

IDENTIFIKASI PROSPEK PANAS BUMI RADIOGENIK MENGUNAKAN LANDSAT-8 DAN GRAVITASI DI DAERAH PERMIS

IDENTIFICATION OF RADIOGENIC GEOTHERMAL PROSPECT USING LANDSAT-8 AND GRAVITY IN PERMIS AREA

Desy Angelica Baita Putri^{1*}, Akhlaqul Karimah Harianja²

^{1,2}Teknik Geofisika Universitas Brawijaya

Received: 2020, October 31st

Accepted: 2021, March 7th

Keyword:

Gravity;

Landsat-8;

Permis;

Radiogenic Geothermal.

Correspondent Email:

angelicadesy04@student.ub.ac.id

Abstrak. Indonesia memiliki sistem panas bumi non-vulkanik yang dapat ditemukan di daerah Permis, Pulau Bangka. Diperlukan tahapan awal untuk mengetahui prospek panas bumi radiogenik dengan menggunakan analisis penginderaan jauh berdasarkan data Landsat-8 dan gravitasi. Metode Landsat-8 memanfaatkan perhitungan NDVI, NDWI, dan LST, dari hasil perhitungan tersebut didapatkan 2 lokasi yang memiliki kelembapan tinggi dan suhu permukaan yang relatif tinggi sebesar 28°C yang terletak di sekitar manifestasi air panas. Kemudian teknik rasio saluran dan komposit warna semu digunakan untuk mengetahui keberadaan beberapa mineral alterasi hidrotermal seperti OH, lempung, anatase, kovelit, serta sulfur yang dapat menunjukkan kemungkinan area *outflow*. Metode gravitasi bertujuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan daerah panas bumi dengan menganalisis pola anomali Bouguer dan derivatif dilanjutkan dengan pemodelan 2D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa manifestasi daerah Permis dipengaruhi sesar geser dengan arah Barat Laut-Tenggara. Kemudian sumber panas bumi radiogenik di daerah Permis diduga berasal dari batuan granit yang memiliki kandungan radioaktif yang dapat menghasilkan panas. Berdasarkan metode gravitasi dan citra Landsat-8 diperkirakan area prospek panas bumi daerah Permis seluas 2.309 Km² dengan sebaran ke arah timur dari manifestasi panas bumi Permis.

How to cite this article:

Putri, D.A.B. & Harianja, A.K.
(2021). Identifikasi Prospek

Abstract. Indonesia has a non-volcanic geothermal system which can be found in the Permis area, Bangka Island. An initial stage is required to determine radiogenic geothermal prospects using remote sensing analysis based on gravity and Landsat-8 data. The Landsat-8 method utilizes NDVI, NDWI, and LST

Panas Bumi Radiogenik Menggunakan Landsat-8 dan Gravitasi di Daerah Permis. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 07(01), 52-70.

© 2021 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

calculations, from the results of these calculations it is found that 2 locations have high humidity and a relatively high surface temperature of 28 °C which is located around the hot spring manifestation. Then band ratio and false-color composites were used to determine the presence of several hydrothermal alteration minerals such as OH, clay, anatase, covellite, and sulfur which could indicate possible outflow areas. Gravity method aims to identify subsurface structure of the geothermal area by analyzing Bouger anomaly pattern and its derivatives followed by 2D modeling. The results showed that the Permis area manifestations were influenced by shear faults in the Northwest-Southeast direction. Then radiogenic geothermal sources in the Permis area are thought to come from granite rocks which contain radioactive elements that can produce heat. Based on the gravity method and Landsat-8 imagery, it is estimated that the Permis geothermal prospect area is 2,309 km² with an eastward distribution of the Permis geothermal manifestations.

1. PENDAHULUAN

Sistem panas bumi di Indonesia secara umum berasosiasi dengan daerah vulkanik (Kasbani, 2009) akan tetapi Indonesia juga diketahui memiliki potensi panas bumi non-vulkanik yang tidak berkaitan secara langsung dengan proses vulkanik. Salah satunya yaitu panas bumi radiogenik yang berasal dari sumber unsur radioaktif (Setiawan, 2016).

Daerah Permis berlokasi di Kabupaten Bangka Selatan, Pulau Bangka merupakan daerah yang menyimpan potensi panas bumi radiogenik yang dapat dimanfaatkan secara optimal. Sistem panas bumi radiogenik dapat dicirikan dengan adanya batuan alterasi oleh kehadiran mineral tertentu. Batuan teralterasi dapat terbentuk akibat interaksi antara fluida dari reservoir panas bumi dengan batuan. Terdapat tiga jenis alterasi yaitu perubahan mineral, pengisian ruang dan pelarutan batuan (Browne, 1970).

Eksplorasi potensi panas bumi secara insitu memiliki beberapa kekurangan dan risiko yang tinggi pada tahap awal karena minimnya informasi dan data serta biaya yang dikeluarkan cukup besar (Witter dkk., 2019) Eksplorasi dengan penginderaan akan lebih efektif dilakukan karena dapat meminimalisir biaya dan risiko yang dapat terjadi. Penginderaan jauh dapat memberikan

informasi geologi yang dibutuhkan sebagai dasar dalam eksplorasi lanjutan dalam skala regional (Noorollahi dkk., 2005).

Oleh sebab itu, penelitian ini akan memaduserasikan data Landsat-8 dan data gravitasi yang tersedia di daerah penelitian sehingga dapat mengestimasi zona prospek panas bumi radiogenik. Data survei Landsat-8 dapat dimanfaatkan dalam mencirikan objek geologi berdasarkan kemampuan objek dalam merefleksikan dan menyerap gelombang elektromagnetik pada permukaan bumi, sehingga dapat menunjukkan mineral-mineral hasil alterasi pada permukaan bumi. Kemudian data gravitasi digunakan untuk mengidentifikasi struktur yang mengontrol sistem panas bumi seperti patahan dan sebaran batuan berdasarkan kontras densitas daerah penelitian (Huenges, 2010).

2. TINJAUAN PUSTAKA

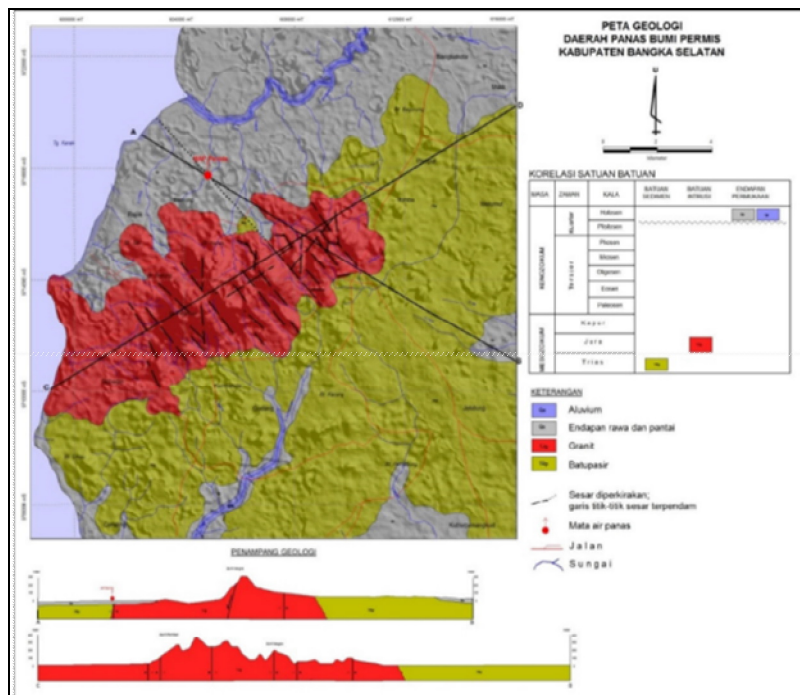
2.1. Geologi Regional

Pulau Bangka merupakan area yang termasuk ke dalam sabuk timah Asia Tenggara dan merupakan bagian luar dari cekungan busur belakang Sumatra (Padmawidjaja, 2013).

Berdasarkan PSDG (2015) Gambar 1 merupakan peta geologi daerah Permis yang tersusun dari batuan dengan umur paling tua

hingga umur yang paling muda yaitu Satuan Batupasir (TRp) berumur Trias yang termasuk kedalam Formasi Tanjung Genting, Satuan Granit Permisan (TJg) berumur Jura, Endapan Rawa dan Pantai (Qs) serta Aluvium (Qa) tergolong umur Kuartar. Satuan batupasir ini didominasi oleh batupasir yang merupakan *quartz arenite* dan pada beberapa area ditemukan bongkahan meta batupasir (Pettijohn dkk., 1975). Batuan tertua pada area ini adalah kompleks Pemali dengan batuan berupa filit, sekis dengan sisipan kuarsit, dan diterobos oleh Granit Klabat (Margono, 1995).

Satuan granit permisan umumnya memiliki tekstur sedang dan granit tekstur kasar. Granit dengan tekstur sedang mempunyai karakteristik dengan warna putih hingga abu-abu, bentuk anhedral, dan terdiri dari mineral-mineral yaitu kuarsa, biotit, muskovit serta plagioklas. Batu granit ini tergolong dalam batu granit plutonik. Satuan granit pada daerah penelitian termasuk ke dalam Formasi Granit Klabat dengan umur Trias yang mengintrusi satuan batu pasir Tanjung Genting (Margono, 1995).



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Permis (PSDG, 2015).

Terdapat beberapa sesar dan lipatan di area Bangka Selatan. Sesar pada daerah penelitian ditemukan pada satuan batu granit pada Formasi Granit Klabat yang memiliki arah timur laut-barat daya, timur laut-tenggara, serta utara-selatan. Sesar yang ditemukan adalah sesar normal, sesar naik dan sesar geser. Sedangkan lipatan ditemukan pada satuan batupasir Formasi Tanjung Genting (Franto, 2015). Sesar geser dengan arah barat laut-tenggara

diperkirakan sebagai pengontrol aktivitas fluida dalam sistem panas bumi radiogenik. Pada bagian timur laut area Permis terdapat manifestasi air panas di sekitar sesar geser (Purwoto dkk., 2015).

Berdasarkan perbandingan komposisi alkali feldspar, kuarsa, dan plagioklas dalam segitiga modifikasi khusus batuan beku plutonik. Diperkirakan sistem panas bumi di daerah Permis berkaitan dengan batolit granit klabat

yang memiliki umur Trias Akhir hingga Jura Awal. Area granit memiliki kandungan thorium yang diperkirakan dapat menghasilkan panas yang cukup sebagai sumber panas di sistem panas bumi radiogenik daerah Permis (Purwoto dkk., 2015).

2.2. Landsat-8

Dalam dua dekade terakhir, teknologi penginderaan jauh spektral telah meningkat secara signifikan (Sabins, 1999). Penginderaan jauh data citra telah menjadi alat yang berguna dalam memberikan informasi berbeda seperti litologi, vegetasi, anomali termal, kelurusan, alterasi hidrotermal, dll. berdasarkan komposisi permukaan bumi dan penyerapan energi oleh batuan (Frutuoso, 2015).

Citra Landsat-8 menyediakan akuisisi berkelanjutan dari data multispektral resolusi tinggi permukaan bumi secara global. Pada studi ini penggunaan citra Landsat-8 difokuskan pada analisis spektral dengan mengolah dan menginterpretasikan data spektral yang terdapat pada masing-masing saluran. Jenis data citra Landsat-8 (OLI/TIRS) yang digunakan meliputi saluran multispektral (1-7) dan saluran termal (10 dan 11). Untuk mengetahui keberadaan sumber manifestasi area Permis, kedua jenis saluran tersebut digunakan. Saluran multispektral berperan untuk mengetahui *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Normalized Difference Water Index* (NDWI).

$$NDVI = \frac{\text{Band5(NIR)} - \text{Band4(Red)}}{\text{Band5(NIR)} + \text{Band4(Red)}} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{\text{Band3(Green)} - \text{Band5(NIR)}}{\text{Band3(Green)} + \text{Band5(NIR)}} \quad (2)$$

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) adalah ukuran kepadatan vegetasi pada suatu area (USGS, 2015). Nilai NDVI ini berkisar -1 sampai 1 dimana nilai mendekati 1 menunjukkan vegetasi yang semakin padat dan

“hijau”, sedangkan mendekati -1 kondisi vegetasi semakin jarang (Drisya dkk., 2018). *Normalized Difference Water Index* (NDWI) adalah ukuran kejenuhan air atau kelembapan tanah pada suatu area (Gao, 1996). Nilai NDWI berkisar -1 hingga 1. Nilai mendekati 1 menunjukkan tingkat kejenuhan air yang tinggi pada area tersebut sedangkan nilai mendekati -1 artinya area tersebut semakin kering atau kandungan air semakin rendah.

Untuk mendapatkan nilai akhir *Land Surface Temperature* (LST), perlu dilakukan pengolahan data band termal untuk mendapatkan nilai *Top of Atmosphere* (TOA) *Radiance*, *Brightness Temperature* (BT), dan *Land Surface Emissivity* (LSE) (Anandababu dkk., 2018).

Perhitungan dimulai dengan menghitung TOA ($L\lambda$) untuk mendapatkan citra dari permukaan atmosfer dengan persamaan:

$$L\lambda \text{ (Radiance/W)} = ML \times Q_{cal} + AL \quad (3)$$

Dimana, ML adalah faktor pengali saluran, Q_{cal} merupakan citra saluran, AL adalah faktor penjumlahan saluran, dan $L\lambda$ adalah nilai TOA.

Kemudian dilanjutkan dengan konversi citra menjadi suhu pada sensor dengan menggunakan:

$$BT = K_2 / \ln(K_1 / L\lambda + 1) - 273,15 \quad (4)$$

Dimana, BT adalah suhu berdasarkan kecerahan piksel, K_1 dan K_2 adalah konstanta dari metadata Landsat-8 sementara -273,15 adalah nilai untuk konversi satuan suhu Kelvin menjadi Celcius.

Setelah itu dilakukan perhitungan fraksi vegetasi dengan persamaan sebagai berikut:

$$PV = \left[\frac{NVDI - NDVI_{min}}{NDVI_{maks} + NDVI_{min}} \right]^2 \quad (5)$$

NDVI merupakan indeks vegetasi, $NDVI_{min}$ adalah nilai minimum indeks vegetasi dan

$NDVI_{maks}$ adalah nilai maksimum indeks vegetasi.

Selanjutnya dilakukan perhitungan emisivitas pada permukaan tanah dengan cara:

$$LSE = 0,004 \times PV + 0.986 \quad (6)$$

Dimana, LSE atau E adalah nilai emisivitas permukaan tanah, dan PV adalah fraksi vegetasi.

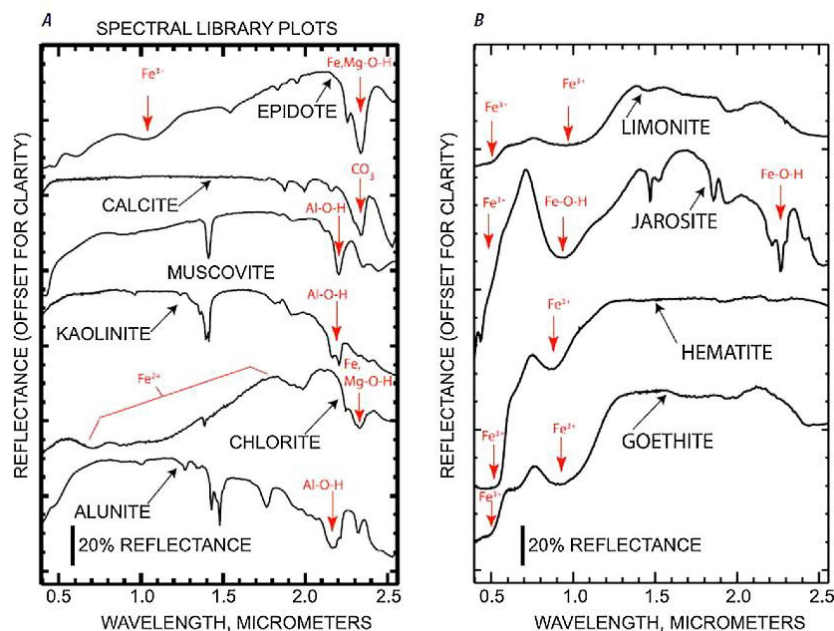
Terakhir dapat dilakukan perhitungan suhu pada permukaan tanah dengan menggunakan persamaan 7:

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\frac{BT}{14380} \right) \times \ln(E)} \quad (7)$$

Dengan, LST adalah suhu permukaan tanah, BT adalah suhu pada sensor dan E adalah emisivitas (Avdan & Jovanovska, 2016).

Mineral hasil alterasi hidrotermal akan memberikan respon panjang gelombang yang unik antar mineral pada survei Landsat-8,

sehingga dapat diketahui keberadaan mineral alterasi. Contoh reflektansi beberapa mineral alterasi terdapat pada Gambar 2. Kehadiran alterasi hidrotermal dapat diketahui dengan mengambil beberapa kombinasi saluran yang memiliki nilai reflektansi tinggi terhadap mineral-mineral alterasi hidrotermal. Saluran 4 (0.636 – 0.673 μm), saluran 2 (0.452 – 0.512 μm), saluran 5 (0.851 – 0.879 μm), saluran 6 (1.566 – 1.651 μm), saluran 7 (2.107 – 2.294 μm), dan saluran 10 (10.60 – 11.19 μm) digunakan dalam menentukan persebaran mineral alterasi hidrotermal (Pour & Hashim, 2015). Kombinasi dari beberapa saluran tersebut dalam saluran RGB sering juga disebut sebagai komposit warna semu. Kombinasi saluran paling kontras untuk mengamati fitur litologi dan penentuan area yang mungkin teralterasi harus mencakup satu pita yang terlihat (2, 3 atau 4), satu NIR (5) dan satu pita SWIR (6 atau 7) (USGS, 2015).



Gambar 2. Contoh kemampuan mineral dalam memantulkan gelombang (Ali & Pour, 2014).

Rasio saluran atau *band ratio* adalah metode dimana satu saluran dengan pantulan

tinggi dibagi dengan yang lain pita pantulan rendah untuk memperjelas target dan

meminimalkan fitur yang tak perlu (Ahmed, 2020). Beberapa penelitian sebelumnya telah berhasil menemukan beberapa rasio saluran yang dapat menguatkan keberadaan mineral tertentu dalam citra. Tabel 1 menunjukkan hasil dari rasio saluran.

Tabel 1. Rasio Saluran dan Perkiraan Hasil (Ahmed, 2020).

| Rasio Saluran | Hasil |
|---------------|---|
| 4/2 | Oksida besi pada piksel cerah. |
| 6/7 | Mineral lempung seperti ilit, kaolinit dan montmorillonite pada piksel cerah. |
| 7/5 | Mineral teralterasi dan kehadiran mineral lempung pada piksel cerah. |
| 6/5 | Pembedaan mineral ferrous seperti geotit dan hematite pada warna cerah. |
| 2/1 | Kehadiran sulfur, anatase dan mineral kovelit pada piksel cerah. |

2.3. Metode Gravitasi

Metode gravitasi digunakan untuk mengetahui perbedaan densitas dan sebarannya pada permukaan (Huenges, 2010) dan dapat memetakan informasi struktur geologi bawah permukaan yang berkembang pada daerah penelitian.

Metode gravitasi didasarkan pada Hukum Newton tentang gravitasi yang diakibatkan oleh pengaruh massa benda yaitu gaya tarik menarik antara massa benda satu dengan massa benda kedua serta jarak antara keduanya, Hukum Gravitasi Newton dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Telford dkk., 1990).

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} r_1 \quad (8)$$

Percepatan benda m_1 terhadap benda m_2 dapat ditemukan dengan membagi gaya (F) dengan m_2 sehingga didapatkan persamaan percepatan gravitasi yang ditunjukkan pada persamaan 9.

$$g = \frac{\gamma m_1}{r^2} r_1 \quad (9)$$

Jika m_1 adalah massa dari bumi dan r adalah jari jari bumi maka dinyatakan secara matematis pada persamaan 10.

$$g = \frac{\gamma M_e}{R_e^2} r_1 \quad (10)$$

Sehingga anomali yang disebabkan oleh variasi densitas lokal dari bidang lain disekitarnya melibatkan serangkaian koreksi terhadap gravitasi yang diamati (Blakely, 1996). Dikarenakan nilai yang diperoleh pada data dipengaruhi oleh beberapa faktor, maka diperlukan koreksi dan analisis untuk menghilangkan faktor-faktor di luar nilai sebenarnya, antara lain:

2.3.1. Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer digunakan dalam perhitungan massa batuan yang terdapat di antara titik pengukuran dengan permukaan air laut. Koreksi Bouguer didapatkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Reynolds, 2011).

$$g_{BC} = 2\pi\gamma\rho h = 0,04192\rho h \quad (11)$$

dengan γ adalah konstanta gravitasi, ρ adalah densitas batuan dan h adalah ketinggian dalam meter.

2.3.2. Koreksi Medan

Koreksi medan dilakukan untuk mengurangi pengaruh topografi pada permukaan bumi yang bervariasi. Topografi ini menyebabkan adanya gaya tarik tambahan

akibat massa batuan pada hasil pengukuran gravitasi.

2.3.3. Analisis First Horizontal Derivative

Analisis yang berdasarkan turunan pertama dari data horizontal berupa grafik anomali dan peta *First Horizontal Derivative* (FHD). Berdasarkan (Setyawan dkk., 2015) pada struktur sekunder seperti patahan atau sesar dapat diidentifikasi pada nilai maksimum dari nilai *First Horizontal Derivative* (FHD).

2.3.4. Analisis Second Vertical Derivative

Analisis yang berdasarkan turunan kedua ini didapatkan grafik dan peta anomali *Second Vertical Derivative* (SVD). Peta SVD diperoleh untuk mengetahui jenis struktur sekunder daerah penelitian berdasarkan nilai anomalinnya. Struktur sekunder terletak di antara kurva tertutup dari nilai maksimum dan nilai minimum pada peta SVD (Zeng dkk., 1994).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data citra satelit. Data Landsat-8 didapatkan dari USGS yang direkam pada tanggal 9 Februari 2020 pukul 03.05.31 WIB dengan tutupan awan pada daratan 13%. Pada penelitian ini pengolahan dan interpretasi data citra Landsat-8 menggunakan bantuan perangkat lunak *Envi 5.3* dan *QGIS*. Pengolahan citra Landsat-8 dimulai dengan koreksi radiometrik untuk mengubah nilai digital (DN) menjadi nilai reflektansi *Top of Atmosphere* (TOA).

Selanjutnya dilakukan koreksi derau atmosfer dengan algoritma *Black Subtraction* untuk mempertajam citra dan menghilangkan derau atmosfer yang menyamarkan tangkapan pada sensor. Kemudian dilanjutkan dengan menghitung nilai NDVI untuk mendapatkan nilai tutupan vegetasi dan lokasi badan air serta untuk perhitungan LST akan didapatkan sebaran suhu permukaan tanah dengan algoritma yang termuat dalam (Avdan & Jovanovska, 2016).

Tahap berikutnya dilakukan proses kombinasi citra atau komposit citra hasil rasio saluran untuk mendapatkan gambaran alterasi permukaan yang lebih baik. Kombinasi saluran dan citra komposit semu yang digunakan berdasarkan penelitian (Ahmed, 2020) yang telah menunjukkan adanya keterkaitan antara citra komposit warna semu dan rasio saluran dengan aktivitas alterasi hidrotermal.

Kemudian pengambilan data gravitasi diperoleh dari *TOPEX* berupa data sekunder. Lalu dilakukan koreksi pada data sekunder yang bertujuan untuk mereduksi pengaruh di luar sumber anomali. Pemisahan anomali gravitasi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan analisis spektrum. Analisis spektrum digunakan dalam mengestimasi kedalaman anomali gravitasi yang bervariasi terhadap posisi x bawah permukaan (Widianto, 2008). Analisis spektrum data gravitasi dilakukan pada peta Anomali Bouguer Lengkap (CBA) karena anomali gravitasi $\Delta g(x)$ bervariasi terhadap posisi x di sepanjang profil. Pada analisis spektrum digunakan metode Transformasi Fourier untuk mengonversikan domain waktu menjadi fungsi dalam frekuensi (Blakely, 1996) dan grafik spektrum $\ln(\text{power})$ dengan gelombang k menunjukkan estimasi kedalaman anomali medan gravitasi.

Hasil yang didapatkan berupa anomali Bouguer masih terdapat pengaruh dari anomali regional yaitu pengaruh benda anomali dalam dan anomali lokal akibat benda-benda anomali lokal. Pemisahan anomali digunakan untuk mengetahui anomali yang disebabkan benda-benda anomali dangkal di kerak bumi. Pemisahan dilakukan dengan filter Butterworth untuk memisahkan nilai pada frekuensi rendah dan panjang gelombang besar sebagai anomali regional. Selanjutnya dilakukan analisis derivatif yang terdiri dari analisis *First Horizontal Derivative* dan *Second Vertical Derivative* untuk mengetahui karakteristik dan memperkirakan

struktur geologi yang mempengaruhi daerah penelitian (Hafidah dkk., 2019).

Kemudian dilanjutkan dengan pemodelan kedepan 2D untuk menunjukkan bentuk bawah permukaan dan struktur yang terdapat pada area penelitian. Penentuan struktur geologi juga dapat menggunakan data geologi dan data *Digital Elevation Model* (DEM) didapatkan dari DEM Nasional. Tahapan terakhir yaitu dengan menganalisis dan mengintegrasikan data gravitasi serta Landsat-8 untuk memberikan gambaran sebaran manifestasi, zona prospek sistem panas bumi daerah penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Landsat-8

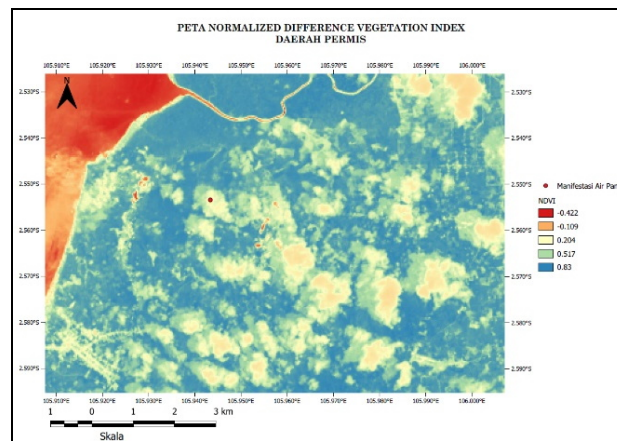
Berdasarkan peta NDVI daerah penelitian didominasi oleh area dengan kerapatan vegetasi tinggi dengan nilai NDVI sebesar 0.5-0.83. Sedangkan nilai mendekati 0 diperkirakan merupakan tutupan awan. Nilai -0.109 pada sebelah barat area merupakan air laut. Nilai minimum terdapat pada daerah barat daya yang masih daratan pulau Belitung. Nilai minimum ini menunjukkan tingkat vegetasi yang minimum pada area tersebut. Peta NDWI menunjukkan mayoritas daerah penelitian menunjukkan area dengan kelembapan relatif rendah dengan nilai NDWI -0.7301 sampai -0.416. Nilai NDWI -0.102 diperkirakan merupakan tutupan awan. Nilai NDWI maksimum berada pada bagian barat yang merupakan daerah lautan dan dua area pada barat laut bagian daratan Pulau Bangka dengan NDWI mencapai 0.526 yang menunjukkan area tersebut merupakan area dengan kelembapan cukup tinggi atau dapat pula menjadi badan air.

Peta sebaran suhu permukaan tanah menunjukkan sebagian besar area penelitian memiliki suhu sebesar 22.8°C. Sementara nilai suhu yang rendah untuk daerah tropis sebesar 6.98°C sampai 17.6°C diperkirakan merupakan

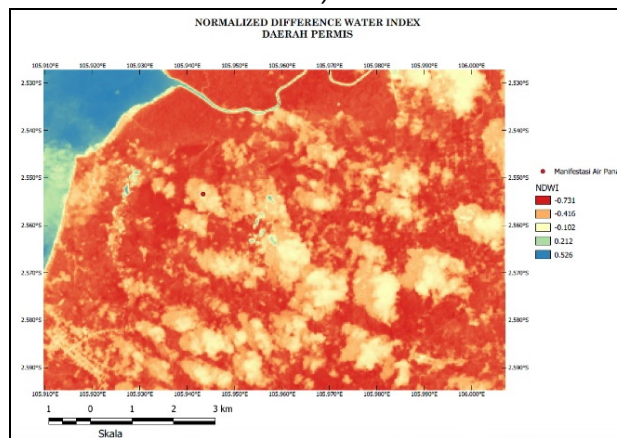
suhu yang terpengaruh oleh tutupan awan. Sementara suhu maksimum sebesar 28.1°C tersebar pada beberapa titik pada area penelitian. Suhu maksimum ini dapat terjadi pada daerah pemukiman penduduk dan dapat pula terkait dengan aktivitas sistem panas bumi Permis. Daerah dengan suhu maksimal ditemukan pula pada daerah sekitar nilai NDWI maksimum.

Peta NDVI, NDWI dan LST yang terlihat pada Gambar 3 menunjukkan adanya daerah dengan vegetasi rendah serta kelembapan tinggi dan suhu relatif tinggi pada dua area pada daerah potensi panas bumi radiogenik Permis. Kedua area tersebut berdekatan dengan manifestasi air panas Permis. Area ini dapat menunjukkan adanya aktivitas hidrotermal pada area tersebut yang dapat berhubungan dengan sistem panas bumi Permis. Manifestasi air panas Permis tidak teridentifikasi dengan baik akibat tutupan awan.

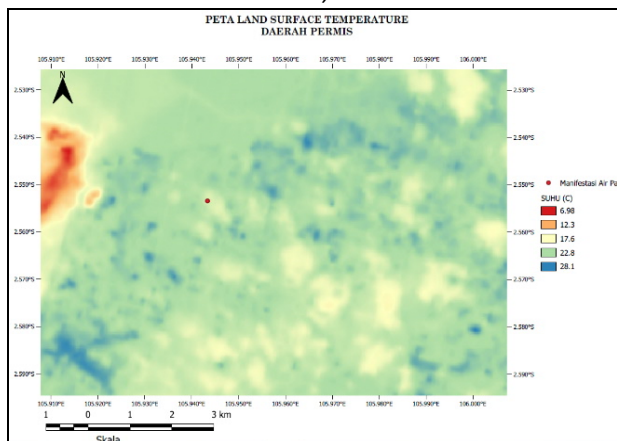
Berdasarkan hasil rasio dari saluran atau pita citra terdapat dua area utama yang didapati konsentrasi mineral alterasi hidrotermal dan hampir keseluruhan rasio menunjukkan kecenderungan yang sama yang dapat dilihat pada Gambar 4. Kotak putih merupakan area perkiraan konsentrasi mineral. Rasio 4/2 menunjukkan adanya kandungan mineral oksida besi pada daerah Permis. Rasio 2/1 menunjukkan adanya sulfur, anatase dan mineral kovelit. Kemudian pada rasio 6/5 yang memiliki kemampuan menunjukkan batas antar mineral ferrous. Pada rasio 6/7 menunjukkan adanya mineral lempung seperti ilit, kaolinit, dan montmorillonit pada daerah Permis. Rasio 7/5 menunjukkan adanya batuan teralterasi dengan kehadiran mineral lempung. Pada rasio 6/5 tidak terlihat adanya piksel yang menonjol sebagai anomali. Hal ini dapat disebabkan minimnya kandungan mineral ferrous ataupun mineral ferrous yang terdapat pada area permis homogen.



a)

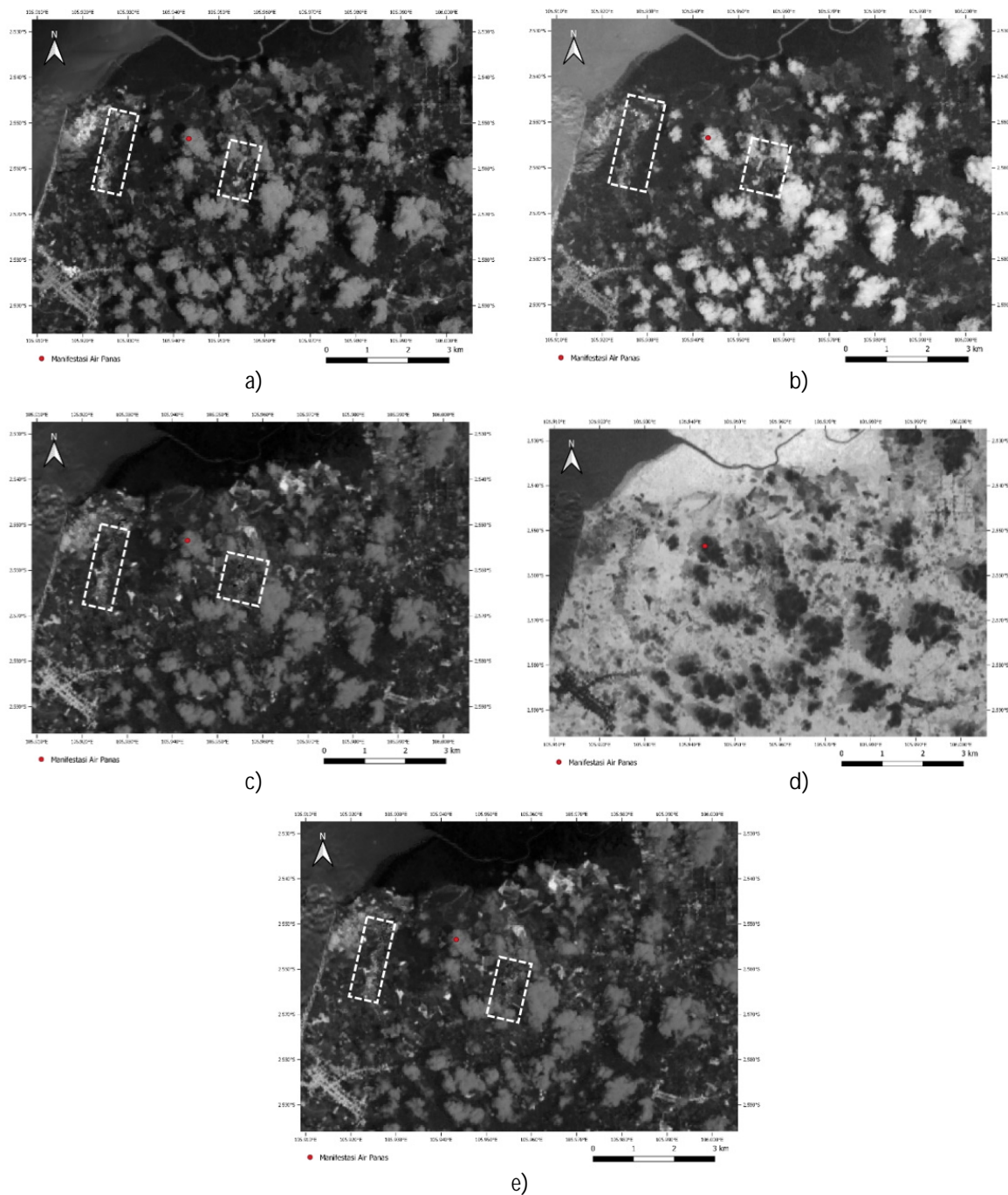


b)



c)

Gambar 3. (a) Peta NDVI, (b) Peta NDWI dan (c) Peta Suhu Permukaan Tanah (LST).



Gambar 4. (a) Peta Rasio 4/2 Daerah Permis (b) Peta Rasio 2/1 Daerah Permis (c) Peta Rasio 6/7 Daerah Permis (d) Peta Rasio 6/5 Daerah Permis (e) Peta Rasio 7/5 Daerah Permis dengan kotak putih merupakan area perkiraan konsentrasi mineral.

Dapat dilihat pada Gambar 5 peta komposit sabin menunjukkan konsentrasi mineral alterasi pada dua area yaitu timur laut dan tenggara dari air panas permis. Peta komposit Kaufman, Gonzales, Ali dan Pour juga menunjukkan kecenderungan yang sama.

Kedua area alterasi tersebut telah ditunjukkan oleh rasio saluran. Pada rasio saluran kontras antara mineral atau batuan teralterasi tidak terlalu terlihat, sedangkan dengan peta komposit dari rasio saluran area konsentrasi mineral teralterasi terlihat kontras dengan

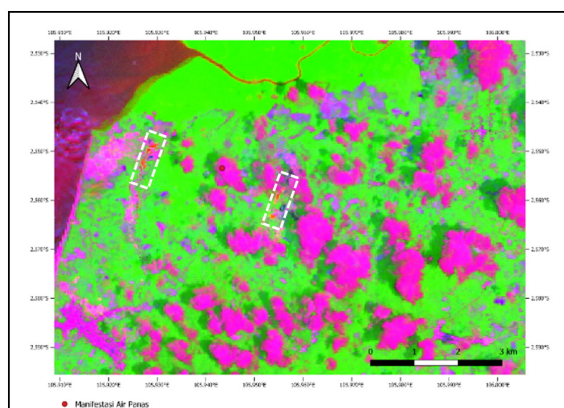
lingkungan sekitarnya termasuk awan dan air laut.

Pada komposit Sabin serta komposit Ali dan Pour menunjukkan warna hijau sebagai vegetasi dan ungu sebagai awan. Sementara warna merah menunjukkan mineral alterasi. Warna merah yang kontras menunjukkan rasio 4/2 yang dominan sebagai saluran merah dan mengindikasikan tingginya kandungan oksida besi sebagai mineral teralterasi hidrotermal pada area Permis. Pada peta komposit Gonzales terlihat warna biru mendominasi yang menunjukkan tingginya kandungan sulfur, anatase dan kovelit yang ditunjukkan rasio 2/1 yang kuat. Sedangkan pada peta komposit Kauffman terlihat terdapat dua warna dominan berbeda pada kedua area alterasi, biru pada timur laut air panas permis dan pada arah tenggara didominasi warna ungu. Baik warna biru dan ungu menunjukkan rasio 6/7 yang kuat dan mengindikasikan kandungan lempung yang tinggi pada kedua area. Sedangkan warna ungu pada bagian tenggara menunjukkan rasio 7/5 yang juga kuat. Rasio 7/5 menunjukkan kehadiran mineral lempung pada batuan yang telah teralterasi. Kedua area teralterasi tersebut berada disekitar sesar yang berarah timur laut-

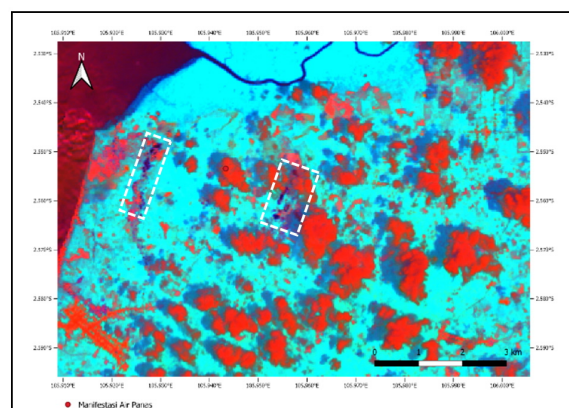
tenggara dan juga dibatasi oleh manifestasi air panas Permis.

Berdasarkan data NDWI, NDVI dan LST kedua area tersebut merupakan daerah lembap dengan suhu relatif lebih tinggi dari daerah sekitarnya dan minim vegetasi. Berdasarkan analisa Landsat-8 baik dengan rasio saluran maupun komposit warna semu menunjukkan karakter yang serupa. Area potensi panas bumi teralterasi dengan kehadiran oksida besi, lempung dan sulfur. Namun hal ini perlu penelitian lebih lanjut dengan melakukan penelitian secara insitu, karena mineral oksida besi dan mineral lempung merupakan produk hasil lapukan.

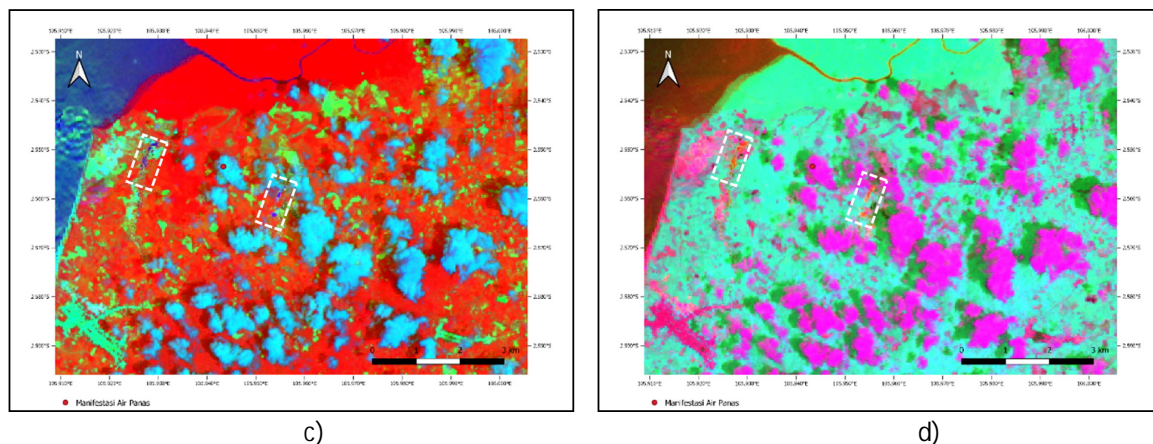
Pada penelitian yang dilakukan oleh (Ahmed, 2020) pada area panas bumi Manda-Inakir, Djibouti dengan teknik rasio saluran didapatkan adanya reflektansi yang minim dari rasio saluran 4/2 yang mengindikasikan minimnya keberadaan mineral oksida besi. Sementara dengan rasio saluran lainnya kehadiran mineral dapat teridentifikasi dengan cukup baik. Sementara dengan metode rasio saluran area Permis menunjukkan minimnya mineral ferrous yang hadir, sedangkan rasio lainnya dapat menunjukkan adanya kehadiran mineral berdasarkan



a)



b)



Gambar 5. (a) Peta Komposit Rasio Sabin Daerah Permis (b) Peta Rasio Kauffman Daerah Permis (c) Peta Rasio Gonzales Daerah Permis (d) Peta Rasio Ali Dan Pour Daerah Permis.

kecerahan pikselnya.

Dengan teknik komposit warna semu (Ahmed, 2020) menggunakan komposit berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Ali & Pour, 2014), (Sabins, 1999), (Gonzalez dkk., 2019), dan (Kaufman, 1988) yang telah melalui proses verifikasi lapangan untuk menunjukkan keterkaitan reflektansi oleh rasio saluran dan komposit warna semu terhadap kehadiran mineral teralterasi hidrotermal pada area penelitian.

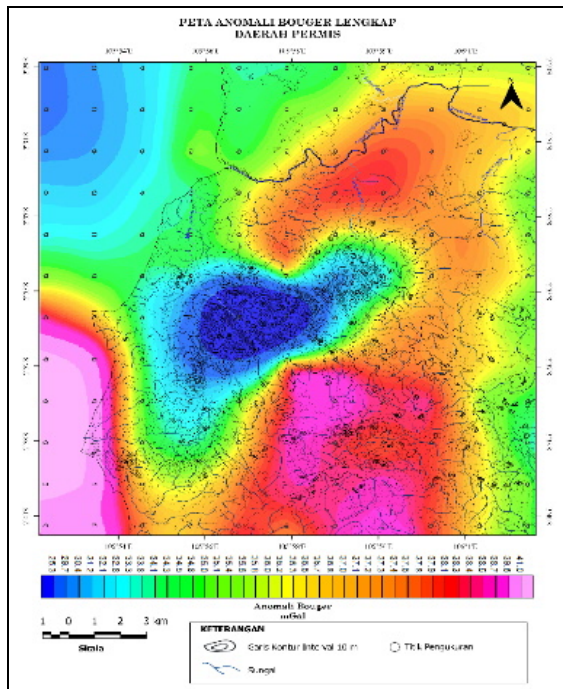
Pada lapangan Manda-Inakir ditemukan penggunaan komposit warna semu dapat digunakan untuk studi awal eksplorasi karena mampu menunjukkan perkiraan lokasi mineral teralterasi sebagai manifestasi permukaan yang dapat digunakan sebagai data pendukung pada tahap berikutnya. Pada area Permis kondisi hampir sama dapat ditemukan dimana dengan menggunakan rasio saluran dan komposit warna semu dari rasio saluran dapat menunjukkan perkiraan area yang menjadi konsentrasi keberadaan area teralterasi.

4.2. Metode Gravitasi

Tujuan dari survei gravitasi adalah untuk menemukan dan mendeskripsikan struktur bawah permukaan dari efek gravitasi yang disebabkan oleh anomali densitas struktur (Lowrie, 2007). Berdasarkan hasil pengolahan

didapatkan distribusi nilai dan peta Anomali Bouguer Lengkap yang ditunjukkan pada Gambar 6 dengan menggunakan densitas rata-rata 2.67 g/cm^3 (Blakely, 1996) memiliki rentang nilai anomali sebesar 25.3 mGal sampai 41.0 mGal. Anomali tinggi pada daerah penelitian memiliki nilai sebesar 36.2 mGal hingga 41.0 mGal yang digambarkan dengan warna kuning hingga merah muda yang terletak di bagian barat daya, selatan dan timur laut daerah penelitian.

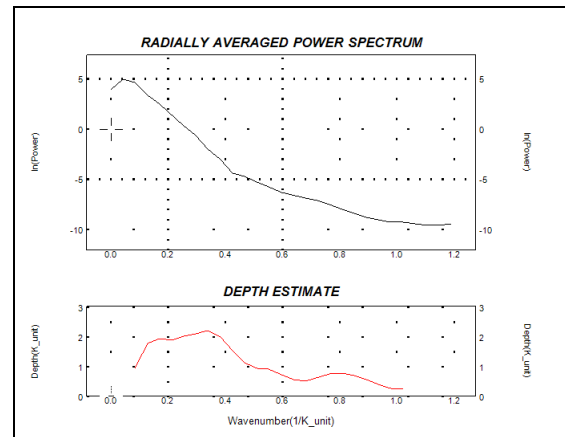
Nilai anomali Bouguer tinggi pada daerah ini diperkirakan akibat batuan dengan rapat massa yang lebih tinggi dibandingkan sekitarnya yang diperkirakan terdiri dari batuan sedimen berupa batupasir pada Formasi Tanjung Genting berumur Trias. Kemudian anomali rendah pada daerah penelitian dengan nilai anomali sebesar 25.3 mGal sampai 36.2 mGal terletak di tengah hingga bagian barat, barat laut dan utara peta. Berdasarkan (Huenges, 2010) anomali gravitasi rendah dapat disebabkan oleh beberapa hal yang memiliki implikasi yang signifikan untuk eksplorasi panas bumi. Densitas yang lebih rendah dapat disebabkan oleh intrusi felsik seperti granit, badan magma, porositas yang relatif tinggi, atau bagian batuan yang sangat retak. Mineral alterasi yang dihasilkan oleh sirkulasi air panas juga dapat menyebabkan anomali densitas rendah.



Gambar 6. Gabungan peta Anomali Bouguer Lengkap dan peta kontur topografi daerah Permis.

Anomali rendah daerah penelitian diasosiasikan sebagai pengaruh dominasi medan gravitasi batuan intrusi granit dari Granit Klabat dengan umur Trias Akhir yang memiliki karakteristik batuan kurang kompak dikarenakan adanya struktur berupa sesar atau rekahan pada lapisan batuan daerah tersebut dan menurut penelitian oleh (Padmawidjaja, 2013) di daerah Bangka Selatan anomali rendah merupakan terobosan Granit Klabat.

Pemisahan anomali gravitasi dilakukan berdasarkan analisis spektrum berupa grafik $\ln(\text{Power})$ dengan bilangan gelombang (k) yang digambarkan pada Gambar 7. Berdasarkan grafik tersebut didapatkan 2 jenis grafik yaitu grafik *depth estimate* untuk memperkirakan kedalaman maksimum pada daerah penelitian adalah 2000 meter dan didapatkan batas untuk *filtering* bernilai 0.4 rad/km.

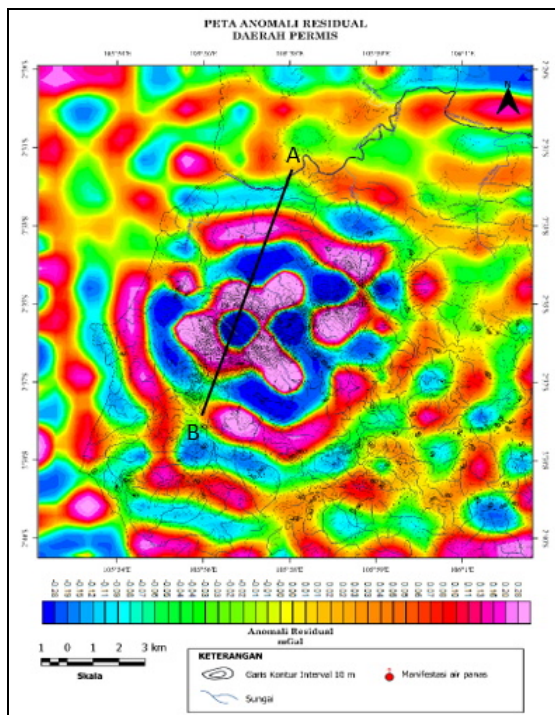


Gambar 7. Grafik analisis spektrum $\ln(\text{Power})$ dengan bilangan gelombang k (Gambar atas) dan bilangan gelombang k dengan kedalaman (gambar bawah).

Selanjutnya didapatkan anomali residual yang merupakan gambaran dari struktur-struktur yang relatif dekat permukaan. Berdasarkan peta anomali residual, daerah dengan nilai anomali tinggi berada pada daerah tengah dan menyebar pada daerah penelitian dengan rentang nilai anomali sebesar 0 mGal sampai 0,28 mGal diasosiasikan dengan warna kuning hingga merah muda.

Anomali rendah memiliki persebaran pada daerah tengah dan juga menyebar pada daerah penelitian. Nilai anomali ini berkisar antara -0.28 mGal sampai dengan 0 mGal yang digambarkan dengan warna hijau hingga biru. Kedua anomali yang berdekatan tersebut diduga membentuk struktur-struktur yang mempengaruhi keadaan geologi daerah penelitian seperti diperlihatkan pada Gambar 8.

Berdasarkan korelasi analisis derivatif dengan analisis struktur pada geologi regional diperkirakan terdapat 1 struktur utama dan 8 struktur sekunder dengan analisa patahan yang



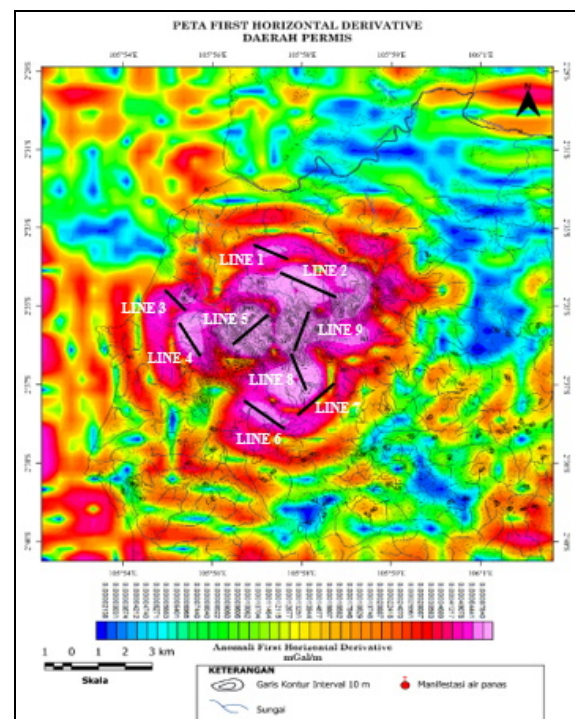
Gambar 8. Gabungan Peta Residual dengan Peta Kontur Daerah Permis dan AB adalah lintasan yang digunakan pada model 2D.

terletak pada nilai maksimum dari nilai FHD yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan berdasarkan grafik kurva tertutup dari nilai minimum dan maksimum dari peta SVD yang terdapat pada Gambar 10.

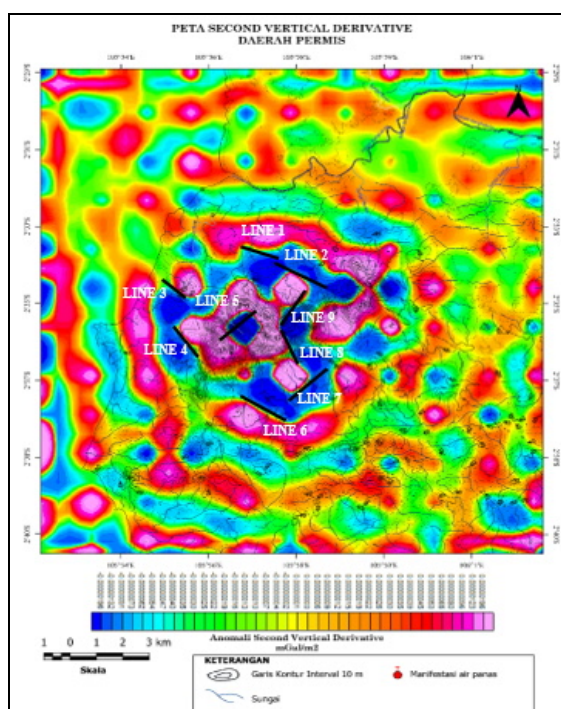
Menurut (Sarkowi, 2010) Berdasarkan hasil sayatan nilai SVD, jenis-jenis patahan dapat dijelaskan pada Gambar 11 dan Tabel 2 yang menghasilkan tiga jenis sesar yaitu pada *line 1*, *line 2*, *line 3*, *line 4*, *line 6* didapatkan indikasi sesar geser dengan nilai $|SVD|_{Maks} = |SVD|_{Min}$. Pada *line 5* dan *line 9* didapatkan indikasi sesar naik dengan nilai $|SVD|_{Maks} < |SVD|_{Min}$, dan pada *line 7* serta *line 8* didapatkan sesar turun dengan nilai $|SVD|_{Maks} > |SVD|_{Min}$.

Tabel 2. Analisis struktur peta *Second Vertical Derivative*.

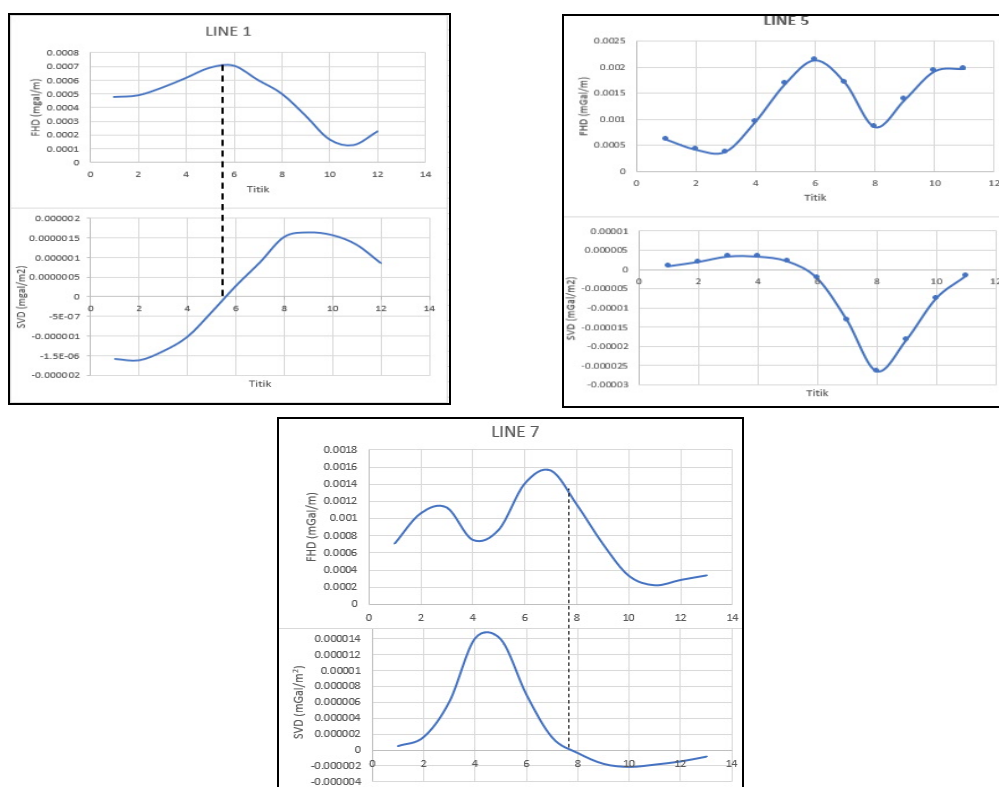
| Line | SVD Min | SVD Maks | Jenis Sesar |
|------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 0.0000015 | 0.0000015 | Geser |
| 2 | 0.000004 | 0.000004 | Geser |
| 3 | 0.000003 | 0.000003 | Geser |
| 4 | 0.0000025 | 0.0000025 | Geser |
| 5 | 0.000025 | 0.000005 | Naik |
| 6 | 0.000004 | 0.0000045 | Geser |
| 7 | 0.000002 | 0.000014 | Turun |
| 8 | 0.000002 | 0.000006 | Turun |
| 9 | 0.000007 | 0.000003 | Naik |



Gambar 9. Gabungan peta *First Horizontal Derivative* dan peta kontur Daerah Permis.



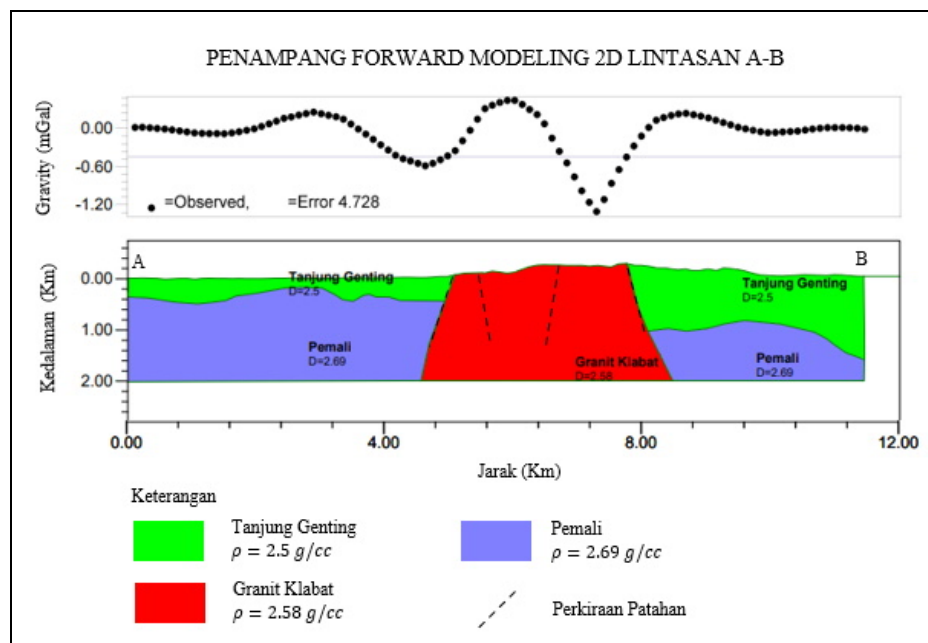
Gambar 10. Gabungan Peta *Second Vertical Derivative* dan Peta Kontur Daerah Permis.



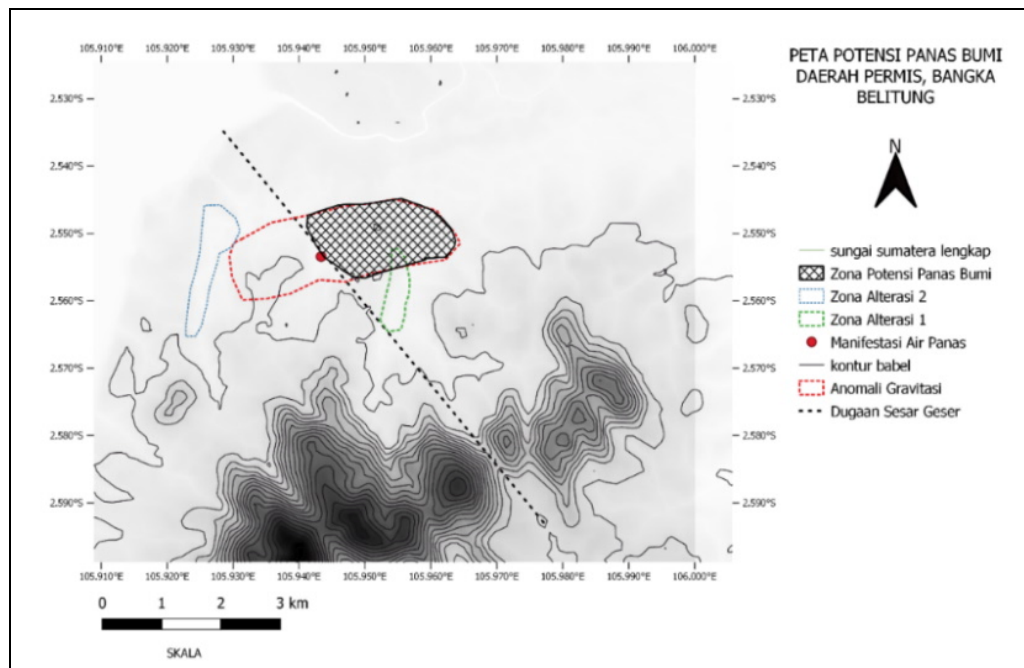
Gambar 11. Grafik profil *line* yang menunjukkan hubungan indikasi patahan (garis hitam putus-putus) berdasarkan anomali FHD dan anomali SVD.

Diketahui bahwa pada *line* 1 merupakan sesar mendatar dengan arah tenggara-barat laut pada intrusi batuan Granit Klabat yang memiliki hubungan dengan manifestasi air panas daerah Permis. Hasil pemodelan 2D pada penampang AB diilustrasikan pada Gambar 12 diperkirakan terdapat 3 lapisan yang direpresentasikan oleh Formasi Tanjung Genting dengan rapat massa 2.5 g/cc, Formasi Pemali dengan nilai rapat massa 2.69 g/cc yang diperkirakan sebagai batuan dasar dan Granit Klabat dengan nilai densitas 2.58 g/cc menerobos batuan Pemali dan Tanjung Genting dengan struktur patahan geser yang diperkirakan mempengaruhi kondisi bawah permukaan, yaitu patahan pada *line* 1, 2, 5 dan 6.

Berdasarkan hasil dari 2 metode didapatkan peta kompilasi area potensi panas bumi Permis yang ditunjukkan pada Gambar 13. potensi panas bumi diduga menyebar mulai dari zona teralterasi di sebelah tenggara manifestasi panas bumi hingga air panas Permis. Sesar mendatar diduga sebagai zona *outflow* fluida hidrotermal yang ditunjukkan dengan adanya manifestasi air panas Permis. Luas area potensi berdasarkan sebaran anomali gravitasi yang tinggi sebesar 0.18-0.23 mGal yang diperkirakan mampu menutup aliran dari fluida. Area potensi ini dibatasi oleh beberapa manifestasi yang mencirikan area *outflow* seperti mata air panas Permis di sisi barat yang terbentuk akibat adanya patahan yang menjadi zona lemah tempat fluida panas bumi keluar.



Gambar 12. Penampang *forward modeling* 2D lintasan A-B gravitasi area Permis.



Gambar 13. Peta potensi panas bumi daerah Permis, Bangka Belitung.

Kemudian pada sisi selatan dibatasi dengan adanya zona teralterasi hidrotermal. Berdasarkan analisis diatas perkiraan area potensi adalah 2.309 km^2 .

Sistem panas bumi permis diperkirakan mendapatkan suplai fluida atau *inflow* dari Sungai Bangkakota di utara area potensi yang masuk akibat adanya gravitasi bumi melalui rekahan-rekahan ataupun area dengan densitas kecil yang terdapat di utara area potensial. Area *inflow* lainnya diduga berada pada sesar geser di *line 3* pada bagian barat daya area potensi.

Seperti penelitian Purwoto dkk. (2015) diperkirakan fluida terpanaskan oleh radiasi thorium dari Formasi Granit Klabat sebagai sumber panas secara konduksi. Setelah itu, fluida akan mengalami konveksi dan mengalami penurunan temperatur dan densitas. Hal ini akan menyebabkan fluida yang panas terdorong ke atas permukaan dan dapat keluar melalui patahan atau rekahan di sekitar area potensial. Fluida panas tersebut kemudian dapat membentuk manifestasi air panas Permis serta dengan interaksi yang

intensif dengan batuan maka batuan tersebut akan mengalami alterasi yang ditemukan pada bagian tenggara dan barat dari manifestasi air panas Permis. Namun, untuk eksplorasi yang lebih detail tetap diperlukan eksplorasi in-situ.

5. KESIMPULAN

- Mineral alterasi yang ditemukan adalah besi oksida, mineral lempung, sulfur, anatase dan kovelit serta batuan teralterasi yang mengandung lempung. Sementara pembedaan mineral ferrous tidak terlihat signifikan pada daerah Permis. Berdasarkan data gravitasi, Anomali Bouguer Lengkap pada area permis bernilai 25.3 mGal sampai 41.0 mGal.
- Analisis FHD dan SVD diperkirakan terdapat 1 struktur utama berupa sesar mendatar berarah barat laut-tenggara yang merupakan pengontrol sistem panas bumi daerah Permis dan 8 struktur sekunder berupa sesar berjenis mendatar, naik dan turun berada pada Formasi Granit Klabat.
- Area *outflow* dari sistem panas bumi Permis diperkirakan berada pada manifestasi air

- panas Permis. *Outflow* lainnya berada pada tenggara manifestasi air panas permis yang diindikasikan oleh adanya alterasi pada area tersebut.
- d. Area *inflow* diperkirakan berada pada utara area potensi dari sungai Bangkakota dan dari sesar geser *line* 3.
 - e. Berdasarkan metode gravitasi dan pengolahan citra Landsat-8 diperkirakan area potensi panas bumi Permis seluas 2.31 km² dengan sebaran ke arah timur dari manifestasi panas bumi Permis
 - f. Penggunaan citra Landsat-8 dan metode gravitasi mampu mengidentifikasi zona prospek panas bumi. Namun hasil dari penginderaan jauh ini masih tetap harus dipastikan dengan penelitian secara in-situ.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A. (2020). Hydrothermal Alteration Mapping for Geothermal Exploration in Manda-Inakir Area , NW of the Republic of Djibouti. *Proceedings World Geothermal Congress 2020, Figure 1*, 1–9.
- Ali, A., & Pour, A. (2014). Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data: a case study in ariab mining district, red sea hills, Sudan. *International Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3). <https://doi.org/10.14419/ijbas.v3i3.2821>
- Anandababu, D., Purushothaman, B. M., & Suresh Babu, S. (2018). Estimation of Land Surface Temperature using LANDSAT 8 Data. *International Journal of Advance Research*, 4(2), 177–186. www.IJARIIIT.com
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Blakely, R. J. (1996). Potential Theory in Gravity and Magnetic. In *Cambridge University Press*.
- Browne, P. R. L. (1970). Hydrothermal alteration as an aid in investigating geothermal fields. *Geothermics*. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(70\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90057-X)
- Drisy, J., Kumar, D. S., & Roshni, T. (2018). Spatiotemporal variability of soil moisture and drought estimation using a distributed hydrological model. In *Integrating Disaster Science and Management: Global Case Studies in Mitigation and Recovery*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00027-0>
- Franto, F. (2015). Interpretasi Struktur Geologi Regional Pulau Bangka Berdasarkan Citra Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). *PROMINE, Vol 3 No 1 (2015): PROMINE*. <http://journal.ubb.ac.id/index.php/promine/article/view/85>
- Frutuoso, R. M. D. C. (2015). Mapping hydrothermal gold mineralization using Landsat 8 data . A case of study in Chaves license , Portugal. *Dissertação de Mestrado*. https://sigarra.up.pt/fcup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=127594
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gonzalez, L. M. R., Aufaristama, M., Jónsdóttir, I., Höskuldsson, Á., Póroarson, P., Proietti, N. M., Kraft, G., & McQuilkin, J. (2019). Remote sensing of surface Hydrothermal Alteration, identification of Minerals and Thermal anomalies at Sveifluháls-Krýsuvík high-temperature Geothermal field, SW Iceland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 254(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/254/1/012005>
- Hafidah, A. D., Daud, Y., & Usman, A. (2019). Reservoir Identification Based on Gravity Method at “aUN” Geothermal Field. *E3S Web of Conferences*, 125(2019), 0–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912514008>
- Huenges, E. (2010). Geothermal Energy Systems: Exploration, Development, and Utilization. In *Wiley-VCH*.

- Kasbani, K. (2009). Tipe Sistem Panas Bumi Di Indonesia Dan Estimasi Potensi Energinya. *Buletin Sumber Daya Geologi, Vol 4, No 3 (2009): Buletin Sumber Daya Geologi*, 23–30. http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id/index.php/bsdg/article/view/BSDG_VOL_4_NO_3_2009_3
- Kaufman, H. (1988). Mineral Exploration along the Agaba-Levant Structure by Use of TM-Data Concepts, Processing and Results. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1630–1658.
- Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics. In *Journal of Materials Processing Technology* (Second Edi). Cambridge University Press.
- Margono. (1995). Peta Geologi Lembar Bangka Selatan. Badan Geologi. Bandung
- Noorollahi, Y., Highway, Y. E., & Ghods, S. (2005). Application of Gis and Remote Sensing in Exploration and Environmental Management of Námafjall Geothermal Area , N-Iceland. In *Training* (Issue 1).
- Padmawidjaja, T. (2013). Deliniasi Endapan Timah Berdasarkan Analisis Anomali Gayaberat Di Daerah Bangka Selatan. *Buletin Sumber Daya Geologi, Vol 8, No 3 (2013): Buletin Sumber Daya Geologi*, 130–140. http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id/index.php/bsdg/article/view/BSDG_VOL_8_NO_3_2013_4
- Pettijohn, F.J., Potter, P. E., & Siever, R. (1975). Sand and Sandstone. *Geological Magazine*, 112(2), 203–204. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0016756800045945>
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2015). Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science*, 9(2), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.008>
- Purwoto, E., Rezky, Y., & Simarmata, R. S. L. (2015). Survei Aliran Panas (Heat Flow) Daerah Panas Bumi Permis Kabupaten Bangka Selatan, Provinsi Bangka Belitung. *Pusat Sumber Daya Geologi*.
- Reynolds, J. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Willey & Sons.
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi struktur daerah panasbumi ulubelu berdasarkan analisa data svd anomali bouguer. *J. Sains MIPA*, 16(2), 111–118.
- Setiawan, D.I.A.L. (2016). Karakteristik Geokimia Granit Dan Implikasinya Terhadap Sistem Panas Bumi Daerah Permis, Kabupaten Bangka Selatan Provinsi Bangka Belitung. *Buletin Sumber Daya Geologi, Vol 11, No 1 (2016): Buletin Sumber Daya Geologi*, 1–13. http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id/index.php/bsdg/article/view/BSDG_VOL_11_NO_1_2016_1
- Setyawan, A., Yudianto, H., Nishijima, J., & Saibi, H. (2015). *Gradient analysis of gravity and magnetic data beneath Gedongsongo geothermal manifestations, Ungaran, Indonesia*.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- USGS. (2015). *Landsat-8 (L8) Data Users Handbook. Version*.
- Widiyanto, E. D. (2008). *Penentuan Konfigurasi Struktur Batuan Dasar Dan Jenis Cekungan Dengan Data Gayaberat Serta Implikasinya Pada Target Eksplorasi Minyak Dan Gas Bumi Di Pulau Jawa*.
- Witter, J. B., Trainor-Guitton, W. J., & Siler, D. L. (2019). Uncertainty and risk evaluation during the exploration stage of geothermal development: A review. *Geothermics*, 78(December 2018), 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.011>
- Zeng, H., Zhang, Q., & Liu, J. (1994). Location of secondary faults from cross-correlation of the second vertical derivative of gravity anomalies. *Geophysical Prospecting*, 42(8), 841–854. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1994.tb00244.x>