



**ZONASI PERMEABILITAS PADA AREA MANIFESTASI PANAS BUMI DI DAERAH KABUPATEN
BURU PROVINSI MALUKU**

**PERMEABILITY ZONING IN GEOTHERMAL MANIFESTATION AREA AT BURU REGENCY OF
MALUKU PROVINCE**

Dinda Rezkia Putri^{1*}, Johanes Hutabarat¹, Agus Didit Haryanto¹

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

* Email: Dindarezkiaputri@gmail.com

ABSTRACT

Wapsalit geothermal area, Buru Regency Maluku Province is one of the areas on buru island geographically located at 3°30'16" - 3°29'17" LS and 126°51'75" -126°21'11" E which is estimated to have geothermal potential. The existence of geological structures triggers the formation of a weak zone (permeable zone) as a medium of the appearance of geothermal manifestations to the surface of a geothermal source below the surface. The purpose of the study was to determine the permeable zones that influence the appearance of geothermal manifestations. The research method is a remote sensing analysis on the straightness of ridges and valleys with (azimuth illumination 0°, 45°, 90°, 135°, and altitude 45°), Fault Fracture Density (FFD). The results of the studio's analysis of the straightness of the ridges and valleys were processed into rosette diagrams, showing a pattern of general straightness of the research area, interpreted with the main pattern leading northwest-southeast and southwest- northeast. FFD analysis results, in the research area had a low fracture density of LD values (6.5-7.1 km⁻¹) while LD values (7.1-8.5km⁻¹), and high LD values (8.5-9.5km⁻¹). Reservoirs are predicted to be caused by cooling fractures and stocky tectonic processes. The permeability of this reservoir was built by intensive targeting mainly by the Waekedang fault and Sesar Waemetar and and Waemetar river complexes and spread northwest to southeast of the manifestation area.

Keywords:FFD ,Maluku, Geothermal, Buru Island, Wapsalit

ABSTRAK

Daerah panas bumi Wapsalit,Kabupaten Buru Provinsi Maluku merupakan salah satu daerah di Pulau Buru secara geografis terletak pada 3°30'16" - 3°29'17" LS dan 126°51'75" -126°21'11" BT yang diperkirakan mempunyai potensi panasbumi. Keberadaan struktur geologi memicu pembentukan zona lemah (zona permeable) sebagai media kemunculan manifestasi panas bumi ke permukaan dari suatu sumber panas bumi di bawah permukaan. Tujuan penelitian adalah untuk menentukan zona per- meabel yang berpengaruh terhadap kemunculan manifestasi panas bumi. Metode penelitian berupa analisis penginderaan jauh pada kelurusan punggung dan lembah dengan (azimuth penyinaran 00, 45o, 900, 1350, dan altitude 450), Fault Fracture Density (FFD). Hasil dari analisis studio terhadap kelurusan-kelurusan punggung dan lembah diolah ke dalam diagram roset, menunjukkan pola ke- lurusan secara umum daerah penelitian, diinterpretasikan dengan pola utama mengarah Barat Laut- Tenggara dan Barat daya- Timur Laut. Hasil analisis FFD, di daerah penelitian memiliki kerapatan rekahan rendah nilai LD (6,5-7,1 km⁻¹) sedang nilai LD (7,1-8,5km⁻¹), dan tinggi nilai LD (8,5- 9,5km⁻¹). Reservoir yang terbentuk diprediksi akibat pendinginan rekahan- rekahan serta kekar- kekar pengaruh proses tektonik. Permeabilitas dari reservoir ini dibangun oleh pensesaran yang intensif teru- tama oleh sesar oblik Waekedang serta Sesar Waemetar dan dan komplek Sungai Waemetar serta me- nyebar ke arah barat laut hingga tenggara daerah manifestasi.

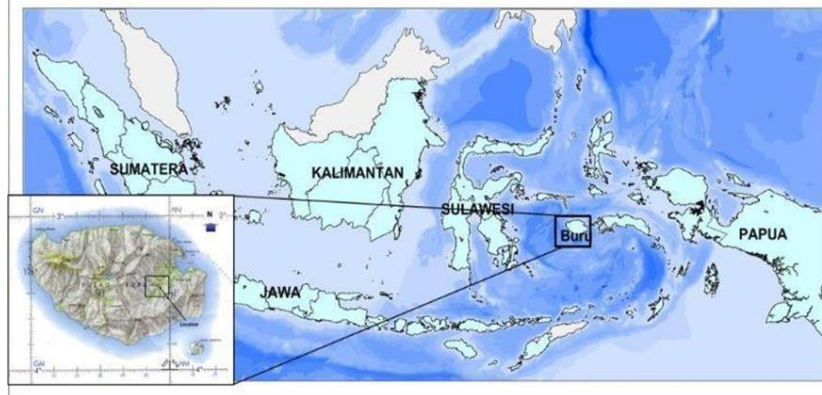
Kata Kunci :FFD ,Maluku, Panas Bumi, Pulau Buru, Wapsalit

PENDAHULUAN

Sistem panas bumi secara umum dapat dijelaskan sebagai sistem perpindahan panas di mantel atas dan kerak, di mana panas di pindahkan dari sumber panas ke lapisan penyimpanan panas. Sistem panas bumi yang sangat dipengaruhi oleh keberadaan uap dan/atau air panas disebut sistem hidrotermal. Kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan terjadi ketika, keluarnya fluida hidrotermal yang berasal dari reservoir melalui media pengontrol, yaitu zona rekahan atau satuan batuan permeabel (Hochstein dan Browne, 2000).

Oleh karena itu diadakan menggunakan metode penginderaan jauh (*remote sensing*), *Fault Fracture Density*

(FFD) yang divalidasi dengan pengamatan secara visual di lapangan, maka dilakukan penelitian mengenai zona permeabilitas dan hubungannya terhadap sebaran manifestasi panas bumi permukaan yaitu mata air panas di daerah penelitian. Daerah panas bumi Wapsalit, Kabupaten Buru Provinsi Maluku merupakan salah satu daerah di Pulau Buru secara geografis terletak pada $3^{\circ}30'16''$ - $3^{\circ}29'17''$ LS dan $126^{\circ}51'75''$ - $126^{\circ}21'11''$ BT dipilih sebagai daerah penelitian (Gambar 1), dikarenakan di daerah ini memiliki manifestasi panas bumi permukaan merupakan salah satu indikasi adanya potensi panas bumi.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Metode ini dipilih mengingat fungsinya yang mampu mengumpulkan informasi aktual dan menggambarkan fenomena yang sedang berlangsung. Penentuan luas prospek pada daerah panas bumi dengan tahap penyelidikan pendahuluan ditentukan melalui pengamatan manifestasi, pengolahan data citra DEM dan kelurusan. Hal ini dilakukan karena belum terdapatnya data kebumihan yang menunjang penentuan luas prospek secara lebih akurat.

Analisis Penginderaan Jauh (*remote sensing*)

Pada tahap ini dilakukan interpretasi kelurusan punggungan dan lembah pada citra DEM-SRTM yang diolah ke dalam diagram mawar untuk mengetahui pola utama dari kelurusan geologi (punggungan dan lembah) yang mengindikasikan struktur geologi di daerah penelitian. Hasil analisis kelurusan tersebut divalidasi dengan observasi di lapangan. Analisis FFD menggunakan citra satelit DEM-SRTM dengan *azimuth* penyinaran 0° , 45° , 90° , 135° , dan *altitude* 45° . Perbedaan sudut penyinaran berfungsi agar semua lereng dapat terlihat dengan sudut-sudut yang berbeda. Selanjutnya kelurusan-

kelurusan ditarik secara manual menggunakan *polyline shape* pada perangkat lunak ArcGis.

Analisis *Fault Fracture Density* (FFD)

Metode *Fault Fracture Density* (FFD). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi kerapatan struktur geologi di permukaan pada daerah penelitian berdasarkan penarikan kelurusan punggungan dan lembah pada analisis penginderaan jauh. Sifat permeabilitas batuan suatu daerah dapat memiliki kerapatan aliran sungai rendah hingga tinggi.

Kerapatan dari kelurusan geologi yang telah ditarik, dapat terlihat dari jumlah dan panjang kelurusan dari setiap *grid* pada peta daerah penelitian. Kerapatan (*density*) didefinisikan sebagai total panjang sebenarnya dari kelurusan yang telah ditarik dan dibagi dengan luas dari *grid* yang telah dibuat. Hasil perhitungan kerapatan struktur geologi (patahan/rekahan) menghasilkan peta kontur berdasarkan nilai mutlak intensitas kelurusan. Zona yang mempunyai nilai FFD tinggi diinterpretasikan berasosiasi dengan keberadaan sebaran manifestasi panas bumi dari fluida reservoir di bawah permukaan.

GEOLOGI

Geomorfologi

Morfologi pulau Buru secara umum dapat dibagi menjadi tiga satuan yaitu satuan pegunungan, perbukitan dan pedataran. Morfologi satuan pegunungan memiliki lereng curam, sebagian merupakan daerah bertopografi karst berlereng sangat terjal yang banyak memiliki goa, lubang langgah (dolina), serta sungai bawah tanah. Morfologi satuan pegunungan memiliki lereng curam, sebagian merupakan daerah bertopografi karst berlereng sangat terjal yang banyak memiliki goa, lubang langgah (dolina), serta sungai bawah tanah.

Satuan pegunungan ini membentang mulai dari tenggara, selatan, barat dan tengah, serta menempati sekitar 30% dari luas pulau Buru. satuan perbukitan tersebar di sekeliling morfologi pegunungan dan peralihan pegunungan ke pedataran di utara. Satuan ini membentuk rangkaian perbukitan membulat dan berlereng landai sampai agak curam, satuan pedataran meliputi dataran rendah dan lembah-lembah datar di antara gunung. Dataran rendah terhampar di pantai utara dan di sepanjang sungai besar seperti dataran.

Stratigrafi

Pulau Buru menurut S. Tjokrosapoetro, dkk. (1993), terdiri dari batuan malihan, sedimen, terobosan, dan batuan gunung api. Batuan tertua, yang termasuk Kompleks Wahlua, berumur Karbon Akhir - Perm Awal, tersusun oleh batuan malihan derajat menengah, berubah fasies dari sekis hijau sampai amfibolit bawah (gambar 2).

Stratigrafi daerah penelitian dikelompokkan menjadi 9 kelompok satuan batuan Urutan dari tua ke muda Yaitu:

- Kelompok Malihan Pra-Tresier (Pz)
- Kelompok Trias (Tr)
- Kelompok Jura - Eosen (JE)
- Kelompok Oligosen (To)
- Kelompok Miosen (Tm)
- Kelompok Pliosen (Tp)
- Batuan Gunungapi Ambalau (Tpa)

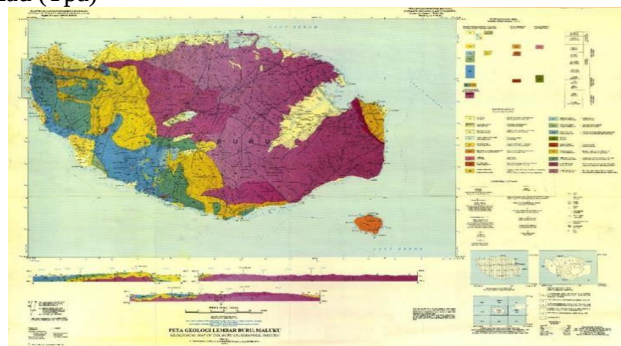
- Kelompok Pleistosen (Qp)
- Kelompok Holosen (Qh)

Struktur Geologi

Struktur yang berkembang di lokasi penelitian adalah hasil dari penarikan kelurusan morfologi baik kelurusan sungai, punggung pada citra landsat maupun peta topografi DEM yang diperlihatkan dengan ditemukannya cermin sesar, kekar, offset litologi, gawir, longsoran dan triangular facet.

Sesar yang berkembang dikelompokkan menjadi Sesar Wapsalit, Sesar Waekedang, Komplek Sesar Waemetar, Sesar Normal Debu.

- Sesar wapsalit** sesar dicirikan dengan ditemukannya cermin sesar dengan arah sekitar N 50° E/ 65° pitch 25° - N 65°E / 65° dengan sudut pitch 30° ke Tenggara, zona hancuran dan longsoran di sepanjang jalan utama setelah dusun wapsalit ke arah Sungai Waehidi.
- Sesar Waetina** berjenis mendatar menganan dengan arah sekitar N 225°E. Keberadaan sesar ini di lapangan dicirikan oleh kelurusan topografi dan tebing di sekitar Dusun Waeplan serta longsoran di Sungai Waeplan
- Sesar Waekadang** Sesar ini berjenis oblique (menurun mengiri) dengan arah sekitar N 320°E. Penarikan sesar didasarkan oleh kelurusan manifestasi mata air panas.
- Sesar Debu** Sesar ini berjenis sesar normal dengan kelurusan sekitar N 335° E, bagian ti- mur laut sebagai hanging wall.
- Komplek Sesar Waemetar** dengan arah barat laut - tenggara sekitar N 175°E/ 65° sudut pitch 30°, arah barat daya – timur laut sekitar N 240° E / 70° sudut pitch 15° dengan arah pergeseran relatif ke timur, N 256° E/ 70° sudut pitch 60° dengan arah pergerakan ke tenggara. Arah hampir barat – timur sekitar N 105° E/ 20° dengan sudut pitch 20°, arah pergerakan relatif tenggara.



Gambar 2. Peta Geologi Regional Kabupaten Buru, Provinsi Maluku(Tjokrosapoerto, dkk., 1993)

HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian diuraikan berdasarkan aspek geologi dan manifestasi panas bumi dalam hal ini difokuskan pada hasil pengolahan dan analisis data di lapangan dan di studio yang menggambarkan zona permeabilitas dan hubungannya dengan sebaran manifestasi panas bumi di daerah penelitian.

HASIL PENGAMATAN LAPANGAN

Geomorfologi Daerah Penelitian

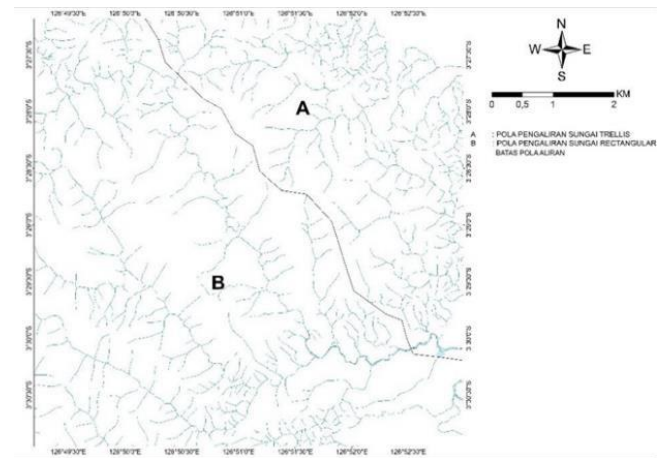
Analisis geomorfologi dilakukan berdasarkan, pengamatan terhadap kenampakan topografi pada citra DEM-SRTM dan pengamatan langsung terhadap morfologi (bentang alam) di lapangan berupa relief, elevasi, dan pola pengaliran sungai. Geomorfologi daerah Wapsalit dibagi menjadi 3 satuan (gambar 3) yaitu Satuan geomorfologi perbukitan curam (a)

Satuan geomorfologi perbukitan bergelombang sedang (b), satuan geomorfologi pedataran. Memiliki hasil analisis pola pengaliran daerah penelitian (gambar 4) yang dilihat dari kenampakan topografi DEM-SRTM dan pengamatan lapangan dapat dikatakan bahwa daerah penelitian memiliki pola pengaliran yaitu pola pengaliran trellis memiliki 40% dari luas dari daerah penelitian yang mempunyai arah Barat Laut Tenggara (a) dan rectangular ini menduduki 60% dari luas daerah penelitian (b).



Gambar 3. Bintang Alam Wapsalit Memperlihatkan Fenomena;

(a)Perbukitan Agak Curam; (b) Perbukitan Bergelombang Sedang,(c) Pedataran.

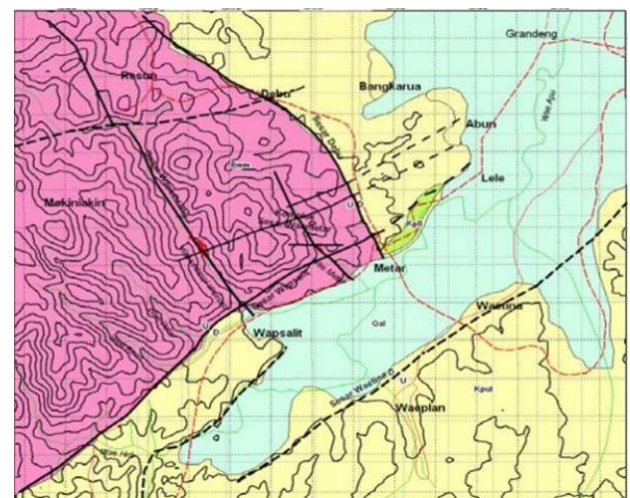


Gambar 4. Peta Pola Pengaliran Sungai Daerah Penelitian:

(A) Pola Pengaliran Trellis: (B) Pola Pengaliran Rectangular.

Struktur Geologi Daerah Penelitian

Penentuan struktur yang berkembang di lokasi survei adalah hasil dari penarikan kelurusan morfologi baik kelurusan sungai, punggung pada citra landsat maupun peta topografi DEM dan pengamatan langsung di lapangan yang diperlihatkan dengan ditemukannya cermin sesar, kekar, offset litologi, gawir, longsor dan triangular facet. Sesar – sesar yang berkembang dikelompokkan menjadi Sesar Wapsalit, Sesar Waekedang, Komplek Sesar Waemeter, Sesar Normal Debu. Untuk Sesar Waetina, Sesar Waehidi, Sesar Waepata dan Sesar Resun ditentukan berdasarkan kelurusan sungai, kelurusan topografi dan triangular facet. Pola umum tektonik yang terbentuk di daerah survei tersusun oleh sesar – sesar dengan jenis oblik dengan arah barat laut – tenggara dan barat daya timur laut (gambar 5).



Gambar 5. Peta Geologi Daerah Manifestasi Panas Bumi Di Daerah Wapsalit, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku (dimodifikasi dari Sulaeman, dkk., 2010)

Manifestasi

Hasil pengamatan di lapangan didapatkan beberapa manifestasi panas bumi yang muncul pada permukaan bumi yaitu : sumber mata air panas dan solfatar di beberapa lokasi yang di sepanjang pinggir Sungai Waekedang atau biasa disebut Sungai Pemali serta dijumpai adanya sumber mata air panas yang terdapat di pinggir Sungai Waemetar.

Manifestasi Solfatar Manifestasi solfatar yang berada di dinding sungai, dan mengeluarkan asap dari rekahan dengan bau yang cukup menyengat, yang disebabkan oleh gas-gas belerang. Kondisi fisik dari air panas tersebut jernih, sedikit berbau belerang, terasa kesat, kadang-kadang muncul gelembung gas dan adanya endapan air panas berupa sinter silika (A) (gambar 6)

Manifestasi Air Panas titik ke-1

Manifestasi air panas ini ditemukan pada koordinat S 3°29'25" dan E 126°51'31", terletak pada pinggir sungai dengan suhu 97°C dengan luas 5 x 4 m² mata air panas ini memiliki kondisi air yang jernih, tidak memiliki bau, terkadang memunculkan gelembung gas (B) (gambar 6)

Manifestasi air panas titik ke-2. Manifestasi air panas ini ditemukan pada koordinat S 3°29'22" dan E 126°51'22", terletak pada pinggir sungai dengan suhu 90°C dengan luas 60 x 50 m² mata air panas ini memiliki kondisi air yang relatif keruh, sedikit berbau belerang jernih muncul melalui rekahan batuan. Pada sekitar manifestasi ini terdapat batu lempung dan batuan ubahan berwarna coklat (C) (gambar 6)

Manifestasi Air Panas titik ke 3 Manifestasi air panas ini ditemukan pada koordinat S 3°29'19,5" dan E 126°51'11", memiliki suhu 70°C, warna air yang jernih, tidak berbau mengeluarkan asap dan terkadang muncul gelembung mata air ini muncul pada rekahan dan merembes menuju ke sungai, memiliki oksida besi berwarna coklat (D) (gambar 6)

Manifestasi panas bumi titik ke 4 Manifestasi air panas ini ditemukan pada koordinat S 3°29'17" dan E 126°51'11", memiliki suhu 90°C dengan warna air yang jernih mengeluarkan asap dan berbau belerang (E) (gambar 6)



Gambar 6. Manifestasi Daerah Penelitian: (A) Manifestasi Berupa Solfatar, (B) Manifestasi Air Panas Titik ke-1; (C) Manifestasi Air Panas Titik ke-2; (D) Manifestasi Air Panas Titik ke-3; (E) Manifestasi Air Panas Titik ke-4

HASIL ANALISIS STUDIO

Analisis Penginderaan Jauh (Remote Sensing)

Interpretasi penginderaan jauh dengan penyinaran 4 (empat) sudut berbeda yaitu pada azimuth: 0°, 45°, 90°, 135°, dan penyinaran konstan 45°.

kelurusan DEM-SRTM Azimuth penyinaran 0°

Pada penyinaran 0° memiliki orientasi arah punggung dan lembahan di daerah penelitian dominan pada diagram

roset berarah Barat laut-Tenggara dan Barat Daya - Timur Laut dengan panjang kelurusan relatif pendek (gambar 7).

Kelurusan DEM-SRTM Azimuth penyinaran 45°

Pada hasil analisis dengan arah penyinaran 45° dan Ketinggian 45° pada peta citra DEM- SRTM menunjukan pola kelurusan dominan berarah Barat Laut – Tenggara. Pada Penyinaran 45° lebih terlihat jelas sudut penyinarannya (gambar 8). Kelurusan ini mempunyai orientasi arah cukup besar, hal ini diinterpretasikan karena pada sudut

(gambar 8) penyinaran ini terlihat punggungan dan lembahan pada perbukitan Barat Laut.

Kelurusan DEM-SRTM Azimuth penyinaran 90°

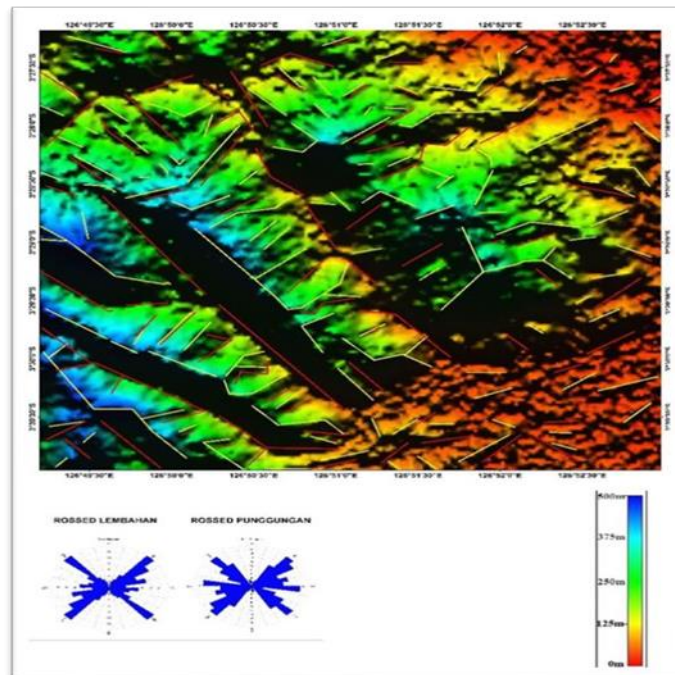
Pada Penyinaran 90° dengan ketinggian 45° memiliki hasil analisis yang memperlihatkan pola kelurusan dominan berarah Barat Laut- Tenggara dan juga terdapat garis berarah Utara-Selatan, Barat Daya-Timur Laut namun tidak dominan (gambar 9).

Kelurusan DEM-SRTM Azimuth Penyinaran 135°

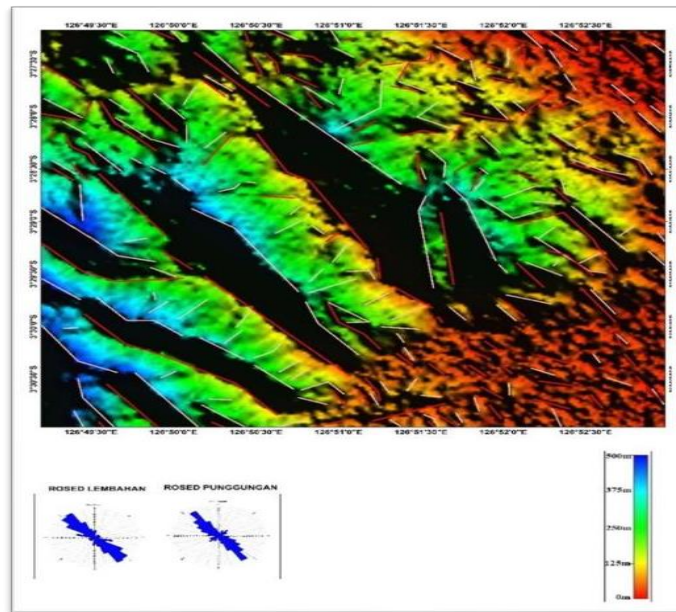
Pada Penyinaran 135° memiliki hasil analisis yang memperlihatkan pola kelurusan dominan berarah Timur Laut-Barat Daya dengan pola yang konsisten dan juga berarah Barat Laut- Tenggara namun tidak dominan (gambar 10).

Kelurusan DEM-SRTM Azimuth penyinaran gabungan (overlays)

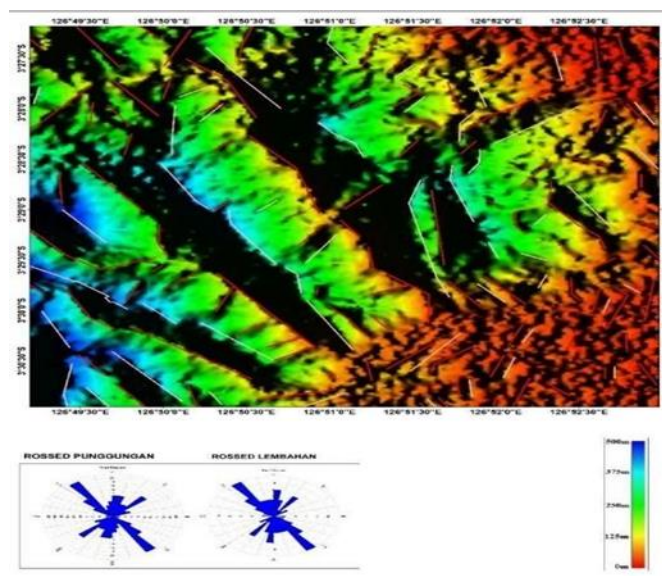
Hasil analisis plotting diagram roset memperlihatkan kelurusan secara menyeluruh dari masing-masing sudut (derajat). Pada masing-masing sudut diberi warna yang berbeda yaitu untuk azimuth 0° diberi warna biru pada peta, azimuth 45° diberi warna kuning pada peta, azimuth 90° diberi warna hijau dan azimuth 135° diberi warna merah. Pada peta kelurusan dan diagram roset secara umum daerah penelitian, di interptasikan dengan pola utama mengarah Barat Laut-Tenggara dan Barat daya- Timur Laut. Pada daerah penelitian menunjukkan bahwa, perkembangan struktur geologi daerah membentuk pola umum tektonik yang terbentuk oleh, sesar-sesar dengan jenis oblik dengan arah Barat laut- Tenggara dan Barat – Timur Laut. (gambar. 11).



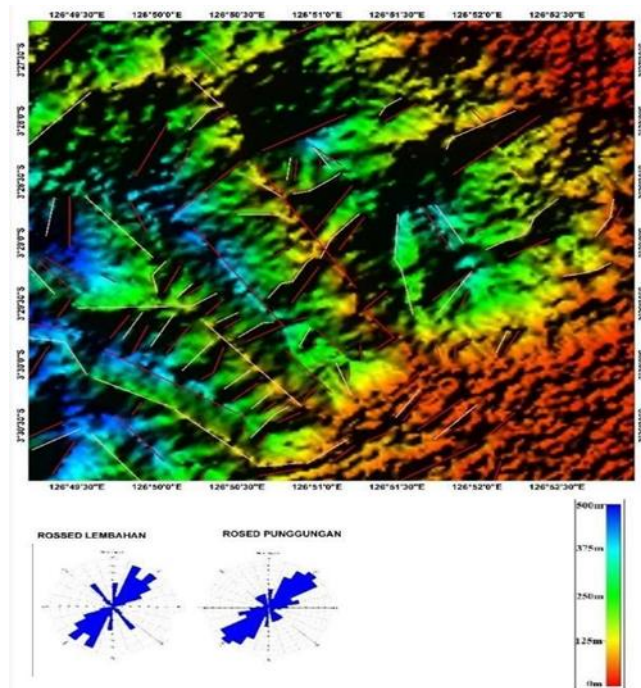
Gambar 7. Peta Kelurusan Dengan Sudut Penyinaran 0° Hasil Ploting Kelurusan Punggungan dan Lembah Pada Diagram Roset, Memperlihatkan Arah Utama Barat laut-Tenggara dan Barat Daya - Timur Laut



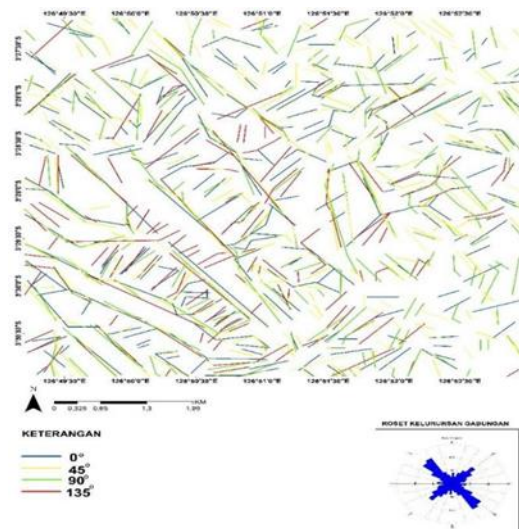
Gambar 8. Peta Kelurusan Dengan Sudut Penyinaran 45° Hasil Ploting Kelurusan Punggungan dan Lembah Pada Diagram Roset, Memperlihatkan Arah Utama Barat Laut – Tenggara



Gambar 9. Peta Kelurusan Dengan Sudut Penyinaran 90° Hasil Ploting Kelurusan Punggungan dan Lembah Pada Diagram Roset, Memperlihatkan Arah Barat Laut-Tenggara, Utara-Selatan Dan Barat Daya-Timur Laut



Gambar 10. Peta kelurusan Dengan Sudut Penyinaran 135° Hasil Ploting Kelurusan Punggungan dan Lembah Pada Diagram Roset, Memperlihatkan Arah Timur Laut-Barat Daya Dan Barat Laut-Tenggara



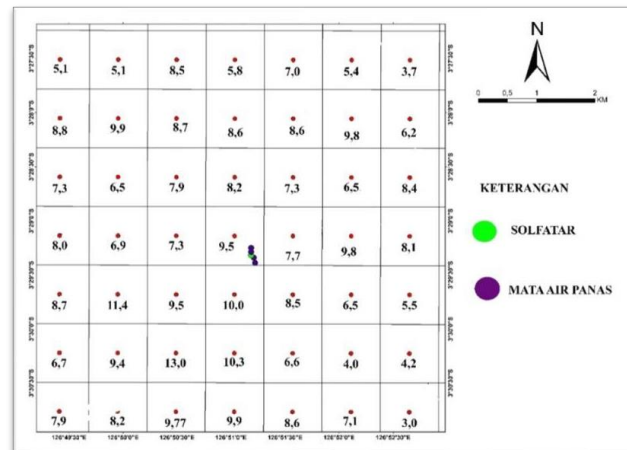
Gambar 11. Peta Overlays Hasil Analisis Kelurusan Azimuth: 0°, 45°, 90°, 135°, Dan Hasil Ploting Kelurusan Punggungan dan Lembah Pada Roset Diagram

Analisis Fault Fracture Density (FFD) Daerah Penelitian

Zona Permeabel dicerminkan dari tingkat kerapatan pada batuan diperlihatkan oleh nilai densitas kerapatan yang bervariasi dari rendah sampai ke tinggi berkisar : $11,4 \text{ km}^{-1}$ – $30,0 \text{ km}^{-1}$ yang diplot dalam satuan area dalam km atau per-grid.

Untuk zona permeabel dengan nilai LD

rendah memiliki nilai yaitu $6,5 \text{ km}^{-1}$ – $7,1 \text{ km}^{-1}$, nilai sedang memiliki nilai yaitu $7,1 \text{ km}^{-1}$ – $8,5 \text{ km}^{-1}$, nilai tinggi yaitu $8,5 \text{ km}^{-1}$ – $9,5 \text{ km}^{-1}$. Pada lokasi penelitian dibagi menjadi 7×7 berdasarkan grid. Agar mengetahui nilai kerapatan kelurusan pada daerah penelitian lebih detail (gambar 12).



Gambar 12. Nilai Tingkat Permeabilitas Untuk Setiap Grid Terlihat Kemunculan Titik Sebaran Manifestasi Panas Bumi Yang Memiliki LD Tinggi

Berdasarkan peta *Fault Fracture Density* terdapat 3 jenis nilai perhitungan fracture yaitu daerah dengan nilai FFD tinggi berwarna merah sampai jingga (orange), daerah dengan nilai FFD sedang berwarna kuning dan daerah dengan nilai FFD rendah berwarna hijau (gambar 13).

Nilai Fault Fracture Density (FFD) Rendah

Zona permeabel dengan nilai LD rendah memiliki nilai yaitu $6,5\text{km}^{-1}$ – $7,1\text{km}^{-1}$ dengan perkiraan luas sebesar 40% daerah penelitian yang berarah Timur-Selatan dapat dilihat dari warna yang diberikan yaitu hijau muda-hijau tua, sehingga menunjukkan bahwa daerah tersebut tidak atau sangat kecil dipengaruhi oleh struktur geologi.

Nilai Fault Fracture Density (FFD) Sedang

Zona permeabel dengan nilai sedang memiliki nilai yaitu $7,1\text{km}^{-1}$ – $8,5\text{km}^{-1}$ dengan perkiraan luas sebesar 40%

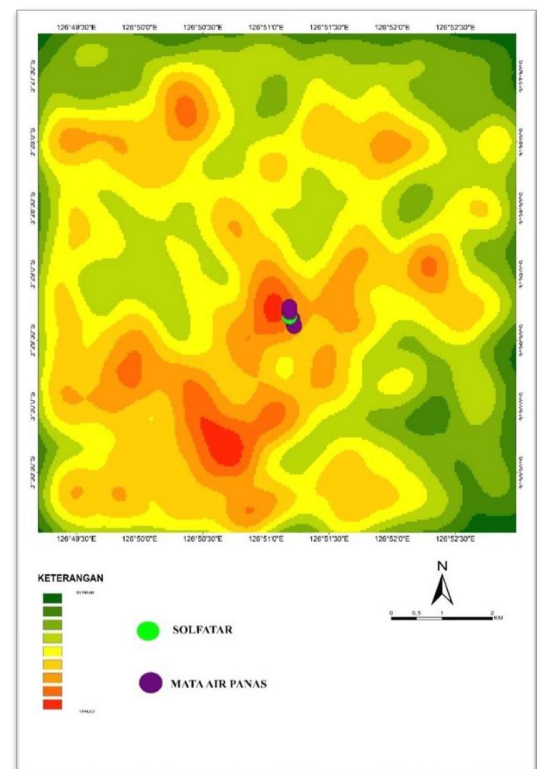
daerah penelitian yang berarah Barat – Barat Laut, dapat dilihat dari warna yang diberikan yaitu warna kuning hingga jingga (orange) muda.

Nilai Fault Fracture Density (FFD) Tinggi

Zona permeabel dengan nilai tinggi yaitu $8,5\text{km}^{-1}$ – $9,5\text{km}^{-1}$ dengan perkiraan luas sebesar 20% daerah penelitian yang, berada pada Barat Laut – Tenggara dapat dilihat dari warna yang diberikan, yaitu warna jingga (orange) tua hingga merah.

Daerah yang memiliki nilai *Fault Fracture Density* (FFD) tinggi membentuk rekahan-

rekahan pada batuan menjadi zona lemah yang membuat batuan yang asalnya impermeabel menjadi permeabilitas. Oleh karena itu, pada nilai FFD yang tinggi ini ditemukan mata air panas dan solfatar yang diberi tanda lingkaran berwarna ungu (mata air panas) dan lingkaran hijau (solfatar) pada Nilai density pergrid (gambar 13).



Gambar 13. Peta Zona Permeabel Untuk Memperllihatkan Nilai Densitas Dari Tinggi-Rendah

Interpretasi Geologi Daerah Penelitian

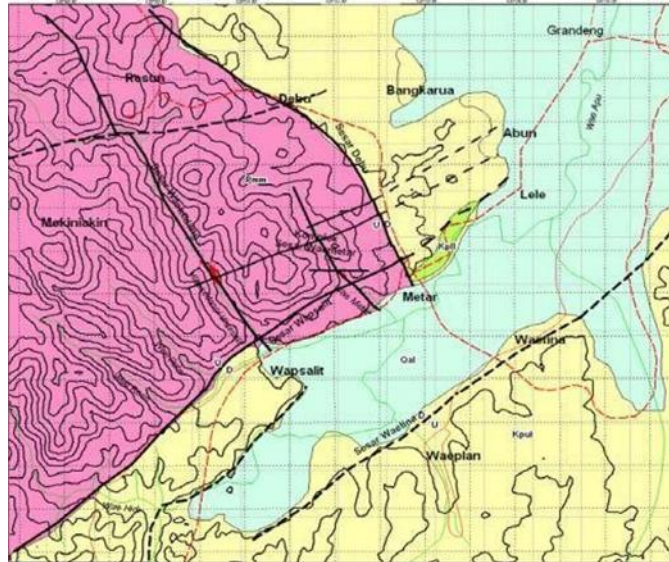
Zonasi permeabilitas pada area manifestasi panas bumi daerah Wapsalit Kabupaten Buru, Provinsi Maluku dengan penelitian langsung di Daerah panas bumi Wapsalit dibagi menjadi 4 Wilayah panas bumi Wapsalit dipecah jadi 4 satuan batuan, adalah satuan batuan metamorf/ malihan, satuan batulempung, satuan undak sungai serta satuan aluvium (gambar 14).

Hasil analisis petrografi menunjukkan batuan metamorf yang ada di Sungai Pemali dan Sungai Waemetar menunjukkan struktur foliasi filonite dan skistose pada mineral kuarsa dan kelompok mika, yang ialah karakteristik khas pada batuan filit dan skis sebaliknya struktur granulose ialah gejala untuk batuan kuarsit yang didominasi oleh mineral kuarsa.

Hasil analisis PIMA (*Portable Infrared Minerals Analyzer*) menunjukkan daerah alterasi yang terletak di Sungai Pemali tersusun oleh mineral-mineral lempung semacam kaolinite, halloysite, dickite, illite serta mineral alunite. Timbulnya illite menampilkan temperatur pembentukannya terletak pada temperatur yang cukup besar,

antara 240-300°C menampilkan jenis hidrotermal pada zona phyllic. Sebaliknya timbulnya mineral alunite menampilkan jenis hidrotermal pada zona advanced argillic, mineral alunite umumnya berasosiasi dengan jenis air panas asam dengan sulfida besar. Sedangkan mineral kaoline, halloysite dan dickite menampilkan temperatur pembentukan yang lebih rendah dan umumnya termasuk pada zona hidrotermal argilik

Pada daerah penelitian terdapat 2 jenis manifestasi panas bumi yaitu mata air panas, dan solfatar yang berada pada zona permeabel dengan nilai densitas yang tinggi karena dipengaruhi oleh adanya struktur sesar-sesar yang berkembang di daerah penelitian dapat dikelompokkan menjadi sesar Wapsalit, sesar Waekedang, kompleks sesar Waetina, sesar Waehidi. Pola nya umum didasari oleh tektonik yang terbentuk pada daerah penelitian tersusun oleh sesar-sesar dengan bentuk oblik berarah Barat Laut – Tenggara dan Barat Daya – Timur Laut (gambar 14).



Gambar 14. Peta Geologi Daerah Manifestasi Panas Bumi Di Daerah Wapsalit, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku (dimodifikasi dari Sulaeman, dkk., 2010)

Hubungan antara manifestasi dan Analisis Fault Fracture Density (FFD)

Geomorfologi daerah Wapsalit dibagi menjadi 3 satuan, yaitu Satuan geomorfologi perbukitan curam, Satuan geomorfologi perbukitan bergelombang sedang, pedataran dan memiliki pola pengaliran sungai pola pengaliran yaitu pola pengaliran trellis memiliki 40% dari luas dari daerah penelitian yang mempunyai arah Barat Laut Tenggara dan rectangular ini menduduki 60% dari luas daerah penelitian hal ini mengindikasikan bahwa Sungai dengan pola aliran rektangular banyak ditemukan di kawasan sesar dengan ciri utama aliran sungai akan mengikuti jalur yang kurang resisten serta, terkumpul pada tempat singkapan batuan yang bersifat lunak. Pada percabangan sungai akan membentuk sudut tumpul dengan sungai utamanya. Sungai Pemali berada pada daerah penelitian terkena Sesar Waekadang, dan Komplek Sesar Waekadang. Pada daerah panas bumi yang memiliki pola kelurusan semakin banyak dan saling berpotongan dapat menjadi indikasi bahwa daerah tersebut rentan terhadap proses deformasi dan berpengaruh terhadap kemunculan manifestasi panas bumi permukaan, dimana berdasarkan hasil uji arah kelurusan punggung dan arah segmen sungai memperlihatkan pola pengaliran yang dikontrol oleh tektonik atau struktur geologi (Gentana, 2018).

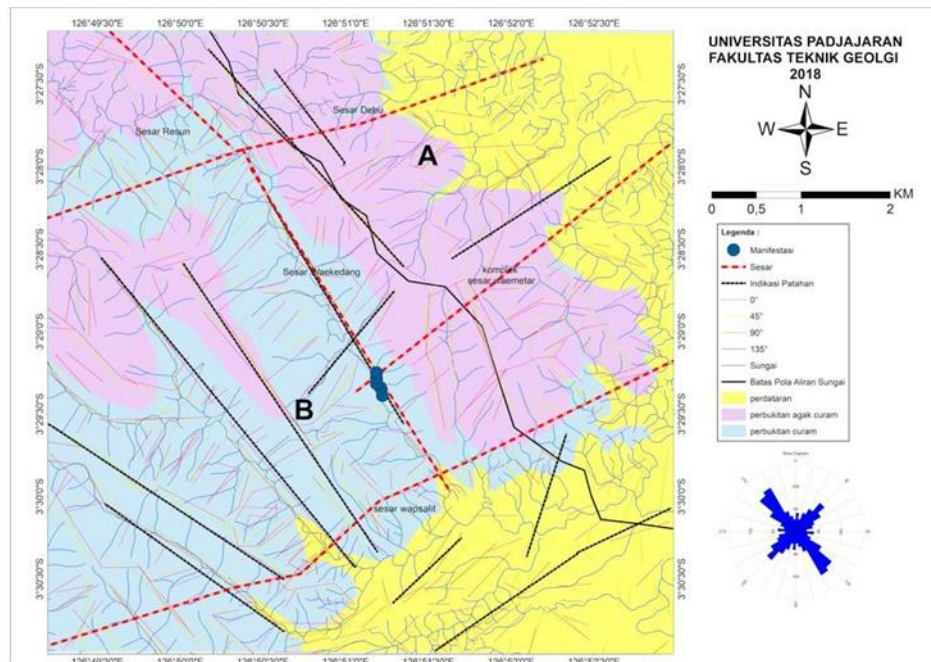
Terbentuknya fenomena bentang alam tersebut menandakan di daerah penelitian telah terganggu oleh adanya aktivitas tektonik, deformasi atau pensesaran yang berperan terhadap perkembangan struktur geologi di daerah penelitian. Struktur geologi menyebabkan terbentuknya rekahan-rekahan pada batuan yang mengubah batuan yang awalnya bersifat tidak dapat meloloskan fluida (impermeable) menjadi batuan yang dapat meloloskan fluida (permeable) membentuk zona lemah, dimana umumnya batuan juga akan bersifat rentan terhadap proses pelapukan. Daerah yang memiliki zona lemah merupakan zona permeabilitas yang berperan sebagai media munculnya fluida panas bumi dari bawah permukaan (reservoir) ke permukaan sebagai manifestasi panas bumi sebagaimana mata air panas yang muncul di daerah penelitian.

Pembentukan sistem panas bumi di wilayah Wapsalit sangatlah berbeda dengan pola umum pembentukan panas bumi yang berkaitan dengan kegiatan kegunungapian. Sistem panas bumi wilayah Wapsalit diperkirakan berkaitan dengan tubuh intrusi/ vulkanik yang tidak timbul di permukaan, dimana tubuh tersebut berfungsi selaku sumber panas yang memanasi air dasar permukaan yang setelah itu naik lewat celah-celah serta rekahan akibat aktivitas tektonik serta terperangkap dalam reservoir panas bumi.

Batuan penudung sistem panas bumi Wapsalit ini diperkirakan berbentuk batuan metamorf yang alami ubahan/ alterasi akibat kontak antara fluida panas dengan batuan sekitarnya. Fluida panas yang timbul ke permukaan keluar dari sesuatu reservoir panas bumi bersuhu tinggi dengan fluida panasnya yang didominasi oleh air (water dominated). Hasil pendugaan temperatur reservoir dengan geotermometer SiO₂ memperlihatkan kalau temperatur reservoir mencapai 224- 247°C serta tercantum kedalam entalpi besar.

Pemunculan mata air panas Wapsalit di Sungai Pemali dengan temperatur antara 99. 6–101. 3°C dengan pH 8.82-9.98 (basa), dan wilayah alterasi yang lumayan luas± 35. 000 m² dikontrol oleh struktur sesar wajar geser (oblik) Waekedang yang berarah barat laut–tenggara serta komplek Sesar Metar yang berarah barat daya– timur laut yang memotong batuan metamorf tipe filit dapat dibuktikan dengan hasil plotting secara umum pada diagram roset menunjukan pola kelurusan utama yang diinterpretasikan sebagai struktur sebagai patahan di daerah penelitian (gambar 14). Sebaliknya timbulnya air panas dengan temperatur 60. 7°C serta ber- pH 7. 12 (netral) dikontrol oleh Sesar Metar tipe oblik yang berarah barat daya – timur laut (gambar 15)

Sinter silika yang ditemui di dekat air panas Wapsalit di wilayah Sungai Pemali mempunyai tebal± 5cm nyaris ditemui di setiap pemunculan air panas. Timbulnya sinter silika mengindikasikan kalau panas bumi di wilayah Wapsalit bertemperatur besar, sebaliknya alterasi yang lumayan luas mengindikasikan kalau batuan di dekat perwujudan sudah hadapi perubahan akibat interaksi antara fluida panas yang dibawa ke permukaan dengan batuan yang terlewati fluida tersebut.



Gambar 15. Supermose Peta Geomorfologi , Peta Overlays Analisis Kelurusan , dan Peta Pola Pengaliran Sungai

DISKUSI

Analisis kelurusan penyinaran gabungan (overlays) dari ke empat sudut penyinaran untuk memastikan bahwa tidak ada kelurusan yang tertutup oleh bayangan. Overlays penyinaran gabungan untuk meminimalisasi adanya gangguan bayangan akibat efek penyinaran dan memastikan sudah tidak ada kelurusan punggung maupun lembah yang belum ditarik dikarenakan tertutup oleh bayangan.

Pola penarikan kelurusan dilakukan pada punggung dan lembahan yang dapat mengindikasikan adanya struktur geologi yang berkembang.

Hasil analisis plotting diagram roset memperlihatkan kelurusan secara menyeluruh dari masing-masing sudut (derajat). Pada masing-masing sudut diberi warna yang berbeda yaitu untuk azimuth 0° diberi warna biru pada peta, azimuth 45° diberi warna kuning pada peta, azimuth 90° diberi warna hijau dan azimuth 135° diberi warna merah.

Pada peta kelurusan dan diagram roset secara umum daerah penelitian, di interpertasikan dengan pola utama mengarah Barat Laut-Tenggara dan Barat daya-Timur Laut. Pada daerah penelitian menunjukkan bahwa, perkembangan struktur geologi daerah penelitian sama dengan Sesar oblik Waekedang serta Sesar Waemetar dan

komplek Sesar Waemetar yang juga memiliki pola yang relatif sama pada Daerah Wapsalit .

Pada daerah panas bumi yang memiliki pola kelurusan semakin banyak dan saling berpotongan dapat menjadi indikasi bahwa daerah tersebut rentan terhadap proses deformasi dan berpengaruh terhadap kemunculan manifestasi panas bumi permukaan, dimana berdasarkan hasil uji arah kelurusan punggung dan arah segmen sungai memperlihatkan pola pengaliran yang dikontrol oleh tektonik atau struktur geologi (Gentana, 2018).

Analisis FFD dilakukan untuk penajaman zona permeabilitas dimana pada daerah yang memiliki kerapatan struktur geologi (patahan/rekahan) yang dominan tinggi menandakan di daerah tersebut memiliki tingkat permeabilitas yang tinggi.

Di daerah penelitian memiliki tingkat permeabilitas yang bervariasi dari rendah hingga tinggi dengan nilai rendah yaitu $6,5\text{km}^{-1} - 7,1\text{km}^{-1}$, nilai sedang memiliki nilai yaitu $7,1\text{km}^{-1} - 8,5\text{km}^{-1}$, nilai tinggi yaitu $8,5\text{km}^{-1} - 9,5\text{km}^{-1}$. berasosiasi dengan kemunculan atau sebaran manifestasi panas bumi permukaan. Pada daerah yang memiliki tingkat permeabilitas sedang dan tinggi akan membentuk zona lemah (zona permeabilitas), sehingga batuan metamorf yang awalnya mempunyai sifat impermeable menjadi permeable yang diakibatkan oleh adanya struktur

geologi (patahan) merupakan media munculnya fluida panas bumi ke permukaan. Sebagian kecil fluida panas ini keluar ke permukaan sebagai mata air panas akibat gaya tektonik yang memotong batuan penudung.

Sumber panas dari sistem panas bumi Wapsalit adalah magma di bawah permukaan yang belum muncul atau masih dalam tahap awal pembentukan vulkanik muda.

Reservoir yang terbentuk diduga akibat pendinginan rekahan-rekahan dan kekar-kekar pengaruh proses tektonik. Permeabilitas dari reservoir ini dibentuk oleh pensesaran yang intensif terutama oleh sesar oblik Waekedang dan Sesar Waemetar serta kompleks Sesar Waemetar. Batuan penudung sistem panas bumi Wapsalit ini diperkirakan berupa batuan metamorf yang mengalami ubahan/ alterasi akibat kontak antara fluida panas dengan batuan sekitarnya.

KESIMPULAN

1. Pola utama kelurusan geologi (punggungan dan lembah) kelurusan dominan berarah Barat Laut-Tenggara dan Barat daya-Timur Laut.
2. Dari hasil analisis penginderaan jauh (remote sensing), pengamatan di lapangan, dan analisis FFD, diperoleh indikasi struktur geologi berupa morfologi perbukitan curam, perbukitan curam bergelombang sedang, pedataran ditentukan berdasarkan kelurusan sungai, kelurusan topografi dan triangular facet. Pola umum tektonik yang terbentuk di daerah sur-vei tersusun oleh sesar – sesar dengan jenis oblik dengan arah barat laut – tenggara dan barat daya timur laut. dan pola pengaliran sungai yang mendominasi yaitu rectangular
3. Berdasarkan hasil analisis FFD di daerah penelitian memiliki tingkat kerapatan rekahan yang bervariasi dari rendah hingga tinggi nilai rendah yaitu $(6,5\text{km}^{-1} - 7,1\text{km}^{-1})$, nilai sedang memiliki nilai yaitu $(7,1\text{km}^{-1} - 8,5\text{km}^{-1})$, nilai tinggi yaitu $(8,5\text{km}^{-1} - 9,5\text{km}^{-1})$. Daerah yang memiliki nilai FFD tinggi diinterpretasikan sebagai daerah yang paling di- pengaruhi oleh struktur geologi yang mem- bentuk zona permeabilitas yang berhubungan dengan kemunculan manifestasi panasbumi di permukaan
4. Dari hubungan manifestasi dan FFD

Reservoir yang terbentuk diduga akibat pendinginan rekahan-rekahan dan kekar-kekar pengaruh proses tektonik. Permeabilitas dari reservoir ini dibentuk oleh pensesaran yang intensif terutama oleh sesar oblik Waekedang dan Sesar Waemetar serta kompleks Sesar Waemetar.

Batuan penudung sistem panas bumi Wapsalit ini diperkirakan berupa batuan metamorf yang mengalami ubahan/ alterasi akibat kontak an- tara fluida panas dengan batuan sekitarnya

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran dan semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian tulisan ini, serta terima kasih kepada Pemerintah Provinsi Daerah Maluku yang sudah mendukung penulis selama menempuh pendidikan di Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

DAFTAR PUSTAKA

- A. Zarkasyi, D.H., & Kasbani 2007, 'Penyelidikan Terpadu Daerah Panas Bumi Wapsalit Kabupaten Buru Provinsi Maluku'
- Doornkamp, J. C., 1986, '*Geomorphology approaches to the study of neotectonics*' *Journal of Geological Society*, Vol.143, hh. 335-342
- D.EBTKE., & KESDM. 2009, 'Potensi Panas Bumi WPSE Wapsalit'.
- F.A.Pratikno , Jamaluddin, H.M.R., & Prabowo 2020, 'Analisis Gravitasi Struktur Bawah Permukaan DaerahManifestasi Panas Bumi Kabupaten Buru Selatan'
- Fournier, R.O., 1981, '*Application of Water Geochemistry Geothermal Exploration and Reservoir Engineering*', "*Geothermal System: Principles and Case Histories*". John Willey & Sons.New York.
- Gentana, D., Sukiyah, E., Sulaksana, N.,Yuningsih, E.N., (2017). *Determination- Tanggamus Geothermal Prospect Area, Lampung Province, South Sumatra Based on Remote Sensing and 3D Micromine Software*, FIG Working Week 2017. Helsinki, Finland, May 29–June 2, 2017.

- Hochstein, M.P., dan Browne, P.R.L., 2000, 'Surface Manifestation of Geothermal System with Volcanic Heat Sources, In Encyclopedia of Volcanoes' H. Sigurdsson., Academic Press A Harcourt Science and Technology Company.
- Haryanto, A. Didit., Yoseph, B. C SSA., 2019, 'Deliniasi Zona Upflow/Out- flow Panasbumi Daerah Cibeber, Banten Menggunakan Analisis Densitas Kelurusan dan Geoindikator'. Fakultas Teknik Geologi. Padjadjaran Geoscience Journal. Vol. 3, No.1.
- Iswahyudi, Sahrul., Widagdo, A., B. A. Pratama. 2016, 'Analisis Zona Permeabel Fluida Sistem Panas Bumi Gunung Api Slamet Berdasarkan Analisis. Kerapatan Kelurusan Citra SRTM dan Struktur Geologi'. Vol 12, No. 1. Hh. 25- 29. Jurusan Teknik Geologi, Universitas Jenderal Soedirman
- Katili, J.A. 1975, 'Volcanism and Plate Tectonics in The Indonesian Island Arc, Tectonics Physics', h, 165-188
- Saptadji, N.M., 2009, 'Karakteristik Reser- voir Panas Bumi, Training Advanced Geothermal Reservoir Engineering', 6- 7 Juli, Bandung, Indonesia.
- Supramono 1974 'Inventarisasi kenampakan gejala panas bumi di daerah Maluku Utara (P. Makian, P. Tidore, P. Hal- mahera), daerah Gorontalo dan Kepu- lauan Sangihe Talaud (Sulawesi Utara)'
- Sasilani R., Haryanto D., Hutabarat J., Herma- wan D.,& W.S. 2019, 'Zone Of Geothermal Prospects Based On Fault Fracture Density (FFD) Method In Sumani Region, West Sumatera'. Journal Of Geological Sciences And Applied Geology Vol. 3 No. 2.
- Sulaeman, M. N., & B. (2010). Surface Manifestation in the Wapsalit Geothermal Area, Buru Island, Indonesia. Proceeding World Geothermal Congress 2010. Bali.Kholid, M., Widodo, S., & Rezk
- Soengkono, S. 1999, 'Te Kopia Geothermal System (New Zealand) - The Relationship Between Its Structure and Ex- tent'.Journal of Geothermics vol 28, hh, 767-784.
- Widodo, Kashani, B.S., E.,& Lim. 2007. 'Potensi Panas Bumi Wilayah Kabupaten Buru Maluku'
- Tjokosapoetro, S., Rusmana, E., Achdan, A., 1993, 'Peta Geologi Regional Ambon, Maluku, Skala 1:250.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Ambon. Lembar, 2612-2613'.
- Utami, P., (1998). Energi Panas Bumi: Sebuah Gambaran Umum. Majalah Energi, Vol.2 November 19988, Pusat Studi Energi Universitas Gadjah Mada, Hal.39-42
- Zarkasyi, A., & Takodana, I. (2016). Survei Magnetotelurik dan Time Domain El- ektromagnetik Daerah Panas Bumi Wapsalit, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi