

INVESTIGASI KONTROL STRUKTUR GEOLOGI PADA MANIFESTASI GEOTERMAL DI DAERAH LOMPPIO, DONGGALA, SULAWESI TENGAH

Asrafil^{1*}, Abdul Mukaddas², Ajeng Listianti³

¹⁻³ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako

e-mail: *¹asrafil@untad.ac.id

ABSTRAK

Lompio merupakan salah satu desa yang memiliki potensi geotermal non-vulkanik yang berada di Kabupaten Donggala Provinsi Sulawesi Tengah. Potensi geotermal memunculkan manifestasi geothermal yang umumnya muncul pada zona permeable, yang sering dikaitkan dengan rekahan batuan yang disebabkan oleh struktur. Oleh karena itu, menarik untuk dilakukan investigasi terkait densitas dari zona rekahan (*fracture*) maupun sesar (*fault*) yang merupakan struktur melalui metode *Fault and Fracture Density* (FFD), guna memperoleh korelasi terhadap manifestasi geotermal yang muncul di daerah Lompio sebagai tujuan dari penelitian ini. Penelitian ini dilaksanakan melalui observasi lapangan (geologi permukaan) dan analisis data guna mengungkap kontrol struktur yang berlaku dan karakteristik dari manifestasi geotermal di Lompio. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah Lompio memiliki manifestasi geotermal berupa mata air panas berada pada zona transisi intensitas kerapatan struktur (*lineament*) rendah ke tinggi, hal ini menunjukkan bahwa struktur tidak begitu dominan mengontrol kemunculan manifestasi geotermal berupa mata air panas. Karakteristik Mata air panas di daerah lompio memiliki pH 7,9 s.d. 9,6, konduktivitas cukup tinggi mencapai 10.4 s.d. 12,6 mS, dan temperatur air panas berkisar 65 s.d. 79°C, muncul pada endapan alluvium, tidak berwarna, memiliki bau belerang yang lemah, sedikit beruap, tidak ada sinter, dan sedikit asin.

Kata-kata kunci: *Faults and Faractures Density*, Geotermal, *lineament*, Lompio, manifestasi

PENDAHULUAN

Potensi geotermal (panas bumi) di Indonesia memiliki sistem yang umumnya berasosiasi dengan aktivitas gunungapi atau vulkanisme. Namun demikian, potensi geotermal juga ditemukan pada wilayah yang tidak terkait gunungapi atau yang dikenal dengan istilah panas bumi non-vulkanik. Di Indonesia, daerah yang ditemukan sistem panas bumi seperti ini meliputi wilayah di luar jalur vulkanik seperti Pulau Kalimantan, Pulau Bangka Belitung, dan Pulau Sulawesi. Sebaran panas bumi non-vulkanik banyak terdapat di wilayah Pulau Sulawesi utamanya bagian Selatan dan Tengah[1]. Salah satu wilayah yang memiliki potensi panas bumi non vulkanik berada di desa Lompio, Kecamatan Sirenja, Kabupaten Donggala Provinsi Sulawesi Tengah. Berbagai penyelidikan panas bumi non-vulkanik di wilayah Lompio juga telah dilakukan oleh Badan Geologi, mulai dari penyelidikan geologi, geofisika hingga geokimia, dan hasilnya memberikan model konseptual sistem panas bumi lompio dan karakteristik dari potensinya[2];[3];[4];[5];[6]. Namun, belum dimanfaatkan secara sistematis, apalagi untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik.

Guna kebutuhan ekstraksi ekonomis dari fluida panas bumi memerlukan sumur produksi yang memotong zona permeabilitas tinggi dalam batuan reservoir berpori[7]. Zona permeabel seperti itu sering dikaitkan dengan rekahan batuan yang disebabkan oleh struktur. Oleh karena itu, penilaian sesar dan zona rekahan sangat penting untuk menggambarkan bagian produktif dari reservoir panas bumi.

Berdasarkan uraian di atas, diperlukan suatu studi investigasi mengenai kontrol struktur geologi, sehingga dapat memberikan informasi dan petunjuk yang mengarah pada zona permeabilitas tinggi dari prospek reservoir panas bumi. Investigasi kontrol struktur geologi dilakukan dengan pendekatan metode *faults and faractures density* (FFD) menggunakan analisis data DEM (*Digital Elevation Model*). Dalam metode ini struktur geologi, *faults* dan *fractures* ini diasumsikan sebagai bidang lemah yang menjadi jalur pergerakan fluida termal sehingga dapat

menjadi petunjuk bagi lokasi daerah permeabel atau reservoir[8]. Fitur topografi pada permukaan bumi yang mewakili zona lemah struktural dapat ditunjukkan oleh sebuah *lineament* [9]. Jika densitas *lineament* (kelurusan) dapat dipetakan maka akan diperoleh informasi mengenai zona permeabel pada suatu daerah.

Penelitian ini dimaksudkan untuk memperoleh kajian mengenai keberadaan kontrol struktur pada sistem panas bumi di daerah studi. Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kontrol struktur geologi di permukaan daerah panas bumi berdasarkan densitas *lineament* dan mengetahui bagaimana karakteristik manifestasi geotermal di daerah studi.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan melalui kegiatan observasi lapangan (survei geologi permukaan) dan analisis data DEM untuk memperoleh densitas struktur berupa *lineaments* (kelurusan).

Survei Geologi Permukaan

Survei geologi dimaksudkan untuk mengetahui kondisi geologi permukaan sekitar area penelitian. Metode yang digunakan dalam kegiatan ini adalah survei melalui observasi geologi permukaan pada sejumlah singkapan litologi, struktur maupun manifestasi geotermal yang dijumpai di lapangan, kemudian dilakukan pencatatan deskripsi kondisi geologi, pengambilan sampel representatif serta koordinat titik pengamatan. Informasi kondisi geologi di daerah penelitian diarahkan pada tinjauan aspek geologi berupa morfologi, litologi dan utamanya kenampakan struktur berupa kekar ataupun sesar. Data pengukuran kedudukan kekar akan menghasilkan diagram mawar (roset) yang akan menunjukkan arah gaya dominan pembentuk struktur geologi tersebut.

Analisis Data

Hasil observasi lapangan dari survei geologi permukaan selanjutnya dikorelasikan terhadap hasil analisis data densitas struktur (*kelurusan/sesar/rekahan*) dari data DEM. Analisis data dilakukan dengan tahapan studi berikut.

1. Tahap Persiapan

Tahapan ini meliputi pengumpulan data sekunder, yang diperoleh melalui studi pustaka peneliti terdahulu, jurnal, geologi regional, dan sebagainya, yang berkaitan dengan pokok permasalahan penelitian. Pengumpulan bahan-bahan penunjang kerja lapangan seperti peta topografi daerah penelitian, dan pengadaan citra digital (DEM). Kemudian dilakukan interpretasi awal, seperti pembuatan peta yang bersifat tentatif mengenai persebaran litologi dan analisis morfologi.

2. Tahap Pengambilan data lapangan

Pada tahap ini peneliti melakukan peninjauan kembali hasil interpretasi terhadap kondisi real lapangan melalui observasi langsung di daerah penelitian, dengan mengidentifikasi singkapan meliputi tipe batuan dan jenis litologi, batas satuan litologi, serta melakukan pengukuran struktur geologi pada singkapan, dan identifikasi keadaan morfologi yang mengindikasikan sebab akibat terbentuknya bentang alam tersebut, ditunjang dengan interpretasi DEM (*Digital Elevation Model*). Dilakukan pula dokumentasi berupa sketsa dan foto singkapan serta mengidentifikasi keberadaan manifestasi geotermal, dan juga sampling batuan pada stasiun pengamatan tertentu yang mewakili daerah studi.

3. Tahap analisis *linament*

Analisis pola kelurusan, dengan menggunakan DEM dilakukan melalui penarikan kelurusan sebanyak-banyaknya pada tiap satuan batuan yang dianggap relevan dan mewakili daerah penelitian.. Analisis data DEM dilanjutkan dengan membuat *shaded relief* daerah Panas bumi dengan menggunakan 4 azimuth cahaya yang berbeda, yaitu 0°, 45°, 90°, 315°, dan dengan ketinggian cahaya 45°, kemudian ditarik kelurusan. Kelurusan yang telah ditarik, dihitung nilai panjangnya dan dikelompokkan pada grid dengan ukuran sama yang dibuat secara random, selanjutnya dibuat peta kontur nilai *fault and fracture density* (FFD) yang diasumsikan bahwa pada densitas struktur tertinggi berasosiasi dengan pusat pergerakan fluida.

HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan survei lapangan, studi literatur dan data sekunder, diperoleh informasi terkait kondisi geologi, keberadaan struktur geologi dan data manifestasi panasbumi serta data DEM.

Kondisi Geologi Daerah Penelitian

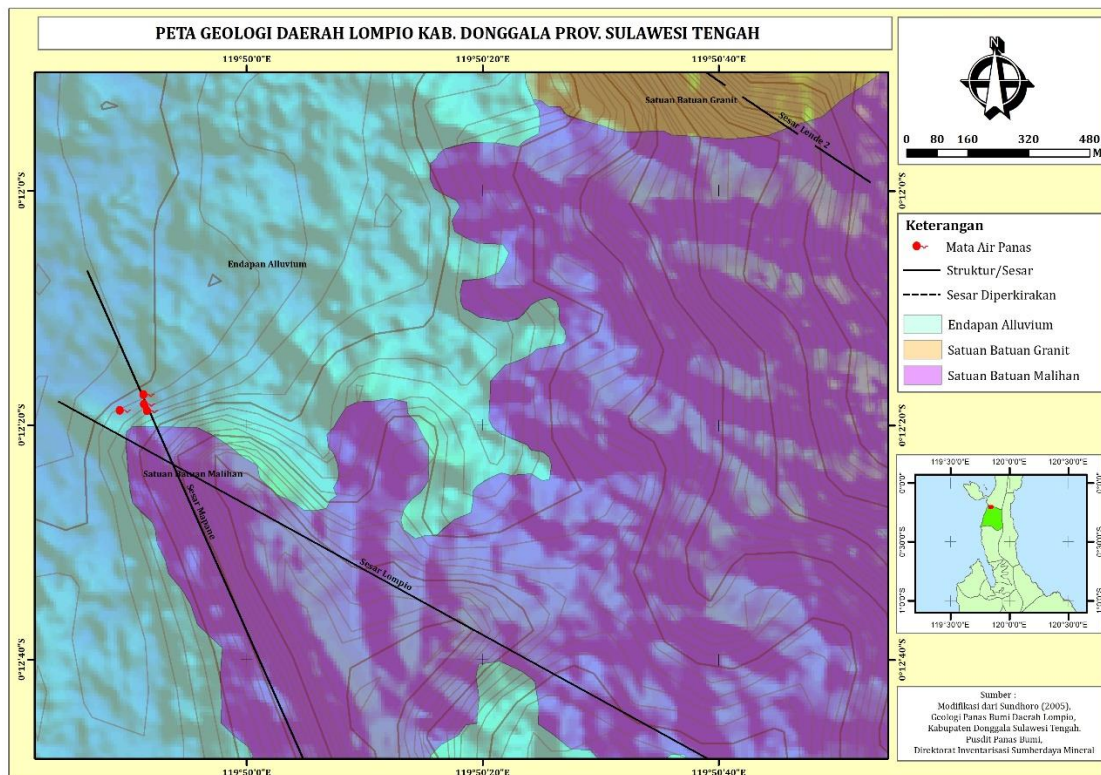
Daerah studi secara fisiografi berada pada pematang timur dari lembah palu yang berorientasi arah Utara-Selatan. Pematang Timur dengan elevasi puncak berkisar 400 – 1900 m dari permukaan laut [10]. Daerah studi secara stratigrafi regional mencakup Kompleks batuan metamorf pada bagian barat yang meliputi sekis, genes dan pualam serta Alluvium dan endapan pantai pada bagian Timur area studi [10]. Struktur regional wilayah penelitian didominasi oleh lajur sesar Palu-Koro yang berarah relatif Utara-Barat Laut, yang beberapa tempat bermunculan mataair panas disepanjang zona sesar aktif tersebut. Terdapat banyak kenampakan sesar maupun kelurusan yang muncul disepanjanga pematang timur lembah Palu, dimana lokasi penelitian berada [10].

Hasil survey di lapangan yang ditunjang dengan studi literatur, diperoleh gambaran kondisi geologi wilayah studi dengan cukup variatif dan kompleks. Geomorfologi daerah studi dapat dibagi menjadi dua satuan, berdasarkan morfometri dan reliefnya. Satuan morfologi wilayah studi meliputi satuan morfologi pedataran dan satuan morfologi perbukitan bergelombang lemah (Gambar-1). Satuan morfologi pedataran menempati wilayah pemukiman dan persawahan penduduk hingga wilayah pantai dengan kemiringan <2°. Adapun satuan morfologi perbukitan bergelombang lemah menempati wilayah bagian Timur daerah penelitian, yang digunakan warga sebagai lahan perkebunan meliputi kelapa dan cengkeh dengan kemiringan 5-13°.



Gambar-1. Kenampakan satuan geomorfologi daerah penelitian

Berdasarkan hasil investigasi geologi [2] menunjukkan bahwa daerah studi disusun satuan batuan malihan (metamorf), satuan batuan granit dan satuan alluvium (Gambar-2). Satuan Batuan termuda adalah alluvium, merupakan endapan hasil rombakan batuan yang terdiri atas kerikil, pasir, lumpur dan batu gamping koral. Endapan alluvium menempati wilayah pedataran hingga daerah pantai di sebelah Barat lokasi Penelitian.



Gambar-2. Geologi Daerah Penelitian (modifikasi dari [2])

Satuan Batuan Granit tersingkap sebagian di sebelah Utara-Timurlaut dari daerah penelitian, yang kontak dengan satuan batuan malihan/metamorf jenis sekis-geneis (Sundhoro, 2005). Hasil uji petrografi menunjukkan bahwa batuan ini memiliki kenampakan mikroskopis berwarna absorbsi abu-abu kecoklatan dengan interferensi berwarna abu-abu kehitaman, memiliki tekstur holokristalin, faneritik, equigranular, bentuk subhedral-euhedral, dengan ukuran mineral 0,02 – 2,2 mm. Adapun mineral penyusun batuan yaitu K-Feldspar(40%), Quartz(30%), Plagioclase(5%), Muscovite(15%), Sericite (9%) dan Mineral Opaq(1%) yang berdasarkan klasifikasi Travis [11] dinamakan batuan granodiorite.

Satuan Batuan Malihan menempati wilayah perbukitan yang berada di sebelah Barat di daerah studi. Hasil Uji Petrografi menunjukkan kenampakan secara mikroskopis batuan ini memperlihatkan warna absorpsi abu-abu dengan warna interferensi abu-abu kehitaman, memiliki tekstur faneritik, struktur masif, bentuk euhedral-anhedral, dengan ukuran mineral 0,02 – 1,5 mm. Adapun mineral penyusun batuan yaitu Quartz(35%), Hornblende(27%), Clinopyroxene(18%), Actinolite(10%), Biotite(5%), dan Opaq(5%) yang berdasarkan klasifikasi Travis[11] diklasifikasikan sebagai batuan *Quartz-Hornblende Gneiss*.

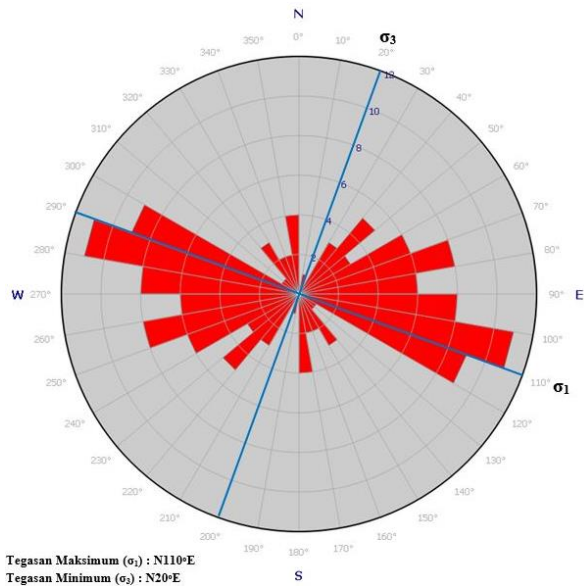
Struktur geologi di daerah penelitian dicirikan dengan bentuk kelurusan topografi seperti pantai, sungai dan bukit serta adanya manifestasi panas bumi. Terdapat 3 sesar utama yang berada di wilayah penelitian berdasarkan tinjauan kondisi geologi [2]. Sesar berarah Utara Baratlaut-Selatan Tenggara yang dinamakan sesar Mapane yang bertemu dengan Sesar Lompio yang relatif berarah Baratlaut-Tenggara. Selain itu, terdapat kelurusan topografi yang diduga merupakan sesar yang lebih kecil berarah Baratlaut-Tenggara.

Keberadaan struktur geologi sebagaimana diuraikan pada bagian kondisi geologi di atas, yang diindikasikan dengan adanya pola kelurusan seperti sungai maupun perbukitan. Struktur geologi di daerah penelitian ditandai dengan adanya kekar-kekar yang ditemukan pada batuan yang tersingkap di daerah penelitian (Gambar-3). Dari kekar pada batuan yang ditemui di area sungai, diduga merupakan hasil dari adanya gaya yang bekerja memberikan tekanan pada batuan yang berasal dari sesar-sesar yang diinterpretasikan oleh Sundhoro [2] di sekitar daerah penelitian.



Gambar-3. Kenampakan kekar pada batuan (arah foto N 98°E)

Kekar yg ditemui di lapangan umumnya merupakan rekahan/retakan pada batuan yang nampak terbuka. Dari analisis diagram roset, menunjukkan bahwa gaya tegasan utama (σ_1) dari kekar-kekar tersebut berarah relatif Baratlaut-Tenggara Tenggara (Gambar-4). Hal ini berkesesuaian dengan arah orientasi dari sesar-sesar yang ada di daerah studi, yakni sesar Lompio maupun Sesar Mapane dan Sesar Lende 2.

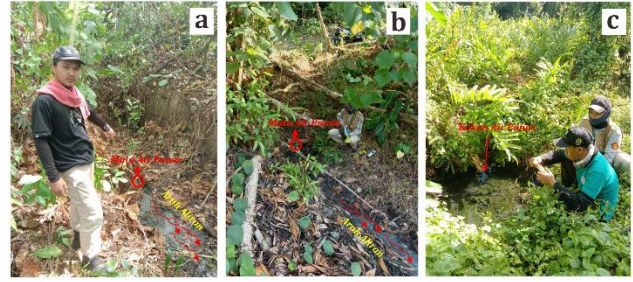


Gambar-4. Diagram roset struktur kekar di daerah penelitian

Manifestasi Geotermal

Investigasi di lapangan, diperoleh manifestasi panas bumi berupa mata air panas (Gambar-5). Manifestasi ini muncul bersamaan dengan bau belerang yang tidak begitu menyengat, menghasilkan uap panas dan beberapa menjadi kolam kecil serta bercampur dengan air tanah yang relatif dingin, mengalir melalui irigasi alami di sekitar perkebunan warga. Hasil pengecekan kondisi fisik mata air panas tersebut menggunakan multimeter digital diperoleh bahwa karakteristik mata air panas di daerah lompio memiliki pH ~7,9 s.d. 9,6, konduktivitas cukup tinggi mencapai ~10,4 s.d. 12,6 mS, dan temperatur air panas berkisar ~65 s.d. 79 °C. Mata air panas di daerah penelitian

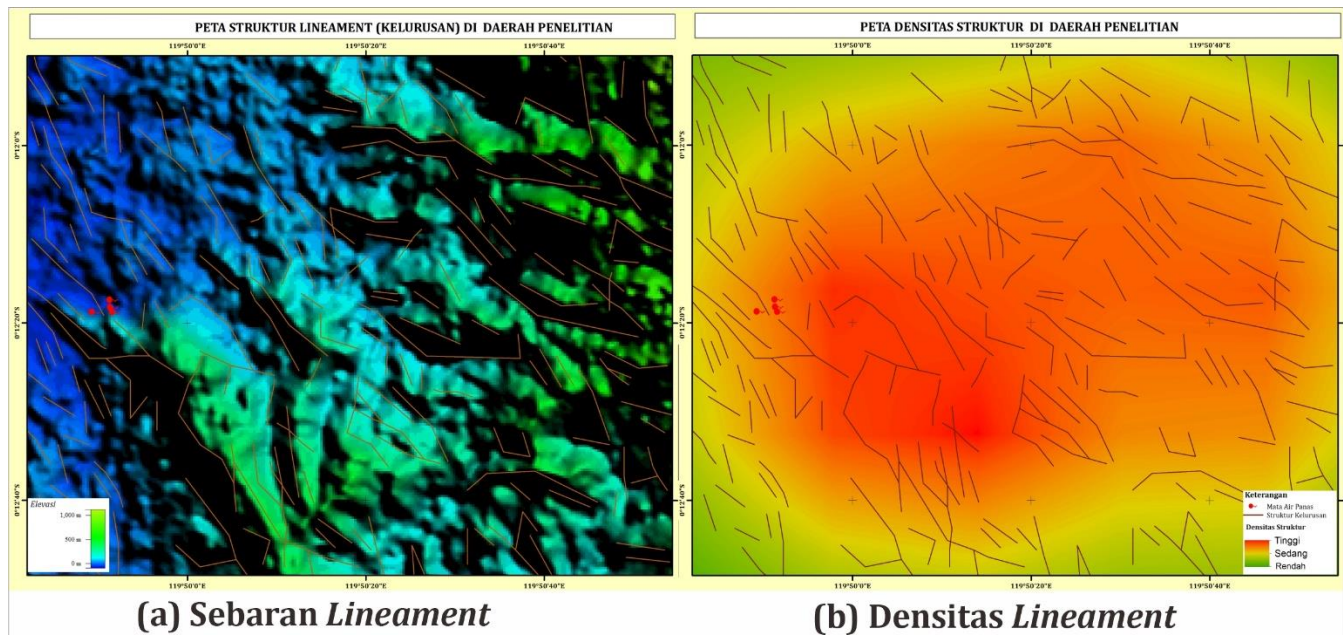
muncul pada endapan alluvium, tidak berwarna, memiliki bau belerang yang lemah, sedikit beruap, tidak ada sinter, dan sedikit asin. Pada manifestasi kolam air panas terdapat uap dalam bentuk gelembung gas, namun tidak kontinyu.



Gambar-5. Kenampakan manifestasi panas bumi lompio; (a) dan (b) mata air panas muncul pada alluvium dengan arah aliran membentuk irigasi alamiah bercampur dengan air tanah, dan (c) kolam air panas.)

Data Digital Elevation Model (DEM)

Data DEM diperoleh secara online melalui website <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/> yang tersedia secara gratis. Data tersebut memuat informasi koordinat posisi dan elevasi dari daerah yang dipilih (daerah penelitian). Data DEM yang diperoleh selanjutnya akan divisualisasikan dalam bentuk *Digital Terrain Model* (DTM) dalam format raster (Gambar-6a). Data DEM selanjutnya diolah sehingga memperoleh pola-pola kelurusan yang kemudian akan menghasilkan pola densitas struktur (berupa kelurusan) yang menunjukkan bagaimana kontrol struktur terhadap keberadaan manifestasi panas bumi yang muncul di daerah penelitian.



Gambar-6. Hasil analisis pola kelurusan dan kerapatan struktur dari data DEM.

Pola-pola kelurusan diekstrak dari fitur topografi yang divisualisasikan melalui DTM sebagai representatif dari adanya kontrol struktur pada bentukan morfologi di daerah penelitian. Hasilnya diperoleh berupa garis (*lines*) lurus, yang kemudian dengan teknik FFD (*Fault and*

Fracture Density) diperoleh gambaran pengaruh dari kerapatan struktur tersebut di daerah penelitian (Gambar-6b). Densitas struktur menunjukkan zona dengan intensitas kerapatan tinggi berada di sebelah Baratdaya daerah penelitian yang berkorelasi dengan keberadaan mata air

panas. Hal ini menunjukkan bahwa daerah tersebut adalah zona dengan permeabilitas tinggi, dimana zona tersebut dapat menjadi jalur bagi fluida yang berasal dari panas bumi untuk menuju ke permukaan.

Diskusi

Elemen struktural utama di daerah studi tidak terlepas dari kontrol struktur geologi regional, yakni zona sesar palu-koro sebagai sesar utama yang berarah relatif Timurlaut-Tenggara [12];[13];[14];[15]. Aktivitas sesar inilah yang memunculkan sesar-sesar sekunder di daerah studi, seperti sesar mapane, sesar lompio dan sesar lende [2]. Kenampakan struktur di permukaan pada daerah studi juga ditemui berupa kekar-kekar pada batuan yang cukup intens serta dicirikan pula dengan pola-pola kelurusan yang diperoleh dari morfologi daerah studi. Keberadaan struktur geologi di daerah studi sangat berpotensi menjadi zona lemah dengan permeabilitas tinggi yang dapat berperan menjadi jalur menyusupnya larutan hidrotermal dari bawah permukaan.

Pola atau tren struktur kekar di daerah studi yang ditunjukkan oleh diagram roset (Gambar-4) memiliki arah tegasannya berkesesuaian dengan arah sesar-sesar sekunder di daerah studi. Hal ini juga berkorelasi dengan kelurusan-kelurusan (*lineaments*) yang diidentifikasi melalui data elevasi digital (Gambar-6a). Hasil analisis pemetaan densitas *lineament* yang diperoleh menunjukkan bahwa manifestasi geotermal berupa mata air panas tidak muncul pada daerah dengan densitas kelurusan yang tinggi, tetapi pada zona transisi antara densitas *lineament* rendah ke tinggi. Kondisi ini menunjukkan adanya faktor kontrol kondisi geohidrologi yang ikut andil dalam memunculkan mata air panas pada daerah lereng [16]. Hal tersebut menjadi alasan, dimana mata air panas justru ditemukan pada endapan alluvium, tidak pada daerah batuan masif seperti batuan baku dan metamorf yang ada di daerah studi.

Distribusi dari densitas *lineament* di daerah studi nampaknya tidak berkorelasi baik dengan kemunculan manifestasi geotermal berupa mata air panas di permukaan. Keadaan ini menunjukkan adanya perbedaan kontrol struktur permukaan yang dominan dimana untuk daerah non-vulkanik seperti di daerah studi kemunculan manifestasi berkorelasi dengan densitas sedang atau pada zona transisi densitas rendah ke tinggi [16]. Sedangkan untuk daerah vulkanik diperoleh adanya korelasi densitas *lineament* yang tinggi berasosiasi dengan kemunculan manifestasi geotermal [17];[18]. Analisis densitas *lineament* masih dapat digunakan dalam identifikasi zona prospek sistem geotermal, dimana densitas *lineament* /FFD yang tinggi dipermukaan dapat menunjukkan permeabilitas yang tinggi di kedalaman [7].

Manifestasi geotermal di daerah Lompio yang berupa mata air panas dengan temperatur yang tidak mencapai titik didih ($>100^{\circ}\text{C}$) dengan jumlah dan luasan dari kemunculan manifestasi geotermal yang terbatas mengindikasikan bahwa potensial sistem panas bumi yang ada, kemungkinan memiliki reservoir temperatur sedang. Hal ini sebagaimana diperoleh dari [6] bahwa temperatur reservoir daerah panas bumi lompio bernilai 180°C berdasarkan perhitungan geotermometer silika dan NaK.

Analisis kondisi geologi dan penyelidikan terpadu yang dilakukan oleh badan geologi menunjukkan bahwa manifestasi geotermal diinterpretasikan muncul oleh adanya hanya zona lemah berupa rekahan dibawah permukaan [1]

yang berasosiasi dengan sistem geohidrologi pada endapan aluvium. Olehnya, diperkirakan sistem panas bumi hanya berada di sekitar zona struktur geologi yang biasanya terbentuk kekar-kekar yang intensif saja. Sehingga akan sangat sulit mendapatkan sumber daya energi panas bumi yang besar dan temperatur tinggi pada sistem ini [1].

Hasil analisis pH pada mata air panas di daerah penelitian menunjukkan nilai derajat keasaman yang agak asam hingga alkali yang termasuk dalam tipe air klorida [6]. Mata air panas tipe ini memiliki temperatur tinggi, rasio yang besar, Cl/SO_4 tinggi, pH 5-9 dan memiliki kandungan klorida yang tinggi yang berasal dari reservoir panas bumi [19].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil penelusuran densitas kelurusan dipermukaan menunjukkan bahwa daerah dimana terdapat manifestasi panas bumi berupa mata air panas berada pada zona transisi pada intensitas kerapatan struktur (*lineament*) rendah ke tinggi, hal ini menunjukkan struktur tidak begitu dominan mengontrol kemunculan manifestasi geotermal berupa mata air panas. Faktor pengontrol yang diduga ikut berperan adalah adanya faktor geohidrologi, dimana manifestasi justru muncul pada wilayah morfologi tepi bawah lereng yang relatif merupakan satuan pedataran.
2. Manifestasi geotermal di daerah studi ditandai dengan kehadiran mata air panas dan kolam air panas. karakteristik Mata air panas di daerah lompio memiliki pH $\sim 7,9$ s.d. $9,6$, konduktivitas cukup tinggi mencapai $\sim 10,4$ s.d. $12,6$ mS, dan temperatur air panas berkisar ~ 65 s.d. 79°C . Mata air panas di daerah penelitian muncul pada endapan alluvium, tidak berwarna, memiliki bau belerang yang lemah, sedikit beruap, tidak ada sinter, dan sedikit asin. Pada manifestasi kolam air panas terdapat uap dalam bentuk gelembung gas, namun tidak kontinyu.

Potensi panas bumi non-vulkanik di desa lompio memerlukan pengembangan serius, berbagai data geosains yang telah ada perlu diintegrasikan dan dilengkapi guna memperoleh status cadangan energi yang tepat. Simulasi model konseptual sistem panas bumi perlu mempertimbangkan faktor keberadaan struktur geologi di bawah permukaan dan sistem geohidrologinya, olehnya disarankan untuk penelitian selanjutnya diperlukan riset yang mengintegrasikan sistem geohidrologi ke dalam sistem panas bumi di daerah Lompio.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Tadulako melalui LPPM yang telah memberi dukungan dalam bentuk finansial melalui skema dana DIPA 2021 pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Risdianto, D., Permana, A.P., Wibowo, A.E.A., Sugianto, A., Hermawan., D. 2015. *Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik di Sulawesi*. Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Bandung.

- [2] Sundhoro, H., 2005. Geologi Panas Bumi Daerah Lompio, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*, Badan Geologi, Bandung. pp. 22-1 – 22-10.
- [3] Dendi, S.K., Liliek, Hasan, dan Sumarna, 2005. Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Daerah Lompio, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*, Badan Geologi, Bandung. Hal. 26-1 – 26-9.
- [4] Foeh, I., M., 2005, Penelitian Geomagnetik di Daerah Panas Bumi Daerah Lompio, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*, Badan Geologi, Bandung. pp. 25-1 – 25-10.
- [5] Suhanto, E., dan Bakrun, 2005, Penyelidikan Geolistrik Tahanan Jenis di Daerah Panas Bumi Pincara, Kabupaten Masamba, Sulawesi Selatan. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*, Badan Geologi, Bandung. pp. 241 – 247.
- [6] Kusnadi, D., Supeno, dan Sumarna, 2005. Penyelidikan Geokimia Panas Bumi Daerah Lompio, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*, Badan Geologi, Bandung. pp. 23-1 – 23-5..
- [7] Soengkono, S. 1999. Analysis of Digital Topographic Data for Exploration and Assesment of Geothermal System, *21st New Zealand Geothermal Workshop*, pp. 163-167.
- [8] Bujung, C.A.N., Singarimbun, A., Muslim, D., Hirnawan, F., dan Sudradjat, A., 2011. Indentifikasi Prospek Panas Bumi Berdasarkan Fault and Fracture Density (FFD): Studi kasus Gunung Patuha, Jawa Barat, *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*. Vol. 2 No. 1 pp. 67-75.
- [9] Williams, R. 1983. *Geological Aplication; Manual of Remote Sensing*. Virginia: American Society Photogrammetry.
- [10] Sukamto, R., Sumadirdja, H., Suptandar, T., Hardjoprawiro, S. and Sudana, S., 1973. *Peta Geologi Lembar Palu, Sulawesi, Skala 1: 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- [11] Travis, R. B. 1955. *Classification of rocks (Vol. 50)*. Colorado School of Mines.
- [12] Bellier, O., Sébrier, M., Beaudouin, T., Villeneuve, M., Braucher, R., Bourles, D., & Pratomo, I. 2001. High slip rate for a low seismicity along the Palu - Koro active fault in central Sulawesi (Indonesia). *Terra Nova*, 13(6), 463-470.
- [13] Katili, J.A. 1978. Past and present geotectonic position of Sulawesi, Indonesia. *Tectonophysics*, 45(4), 289-322.
- [14] Tjia, H. D. 1978. Active faults in Indonesia. *Geol. Soc. Malaysia, Bulletin*. 10 73-92.
- [15] Watkinson, I.M. and Hall, R., 2017. Fault systems of the eastern Indonesian triple junction: evaluation of Quaternary activity and implications for seismic hazards. *Geological Society, London, Special Publications*, 441(1), pp.71-120.
- [16] Suryantini dan 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. *Jurnal Geoaplika*, 5(1), pp.027-037.
- [17] Oktoberiman, Ramadhan, D.A.P, Rizki, F.W., dan Tawakal., R.A. 2014. Identification of Geothermal Potential Based on Fault Fracture Density (FFD), Geological Mapping and Geochemical Analysis, Case Study : Bantarkawung, Brebes, Central Java. *PROCEEDING INTERNATIONAL CONFERENCE The 3 rd Indonesia EBTKE-ConEx 2014 New and Renewable Energy and Energy Conservation*. Volume 2 (2015) 141-151.
- [18] Agung, Y.Z., Haryanto, A.D., Hardiyono, A., Setiawan, D.I. and Suleman, W.A., 2021. High Permeability Zone On Geothermal Manifestations Using Fault Fracture Density In Sembalun Area, Lombok. *Journal of Geological Sciences and Applied Geology*, 5(2).
- [19] Nicholson, K., 1993, *Geothermal Fluids*, Springer Verlag, Inc., Berlin