



Karakterisasi Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik pada Manifestasi Air Panas Biatan Bapinang: Studi Pendahuluan

Nanda Hanyfa Maulida^{1✉}, Octa Della Puspita¹, Akroma Hidayatika², Rahmi Mulyasari²

¹Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Jl.Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Gedong Meneng, Bandar Lampung

¹Program Studi Teknik Geologi, Universitas Lampung, Jl.Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Gedong Meneng, Bandar Lampung

ARTICLE INFO

Article history:

Received: November 3, 2024

Accepted: December 20, 2024

Published: December 26, 2024

Keywords:

manifestasi air panas
panas bumi non-vulkanik
cekungan sedimen
basement uplift

Corresponding author:

Nanda Hanyfa Maulida

Email: nandahanyfa@eng.unila.ac.id

Read online:



Scan this QR code
with your smart
phone or mobile
device to read online.

Copyright © 2024 Authors



This work is
licensed under
a Creative Commons

Attribution-ShareAlike 4.0 International
License.

ABSTRAK

Kemunculan manifestasi air panas di Biatan Bapinang, Kalimantan Timur, merupakan fenomena yang menarik karena berlokasi jauh dari aktivitas vulkanik dan tektonik aktif. Penelitian ini bertujuan untuk memahami kemungkinan penyebab kemunculan manifestasi air panas tersebut serta karakteristik sistem panas bumi melalui analisis geologi dan distribusi anomali Bouguer. Data geologi regional dan Digital Elevation Model (DEM) digunakan untuk meninjau formasi batuan dan kemungkinan adanya struktur yang berperan sebagai jalur migrasi fluida panas. Sebaran anomali Bouguer digunakan untuk melihat adanya variasi densitas yang berkaitan dengan kedalaman batuan dasar. Hasil analisis menunjukkan bahwa manifestasi air panas Biatan Bapinang berada pada batas antara cekungan sedimen dan tinggian *basement*. Asal fluida kemungkinan berasal dari cekungan sedimen dan adanya kenaikan *basement* berpotensi meningkatkan aliran panas yang menjadi sebab terpanaskannya air bawah permukaan. Batas litologi antar formasi serta kemungkinan keterdapatan struktur bawah permukaan memberikan jalur preferensial bagi fluida panas menuju permukaan. Penelitian ini mengindikasikan bahwa sistem panas bumi dari manifestasi air panas Biatan Bapinang merupakan sistem non-vulkanik tipe cekungan intrakratonik dengan sumber panas kemungkinan berasal dari aliran panas terrestrial yang terfokus akibat kenaikan batuan *basement* dan konfigurasi geologi setempat. Penelitian ini membuka peluang bagi studi lebih lanjut terhadap potensi panas bumi di wilayah non-vulkanik khususnya pada wilayah Biatan.

ABSTRACT

The emergence of hot spring manifestations in Biatan Bapinang, East Kalimantan, is intriguing due to its location, far from active volcanic and tectonic regions. This study aims to investigate possible causes and characteristics of this geothermal system using geological analysis and Bouguer anomaly distribution. Regional geological data and a Digital Elevation Model (DEM) were used to examine rock formations and potential structures that could serve as pathways for hot fluid migration. Bouguer anomaly distribution provided insights into density variations associated with basement depth. Findings indicate that the Biatan Bapinang hot spring manifestation lies at the boundary between a sedimentary basin and a basement uplift. The fluid likely originates from the sedimentary basin, with basement uplift potentially enhancing heat flow that warms subsurface water. Lithological boundaries and possible subsurface structures create preferential pathways for hot fluids to reach the surface. This study suggests that the Biatan Bapinang geothermal system is a non-volcanic, intraplate basin-type system, with a probable heat source from terrestrial heat flow concentrated by the basement uplift and local geological configuration. This research opens opportunities for further studies on geothermal potential in non-volcanic regions, especially in the Biatan area.

How to cite: Maulida, N. H., Puspita, O. D., Hidayatika, A., dan Mulyasari, R. (2024). Karakterisasi Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik pada Manifestasi Air Panas Biatan Bapinang: Studi Pendahuluan. *OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan*, 6(2), pp. 80-91. <https://doi.org/10.56099/ophi.v6i2.p80-91>

1 Pendahuluan

Mata air panas merupakan manifestasi permukaan yang menjadi penciri adanya potensi energi panas bumi. Biasanya, kemunculan manifestasi air panas ditemukan di sistem panas bumi dengan aktivitas vulkanik atau tektonik, di mana air panas dari dalam bumi dapat mencapai lapisan yang lebih dangkal melalui rekahan-rekahan batuan. Namun, mata air panas juga dapat ditemukan di lingkungan geologi yang jauh dari aktivitas vulkanik atau tektonik, salah satunya adalah kemunculan air panas di daerah Biatan, Kalimantan Timur. Air panas Biatan Bapinang muncul di lingkungan sedimen dengan aktivitas tektonik yang minim serta jauh dari zona vulkanik. Hal ini menimbulkan pertanyaan mengenai sebab terbentuknya mata air panas Biatan Bapinang dan darimana sumber panasnya berasal.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa mata air panas tidak selalu memerlukan aktivitas vulkanik untuk terbentuk. Sebagai contoh, mata air panas Muiño da Veiga di Spanyol, tidak terkait dengan aktivitas gunung berapi, melainkan dengan sistem panas bumi bersuhu tinggi yang dialiri oleh panas bawah permukaan yang dalam (Escuder-Rodríguez dkk., 2022). Di daerah Kumamoto, Jepang, terdapat mata air panas dengan kandungan bikarbonat dan klorida yang tinggi di daerah tanpa sistem magmatik yang aktif. Mata air ini terkait dengan pergerakan fluida dalam yang bersumber dari kerak bumi, yang menunjukkan adanya pengaruh tektonik dan proses pencampuran fluida (Hosono dan Yamanaka, 2021).

Di Botswana, analisis geokimia mata air panas menunjukkan bahwa sistem geotermal yang ada di daerah tersebut terkait dengan reservoir yang terperangkap dalam batuan sedimen atau kristalin, yang memiliki permeabilitas alami (Ramotoroko dkk., 2023). Penelitian di Noto Peninsula, Jepang, menunjukkan bahwa sumber panas juga dapat berasal dari produksi panas radiogenik yang dihasilkan oleh peluruhan unsur-unsur seperti uranium dan thorium dalam litosfer (Umeda dkk., 2009). Di Indonesia, Kasbani (2009) mengkategorikan sistem yang terbentuk pada lingkungan yang tidak berkaitan langsung dengan vulkanisme sebagai sistem panas bumi non-vulkanik. Sistem ini pada umumnya tersebar di bagian timur *sundaland* (paparan sunda), daerah lengan dan kaki Sulawesi serta daerah Kepulauan Maluku hingga Irian (Kasbani, 2009).

Meskipun tidak ada aktivitas vulkanik yang jelas, proses geotermal masih dapat terjadi di daerah dengan struktur geologi yang sesuai. Beberapa prospek panas bumi non-vulkanik di Indonesia seperti Maranda-Kawende dan Amohola di Sulawesi,

Batabual dan Wapsalit di Maluku, dan sistem lain di Kalimantan telah di data dan dideskripsikan tatanan sistemnya dalam Buku Potensi Panas Bumi Indonesia dari KESDM (2017a, 2017b), namun tidak ditemukan informasi mengenai sistem panas bumi pada daerah Biatan Bapinang. Kekosongan informasi ini mendorong penulis melakukan identifikasi awal mengenai sistem yang mengontrol kemunculan manifestasi di Biatan Bapinang dengan studi pendahuluan berupa pengumpulan informasi dan analisis kualitatif dari data geologi dan geofisika yang telah tersedia sebagai tahap awal eksplorasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kemungkinan penyebab kemunculan mata air panas di wilayah Biatan Bapinang. Lingkungan pembentukan sistem panas bumi serta kemungkinan jenis sumber panas dianalisis berdasarkan peta geologi, peta DEM, dan peta sebaran anomali Bouguer. Cakupan penelitian hanya pada wilayah di sekitar mata air panas Biatan Bapinang. Penelitian dibatasi pada studi literatur mengenai sistem panas bumi, analisis geologi berdasarkan peta geologi regional dan analisis kondisi bawah permukaan berdasarkan peta sebaran anomali Bouguer dan analisis struktur geologi dengan identifikasi kelurusan berdasarkan data DEM. Anomali bouguer digunakan dalam penelitian ini, selain karena ketersediaan datanya, juga karena relevan untuk memberikan gambaran awal kondisi bawah permukaan di sistem panas bumi non-vulkanik seperti identifikasi struktur geologi dan struktur batuan (Arrofi dkk., 2022; Firdaus dkk., 2021; Nahli dkk., 2016) serta identifikasi sumber panas (Mawalid dan Mardhotilla, 2021). Dengan studi pendahuluan yang dilakukan ini, diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai potensi panas bumi pada lingkungan geologi non-vulkanik yang memunculkan mata air panas khususnya di wilayah Biatan Bapinang.

2 Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di daerah Biatan Bapinang, Kecamatan Bapinang, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Pada daerah ini terdapat satu manifestasi air panas (Air panas Biatan Bapinang) berbentuk kolam air panas. Area penelitian mencakup batas 1°15'00" – 2°00'00" LU dan 117°30'00" – 118°30'00" BT agar dapat menganalisis lingkungan pembentukan. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder berupa peta geologi regional yang diambil dari Peta Geologi Lembar

Muaralasan, Kalimantan (Sukardi dkk., 2011), data DEM (Digital Elevation Model) SRTM 1 Arc-second Global dan peta anomali bouguer (Sobari dan Nasution, 2005). Pada peta geologi, parameter yang dianalisis berupa: (1) sebaran struktur geologi di permukaan, (2) sebaran litologi dan stratigrafi. Data

DEM SRTM digunakan untuk menentukan kelurusan dan identifikasi struktur geologi di permukaan. Pada peta anomali bouguer, parameter yang dianalisis berupa kontur anomali untuk mendapatkan gambaran kondisi bawah permukaan.



Gambar 1 Peta lokasi Air Panas Biatan Bapinang

2.3 Prosedur Penelitian

Diagram alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian dimulai dengan pengumpulan data berupa peta geologi, data DEM (*Digital Elevation Model*) serta peta anomali Bouguer. Peta geologi digunakan untuk menganalisis struktur geologi dan litologi. Analisis struktur geologi bertujuan memahami pola struktur yang mungkin menjadi jalur migrasi fluida panas bumi. Sedangkan analisis litologi memberikan informasi tentang jenis batuan, yang memengaruhi permeabilitas dan kemampuan batuan dalam menyimpan dan mengalirkan fluida panas.

Data DEM digunakan untuk melakukan analisis kelurusan yang bertujuan mengidentifikasi fitur kelurusan di permukaan bumi, seperti patahan atau rekahan. Teknik penentuan kelurusan adalah dengan mengidentifikasi secara manual pola-pola kelurusan yang terbentuk pada peta DEM dengan beberapa arah penyinaran (azimuth 45°, 135°, 225°, dan 315°). Hasil dari analisis kelurusan ini menghasilkan peta kelurusan yang menunjukkan pola-pola linear pada permukaan, yang penting untuk menentukan potensi jalur aliran fluida panas bumi. Peta anomali Bouguer digunakan untuk mengetahui variasi densitas di bawah permukaan. Dari peta ini dilakukan identifikasi dan zonasi anomali densitas tinggi, yang dapat

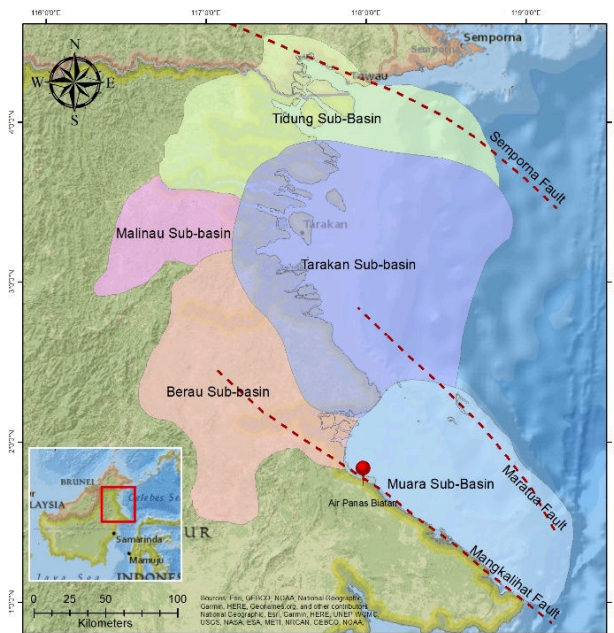
mengindikasikan keberadaan tubuh batuan dengan densitas lebih tinggi atau sumber panas yang berpotensi menjadi sumber panas bumi.



Gambar 2 Diagram alir penelitian

KETERANGAN/LEGEND

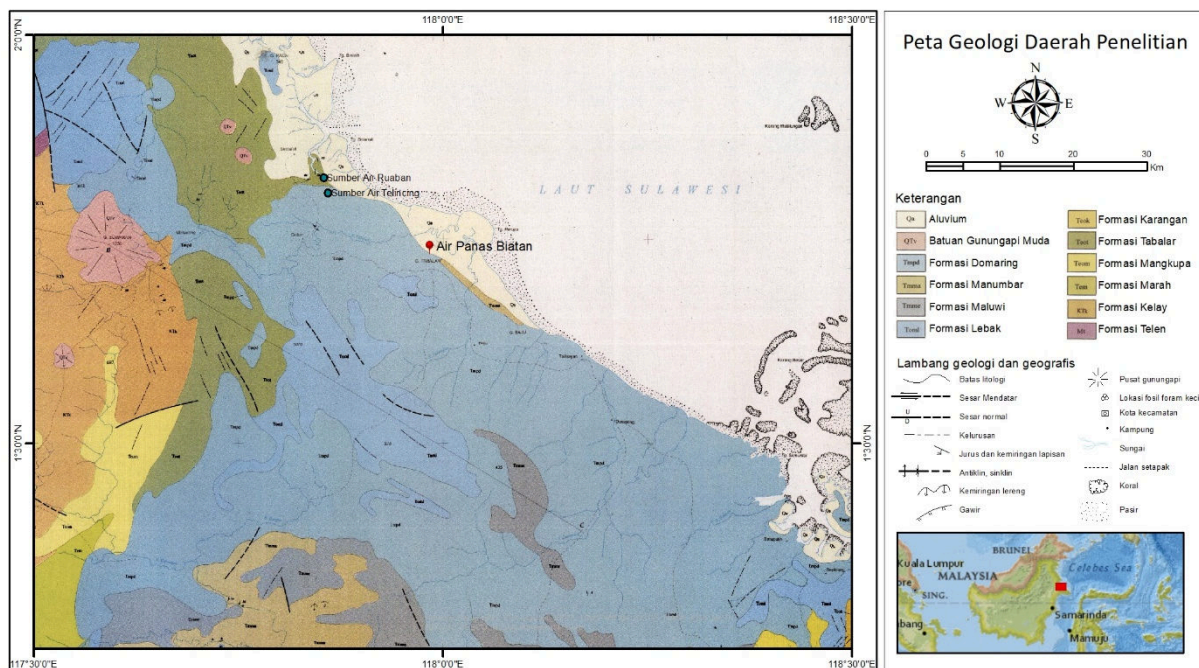
- Kraton
Craton
- Tepian Laut
Marginal Sea
- Lempeng Samudera
Oceanic Plate
- Komplek Transisi
Transitional Complex
- Lokasi Penelitian
Research Location



Gambar 4 Peta Cekungan Tarakan dan Sub-Cekungannya (sub-cekungan bersumber dari [Krisnabudhi dkk. \(2022\)](#), indikasi patahan bersumber dari [Husein \(2017\)](#).

Formasi Lebak (Toml) tersusun atas litologi perselingan batugamping dan napal, breksi batugamping, batupasir dengan ketebalan mencapai 1500 m. Bagian bawah pada formasi Karangan (Teot) terdiri dari napal kelabu, batupasir, serpih, sisipan batugamping, dan konglomerat alas. Pada bagian atas terdiri dari dolomit dan karenit serta sisipan napal yang terendapkan dalam lingkungan fluviatile-laut dangkal. Tebalnya mencapai 1300 m. ([Sukardi dkk., 2011](#)).

Formasi-formasi pada wilayah penelitian terbentuk dari masa eosen awal hingga holosen (**Gambar 6**). Endapan Aluvium (Qa) terbentuk pada Kala Holosen. Pada Kala Plistosen Awal hingga Plistosen Akhir tidak ada pembentukan formasi batuan pada daerah penelitian. Kala Miosen Akhir hingga Pliosen terendapkan Formasi Domaring (Tmpe). Kala Miosen Tengah terendapkan Formasi Maluwi (Tmma). Formasi Lebak (Toml) terendapkan pada kala Oligosen Akhir hingga Miosen Awal. Formasi Karangan (Teot), terendapkan pada Kala Eosen Awal hingga Oligosen Awal.



Gambar 5 Peta geologi daerah penelitian, kotak merah merupakan area utama penelitian (modifikasi dari [Sukardi, dkk. \(2011\)](#))

4 Sebaran Anomali Bouguer

Sebaran anomali bouguer yang ditampilkan pada **Gambar 7** diambil dari peta gayaberat anomali bouguer yang dipetakan oleh Puslitbang Geologi ([Sobari dan Nasution, 2005](#)). Pengukuran gayaberat dilakukan dalam rangka pemetaan gayaberat Kalimantan timur dan tengah yang mencakup 15 (lima belas) lembar peta skala 1:250.000. Lokasi titik ditentukan dari citra landsat dan pencapaiannya

dilakukan dengan menggunakan helikopter. Pengukuran gayaberat dilakukan dengan alat gravimeter LaCoste & Romberg, model Geodetic, masing- masing G.826, dan G.525. Ketinggian titik amat gayaberat diukur dengan menggunakan dua unit barometer DPI Druck, sedang posisinya ditentukan dengan metoda absolute dari Global Positioning System (GPS) model GPS-45XL Garmin jenis navigasi dan Trimble Geo Explorer CE Series.

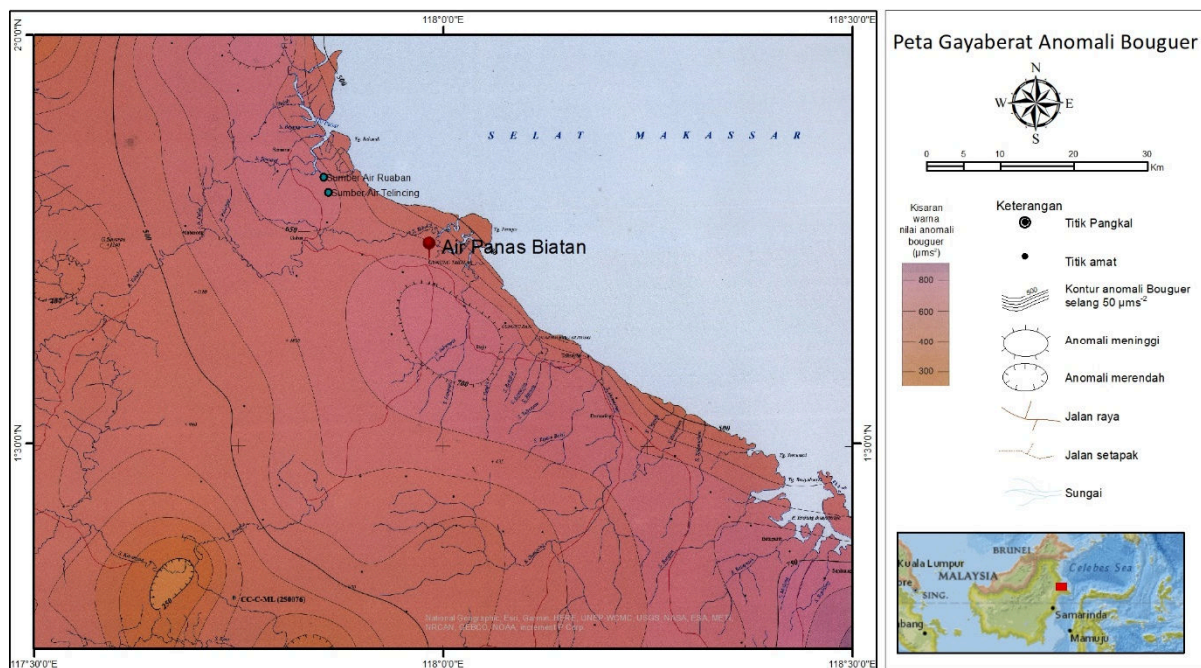
MASA ERA	ZAMAN PERIOD	KALA EPOCH		UMUR (juta) AGE (m.y)	Batuan Sedimen Sedimentary Rock	
KENOZOIKUM CENOZOIC	KUATER QUATERNARY	HOLOSEN HOLOCENE		(0.01)	Qa	
		PLISTOSEN PLEISTOCENE	AKHIR LATE			
			TENGAH MIDDLE			
			AWAL EARLY			
	TERSIER TERTIARY	PLIOSEN PLIOCENE		1.6		
		MIOSEN MIOCENE	AKHIR LATE	5.3 (4.8)	Tmpt	
			TENGAH MIDDLE	11 (11.3)	Tmma	
			AWAL EARLY	16.2		
				23 (23.7)	Toml	
		OLIGOSEN OLIGOCENE		36.5		
		Eosen Eocene	AKHIR LATE	39 (43.6)	Teot	
			AWAL EARLY	53 (57.8)		
		PALEOSEN PALEOCENE				

Gambar 6 Kolom stratigrafi pada daerah penelitian

Nilai gayaberat yang diamati dikoreksi terhadap pengaruh apungan alat, pasang surut bumi dan koreksi medan topografi hanya sebatas zona dalam (*inner zone*). Nilai gayaberat ini kemudian disusutkan

menjadi nilai anomali Bouguer dan dinyatakan dalam μms^{-2} . Rapatmassa batuan yang digunakan dalam penyusutan adalah $2,67 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Nilai gayaberat normal (Gn) dihitung dengan rumus gayaberat Internasional GRS (Geodetic References System, 1967).

Nilai kontur anomali Bouguer pada peta berkisar antara $+250 \mu\text{ms}^{-2}$ hingga $+750 \mu\text{ms}^{-2}$ dengan pola utama adalah melajur dan eliptik. Pola melajur terlihat sepanjang garis pantai dengan arah timurlaut baratdaya dan sejajar garis pantai. Beberapa pola eliptik terlihat pada bagian barat dan baratdaya serta di beberapa titik dekat garis pantai. Anomali rendah dengan besaran $250\text{--}400 \mu\text{ms}^{-2}$, di beberapa tempat membentuk bulatan eliptik yang dapat diduga sebagai cerminan daerah sinklinorium. Anomali tinggi antara besaran $600\text{--}700 \mu\text{ms}^{-2}$ yang terdapat di sepanjang pantai disebabkan oleh pengaruh undulasi kerak samudra yang mengalasi laut Sulawesi. Anomali tinggi tersebut bersesuaian dengan beberapa data seismik yang menunjukkan adanya peninggian batuan dasar (*basement*) di sepanjang Tanjung Mangkalihat.



Gambar 7 Peta Sebaran Anomali Bouguer, modifikasi dari Sobari dan Nasution (2005)

5 Hasil dan Pembahasan

5.1 Karakteristik Air Panas Biatan Bapinang

Air panas Biatan Bapinang terletak di lingkungan sedimentasi dengan aktivitas tektonik yang rendah. Tidak ditemukan adanya bukti vulkanisme seperti sisa-sisa gunung api yang mungkin berasosiasi dengan keberadaan mata air panas. Berdasarkan peta cekungan Indonesia (KESDM, 2022), air panas Biatan Bapinang berada pada batas cekungan Tarakan pada

sub-cekungan Muara (Gambar 4). Kemunculan air panas hanya terdeteksi pada titik air panas Biatan Bapinang dan belum ditemukan manifestasi lain di sekitar wilayah manifestasi ini.

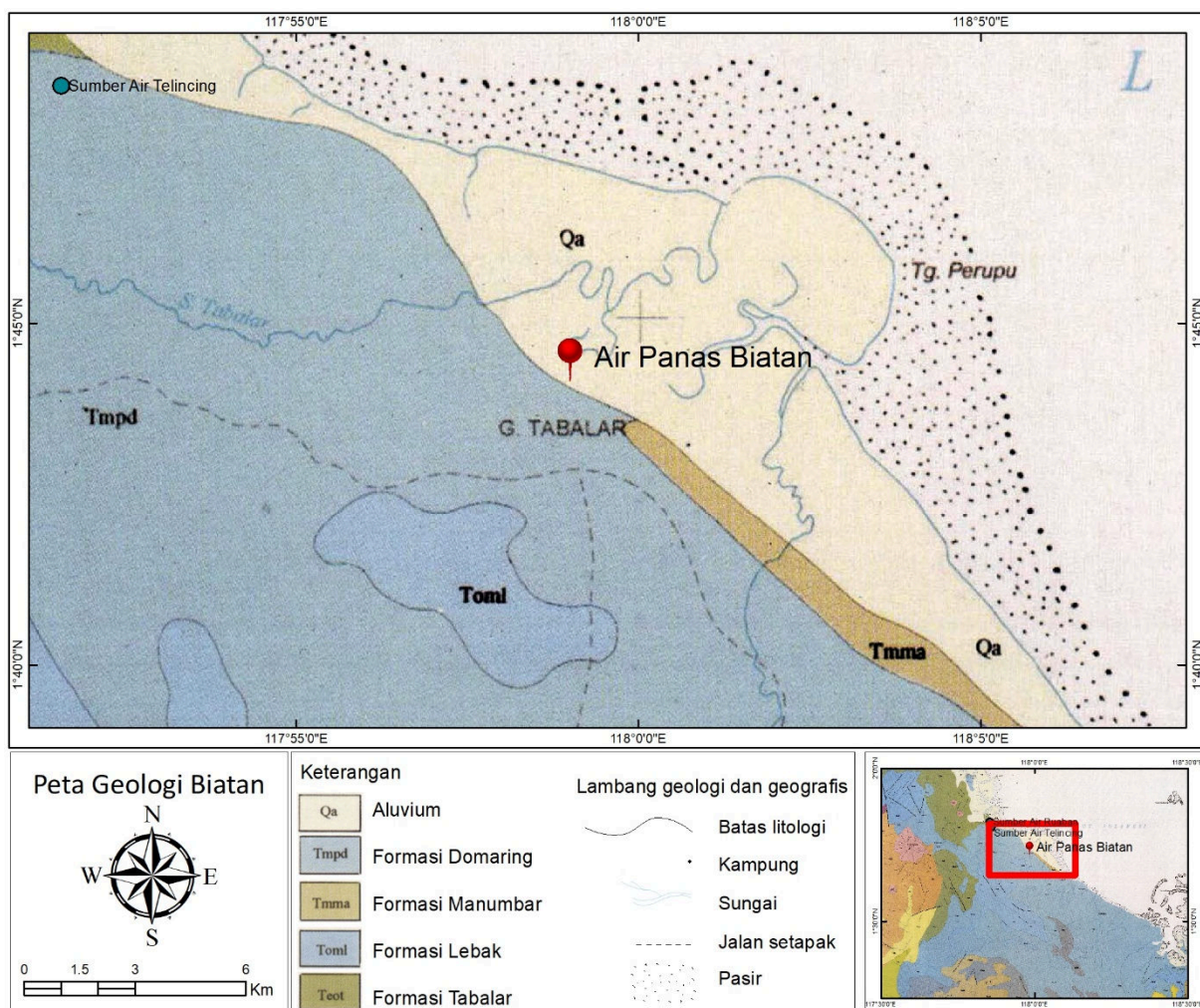
Secara fisis kenampakan kolam air panas Biatan Bapinang dapat dilihat pada Gambar 8. Diameter kolam air panas Biatan Bapinang sebesar kurang lebih 10 meter dengan ciri fisis warna kehijauan dan rasa asin yang cukup kuat. Terdapat singkapan batugamping terumbu di dalam kolam air panas yang

juga ditemukan di sekitar kolam. Perkiraan temperatur air panas ini kurang lebih 40 – 50°C. Air

panas keluar melalui celah-celah antar batuan dengan titik sumber berada di tengah kolam.



Gambar 8 Kenampakan fisik kolam Air panas Biatan Bapinang, sumber foto: dokumentasi pribadi (Oktober 2024)



Gambar 9 Litologi di sekitar manifestasi Air panas Biatan Bapinang

5.2 Formasi Batuan dan Litologi

Berdasarkan plotting lokasi pada peta geologi (**Gambar 9**), air panas Biatan Bapinang muncul pada formasi Qa (aluvium) dekat dengan batas antara endapan aluvium (Qa) dan formasi domaring (Tmpd). Formasi Maluwi (Tmna) juga berada dekat dengan

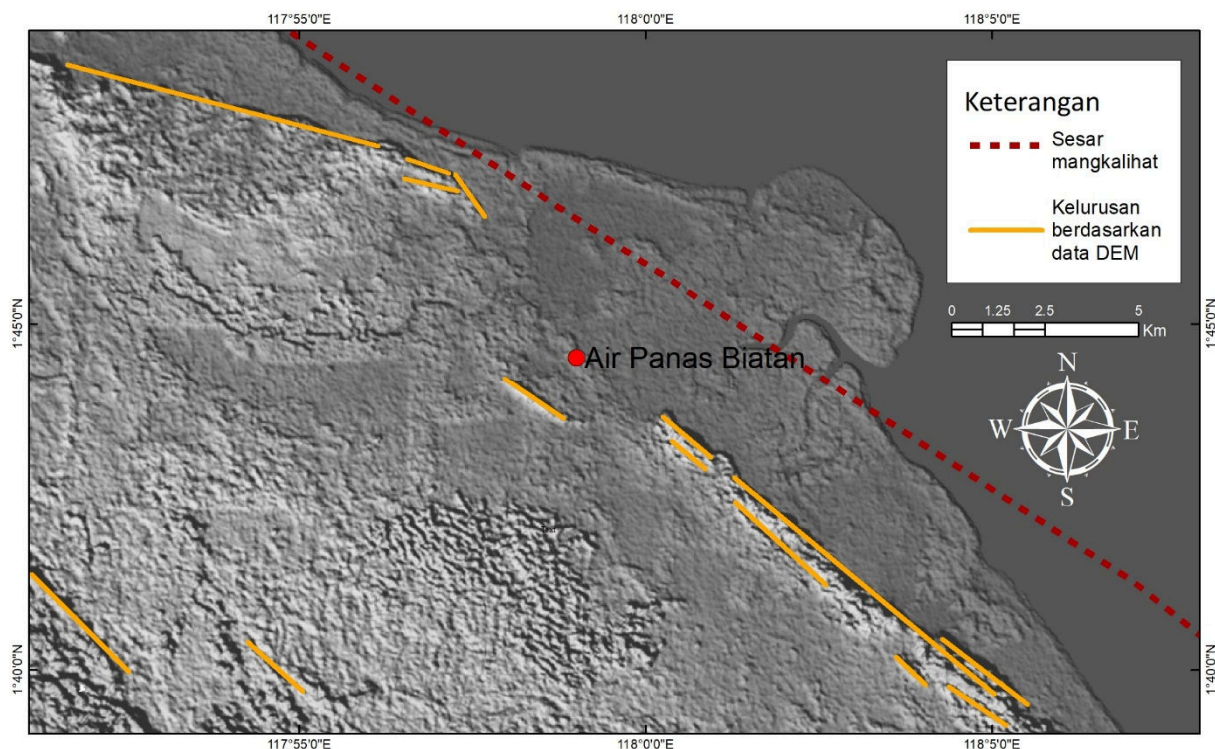
kemunculan air panas. Seluruh litologi yang berada di sekitar air panas tersusun dari batuan sedimen. Formasi Aluvial (Qa) tersusun atas litologi kerakal, kerikil, pasir, lanau, lempung, lumpur, sisa tumbuhan, kepingan, cangkang dan koral. Formasi Domaring (Tmpd) tersusun dari batugamping terumbu, batugamping kapuran, sisipan napal dan lignit.

Formasi Maluwi (Tmma) terdiri atas batugamping, napal, batupasir dan sisipan batulanau.

5.3 Struktur dan Fitur Geologi

Berdasarkan peta geologi, tidak ada kenampakan struktur yang terpetakan di sekitar wilayah Air panas Biatan Bapinang. Dari beberapa literatur (Husein, 2017; Krisnabudhi dkk., 2020) terdapat sesar geser (Sesar Mangkalihat) yang membentang dari arah Tenggara (kawasan Pantai Mangkalihat) hingga Timur Laut (Berau) (Gambar 10). Namun keterkaitan antara sesar ini terhadap kemunculan manifestasi air panas

belum dipastikan. Berdasarkan peta DEM (Gambar 10) terlihat terdapat kelurusan yang terbentuk dari morfologi barisan perbukitan berarah Timurlaut-Tenggara yang jika ditarik kemenerusannya berdekatan dengan lokasi kemunculan manifestasi air panas. Arah kelurusan dari perbukitan ini searah dengan arah Sesar Mangkalihat, namun keterkaitan antara terbentuknya barisan perbukitan dan aktivitas Sesar Mangkalihat masih perlu diteliti lebih lanjut dengan studi evolusi tektonik. Struktur maupun fitur geologi lainnya tidak ditemukan di wilayah sekitar kemunculan mata air panas Biatan Bapinang.



Gambar 10 Peta struktur dan kelurusan yang diinterpretasi berdasarkan data DEM

5.4 Analisis Sebaran Anomali Bouguer

Berdasarkan sebaran anomali Bouguer (Gambar 7) diketahui adanya anomali tinggi di selatan manifestasi air panas Biatan Bapinang dengan besaran $600-700 \mu\text{ms}^{-2}$. Anomali ini disebabkan oleh pengaruh undulasi kerak samudra yang mengalasi laut Sulawesi (Sobari dan Nasution, 2005). Beberapa artikel menunjukkan adanya peninggian batuan dasar (*basement*) di Tanjung Mangkalihat (Darman, 2017; Tiranda dan Hall, 2021). Hal ini bersesuaian dengan kondisi anomali Bouguer yang tinggi, sehingga anomali tinggi ini kemungkinan merupakan efek dari posisi *basement* yang lebih tinggi. Batuan *basement* yang umumnya memiliki konduktivitas panas yang lebih tinggi dibandingkan batuan di sekitarnya berpotensi meningkatkan aliran panas di area kenaikan *basement* tersebut.

5.5 Analisis Sistem Panas Bumi

Sumber Fluida

Lokasi kemunculan air panas berada pada batas cekungan Tarakan, maka ada kemungkinan sumber air berasal dari cekungan sedimen yang naik ke atas dan muncul di batas cekungan. Hal ini diperkuat dengan ciri fisis air panas Biatan Bapinang yang memiliki rasa asin yang cukup kuat, yang mungkin merupakan akibat dari sumber airnya yang berasal dari sedimen atau adanya infiltrasi air laut. Indikasi ini masih perlu dikaji lebih lanjut dengan melakukan analisis kandungan kimia fluida dari manifestasi ini sehingga dapat diketahui secara lebih akurat mengenai darimana asal sumber air panas Biatan Bapinang.

Jalur Aliran Fluida

Berdasarkan peta geologi diketahui bahwa manifestasi air panas muncul pada formasi aluvial (Qa), namun singkapan yang nampak pada kolam merupakan batugamping terumbu yang menjadi salah satu litologi penyusun formasi Domaring (Tmpd). Hal ini mengindikasikan bahwa lokasi kemunculan manifestasi ini kemungkinan sudah masuk pada batas formasi Qa dan Tmpd. Kemunculan air panas pada batas formasi menunjukkan bahwa

batas formasi ini mungkin menjadi jalur preferensial bagi fluida panas untuk naik ke permukaan. Aliran air panas seringkali muncul pada kontak antar formasi batuan, terutama ketika salah satu formasi lebih permeabel daripada yang lain. Kemunculan manifestasi air panas dapat juga didukung oleh keberadaan patahan bawah permukaan, meskipun perlu penelitian lebih lanjut untuk bisa membuktikan kemungkinan ini.

Tabel 1 Karakteristik sistem panas bumi pada berbagai jenis sumber panas (disarikan berdasarkan Suryantini (2016))

Kriteria	Jenis sumber panas		
	<i>Terrestrial heat flow</i> normal	<i>Terrestrial heat flow</i> lebih tinggi dari normal	Vulkanisme/magmatisme
Kenampakan manifestasi	Sangat minim	bervariasi	Sangat signifikan
Jenis manifestasi yang umum	Mata air hangat	Mata air hangat hingga panas, geyser	Mata air panas, fumarola/solfatara, menunjukkan adanya volatil dari gunung api
Jarak dari gunung api	Jauh (cekungan sedimen atau pada zona struktur)	Bervariasi (jauh hingga ke zona <i>flank</i> gunung api)	Dekat
Aliran panas	Normal, konduktif	Sedikit lebih tinggi dari normal, konduktif	Lebih tinggi dari normal, konvektif
Gradien geotermal	Normal	Sedikit lebih tinggi dari normal	Lebih tinggi dari normal

Sumber Panas

Sumber panas dari sistem panas bumi dibagi menjadi tiga, *terrestrial heat flow* normal, *terrestrial heat flow* lebih tinggi dari normal dan vulkanisme/magmatisme seperti gunung api, *dike*, atau *cooling pluton* (Suryantini, 2016). Untuk dapat membedakan ketiga sumber panas ini dapat dilihat pada Tabel 1. Air panas Biatan Bapinang terletak di batas antara zona cekungan sedimen dan zona tinggian *basement* yang kemungkinan terjadi akibat proses tektonisme masa lampau. Tidak ada bukti vulkanisme atau sisa-sisa gunungapi di sekitar kemunculan mata air panas dengan jarak dengan gunungapi terdekat sejauh 43 kilometer. Berdasarkan deskripsi tersebut maka sumber panas kemungkinan berasal dari *terrestrial heatflow* normal yang aliran panasnya menjadi lebih tinggi daripada sekitarnya akibat pengangkatan *basement*.

5.6 Jenis Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan berbagai aspek, seperti temperatur reservoirnya (Benderitter dan Cormy, 1990; Haenel dkk., 1988; Hochstein, 1988; Muffler, 1979; Sanyal, 2005), jenis reservoirnya (DiPippo, 2016), lingkungan geologinya (Kasbani, 2009; Moeck, 2014), maupun gabungan kriteria geologi, geofisika, hidrologi, dan teknik (Goff dan Janik, 2000). Berdasarkan asosiasi lingkungan geologinya, sistem panas bumi di Indonesia dibedakan menjadi sistem vulkanik,

vulkano-tektonik dan non-vulkanik (Kasbani, 2009). Berdasarkan klasifikasi tersebut maka kemunculan manifestasi air panas Biatan Bapinang berkaitan dengan sistem non-vulkanik.

Moeck (2014) mengklasifikasikan tatanan panas bumi berdasarkan kondisi geologi yang lebih kompleks (Tabel 2). Sistem panas bumi dibagi menjadi dua sistem utama berdasarkan proses transfer panasnya, yaitu konveksi dan konduksi. Masing-masing memiliki tiga klasifikasi berdasarkan kontrol geologi dan tatanan lempeng tektonik, yaitu tipe vulkanik, plutonik dan domain ekstensional pada jenis transfer konduksi serta tipe cekungan intrakratonik, sabuk orogenik dan batuan dasar pada jenis transfer konduksi. Jika dikaitkan dengan kondisi pada daerah Biatan Bapinang yang terletak pada zona pengendapan dengan tatanan geologi yang paling jelas terlihat adalah adanya cekungan dan tinggian yang berdekatan pada tatanan tektonik tepian/pinggiran pasif (*passive margin*) dengan aktivitas tektonik yang minim maka sistem panas buminya dapat diklasifikasikan menjadi tipe cekungan intrakratonik. Klasifikasi ini juga didukung dengan indikasi kuat bahwa batuan induk berupa batuan sedimen dan indikasi sumber fluida yang berasal dari cekungan sedimen pada sub-cekungan Muara. Jika klasifikasi berdasarkan Kasbani (2009) dan Moeck (2014) digabungkan, maka jenis sistem panas bumi dari manifestasi air panas Biatan Bapinang

adalah sistem non-vulkanik tipe cekungan intrakratonik.

6 Kesimpulan

Berdasarkan seluruh analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kemunculan manifestasi air panas di Biatan Bapinang kemungkinan disebabkan oleh aliran fluida yang berasal dari cekungan sedimen yang terpanaskan pada zona pengangkatan *basement*. Lokasi manifestasi berada dekat dengan batas Formasi Domaring dan endapan aluvium, dibuktikan dengan adanya singkapan batugamping terumbu penyusun Formasi Domaring. Terdapat indikasi keberadaan sesar bawah permukaan berdasarkan data struktur geologi dan penarikan kelurusan dari data DEM yang memperlihatkan adanya struktur geologi lokal pada arah baratlaut – timurlaut yang mengarah ke manifestasi air panas. Struktur geologi dan kontak

antar litologi ini menjadi jalur preferensial bagi fluida panas untuk mencapai permukaan. Anomali bouguer yang tinggi bersesuaian dengan indikasi pengangkatan *basement* yang dapat berperan sebagai sumber panas. Berdasarkan karakteristik tersebut, sistem panas bumi di wilayah ini dapat dikategorikan sebagai sistem non-vulkanik tipe cekungan intrakratonik.

Untuk memahami lebih jauh terkait dengan sistem panas bumi yang berkaitan dengan kemunculan manifestasi air panas Biatan Bapinang ini maka penulis menyarankan dilakukannya survei lanjutan berupa survei geofisika, seperti survei seismik atau geolistrik, untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan, serta analisis isotop dan geokimia pada sampel air panas guna menentukan sumber asal dan umur fluida hidrotermal.

Tabel 2 Klasifikasi tipe sistem panas bumi berdasarkan jenis transfer panas dan lingkungan pembentukannya (modifikasi dari Moeck (2014))

Jenis transfer panas dominan	Kontrol Geologi	Tatanan lempeng tektonik sistem geologi	Tipe tatanan panas bumi	Karakteristik		
				Batuan induk	Fluida	Temperatur (°C)
Konveksi	Dapur magma di daerah vulkanik aktif	Wilayah busur vulkanik di zona subduksi Punggungan tengah samudra <i>Hotspot</i>	Tipe vulkanik	Andesit, Riolit, Basal	Fluida dari kerak bercampur dengan fluida resapan (meteorik, air laut)	70 – 320
	Magma yang mengkristal, intrusi + patahan aktif	Penurunan vulkanisme pada sabuk orogenik muda	Tipe plutonik	Sedimen granit, gabro	Air resapan dan fluida kerak	100 – 350
	Patahan aktif (kegempaan alami)	Lingkungan metamorf kompleks <i>Pull-apart basin</i> Cekungan busur belakang Retakan intrakontinental (graben)	Tipe domain ekstensional	Batuan vulkanik tersedimentasi	Bervariasi	150 – 240
Konduksi	Litofasies (ukuran butiran, mineralogi) Biofasies (kandungan fosil)	Cekungan retakan intrakontinental Cekungan pinggiran pasif	Tipe cekungan intrakratonik (hidrotermal)	Sedimen fluvial permeabilitas tinggi - rendah	Fluida cekungan	< 150
	Litofasies/biofasies + patahan/retakan	Sabuk lipatan dan patahan Cekungan tanjung	Tipe sabuk orogenik (hidrotermal)	Sedimen laut permeabilitas tinggi - rendah	Fluida resapan (mungkin juga fluida cekungan)	< 160
	Patahan/retakan	Intrusi intrakontinental pada medan yang datar	Tipe batuan dasar (<i>hot dry rock</i> petrotermal)	Batu granit dengan produksi panas radiogenic tinggi	-	150 – 320

Referensi

- Arrofi, D., Abu-Mahfouz, I.S., dan 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(1). pp. 29. <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00241-3>
- Benderitter, Y., Cormy, G., 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs, in: *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*. UNITAR, New York, pp. 59–69.
- Darman, H., 2017. The Paleogene of East Borneo and its Facies Distribution. *Berita Sedimentologi*, 37, pp. 5–13. <https://doi.org/10.51835/bsed.2017.37.1.94>
- DiPippo, R., 2016. Geology of Geothermal Regions, in: *Geothermal Power Plants*. Elsevier, pp. 3–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100879-9.00001-X>
- Escuder-Rodríguez, J.-J., DeCastro, M.-E., Saavedra-Bouza, A., Becerra, M., González-Siso, M.-I., 2022. Insights on Microbial Communities Inhabiting Non-Volcanic Hot Springs. *International Journal of Molecular Sciences* 23, pp. 12241. <https://doi.org/10.3390/ijms232012241>
- Firdaus, R., Oktaviyani, S., Hardianti, P., Kusmita, T., Indriawati, A., 2021. Identification of Subsurface Rock Structure of Non-Volcanic Geothermal Systems Based on Gravity Anomalies (Terak Village, Central Bangka Regency). *JAGI*, 5, pp. 539–543. <https://doi.org/10.30871/jagi.v5i2.3640>
- Goff, F., Janik, C.J., 2000. Geothermal systems, in: *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp. 817–834.
- Haenel, R., Rybach, L., Stegena, L., 1988. Fundamentals of Geothermics, in: *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 9–57. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2847-3_2
- Hochstein, M.P., 1988. Assessment and modelling of geothermal reservoirs (small utilization schemes). *Geothermics* 17, pp. 15–49. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(88\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0375-6505(88)90004-1)
- Hosono, T., Yamanaka, C., 2021. Origins and pathways of deeply derived carbon and fluids observed in hot spring waters from non-active volcanic fields, western Kumamoto, Japan. *Earth, Planets and Space* 73, pp. 155. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01478-1>
- Husein, S., 2017. Sedimentology and Stratigraphy of Upper Tarakan Formation, Tarakan Island, North Kalimantan, Indonesia. The 7th International Annual Engineering Seminar, Yogyakarta.
- Kasbani, K., 2009. Tipe Sistem Panas Bumi di Indonesia dan Estimasi Potensi Energinya. *Buletin Sumberdaya Geologi*, 4(3), pp. 23–30. <https://doi.org/10.47599/bsdg.v4i3.184>
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017a. Buku Potensi Panas Bumi Indonesia 2017 Jilid 1.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017b. Buku Potensi Panas Bumi Indonesia 2017 Jilid 2.
- KESDM, 2022. Peta Cekungan Sedimen Indonesia, Skala 1:5.000.000, Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Krisnabudhi, A., Gunawan, A., Putra, Y.A., Amal, A.N., Ardiansyah, F., 2020. New Insight Into Berau Sub-basin North East Borneo: Basin Evolution and Tectonostratigraphy and Their Implication to New Exploration Play Concept, Proceedings Indonesian Petroleum Association Digital Technical Conference 2020, Indonesian Petroleum Association.
- Krisnabudhi, A., Sapiie, B., Riyanto, A.M., Gunawan, A., Rizky, F.F., 2022. Mesozoic-Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Development of the Southern Great Tarakan Basin, Northeast Borneo, Indonesia. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 37(1), pp. 123–138. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.1.11>
- Maulin, H.B., 2021. Analisis Sesar Tumbuh pada Sistem Tektonik Delta Tersier Di Subcekungan Tarakan, Kalimantan Utara. *Bulletin of Geology*, 5(2), pp. 570–579.
- Mawalid, A., Mardhotilla, A., 2021. Preliminary Study: Identifying the Heat Source of Hot Spring Discovery at Non-Volcanic Region with Gravity Method. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 873, pp. 012092. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012092>
- Moeck, I.S., 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37, pp. 867–882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>

- Muffler, L.J., 1979. Assessment of geothermal resources of the United States, 1978. Geological Survey, Reston, VA (USA). Geologic Div.
- Nahli, K., Mulyana, F., Tsani, G.E., Alwan, M.A., Darajat, M.H., Hendrawan, R.N., 2016. Identifying Non-Volcanic Geothermal Potential in Amohola, Southeast Sulawesi Province, by Applying the Fault and Fracture Density (FFD) Method. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 42, pp. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012015>
- Ramotoroko, C., Thiede, A., Junge, A., Shemang, E., 2023. Geothermal Resource Mapping in Northern Botswana Inferred from Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion. Applied Sciences, 13(20), pp. 11236. <https://doi.org/10.3390/app132011236>
- Sanyal, S.K., 2005. Classification of geothermal systems—a possible scheme, in: Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University Stanford, California.
- Sobari, I., Nasution, J., 2005. Peta Anomali Bouguer Lembar Muaralesan, Kalimantan, Skala 1:250.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sukardi, Djamel, S., Supriatna, S., Santosa, S., 2011. Peta Geologi Lembar Muaralesan, Kalimantan, Skala 1:250.000, Pusat Survei Geologi.
- Suryantini, 2016. Komponen Sistem Hidrotermal - Sumber Panas (Catatan Kuliah Sistem dan Teknologi Geotermal). Institut Teknologi Bandung, Bandung. Unpublished
- Tiranda, H., Hall, R., 2021. Structural and stratigraphic development of Offshore NW Sulawesi, Indonesia. (preprints). <https://doi.org/10.31223/X5WC89>
- Umeda, K., Ninomiya, A. and Negi, T., 2009. Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114(B1). B01202. <https://doi.org/10.1029/2008JB005812>

