GeoScienceEd *7(4) (2026)*

Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika

http://jpfis.unram.ac.id/index.php/GeoScienceEdu/index

Interpretasi Perbedaan Kondisi Tektonik yang Mempengaruhi Sistem Panas Bumi di WKP Kotamobagu Berdasarkan Data Kerapatan Kelurusan

Muhammad Agni Gustama[1*], Ferdian Budi Ar-rouf[1], Imam Purwadi[1], Mohamad Obby Adianto[1], Robekca Purba[1]

[1] Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia.

DOI: https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3521

Article Info
Received: August,12th2026
Revised : August, 31st2026
Accepted: October, 1st2026

Correspondence:

Phone: +6285601434152

Abstract: Kerapatan kelurusan suatu lokasi dalam geologi umumnya dikaitkan dengan daerah dengan permeabilitas batuan tinggi. Daerah dengan permeabilitas batuan tinggi dikaitkan dengan keberadaan reservoir panas bumi serta manifestasi sistem panas bumi di permukaan. Setiap sistem panas bumi memiliki model konseptual yang berbeda, sehingga tidak semua daerah dengan nilai kerapatan kelurusan tinggi dapat dikorelasikan dengan reservoir panas bumi ataupun manifestasi panas bumi. Salah satu contoh sistem panas bumi yang memiliki kasus tersebut adalah sistem panas bumi di Kotamobagu, Sulawesi Utara. Peta kerapatan kelurusan daerah Kotamobagu menunjukan bahwa manifestasi panas bumi tetap muncul bahkan di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan yang rendah. Peta kerapatan kelurusan Kotamobagu menunjukan bahwa terdapat perbedaan pola manifestasi sistem panas bumi di Kotamobagu. Bagian timur laut Kotamobagu menunjukan manifestasi panas bumi tersebar di daerah dengan kerapatan kelurusan tinggi, sedangkan bagian barat laur Kotamobagu menunjukan manifestasi panas bumi tersebar di daerah dengan kerapatan kelurusan rendah. Perbedaan pola kemunculan manifestasi panas bumi menunjukan adanya potensi dua sistem panas bumi berbeda di Kotamobagu.

Keywords: Panas Bumi; Kerapatan Kelurusan; Tektonik; *Play*

Citation: Gustama, M. A., Ar-rouf, F. B., Purwadi, I., Adianto, M. O., & Purba, R. (2026). Interpretasi Perbedaan Kondisi Tektonik yang Mempengaruhi Sistem Panas Bumi di WKP Kotamobagu Berdasarkan Data Kerapatan Kelurusan. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, *7*(4), 6242–6247. https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3521

Pendahuluan

Kelurusan (*lineament*) adalah bentukan linier di permukaan Bumi yang mencerminkan pengaruh aktivitas di bawah permukaan Bumi. Kelurusan dapat diakibatkan karena pengaruh morfologi seperti lembah, sungai, horst, maupun graben (O'Leary dkk, 1976). Penampakan struktur geologi yang terbentuk dari pengaruh morfologi seperti sesar, kekar, dan zona geser membentuk kelurusan dan dapat terlihat dalam bentuk data citra setelit (Solomon dan Ghebreab, 2006). Pemanfaatan data citra satelit dan kelurusan banyak digunakan dalam kegiatan prospeksi kebumian, termasuk eksplorasi panas bumi. Data citra satelit umum digunakan untuk pemetaan awal manifestasi panas bumi serta struktur geologi. Semakin banyak struktur geologi seperti sesar dan kekar dapat membuat air semakin mudah masuk ke bawah tanah untuk membentuk reservoir panas bumi, sehingga mencari daerah ini merupakan tujuan utama dalam kegiatan eksplorasi panas bumi. Jumlah struktur geologi yang tinggi mengindikasikan adanya daerah dengan permeabilitas batuan tinggi, yaitu merupakan daerah produktif untuk reservoir panas bumi dalam eksplorasi Panas Bumi (Soengkono, 2000).

Nilai kerapatan kelurusan sering dikaitkan dengan permeabilitas batuan. Daerah dengan permeabilitas batuan tinggi dapat dikorelasikan dengan kerberadaan reservoir panas bumi. Salah satu contoh nilai kelurusan tinggi yang terkait dengan keberadaan reservoir adalah sistem panas bumi Sembalun, Lombok.

Email: agnigustama@ft.unsri.ac.id

Copyright © 2026, Gustama et al.
This open access article is distributed under a (CC-BY License

Kemunculan manifestasi panas bumi dan reservoir panas bumi di daerah ini terletak di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan tinggi (Agung dkk, 2019). Setiap sistem panas bumi memiliki model konseptual yang berbeda, sehingga tidak semua daerah dengan nilai kerapatan kelurusan tinggi dapat dikorelasikan dengan reservoir panas bumi ataupun manifestasi panas bumi. Daerah dengan sistem panas bumi tersembunyi (*hidden geothermal system*) umumnya berada di daerah yang memiliki tingkat sedimentasi tinggi atau berada di daerah aluvium, sehingga kerapatan kelurusan di daerah tersebut umumnya rendah namun memiliki manifestasi panas bumi. Contoh sistem panas bumi dengan kondisi tersebut adalah sistem panas bumi Snake-Plain River di Yellowstone, Amerika Serikat. Keberadaan akuifer dingin dan sedimentasi danau menyebabkan kebanyakan manifestasi sistem panas bumi di daerah ini tidak dapat terlihat dari atas permukaan (De Angelo dkk, 2024).

WKP Kotamobagu merupakan salah satu Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) di Provinsi Sulawesi Utara. Penelitian mengenai kerapatan kelurusan di WKP Kotamobagu sudah dilakukan oleh Andriani dkk (2021). Menurut Apandi dan Bachri (1997), stratigrafi prospek panas bumi Kotamobagu dari yang berumur paling tua hingga paling muda disusun oleh Formasi Tinombo Fasies Sedimen, Batuan Gunungapi Bilungala, Anggota Batugamping Tapadaka, Formasi Tapadaka, Diorit Bone, Batuan Gunungapi Pinogu, Molasa Selebes, Endapan Danau, serta Batuan Gunungapi Ambang. Riogilang dkk (2013) memberikan gambaran model konseptual sistem panas bumi Kotamobagu berdasarkan data geokimia. Hasil geokimia menunjukan bahwa terdapat dua sistem panas bumi di Kotamobagu, yaitu sistem panas bumi di bawah Gunung Muayat (terletak bersebelahan dengan Gunung Ambang) dan sistem panas bumi di Lobong (barat laut Kotamobagu). Sistem panas bumi Gunung Muayat dipengaruhi oleh intrusi magma, sedangkan sistem panas bumi Lobong belum dapat dipastikan kondisi tektonik yang berpengaruh. Interpretasi nilai kerapatan kelurusan WKP Kotamobagu masih terbatas mengenai keberadaan reservoir dan arah struktur geologi. Kondisi geologi dan kontrol tektonik dapat mempengaruhi jenis dan karakteristik sistem panas bumi, sehingga dapat diklasifikasikan menurut *play* panas bumi (Moeck, 2014). Menurut Gustama dan Afifah (2025), terdapat dua kondisi tektonik yang mempengaruhi sistem panas bumi di Lengan Utara Sulawesi, yaitu *rollback* di bagian barat dan subduksi di bagian timur. Hal tersebut membuat sistem panas bumi di tiap bagian Lengan Utara Sulawesi memiliki karakteristik yang berbeda. WKP Kotamobagu berada di batas antara kedua jenis sistem panas bumi tersebut, sehingga ada kemungkinan bahwa terdapat dua sistem panas bumi dengan mekanisme berbeda di WKP ini.

Play didefinisikan sebagai kelompok sistem panas bumi berdasarkan kesamaan sumber panas, kontrol struktur geologi, kapasitas reservoir, serta teknologi untuk regenerasi panas (Moeck, 2014). *Play* panas bumi dibagi dalam dua kelompok besar sesuai hubungan antar lempeng dan kondisi tektonik. Dua kelompok besar tersebut meliputi *play* panas bumi dominasi konveksi dan *play* panas bumi dominasi konduksi. *Play* panas bumi dominasi konveksi adalah sistem panas bumi yang dipengaruhi oleh kegiatan tektonik dan vulkanik aktif, yaitu daerah dekat busur vulkanik maupun daerah subduksi. *Play* panas bumi dominasi konduksi merupakan sistem paans bumi yang dipengaruhi oleh tektonik dan vulkaniknya relatif sudah tidak aktif seperti di daerah kraton. Lengan Utara Sulawesi masih dipengaruhi oleh aktivitas tektonik dan vulkanik aktif, sehingga termasuk dalam *play* panas bumi konveksi. Rincian *play* panas bumi konveksi beserta kondisi tektonik dan sumber panasnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1: Klasifikasi *play* panas bumi konveksi (Moeck, 2014).

***Play* panas bumi konveksi**		**Kondisi tektonik**	**Sumber panas**
Magmatik	Medan vulkanik	Busur gunungapi, *Mid-oceanic ridge*, *hot spot*	Dapur magma, intrusi
	Tipe plutonik	Aktivitas vulkanik berumur > 50000 tahun	Intrusi berumur > 50000 tahun
Non-magmatik	Domain ekstensi	Sesar geser atau sesar normal	Penipisan kerak Bumi

Paper ini memberikan gambaran mengenai hubungan kerapatan kelurusan dengan keberadaan reservoir dari sudut pandang tektonik dan *play* panas bumi dari sudut pandang citra satelit. Sistem panas bumi Kotamobagu dipilih karena daerah ini memiliki banyak manifestasi panas bumi pada beberapa litologi yang berbeda (Apandi dan Bachri, 1997). Klasifikasi sistem panas bumi yang digunakan dalam analisa ini adalah kasifikasi *play* panas bumi untuk memudahkan penjelasan perbedaan model konseptual sistem panas bumi berdasarkan kondisi geologinya. Model konseptual yang tepat dapat membantu dalam kegiatan eksplorasi dan produksi panas bumi kedepannya.

Metode

Digital Elevation Model (DEM)

Data citra satelit dapat digunakan untuk analisa awal keberadaan suatu kelurusan. Salah satu jenis data citra satelit adalah data *Digital Elevation Model* (DEM). Data DEM merupakan model digital permukaan bumi yang menggambarkan kondisi topografi permukaan Bumi tanpa adanya fitur penutup lahan seperti bangunan, vegetasi, dan bentukan lahan buatan manusia seperti sawah maupun perkebunan. Data DEM dapat digunakan untuk menentukan keberadaan jalur sirkulasi fluida panas bumi yang berasosiasi dengan struktur geologi (Mariita, 2009; Kana dkk, 2015). Data DEM didapatkan dari pengambilan nilai elevasi yang direkam oleh satelit di atas orbit bumi. Prinsip akuisisi data DEM adalah dengan memanfaatkan perbedaan kemampuan benda di permukaan Bumi untuk merefleksikan cahaya. Cahaya yang direfleksikan oleh objek di permukaan akan ditangkap oleh satelit kemudian hasil akuisisi data dikirimkan ke stasiun penerima (Florinsky, 2011). Salah satu jenis data DEM adalah data DEMNAS. DEMNAS merupakan data DEM yang difokuskan hanya di Indonesia. DEMNAS dibangun dari beberapa sumber data meliputi data IFSAR dengan resolusi 5m, TERRASAR-X dengan resolusi 5m, dan ALOS PALSAR dengan resolusi 11.25m. Resolusi spasial DEMNAS adalah 0.27-arcsecond, dengan menggunakan datum vertikal EGM2008 (DEMNAS, 2026).

Lineament Density

Kerapatan kelurusan (*lineament density*) merupakan parameter kuantitatif yang menyatakan panjang total kelurusan per satuan luas. Kerapatan kelurusan digunakan untuk menggambarkan distribusi spasial dan tingkat konsentrasi kelurusan dalam suatu wilayah. Nilai kerapatan yang tinggi menunjukkan konsentrasi panjang kelurusan yang relatif besar dalam suatu area, sedangkan nilai rendah menunjukkan konsentrasi yang relatif kecil. Variasi nilai kerapatan dipengaruhi oleh resolusi spasial data, metode ekstraksi, parameter pengolahan citra, serta ketelitian interpretasi kelurusan (Ahmadi & Pekkan, 2021; Maulana et al., 2023).

$$D_L = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{A}$$

Keterangan:
D_L : kerapatan kelurusan (km/km²).
L_i : panjang kelurusan *i* (km)
n : jumlah kelurusan
A : luas area (km²)

Fault Fracture Density (FFD)

Fault Fracture Density (FFD) merupakan parameter kuantitatif yang digunakan untuk menganalisis distribusi spasial dan tingkat kerapatan kelurusan yang diinterpretasikan sebagai sesar dan rekahan berdasarkan data penginderaan jauh dan DEM. Analisis FFD dilakukan melalui identifikasi fitur linear, pengukuran panjang setiap kelurusan, dan perhitungan panjang total kelurusan per satuan luas wilayah analisis. Hasil perhitungan tersebut adalah peta kerapatan yang menunjukkan variasi konsentrasi kelurusan pada suatu wilayah (Arrofi et al., 2022; Rafiq et al., 2025).

Pengolahan Data

Alur pengolahan data kerapatan kelurusan adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur mengenai sistem panas bumi, persebaran manifestasi panas bumi, persebaran tambang yang memiliki rembesan air panas, serta sejarah geologi regional di daerah Kotamobagu dan sekitarnya.
2. Mengambil data DEM dari situs http://tides.big.go.id dengan cakupan daerah di sekitar WKP Kotamobagu.
3. Plot persebaran manifestasi panas bumi, persebaran tambang yang memiliki rembesan air panas, litologi, serta persebaran gunungapi aktif di Kotamobagu menggunakan *software* ArcMap.
4. Membuat citra *hillshade* dari data DEM pada sudut 0˚, 45˚, 90˚, dan 135˚ menggunakan *software* ArcMap.
5. Menyatukan citra *hillshade* menggunakan weighted sum, kemudian disimpan dalam format gambar .tif.
6. Melakukan ekstrasi persebaran kelurusan berdasarkan citra *hillshade* secara otomatis menggunakan *software* PCI Geomatica.
7. Memasukan hasil ekstrasi kelurusan kedalam *software* ArcMap untuk dilakukan koreksi kelurusan secara manual. Lakukan koreksi dengan cara menghilangkan kelurusan yang diakibatkan oleh kenampakan puncak bukit, puncak gunung serta aliran sungai.
8. Membuat peta FFD (*Fault and Fracture Density*) berdasarkan kelurusan yang telah dikoreksi menggunakan fitur *tool line density* di *software* ArcMap.

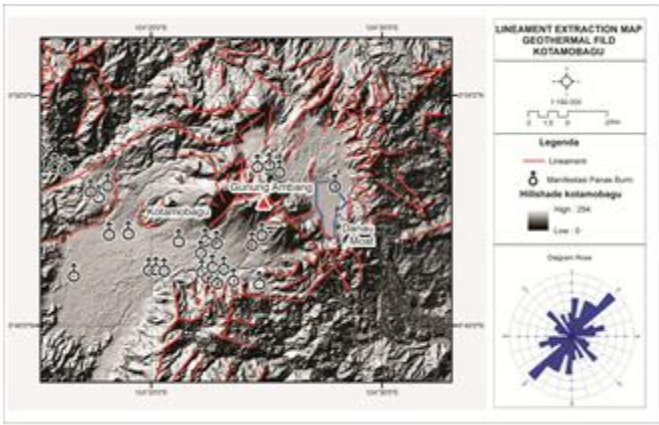
Hasil dan Pembahasan

Ekstraksi Kelurusan

Gambar 1. menunjukan hasil ekstraksi kelurusan berdasarkan *hillshade* di WKP Kotamobagu. Terdapat sekitar 30 manifestasi panas bumi berupa mata air panas yang diambil dari data Apandi dan Bachri

(1997) dan Direktorat Panas Bumi (2017). Persebaran panas bumi terbanyak berada di bawah Gunung Ambang dan memanjang hingga bagian barat laut Kotamobagu dengan 26 lokasi mata air panas, sedangkan 3 lokasi mata air panas terdapat di Gunung Ambang dan 1 mata air panas terletak di dekat Danau Moat.

Hasil ekstraksi kelurusan yang ditampilkan dengan diagram rose yang menunjukan kecenderungan orientasi arah struktur adalah barat daya-timur laut. Hal ini berbanding terbalik dengan orientasi arah struktur di WKP Lahendong yang memiliki arah barat laut-tenggara (Rauf dkk, 2023). Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi tektonik yang mempengaruhi sistem panas bumi Kotamobagu kemungkinan memiliki perbedaan dengan WKP Lahendong meskipun kedua WKP ini berada di bagian timur Lengan Utara Sulawesi.

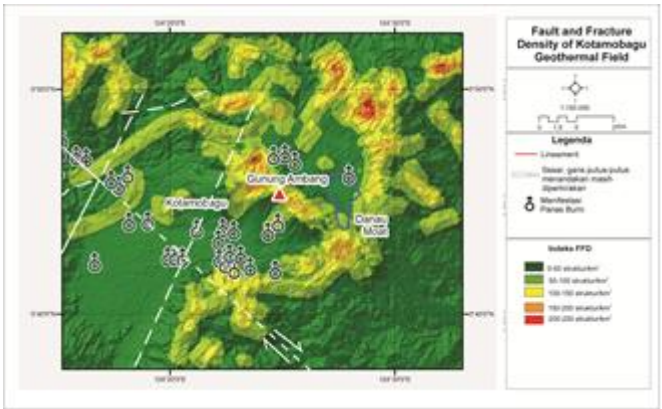


Gambar 1. Hasil ekstraksi kerapatan kelurusan pada peta *hillshade* WKP Kotamobagu. Persebaran manifestasi panas bumi diambil dan digambar ulang dari Apandi dan Bachri (1997) dan Direktorat Panas Bumi (2017).

Menurut Hall dan Spakman (2015), ada dua gaya tektonik yang mempengaruhi geologi Lengan Utara Sulawesi, yaitu pembalikan arah pergerakan lempeng (*rollback*) di Teluk Gorontalo (bagian selatan Gorontalo) serta *double subduction* di bawah Laut maluku. WKP Lahendong dipengaruhi oleh subduksi dari *double subduction* di bawah Laut Maluku karena lokasinya yang tepat terletak di atas zona subduksi tersebut, sehingga perbedaan arah orientasi merupakan indikasi adanya pengaruh *rollback* pada pembentukan sesar dan kekar di WKP Kotamobagu mesikipun daerah tersebut secara jelas memiliki sumber panas dari intrusi gunung api. Kondisi tektonik *rollback* di bagian barat dapat rekahan ekstensional dengan arah bukaan/ekstensi relatif tegak lurus terhadap orientasi rekahan barat laut-tenggara seperti yang terdapat di bagian barat Lengan Utara Sulawesi, salah satunya di Petandio (Shalihin dkk, 2024).

Peta FFD

Gambar 2. menunjukan peta FFD di WKP Kotamobagu. Peta kerapatan kelurusan WKP Kotamobagu dibagi menjadi tiga daerah warna, yaitu daerah dengan warna hijau mewakili daerah dengan nilai kerapatan kelurusan rendah (0-100 struktur/km^2), warna kuning mewakili daerah dengan nilai kerapatan kelurusan sedang (100-200 struktur/km^2), sedangkan warna merah mewakili daerah dengan nilai kerapatan kelurusan tinggi (di atas 200 struktur/km^2). Peta kerapatan kelurusan di WKP Kotamobagu menunjukan bahwa persebaran manifestasi panas bumi di WKP Kotamobagu terdpat di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan tinggi serta di sekitar daerah dengan nilai kerapatan kelurusan rendah yang dipotong oleh sesar. Persebaran manifestasi panas bumi yang terletak di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan menengah hingga tinggi terdapat di bagian selatan Gunung Ambang serta di sekitar Gunung Ambang, sedangkan manifestasi panas bumi yang terletak di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan rendah terdapat di sepanjang bagian baratlaut hingga Kotamobagu.



Gambar 2. Peta *Fault and Fracture Density* WKP Kotamobagu. Persebaran struktur sesar dan persebaran manifestasi panas bumi diambil dan digambar ulang dari Apandi dan Bachri (1997) dan Direktorat Panas Bumi (2017).

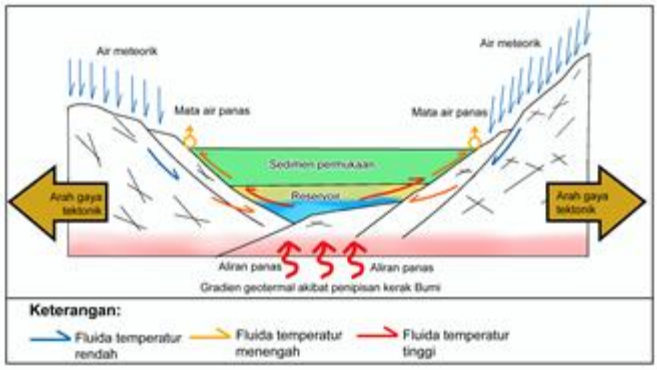
***Play* Panas Bumi Kotamobagu**

Persebaran manifestasi panas bumi di WKP Kotamobagu tidak sepenuhnya dipengaruhi oleh banyaknya kelurusan. Mayoritas manifestasi panas bumi WKP Kotamobagi berasosiasi dengan keberadaan aktivitas vulkanik (Gunung Ambang dan Danau Moat) atau mengikuti arah sesar. Daerah dengan jumlah manifestasi panas bumi terbanyak berada di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan menengah di bagian selatan Gunung Ambang. Hal ini menunjukan bahwa adanya korelasi antara jumlah manifestasi panas bumi dipengaruhi oleh banyaknya kelurusan. Semakin banyak kelurusan di sekitar sumber panas, semakin

banyak manifestasi panas bumi yang muncul seperti yang terdapat di WKP Lahendong (Rauf dkk, 2023). Terdapat tiga manifestasi panas bumi di selatan Gunung Ambang yang berada di daerah dengan nilai kerapatan kelurusan rendah, mengindikasikan bahwa terdapat struktur yang tertutup oleh endapan sedimen dari WKP Kotamobagu. Sumber panas di bagian ini dapat dipastikan dipengaruhi oleh aktivitas vulkanisme di bawah Gunung Ambang, sehingga *play* panas bumi yang tepat di bagian ini adalah *play* konveksi magmatik-medan vulkanik.

Pola kemunculan manifestasi panas bumi berbeda terdapat di bagian barat laut Gunung Ambang yang memanjang hingga ke tenggara. Manifestasi panas bumi muncul di daerah dengan orientasi ke arah barat laut-tenggara di bagian selatan Gunung Ambang dan sesar dengan arah orientasi timur laut-barat daya yang memotong Gunung Ambang. Sesar-sesar tersebut tidak terlihat secara eksplisit melalui pola kelurusan, namun dapat diperkirakan dari adanya kelurusan lembah dan manifestasi panas bumi. Hal ini mengindikasikan bahwa sumber panas bumi di bagian barat laut Kotamobagu bukan berasal dari Gunung Ambang. *Play* panas bumi konveksi non-magmatik-domain ekstensi kemungkinan adalah *play* panas bumi yang kemungkinan paling cocok dengan kondisi bagian barat laut WKP Kotamobagu. *Play* panas bumi panas bumi konveksi non-magmatik-domain ekstensi adalah *play* panas bumi yang sumber panasnya berasal dari kegiatan penipisan lempeng. Penipisan lempeng tidak selalu menghasilkan gunung api baru, namun dapat membuat jarak antara permukaan dengan sumber panas di bawah permukaan akan semakin dekat, sehingga panas akan lebih mudah mencapai permukaan seperti yang ditunjukan pada Gambar 3.

Arah orientasi kelurusan yang menunjukan bahwa kegiatan tektonik yang mempengaruhi Kotamobagu berlawanan dengan Lahendong (tektonik subduksi) tapi searah dengan Petandio (tektonik *rollback* yang menyebabkan ekstensi lempeng), mengindikasikan bahwa terdapat dua kegiatan tektonik yang mempengaruhi WKP Kotamobau. Keberadaan Gunung Ambang mengindikasikan bahwa masih ada proses vulkanik aktif di bawah Kotamobagu, namun arah orientasi kelurusan mengindikasikan bahwa terdapat pengaruh gaya ekstensi seperti yang terjadi di bagian barat Lengan Utara Sulawesi. Hal ini membuat WKP Kotamobagu menjadi daerah transisi antara *play* panas bumi di bagian barat dengan timur Lengan Utara Sulawesi.



Gambar 3. Sketsa model konseptual sistem panas bumi di daerah domain konveksi. Ditranslasikan dan digambar ulang dari Moeck (2014).

Kesimpulan

Pola kerapatan kelurusan di sekitar Gunung Ambang merupakan ciri khas dari *play* panas bumi konveksi magmatik karena kemunculan manifestasi panas bumi selaras dengan daerah kerapatan kelurusan tinggi. Pola kerapatan kelurusan di bagian barat laut Kotamobagu menunjukan bahwa *play* panas bumi di daerah tersebut dikontrol oleh struktur non-vulkanik yang di interpretasikan sebagai *play* panas bumi konveksi non-magmatik-domain ekstensi. Hasil diagram rose mengindikasikan bahwa ada gaya tektonik *rollback* yang mempengaruhi tektonik Kotamobagu, sehingga menyebabkan WKP Kotamobagu memiliki dua *play* panas bumi berbeda di lokasi yang berdekatan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapkan terima kasih disampaikan kepada bagian akademik Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya serta pihak-pihak lain yang telah membantu penelitian ini.

Daftar Pustaka

Agung, Y. Z., Haryanto, A. D., Hardiyono, A., Setiawan, D. I., & 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), 43–52.

Ahmadi, H., & Pekkan, E. (2021). Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS—A Review. Geosciences, 11(5), 183.

Allen, P. A., & Allen, J. R. (2005). Basin Analysis Principles and Applications Second Edition. History in Blackwell Science (Vol. 2). Blackwell Publishing.

Andriani, N., Dyasti, J. A., Jhanesta, W., & Suparno, S. (2021). Interpretation of structural features controlling the thermal springs in Kotamobagu

GWA, Indonesia using geological lineaments and gravity investigation. Proceedings of the 10th ITB International Geothermal Workshop (IIGW).

Apandi, T. & Bachri, S. (1997). Peta Geologi Lembar Kotamobagu, skala 1 : 250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Arrofi, D., Abu-Mahfouz, I. S., & 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, 10, Article 29.

Bachri, S., Sukido, & Ratman, N. (1993). Peta Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi, skala 1: 250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Budiati, M. R., Toyokuni, G., Okada, T., & Matsuzawa, T. (2019). Crustal Thickness Beneath Central Indonesia by The Cross-correlation Analysis of Seismic Ambient Noise. Japan Geoscience Union Meeting 2019, 2, 2019.

DeAngelo, J., Shervais, J. W., Glen, J. M., Nielson, D., Garg, S., Dobson, P. F., Gasperikova, E., Sonnenthal, E., Liberty, L. M., Siler, D. L., & Evans, J. P. (2023). Geothermal Play Fairway Analysis, Part 2: GIS methodology. Geothermics, 117, 102882.

DEMNAS, 2026, Seamless Digital Elevation Model (DEM) dan Batimetri Nasional: http://tides.big.go.id/DEMNAS/index.html#Info (diakses 15 Oktober).

Direktorat Panas Bumi. (2017). Buku Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 2. Jakarta: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, Direktorat Panas Bumi.

Florinsky, I.V. (2011). Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology, Institute of Mathematical Problems of Biology, Russia.

Gustama, M. A., & Afifah, P. D. (2025). Korelasi tektonik dengan play panas bumi lengan utara Sulawesi berdasarkan tomografi seismik. Syntax Idea, 7(9), 1151-1163

Hall, R., & Spakman, W. (2015). Mantle structure and tectonic history of SE Asia. Tectonophysics, 658, 14–45.

Kana, J.D., Djongyang, N., Raidandi, D., Nouck, P.N., dan Dadje, A. (2015). A Review of Geophysical Methods for Geothermal Exploration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Canada.

Mariita, N. O. (2009). Application of geophysics to geothermal energy exploration and monitoring of its exploitation. United Nations University Geothermal Training Programme (UNU-GTP).

Maulana, B. R., Burhanuddin, M. S., & Akbar, M. F. (2023). Lineament Density and Implications for the Distribution of Ground Fissures After 2021 MW 7.3 Flores Sea Earthquake on Kalaotoa Island, Indonesia. Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology, 8(1).

Moeck, I. S. (2014). Catalog of Geothermal Play Types Based on Geologic Controls. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 867–882.

O'leary, D.W., Friedman, J.D., & Pohn, H. A. (1976). Lineament, Linear, Lineation: Some Proposed New Standards for Old Term. U.S. Geological Survey, Federal Center, Denver, Colorado 80225.

Rafiq, J., Abu-Mahfouz, I. S., Chavanidis, K., & Soupios, P. (2025). Integrated structural analysis for geothermal exploration: A new protocol combining remote sensing and aeromagnetic geophysical data. MethodsX, 14, Article 103189.

Rauf, J., Kayambo, M. R., Nurjana, I., & Manyoe, I. N. (2023). Lineament extraction analysis using digital elevation model (DEM) in Lahendong geothermal area, North Sulawesi. E3S Web of Conferences, 400, 01009.

Riogilang, H., Itoi, R., & Taguchi, S. (2013). Conceptual Model of Hydrothermal System at Kotamobagu Geothermal Field, North Sulawesi, Indonesia. Procedia Earth and Planetary Science, 6, 83–90.

Shalihin, M., & Ghassan, M. (2024). Preliminary assessment of the Pentadio geothermal prospect, Gorontalo, Indonesia [Paper presentation]. Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA.

Soengkono, S. (2000). Analysis of Digital Topographic Data For Exploration and Assessment of Geothermal System. Proceedings 21st NZ Geothermal Workshop 2000, New Zealand, pp 163-167.

Solomon, S. and Ghebreab, W. (2006) Lineament Characterization and Their Tectonic Significance Using Landsat TM Data and Field Studies in the Central Highlands of Eritrea. Journal of African Earth Sciences, 46, 371-378.