JOURNAL SYNTAX IDEA
p–ISSN: 2723-4339
e-ISSN: 2548-1398
Vol. 7, No. 9, September 2025

Korelasi Tektonik dengan *Play* Panas Bumi Lengan Utara Sulawesi Berdasarkan Tomografi Seismik

Muhammad Agni Gustama, Putri Dwi Afifah
Universitas Sriwijaya, Indonesia
Email: agnigustama@ft.unsri.ac.id, putridafifah@ft.unsri.ac.id

Abstrak

Lengan Utara Sulawesi merupakan salah satu daerah dengan potensi panas bumi di Indonesia. Pengembangan lapangan panas bumi di daerah ini, terutama di bagian barat Lengan Sulawesi masih terbatas karena kurangnya eksplorasi dan potensi pembangkit listriknya lebih rendah. Padahal panas bumi tidak hanya dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik, namun juga dapat dimanfaatkan untuk sektor lain bila dikelola dengan tepat. Pengelompokan jenis sistem panas bumi berdasarkan kondisi geologi dapat membantu strategi pengembangan panas bumi di daerah Lengan Utara Sulawesi. Tomografi seismik adalah salah satu metode geofisika yang dapat membantu memahami kondisi geologi dalam skala regional. Tomografi seismik menggunakan data gempa bumi untuk mengetahui keadaan bawah permukaan. Berdasarkan hasil pengolahan data tomografi seismik, bagian barat Lengan Utara Sulawesi dipengaruhi oleh depresi akibat penunjaman *Celebes Slab* dan *Sula Slab* yang menyebabkan sumber panas sistem panas bumi di daerah ini disebabkan oleh penipisan lempeng. Hasil tomografi seismik di bagian barat dipengaruhi oleh Busur Vulkanik Sangihe yang menyebabkan sumber panas sistem panas bumi di daerah ini disebabkan oleh aktivitas vulkanik.
Kata kunci: Tomografi seismik, gempa bumi, panas bumi.

Abstract

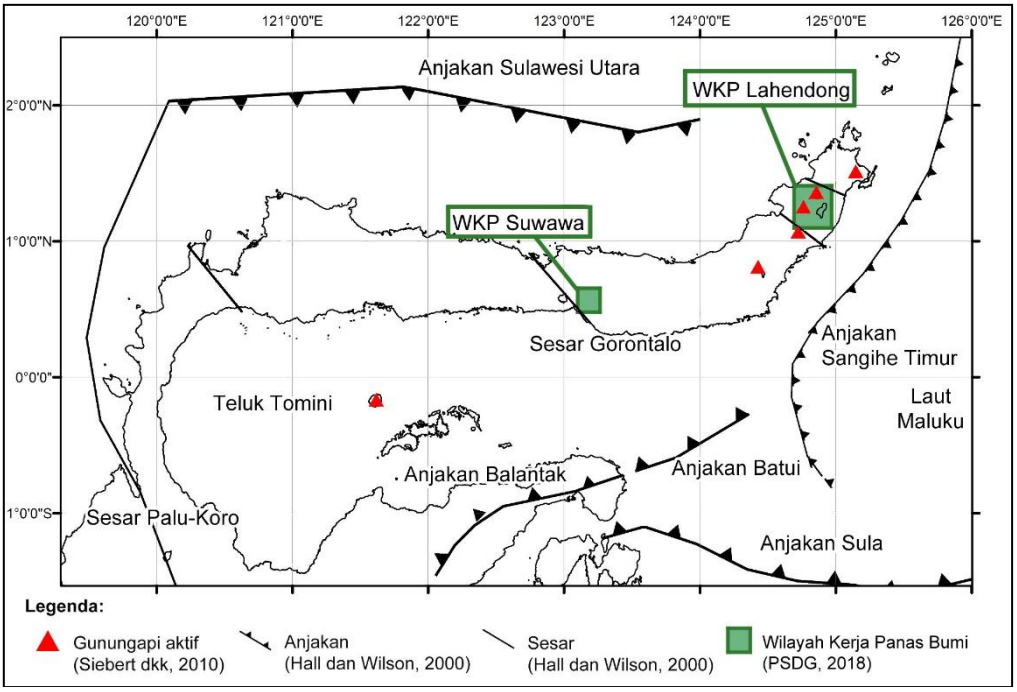
North Arm of Sulawesi is one of geothermal potential area in Indonesia. Geothermal field development in this area, especially in the western part of Sulawesi Arm limited due to lack of exploration and power generation potency. Aside for power generation, geothermal can be also used to help other industry sector with correct strategy and planning. In order to help geothermal development strategies, we classify types of geothermal systems in the North Arm of Sulawesi based on geological conditions. We use seismic tomography to determine geological conditions of North Arm of Sulawesi on a regional scale. We use earthquake data to determine subsurface conditions. Based on the results of seismic tomography, the western part of the North Arm of Sulawesi is affected by depression due to the subduction of Celebes Slab and Sula Slab, which causes the heat source of geothermal systems in this area caused by thinned crust. Seismic tomography results in the west are influenced by the Sangihe Arc, which causes geothermal heat sources in this area affected by volcanic activity.
Keywords: *Seismic tomography, earthquake, geothermal.*

PENDAHULUAN

Panas bumi merupakan salah satu sumber daya terbarukan yang sedang dikembangkan di Indonesia. Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi panas bumi adalah Lengan Utara Sulawesi yang melingkupi Provinsi Gorontalo dan Sulawesi Utara. Pengembangan lapangan panas bumi di Lengan Utara Sulawesi sebagian besar diprioritaskan di bagian timur terutama untuk sektor pembangkit listrik (Abdurrachman et al., 2024). Berbeda dengan bagian timur, sistem panas bumi di bagian barat belum mendapat prioritas karena

tidak memiliki prospek besar untuk pembangkit listrik (Alam et al., 2022). Padahal panas bumi tidak hanya dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik, namun juga dapat dimanfaatkan untuk sektor lain bila dikelola dengan tepat (Chen et al., 2024). Selain untuk pembangkit listrik, pemanfaatan sistem panas bumi antara lain untuk jaringan penghangat ruangan di Perancis Laplaige et al., perkebunan tomat dan melon di Algeria, serta pengolahan madu di India (Sircar dan Yadav, 2018). Dengan adanya komitmen pemerintah Indonesia untuk mencapai *Net Zero Carbon* pada tahun 2060, maka strategi pengembangan dan pengelolaan pembangkit energi terbarukan seperti energi panas bumi menjadi krusial. Untuk dapat memaksimalkan pengelolaan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP), pemahaman mengenai karakteristik sistem panas bumi perlu dilakukan. Salah satu cara untuk memahami karakteristik sistem panas bumi dapat dilakukan dengan membagi tipe sistem panas bumi berdasarkan *play* (Gauntlett et al., 2023). *Play* panas bumi adalah klasifikasi sistem panas bumi berdasarkan faktor kesamaan jenis sumber panas, kontrol struktur geologi, kapasitas reservoir, serta teknologi untuk regenerasi panas. Faktor-faktor tersebut dikontrol oleh kondisi tektonik (Moeck, 2014).

Lengan Utara Sulawesi adalah salah satu daerah yang memiliki banyak prospek panas bumi serta memiliki kondisi tektonik kompleks. Menurut Hall dan Spakman (2015), ada dua gaya tektonik yang mempengaruhi geologi Lengan Utara Sulawesi, yaitu pembalikan arah pergerakan lempeng (*rollback*) di bagian barat serta *double subduction* di bagian timur. *Rollback* di Lengan Utara Sulawesi dipengaruhi oleh anjakan Sulawesi Utara dan anjakan Batui, sedangkan *double subduction* dipengaruhi oleh anjakan Sangihe Timur seperti yang terlihat pada Gambar 1. Perbedaan kondisi tektonik seharusnya mempengaruhi *play* panas bumi di Lengan Utara Sulawesi. Namun, penelitian komperhensif mengenai perbedaan *play* panas bumi di Lengan Utara Sulawesi hingga saat ini masih sedikit. Rezky dkk. dan Idral telah memberikan gambaran model konseptual di WKP Suwawa, namun masih belum dapat menjelaskan perbedaan *play* panas bumi di bagian barat dengan bagian timur Lengan Utara Sulawesi. Paper ini akan menjelaskan kondisi geologi berdasarkan data tomografi seismik di bagian barat dan bagian timur Lengan Utara dan kaitannya dengan *play* panas bumi di Lengan Utara Sulawesi (Hall & Spakman, 2015).



Gambar 1 Peta lokasi penelitian

Moeck (2014) membagi sistem panas bumi berdasarkan *play* panas bumi. *Play* dipinjam dari istilah dalam eksplorasi hidrokarbon yang berarti kelompok sistem hidrokarbon berdasarkan kesamaan jenis reservoir, kontrol struktur geologi, batuan penudung, dan jenis perangkap minyak bumi. Dalam panas bumi, *play* diartikan sebagai tipe kelompok sistem panas bumi yang memiliki kesamaan sumber panas, kontrol struktur geologi, kapasitas reservoir, serta teknologi untuk regenerasi panas. Berdasarkan hubungan antar lempeng dan kondisi tektoniknya, *play* panas bumi dibagi menjadi dua kelompok, yaitu *play* panas bumi dominasi konveksi dan *play* panas bumi dominasi konduksi (Hochstein & Sudarman, 2015). *Play* panas bumi dominasi konveksi terdapat di daerah yang memiliki kegiatan tektonik dan vulkanik aktif, sedangkan *play* panas bumi dominasi konduksi terdapat di daerah yang kegiatan tektonik dan vulkaniknya sudah tidak aktif. Rincian *play* panas bumi beserta kondisi tektonik dan sumber panasnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 *Play* panas bumi (Moeck, 2014).

***Play* panas bumi**			**Kondisi tektonik**	**Sumber panas**
Konveksi	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

Play panas bumi			Kondisi tektonik	Sumber panas
Konduksi	Batuan beku	Tipe batuan dasar	Intrusi di daerah dengan medan datar	Panas radiogenik dari batuan dasar
	Non-magmatik	Sabuk orogenik	Daerah lipatan atau cekungan muka daratan	Struktur patahan kompleks
		Cekungan intra-kratonik	Cekungan sedimen	Sekuen sedimen

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Purba et al. (2020) menekankan bahwa salah satu hambatan utama dalam pengembangan energi panas bumi di Indonesia adalah tingginya biaya pengeboran, sementara pemanfaatan potensi panas bumi baru sekitar 7,8% dari total cadangan yang ada. Fokus penelitian tersebut lebih menyoroti aspek ekonomi dan efisiensi biaya, tanpa melakukan analisis komprehensif terhadap variasi geologi atau klasifikasi play panas bumi di wilayah tertentu (Moeck, 2014). Sementara itu, laporan Geothermal Energy in Indonesia yang diterbitkan oleh BRIN (2020) menunjukkan bahwa meskipun Sulawesi, termasuk kawasan Lengan Utara, memiliki potensi panas bumi yang cukup besar, sebagian besar kajian masih terbatas pada pemanfaatan untuk pembangkit listrik, sedangkan eksplorasi mendalam terkait karakteristik sistem panas bumi berdasarkan kondisi tektonik dan reservoir masih minim. Keduanya memperlihatkan adanya kesenjangan penelitian, yakni kurangnya kajian yang mengaitkan secara spesifik data geologi dan tomografi seismik dengan klasifikasi play panas bumi pada wilayah dengan tektonik kompleks (Liu et al., 2024).

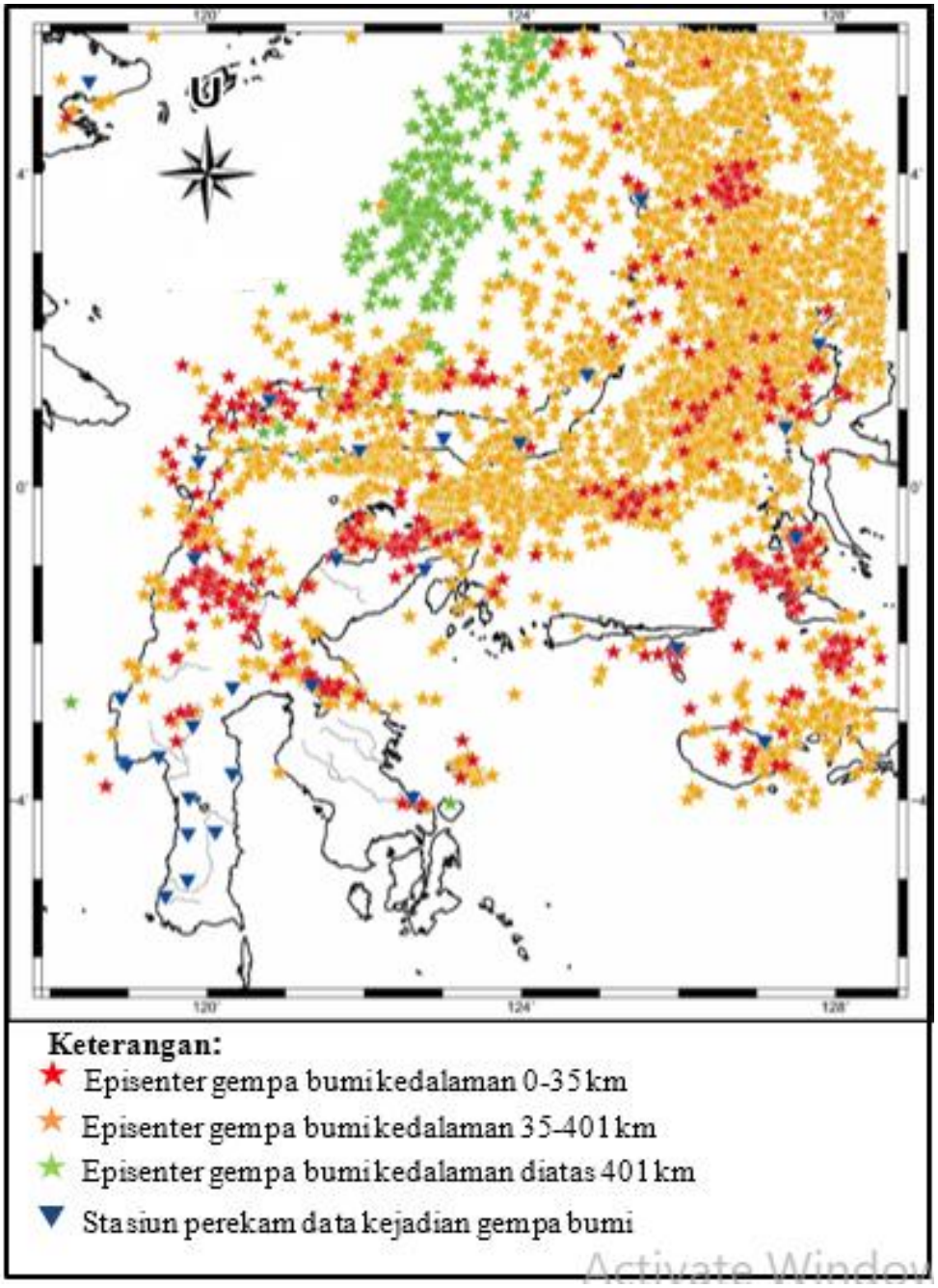
Tujuan dari penelitian ini adalah memberikan pemahaman baru terkait variasi sistem panas bumi di kawasan tersebut, sementara manfaatnya tidak hanya mendukung strategi eksplorasi yang lebih efektif dan berkelanjutan, tetapi juga berkontribusi pada pencapaian target Net Zero Carbon 2060 melalui pemanfaatan energi panas bumi secara optimal.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tomografi Seismik. Penelitian dimulai dengan memahami kondisi tektonik dan geologi regional di Lengan Utara Sulawesi (Siebert dkk, 2010; Hall dan Spakman, 2015). Pemahaman mengenai kondisi tektonik dan geologi regional penting karena klasifikasi *play* panas bumi oleh Moeck (2014) berdasarkan kondisi tektonik yang mempengaruhi suatu sistem panas bumi. Pemahaman kondisi tektonik dan geologi regional Lengan Utara Sulawesi menjadi dasar interpretasi data tomografi seismik. Bachri (2011) memberikan gambaran kondisi geologi di WKP Suwawa. Rezky dkk memberikan gambaran model konseptual sementara WKP Suwawa. Sumintadireja dkk. memberikan gambaran model konseptual WKP Lahendong berdasarkan integrasi data geofisika, sedangkan Utami (2011) memberikan gambaran model konseptual WKP Lahendong berdasarkan data log sumur.

Data tomografi seismik digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisa keadaan tektonik di Lengan Utara Sulawesi. Prinsip tomografi seismik adalah memanfaatkan waktu tiba gelombang seismik untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan berdasarkan model inversi 3D bawah permukaan Bumi. Salah satu tipe gelombang seismik yang umum digunakan dalam tomografi seismik adalah gempa bumi. Gempa bumi adalah suatu pelepasan akumulasi tekanan secara tiba-tiba dibawah permukaan Bumi. Pelepasan energi tersebut dapat diakibatkan oleh tumbukan antar lempeng, aktivitas di sekitar patahan, runtuhnya rongga dalam gua, ataupun disebabkan oleh jatuhan suatu benda. Pada daerah panas bumi, perbedaan intensitas jumlah gempa bumi dapat menunjukan aktivitas tektonik yang mempengaruhi dinamika sistem panas bumi. Salah satu software yang dapat digunakan dalam tomografi seismik adalah FMTOMO. Penentuan episenter dan hiposenter gempa bumi didasarkan pada asumsi bahwa kondisi bawah permukaan Bumi bersifat homogen. Agar hasil tomografi seismik sesuai dengan kaidah geologi, inversi FMTOMO menggunakan Hukum Huygens dan Asas Fermat. Hukum Huygens menyatakan bahwa gelombang baru akan terbentuk pada saat gelombang mencapai batas dua medium yang berbeda, sedangkan Asas Fermat menaytakan bahwa gelombang akan merambat pada medium yang lebih kompak.

Data persebaran gempa bumi yang diambil adalah data persebaran episenter dan hiposenter gempa bumi yang diambil dari situs http://www.isc.ac.uk/ pada tanggal 1 Januari 1950 hingga 31 Maret 2017 dengan magnitude gempa lebih atau sama dengan 2.5 dalam Skala Richter. Situs http://www.isc.ac.uk/ dikelola oleh ISC (International Sesimological Centre) yaitu organisasi ilmiah yang mengkoleksi serta mengolah data gempa bumi diseluruh dunia. Resolusi data seismik tomografi baru dapat diketahui setelah diuji terlebih dahulu menggunakan tes rekonstruksi sintetis. Dalam tes rekonstruksi sintetis, data persebaran episenter dan hiposenter adalah titik acuan yang digunakan untuk menentukan seberapa baik resolusi data seismik tomografi. Persebaran episenter gempa bumi yang digunakan dalam tes rekonstruksi data sintetis ditunjukan pada Gambar 2. Simbol segitiga terbalik berwarna biru melambangkan stasiun perekam data kejadian gempa, sedangkan simbol bintang menunjukan episenter gempa. Jumlah stasiun perekam gempa adalah 29, sedangkan jumlah data kejadian gempa adalah 3031.



Gambar 2. Episenter gempa bumi dan stasiun perekam gempa dengan skala peta 1:10,000,000

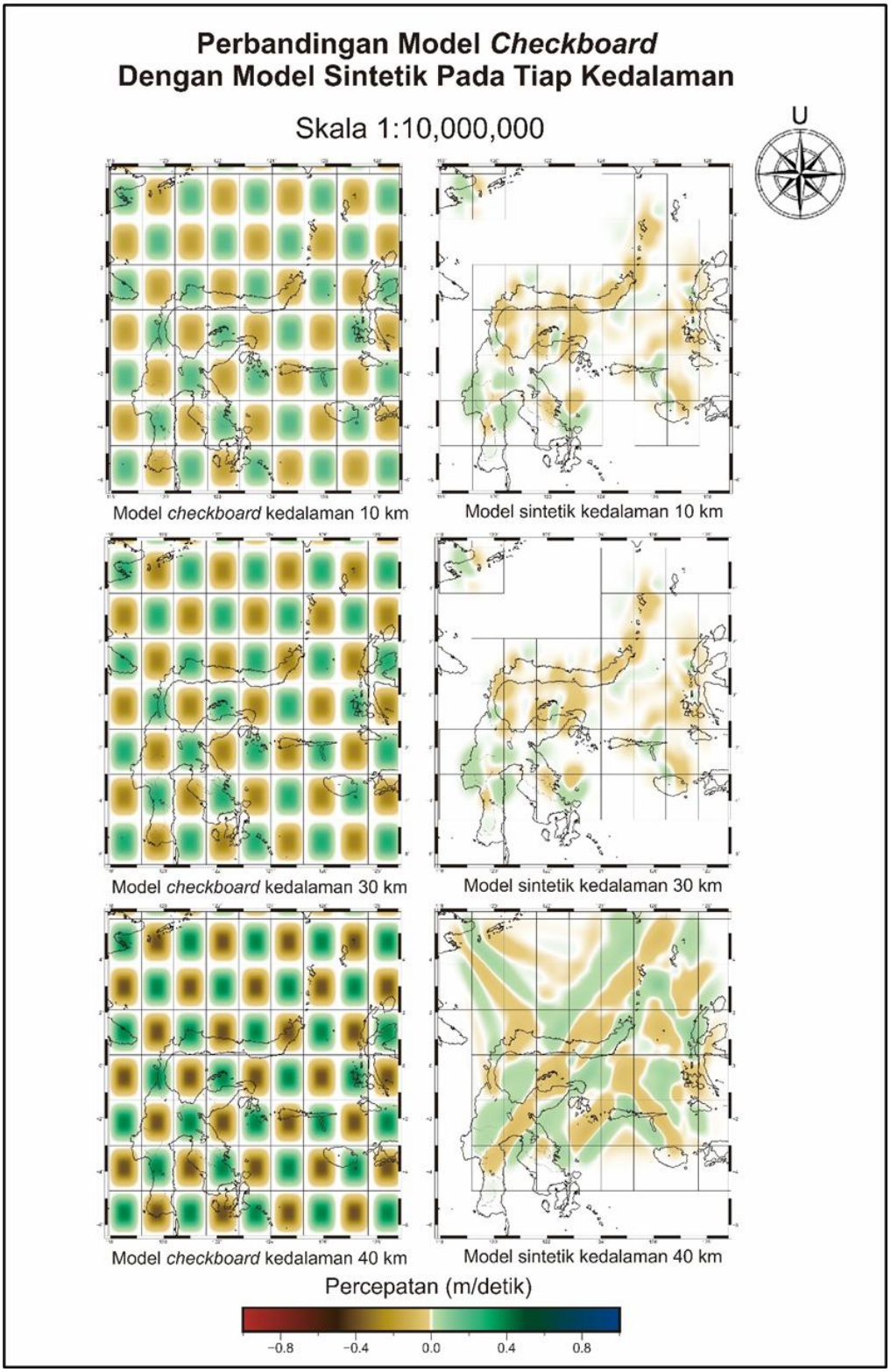
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data gempa bumi menggunakan tomografi seismik dilakukan dengan memasukan data gempa bumi pada suatu model bawah permukaan. Untuk mengetahui kesesuaian model bawah permukaan tersebut dengan kondisi geologi bawah permukaan yang sebenarnya perlu dilakukan

tes rekonstruksi sintetis. Tes rekonstruksi sintstis menggunakan software FMTOMO dilakukan dengan membuat model sintetik dan model checkboard dari nilai kecepatan waktu tiba gelombang seismik yang tercatat pada data kejadian gempa bumi sesuai dengan parameter model bawah permukaan yang akan digunakan (Nur et al., 2023). Kedua model ini memiliki nilai parameter yang sama namun memiliki nilai waktu tiba gelombang yang berbeda. Model checkerboard adalah model yang menggunakan nilai kecepatan waktu tiba gelombang seismik yang sebenarnya, sedangkan model sintetis menggunakan menggunakan waktu tiba gelombang seismik sintetis. Hasil tomografi seismik menunjukan perubahan nilai kecepatan gelombang seismik sebelum dilakukan inversi dengan nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik setelah dilakukan inversi (Nasruddin et al., 2016). Model bawah permukaan yang digunakan adalah model dengan nilai parameter yang pola warna model sintetiknya mendekati model checkerboard (Muksin et al., 2016).

Berdasarkan tes rekonstruksi sintetis menggunakan software FMTOMO, nilai parameter yang dipilih adalah nilai parameter dengan ukuran grid 150 x 100 km. Gambar 3. menunjukan perbandingan antara model sintetik dengan model checkboard pada setiap kedalaman. Model dengan ukuran grid 150 x 100 km menunjukan pola warna yang relatif sesuai antara model sintetik dengan model checkboard pada kedalaman 10 dan 30 km, namun tingkat kesesuaian pola warna antara model sintetik dengan model checkboard relatif rendah pada kedalaman 40 km. Hasil ini menunjukan bahwa parameter model grid 150 x 100 km dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan yang relatif sesuai dengan kondisi geologi sebenarnya pada kedalaman 0-30 km daripada kedalaman 40 km.

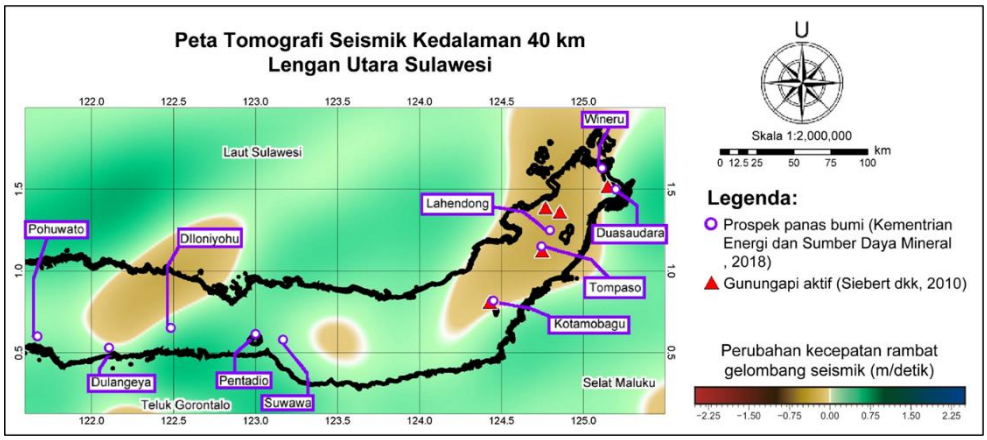
Berdasarkan pola tersebut, parameter model kedalaman dengan grid 150 x 100 km dapat dipakai untuk pengolahan tomografi (Pratama et al., 2023). Dengan asumsi bahwa ketebalan kerak di Lengan Utara Sulawesi diperkirakan 35-45 km (Budiati dkk, 2019), maka karakteristik tomografi pada kedalaman 0-40 km diasumsikan dapat merepresentasikan kondisi bawah permukaan Lengan Utara Sulawesi hingga kedalaman 40 km.



Gambar 3. Perbandingan antara model checkboard dengan model sintetik

Kondisi tektonik adalah salah satu faktor yang mempengaruhi klasifikasi *play* panas bumi yang ditulis oleh Moeck (2014). Tomografi seismik dapat digunakan untuk melihat kondisi tektonik yang mempengaruhi prospek-prospek panas bumi di Lengan Utara Sulawesi, sehingga metode ini cocok digunakan untuk mengetahui kondisi tektonik yang mempengaruhi tiap prospek panas bumi di Lengan Utara Sulawesi. Hasil tomografi seismik pada berupa persebaran nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik pada tiap kedalaman. Parameter yang dihasilkan dari inversi software FMTOMO adalah perubahan nilai kecepatan gelombang seismik setelah dilakukan inversi, sehingga nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik dapat bernilai positif (di atas 0 m/detik) atau negatif (di bawah 0 m/detik). Daerah dengan nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik bernilai positif menggambarkan daerah dengan batuan penyusun yang bersifat kaku (rigid), sedangkan daerah dengan nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik bernilai negatif menggambarkan daerah dengan batuan penyusun yang bersifat plastis (*ductile*) (Yushantarti et al., 2024).

Gambar 4. menunjukan tomografi seismik pada kedalaman 40 km. Kedalaman 40 km di bawah permukaan dipilih untuk analisa tomografi seismik karena ketebalan kerak di Lengan Utara Sulawesi diperkirakan antara 35 km hingga 45 km (Budiati dkk, 2019), sehingga bentuk lempeng di Lengan Utara Sulawesi dapat terlihat. Hasil pengolahan tomografi seismik menunjukan terdapat tiga daerah dengan nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik negatif, yaitu di bagian timur Lengan Utara Sulawesi meliputi prospek panas bumi Wineru hingga Kotamobagu, di bagian timur prospek panas bumi Suwawa, serta di bagian utara prospek panas bumi Dulangeya.

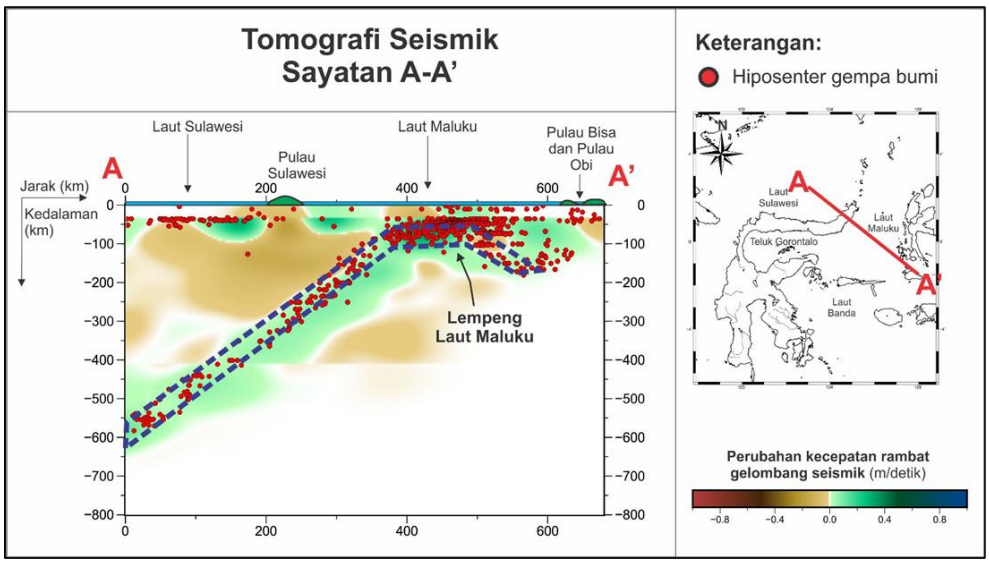


Gambar 4 . Tomografi Seismik kedalaman 40 km

Sayatan A-A’ pada Gambar 5. menunjukan bahwa bagian timur Lengan Utara Sulawesi terletak di atas daerah dengan perubahan kecepatan rambat gelombang seismik bernilai negatif, menandakan bahwa material penyusun batuan di bawah bagian timur Lengan Utara Sulawesi memiliki sifat yang lebih

plastis daripada batuan di sekitarnya. Kondisi ini diinterpretasikan sebagai tanda adanya pergerakan magma menuju permukaan Bumi akibat subduksi yang menandakan bahwa terdapat aktivitas vulkanik di bagian timur Lengan Utara Sulawesi. Hal ini diperkuat dengan seluruh gunungapi aktif di bagian timur Lengan Utara Sulawesi terletak di atas daerah dengan nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik negatif yang menandakan bahwa daerah dengan perubahan kecepatan rambat gelombang seismik bernilai negatif di bawah Lengan Utara Sulawesi bagian barat berkaitan dengan aktivitas gunungapi aktif. Bentuk rekonstruksi lempeng pada sayatan A-A' memiliki bentuk mirip dengan model rekonstruksi lempeng Hall dan Wilson di bagian timur Lengan Utara Sulawesi yang menunjukan bahwa terdapat *double subduction* di bawah Laut Maluku.

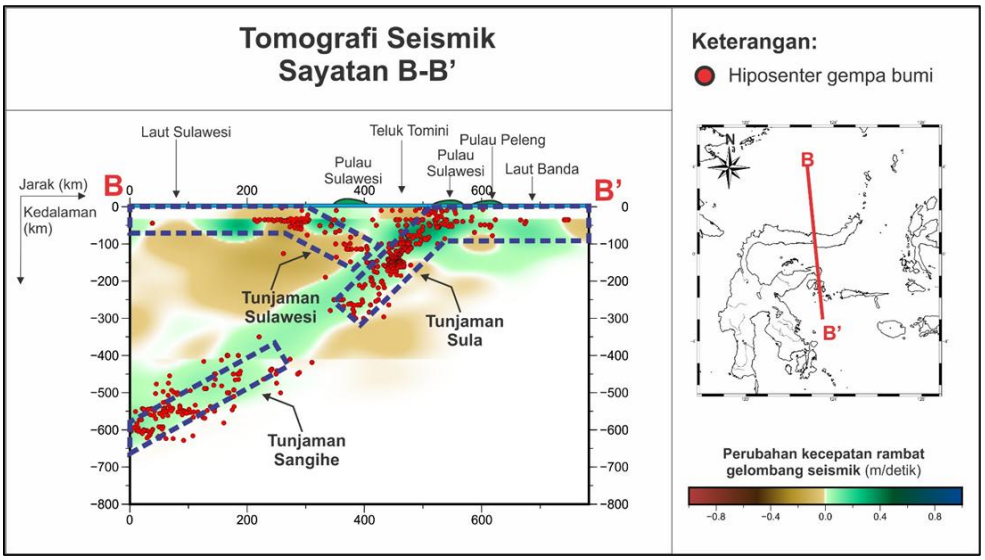
Batuan penyusun daerah dengan nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik negatif di bagian timur Lengan Utara Sulawesi yang meliputi prospek panas bumi Wineru hingga Kotamobagu didominasi oleh batuan hasil produk aktivitas gunungapi yang masih aktif saat ini (Riogilang dkk, 2013). Hal ini mengindikasikan bahwa nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik negatif di bagian timur Lengan Utara Sulawesi berkaitan dengan aktivitas magmatik.



Gambar 5. Tomografi Seismik bagian timur Lengan Utara Sulawesi sayatan A-A'

Bagian barat Lengan Utara Sulawesi meliputi prospek panas bumi Suwawa, Petandio, Diloniyohu, Dulangeya, dan Petandio memiliki nilai perubahan kecepatan rambat gelombang seismik positif. Bentuk tomografi seismik bawah permukaan di bagian barat Lengan Utara Sulawesi dapat dilihat pada sayatan B-B' (Gambar 6.). Sayatan B-B' menunjukan bahwa bagian barat Lengan Utara Sulawesi terletak di atas daerah dengan perubahan kecepatan rambat gelombang seismik bernilai positif, tidak seperti bagian timur yang terletak di atas daerah dengan perubahan kecepatan rambat gelombang seismik

bernilai negatif. Bentuk rekonstruksi lempeng pada sayatan B-B' mirip dengan model rekonstruksi lempeng Hall dan Spakman (2015) yang menunjukan bahwa terdapat *rollback* di bawah Lengan Utara Sulawesi bagian barat. Kondisi tektonik *rollback* menyebabkan bagian barat Lengan Utara Sulawesi tidak memiliki gunungapi aktif, sehingga *play* panas bumi dominasi konveksi magmatik-medan vulkanik tidak mungkin terdapat di prospek-prospek panas bumi di bagian barat.



Gambar 6. Tomografi Seismik bagian barat Lengan Utara Sulawesi sayatan B-B'

KESIMPULAN

Hasil sayatan tomografi seismik bagian timur Lengan Utara Sulawesi dipengaruhi oleh pergerakan subduksi Lempeng Laut Maluku (Gambar 5.), sedangkan bagian barat dipengaruhi oleh *rollback* (Gambar 6.). Perbedaan kondisi tektonik ini menyebabkan prospek panas bumi di bagian timur Lengan Utara Sulawesi memiliki *play* panas bumi yang berbeda dengan bagian barat. *Play* panas bumi di bagian timur Lengan Utara Sulawesi memiliki perubahan kecepatan gelombang seismik bernilai negatif dan didominasi oleh *play* panas bumi dominasi konveksi-medan vulkanik. *Play* panas bumi di bagian barat memiliki perubahan kecepatan gelombang seismik bernilai positif, sehingga kemungkinan memiliki *play* panas bumi dominasi konveksi non-magmatik-domain ekstensi. Saran yang dapat diberikan yakni perbedaan pengaruh kondisi tektonik di bagian barat dan timur Lengan Utara Sulawesi membuat strategi eksplorasi dan pengelolaan panas bumi di bagian barat Lengan Utara Sulawesi berbeda dengan bagian timur. Sumber panas di WKP Suwawa kemungkinan besar bukanlah intrusi ataupun dapur magma, sehingga perlu pendekatan eksplorasi rinci yang berbeda dengan WKP Lahendong (bagian timur Lengan Utara Sulawesi). Strategi pengelolaan panas bumi di bagian barat kemungkinan akan lebih cocok menggunakan strategi pengelolaan

sistem panas bumi temperatur rendah hingga menengah karena sumber panas di WKP ini bukan berasal dari aktivitas vulkanisme.

DAFTAR PUSTAKA

Abdurrachman, M., Warmada, I. W., Zaenudin, A., Kawai, T., Thanh, N. X., Itoh, J., & Hadi, S. (2024). Radiogenic geothermal systems of Bangka Island, Indonesia: Implications of high heat production and tectonic framework. *Geothermics*, *118*, 102910. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102910

Alam, M. A., Chandrasekharam, D., & Parada, M. A. (2022). Tectonic and structural controls on geothermal systems. In D. Chandrasekharam et al. (Eds.), *Geothermal energy* (pp. 339-378). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_15

Bachri, S. (2011). Structural Pattern and Stress System Evolution During Neogene - Pleistocene Times in The Central Part of The North Arm of Sulawesi, JSDG, Vol. 21, pp 127-135.

Budiati, M. R., Toyokuni, G., Okada, T., & Matsuzawa, T. (2019). Crustal Thickness Beneath Central Indonesia by The Cross-Correlation Analysis of Seismic Ambient Noise (2), Japan Geoscience Union Meeting 2019, SSS12-P15.

Chen, L., Negredo, A. M., Liu, M., Jiménez-Munt, I., & Fernàndez, M. (2024). Upright emplacement of the Gibraltar slab and the origin of rifting in adjacent foreland and Backarc Basins. *Communications Earth & Environment*, *5*, 661. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01833-6

Gauntlett, E., Rawlinson, N., Kendall, J. M., Winder, T., Biggs, J., & Calvert, A. (2023). Seismic tomography of Nabro Caldera, Eritrea: Insights into the magmatic and hydrothermal systems of a recently erupted volcano. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *128*(5), e2022JB025742. https://doi.org/10.1029/2022JB025742

Hall, R., & Spakman, W. (2015). Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, *658*, 14-45. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.003

Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2015). Indonesian volcanic geothermal systems. *Geothermics*, *54*, 45-65. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.11.003

Liu, Y., Chen, A., Zhang, Y., Wang, Q., & Li, X. (2024). Study of 3-D velocity structure characteristics in Dadu river Houziyan reservoir area at different impoundment stages. *Frontiers in Earth Science*, *12*, 1324268. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1324268

Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *37*, 867-882. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032

Muksin, U., Bauer, K., & Haberland, C. (2016). Ambient seismic noise tomography reveals a hidden caldera and its relation to the Tarutung

pull-apart basin at the Sumatran Fault Zone, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *321*, 73-84. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.035

Nasruddin, Alhamid, M. I., Daud, Y., Surachman, A., Sugiyono, A., Aditya, H. B., & Mahlia, T. M. I. (2016). Potential of geothermal energy for electricity generation in Indonesia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *53*, 733-740. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.032

Nur, S., Ikhwali, M. F., Said, M., Himran, S., & Syarifuddin, N. (2023). The geothermal energy landscape in Indonesia: A comprehensive 2023 update on power generation, policies, risks, phase and the role of education. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *189*, 113963. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113963

Pratama, H., Sarkowi, M., & Widodo, A. (2023). Structural map of Sulawesi derives from gravity data and its implications for geothermal systems. *E3S Web of Conferences*, *423*, 04004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342304004

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

Siebert, L., Simkin, T.S., & Kimberly, P. (2010). Volcanoes of the World: Third Edition (3rd ed.). Oakland: University of California Press.

Utami, P. (2011). Hydrothermal Alteration and the Evolution of the Lahendong Geothermal System, North Sulawesi, Indonesia. Thesis. University of Auckland.

Yushantarti, A., Widiatma, R., Said, Y. M., & Hermawan, D. (2024). Overview of future geothermal development plan in Indonesia. *Geothermics*, *123*, 103078. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103078