala, B. D., & Gunderson, R. P. (2004). *Tectonic and stratigraphic evolution of the Sarulla graben geothermal area , North Sumatra , Indonesia*. 23, 435–448. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00155-X](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00155-X)
- 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. <https://doi.org/10.24815/jacps.v12i2.31160>

- International, G. (2013). *Geomechanical Model and Fracture Analysis for ML-H2 Well, Muara Laboh Field*.
- Iqbal, M., & Juliarka, B. R. (2019). Analisis Kerapatan Kelurusan (Lineament Density) sebagai indikator tingkat permeabilitas di Lapangan Panasbumi Suoh-Sekincau, Lampung. *Journal of Science and Applicative Technology*, 3(2), 61.
- Means, W. D. (1987). A newly recognized type of slickenside striation. *Journal of Structural Geology*, 9(5–6), 585–590. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90143-X](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90143-X)
- Mertosono, S., & Nayoan, G. A. S. (1974). The Tertiary Basinal Area of Central Sumatra. *Proceeding Indonesian Petroleum Association, 3rd annual*, 63–76.
- Nahli, K., Mulyana, F., Tsani, G. E., Alwan, M. A., Darajat, M. H., & Hendrawan, R. N. (2016). Identifying Non-Volcanic Geothermal Potential in Amohola, Southeast Sulawesi Province, by Applying the Fault and Fracture Density (FFD) Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 42(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012015>
- Natasia, N., Syafri, I., Kurniawan Alfadli, M., & Arfiansyah, K. (2017). Analisis Fasies Reservoir a Formasi Menggala Di Lapangan Barumun Tengah, Cekungan Sumatra Tengah. *Bulletin of Scientific Contribution*, 15(2), 139–150.
- Oktoberiman, Ramadhan P, D. A., W, F. R., & A, R. T. (2015). Identification of Geothermal Potential Based on Fault Fracture Density (FFD), Geological Mapping and Geochemical Analysis, Case Study : Bantarkawung, Brebes, Central Java. *KnE Energy*, 2(2), 141. <https://doi.org/10.18502/ken.v2i2.369>
- Prost, G. L. (2013). *Remote Sensing for Geoscientists* (3rd Editio). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b15638>
- Rickard, M. J. (1972). Fault classification: Discussion. *Bulletin of the Geological Society of America*, 83(8), 2545–2546. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[2545:FCD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[2545:FCD]2.0.CO;2)
- Siler, D. L., Faulds, J. E., Hinz, N. H., Dering, G. M., Edwards, J. H., & Mayhew, B. (2019). Three-dimensional geologic mapping to assess geothermal potential: examples from Nevada and Oregon. *Geothermal Energy*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-018-0117-0>
- Stimac, J., Ganefianto, N., Baroek, M., Sihotang, M., Ramadhan, I., Mussofan, W., Sidik, R., Alfiady, Dyaksa, D. A., Azis, H., Putra, A. P., Martikno, R., Irsamukhti, R., Santana, S., Matsuda, K., Hatanaka, H., Soeda, Y., Cariou, L., & Egermann, P. (2019). An overview of the Muara Laboh geothermal system, Sumatra. *Geothermics*, 82(May), 150–167. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.008>
- Suryantini. (2013). Statistical Analysis of Mercury Data from Soil Survey in Non-volcanic Geothermal System: A Case Study in Sulawesi. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2013.01.029>
- Tingay, M., Morley, C., King, R., Hillis, R., Coblenz, D., & Hall, R. (2012). Present-day stress field of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 482(1–4), 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.019>
- Van Gorsel, J. T. (2018). Bibliography of the geology of Indonesia and surrounding areas. *Www.Vangorselstlist.Com*, 7.0, 0–315.
- Wibowo, H. H. (2010). Application of Fault and Fracture Density (FFD) Method for Geothermal Exploration in Non-Volcanic Geothermal System; a Case Study in Sulawesi-Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress, April*, 25–29.