



Identifikasi Struktur Geologi Dan Zona Alterasi Dengan Menggunakan Teknologi *Remote Sensing* Pada Daerah Prospek Geothermal

Ahmad Fitra Ritonga^{1*)}, Kms Novranza²⁾, dan Ricky Ferdianto Herlambang³⁾

¹Teknik Fisika, Universitas Binawan, Jakarta

²Pusat Data dan Informasi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta

³Konsultan Independen, Jakarta

*) *Corresponding author*: fitra@binawan.ac.id

(Received: 01-May-2020 • Approved: 07-May-2020 • Accepted: 14-May-2020)

Abstract

Exploration is an important stage in developing geothermal potential. The exploration covers three activities in the field include a geological, geochemical, and geophysical survey. Before doing exploration, we should make a map of the geothermal prospect area using remote sensing technology to increase the survey's effectiveness and efficiencies. The result of mapping can be used as a basis for determining the next survey location. This research used free Landsat 8 Imagery, downloaded from the site www.earthexplorer.com and processed by band combination technique. Band combination technique is used to identify lineaments, alteration zone, and crater features in the "X" geothermal system area. Interpretation of remote sensing data using the band combination method and manual observation shows that the main direction of lineaments that develop in the "X" area is North-South and Northwest-Southeast. These structures correlated with the appearance of surface manifestations such as fumaroles, altered rocks, and hot springs. It also found an area of suspicion as altered rocks around the summit of Mount BA

Abstrak

Eksplorasi merupakan salah satu tahap penting dalam pengembangan potensi geothermal. Tahapan eksplorasi terdiri dari tiga survei yaitu survei geologi, geokimia dan geofisika. Sebelum melakukan eksplorasi, sebaiknya membuat peta daerah prospek geothermal dengan menggunakan bantuan teknologi *remote sensing* untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi survei. Hasil pemetaan dapat dijadikan sebagai dasar untuk menentukan lokasi survei berikutnya. Penelitian ini menggunakan Citra Landsat 8 gratis, diunduh dari situs www.earthexplorer.com dan diproses dengan teknik *band combination*. Teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi kelurusan, zona alterasi, dan fitur kawah pada daerah sistem geothermal daerah "X". Interpretasi data *remote sensing* dengan menggunakan metode *band combination* dan pengamatan secara manual menunjukkan bahwa arah utama dari kelurusan-kelurusan yang berkembang di daerah "X" adalah Utara-Selatan dan Barat Laut - Tenggara. Struktur-struktur tersebut berkorelasi dengan kemunculan manifestasi permukaan berupa fumarol, batuan teralterasi dan mata air panas. Selain itu juga ditemukan satu titik dugaan sebagai batuan teralterasi yang berada di sekitar puncak Gunung BA.

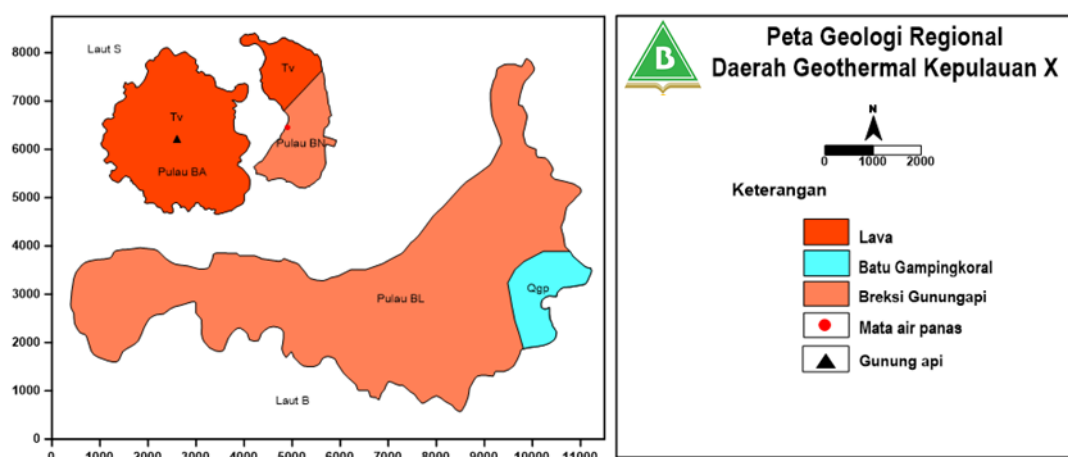
Keywords : *exploration, geothermal, lineament, remote sensing, surface manifestations*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara terkaya dengan sumber energi geothermal, karena Indonesia berada di jalur pegunungan aktif (*ring of fire*) yang menunjukkan adanya aktivitas vulkanisme. Negara Indonesia memiliki 324 lokasi potensi geothermal yang berpotensi untuk dikembangkan dan dimanfaatkan [1]. Total potensi energi geothermal yang siap dikembangkan mencapai 29.475 MWe, namun saat ini pemanfaatan energi geothermal untuk pembangkit listrik baru mencapai 1.438,5 MWe, sehingga rasio pemanfaatan energi dibandingkan total potensi geothermal hanya mencapai 5%. Untuk itu diperlukan upaya, kerja keras dan kerja sama antara pemerintah, akademisi dan perusahaan agar tetap bersinergi membangun pembangkit listrik bertenaga geothermal untuk kepentingan bangsa.

Saat ini, energi geothermal di Indonesia masih dalam tahap pengembangan. Tahapan pengembangan energi geothermal dimulai dari survei pendahuluan, eksplorasi, studi kelayakan, eksploitasi, dan pemanfaatan [2]. Survei pendahuluan merupakan satu tahapan penting dalam pengembangan dan pemanfaatan energi geothermal atau merupakan kegiatan awal perencanaan penelitian yang meliputi kegiatan survei geologi, geokimia, dan geofisika (3G). Sebelum melaksanakan survei pendahuluan, peneliti melakukan pemetaan yang merupakan peta perpaduan berbagai sumber data awal yang bertujuan untuk memudahkan peneliti sebelum melaksanakan penelitian di lapangan. Pada penelitian ini, penulis fokus membuat peta terpadu yang merupakan hasil interpretasi data geologi mengenai informasi tentang litologi, stratigrafi, struktur, tektonik *setting*, dan vulkanisme dan geokimia berupa sebaran manifestasi permukaan pada daerah prospek geothermal "X".

Pembentukan kompleks sistem geothermal daerah "X" berkaitan erat dengan penunjaman antara Lempeng Samudera Hindia, Lempeng Kontinen Australia, Lempeng Kontinen Eurasia, dan Lempeng Samudera Pasifik dengan Lempeng yang bersifat lokal seperti Lempeng Halmahera, Sulawesi, dan Irian. Mengacu pada peta geologi regional lembar Moa, Damar, dan Bandaneira. Daerah penelitian terdiri dari batuan lava, breksi gunung api, dan batu gamping koral yang berumur Tersier hingga Kuartar [3].

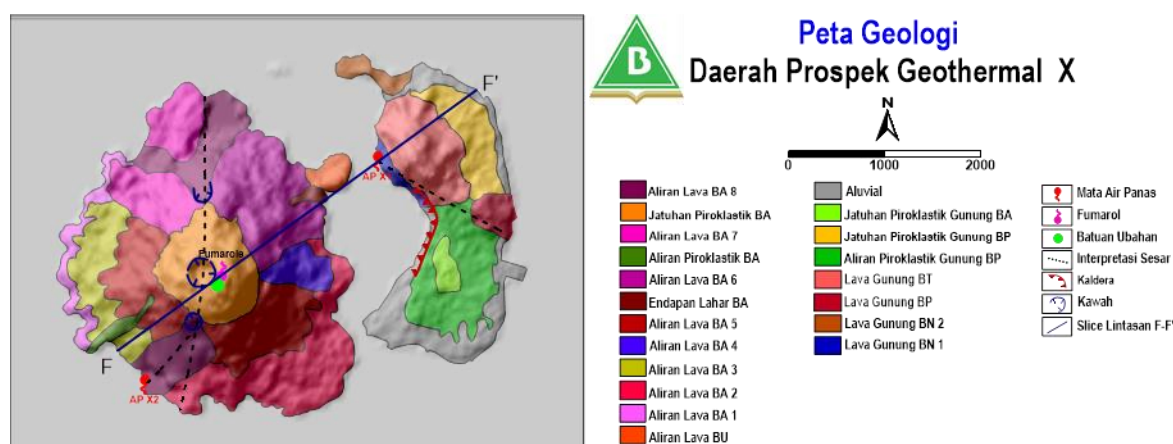


Gambar 1. Peta Geologi Regional Daerah Geothermal "X" (Modifikasi dari [3])

Evolusi kompleks Gunung BA dimulai dengan kemunculan Gunung BL ke permukaan yang diikuti oleh letusan besar yang menghancurkan seluruh puncak dan badan gunung. Akibat dari letusan tersebut terbentuk sebuah kaldera di dasar laut yang dikenal dengan kaldera BL [4]. Selanjutnya, muncul gunung api baru yang disebut Gunung BN. Diperkirakan Gunung BN mengalami letusan yang menyebabkan terbentuknya kaldera kedua, dimana Gunung BP dan Gunung BT yang terdapat di Pulau BN merupakan bagian dari sisa kaldera.

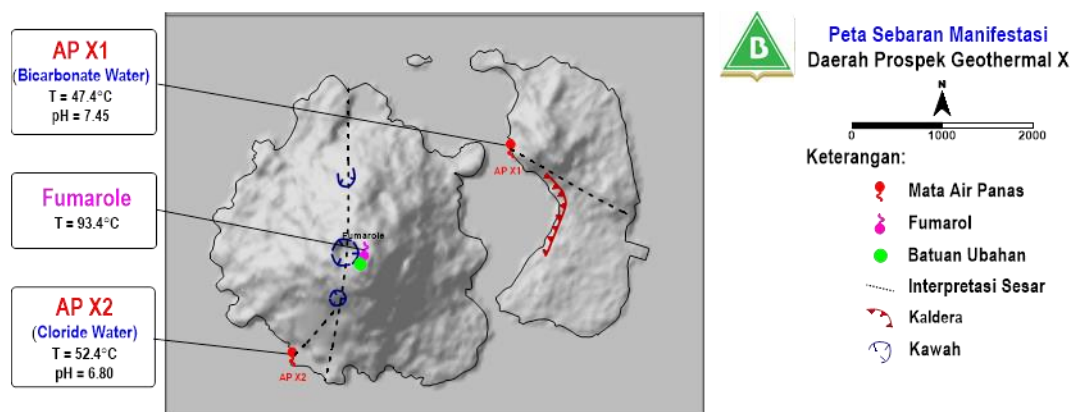
Secara umum, Pulau BN tersusun oleh aliran lava, aliran piroklastik, jatuhnya piroklastik dan aluvial. Secara megaskopis, aliran lava dicirikan oleh warna abu-abu, afanitik, disetempat dijumpai struktur vesikuler, porforitik dengan fenokris terdiri dari plagioglas dan piroksen yang tertanam dalam masa dasar mikrokristalin. Sementara itu, jatuhnya piroklastik dan aliran piroklastik di Pulau BN terdistribusi dibagian barat, tengah hingga selatan yang merupakan produk erupsi dari Gunung BP dan Gunung BA.

Fase selanjutnya yaitu terjadinya letusan Gunung BP dan Gunung BT, kemudian diikuti pembentukan Gunung BA yang terdapat di Pulau BA. Litologi daerah Pulau BA tersusun atas aliran lava, endapan lahar, aliran piroklastik, dan jatuhnya piroklastik. Struktur geologi yang terdapat di daerah penyelidikan berupa kaldera, kawah, dan sesar. Struktur kaldera yang ditemukan di Pulau BN berupa punggung yang hampir melingkar dengan gawir terjal yang diperkirakan merupakan sisa dinding kaldera. Struktur kawah dapat dijumpai di daerah puncak, lereng, dan kaki Gunung BA. Keberadaan sesar normal diperkirakan melewati puncak dan beberapa pusat erupsi di lereng utara dan selatan Gunung BA dengan arah relatif Utara - Selatan, sedangkan sesar yang terdapat di sekitar Gunung BP memiliki arah relatif Barat Laut – Tenggara.



Gambar 2. Peta Geologi Tinjauan Daerah Geothermal “X” [5]

Kenampakan gejala geothermal di daerah geothermal “X” ditandai dengan hadirnya mata air panas, fumarol, dan batuan ubahan. Temperatur air panas di daerah penelitian berkisar 47,4°C - 52,4°C, sedangkan temperatur yang diperoleh dari kawah puncak Gunung BA sekitar 93,4°C. Sebaran kandungan dan temperatur manifestasi permukaan di daerah geothermal “X” dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kandungan dan Temperatur Manifestasi Permukaan Daerah Geothermal “X”

Untuk mengkonfirmasi keberadaan struktur maupun zona alterasi daerah geothermal “X” perlu dilakukan studi identifikasi struktur dan zona alterasi dengan menggunakan teknologi *remote sensing*. Teknologi *remote sensing* saat ini semakin berkembang dan diaplikasikan dalam berbagai lingkup penelitian, diantaranya yaitu di bidang eksplorasi geothermal. Teknologi ini dapat membantu meningkatkan efektifitas, akurasi dan nilai ekonomis pada survei suatu lapangan geothermal. Teknologi *remote sensing* telah menjadi salah satu metode yang berperan dalam menunjang kegiatan eksplorasi, khususnya sebagai acuan sebelum melakukan peninjauan dan penelusuran di lapangan. Peranan penting teknologi *remote sensing* dalam kegiatan studi pendahuluan yaitu dapat mengidentifikasi struktur geologi yang berkembang di permukaan. Struktur geologi yang merupakan bagian sistem geothermal yang dapat dihubungkan dengan zona *upflow* maupun *outflow*. Hal tersebut tidak menjadi satu-satunya faktor penentu pendelineasian zona, karena masih ada beberapa faktor lain seperti kondisi hidrogeologi.

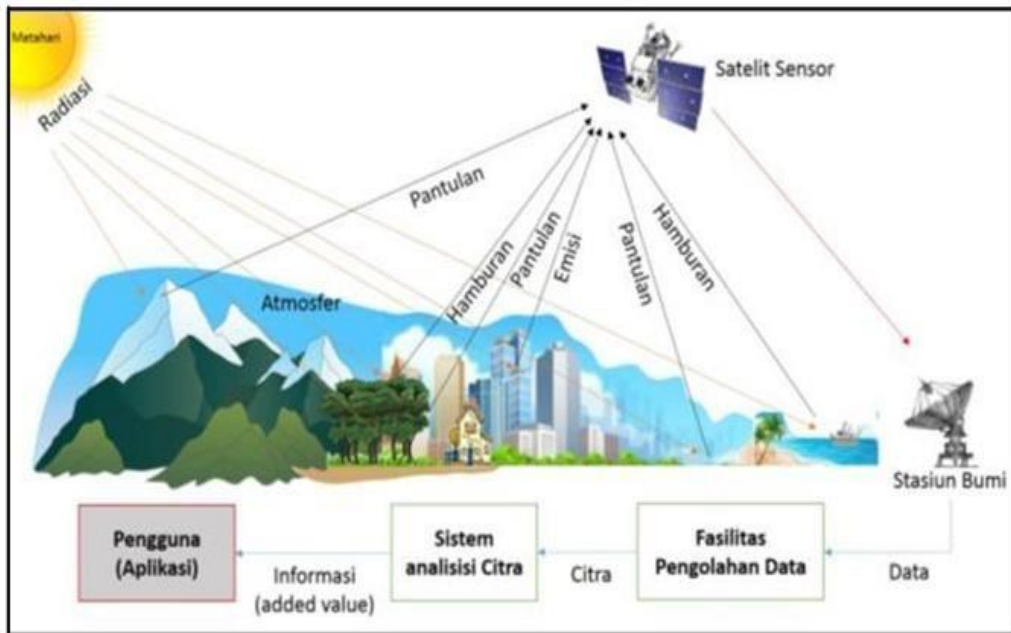
Identifikasi struktur geologi pada teknologi *remote sensing* dapat dilakukan melalui pengamatan fitur-fitur kelurusan dalam citra. Konsep pengamatan dan ekstraksi fitur kelurusan dari citra satelit yang berhubungan dengan struktur geologi telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, diantaranya yaitu: Abdullah, A., *et al* [6], Burdick & Speirer [7] dan Podwysoki, *et al* [8]. Penggunaan teknik ekstraksi fitur kelurusan menggunakan bantuan software PCI Geomatica modul LINE (*lineament extraction*) dari Citra Satelit Landsat telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya Abdullah, A., *et al* [6], Ibrahim, U. dan Mutua, F. [9] dan Madani, A. [10]. Sedangkan dalam bidang eksplorasi geothermal, penggunaan teknik pengamatan kelurusan yang berhubungan dengan struktur geologi dan metode pengamatan kerapatan kelurusan untuk mendelineasi zona *outflow* telah dilakukan oleh beberapa peneliti, seperti Iswahyudi., *et al* [11]. Penelitian mengenai kelurusan dan *fault-fracture density* (FFD) dalam bidang geothermal pun telah banyak dilakukan, seperti oleh Soengkono, S. [12] dan Suryantini & Wibowo, H. [13]. Dalam pengolahan citra satelit khususnya citra Landsat, terdapat beberapa teknik ataupun metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan resolusi baik itu spasial maupun spektral. Penelitian mengenai peningkatan kualitas citra dilakukan diantaranya oleh Yuhendra, H., & Sumantyo, J. [14] yang menunjukkan bahwa teknik *Gram-Schmidt Pan-Sharpning* dilanjutkan dengan

transformasi PCA (*Principal Component Analysis*) memberikan hasil yang sangat baik dalam peningkatan kualitas citra.

Penginderaan jauh atau *remote sensing* merupakan ilmu atau seni untuk memperoleh informasi tentang obyek, daerah, atau fenomena melalui analisis data yang diperoleh dengan suatu alat tanpa kontak langsung dengan obyek, daerah, atau fenomena yang dikaji [15]. *Remote sensing* salah satu alat eksplorasi yang berperan dalam menunjang kegiatan eksplorasi. Keunggulan metode ini adalah dapat menggambarkan *geological setting* sistem geothermal [16]. Informasi yang diperoleh dari hasil perekaman gelombang elektromagnetik dipancarkan dan dipantulkan oleh obyek yang terdapat di permukaan bumi. Penggunaan data satelit *remote sensing* di bidang kebumih telah banyak dilakukan di negara maju untuk keperluan eksplorasi mineral dan energi, pemetaan geologi, bencana alam dan sebagainya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kelurusan yang berhubungan dengan struktur geologi di permukaan dan zona alterasi yang berkorelasi dengan kemunculan manifestasi geothermal di daerah prospek geothermal "X". Penelitian ini menggunakan teknologi *remote sensing* untuk menganalisis dan mengekstraksi fitur-fitur kelurusan yang diperkirakan berhubungan dengan struktur geologi dan menentukan zona alterasi daerah sekitar manifestasi permukaan. Data citra yang digunakan dalam penelitian ini adalah Citra Multispectral Landsat-8 OLI yang dapat diunduh bebas pada situs www.earthexplorer.usgs.gov.

METODE PENELITIAN

Sistem *remote sensing* terdiri dari empat komponen yaitu target, sumber energi, alur transmisi, dan sensor. Komponen tersebut berkerja bersama untuk mengukur dan mencatat informasi mengenai objek atau target tanpa menyentuh obyek tersebut. Sumber energi yang menyinari atau memancarkan energi elektromagnetik pada objek sangat diperlukan. Energi berinteraksi dengan objek dan sekaligus berfungsi sebagai media untuk meneruskan informasi dari objek kepada sensor. Sensor merupakan sebuah alat untuk mengumpulkan dan mencatat radiasi elektromagnetik. Setelah data dicatat, kemudian data akan dikirimkan ke stasiun penerima dan diproses menjadi data yang siap pakai berupa citra. Selanjutnya, Citra tersebut diinterpretasi untuk menyarikan informasi mengenai objek. Interpretasi biasanya berupa gabungan antara visual dan otomatis dengan bantuan komputer dan perangkat lunak pengolah citra [17].



Gambar 4. Komponen *Remote Sensing* [17]

Teknologi *remote sensing* sangat membantu dalam mengidentifikasi gejala-gejala geologi yang muncul di permukaan. Gejala-gejala geologi yang diinterpretasikan berupa pembagian satuan batuan, keberadaan struktur geologi serta manifestasi geothermal berupa alterasi bahkan *hot spring* dan fumarola [17]. Interpretasi gejala-gejala geologi tersebut dilakukan dengan kombinasi band *Red, Green, Blue* (RGB). Selain landsat 7 juga terdapat landsat 8 yang memiliki 11 band yaitu dengan tambahan sensor *Onboard Operational Land Imager* (OLI) dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Perbedaan antara landsat 7 dan landsat 8 serta kombinasi RGB dan manfaatnya diuraikan dari tabel di bawah ini.

Tabel 1. Perbandingan Spesifikasi *Landsat* 7 ETM+ dan *Landsat* 8 OLI/TIRS [18]

Landsat-7 ETM + Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m coastal/Aerosol	0,435 – 0,451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0,441 - 0,514	30 m Blue	0,452 – 0,512	Band 2
Band 2	30 m Green	0,519 – 0,601	30 m Green	0,533 – 0,590	Band 3
Band 3	30 m Red	0,63 – 0,692	30 m Red	0,636 – 0,673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0,772 – 0,898	30 m NIR	0,851 – 0,879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1,547 – 1,749	30 M SWIR-1	1,566 – 1,651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10,3 – 12,36	100 m TIR-1	10,60 – 11,19	Band 10
			100 m TIR-2	11,50 – 12,51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2,064 – 2,345	30 m SWIR-2	2,107 – 2,294	Band 7
			15 m Pan	0,503 – 0,676	Band 8
Band 8	15 m Pan	0,515 – 0,896	30 m Cirrus	1,363 – 1,384	Band 9

Data *remote sensing* terdiri dari data digital yang memerlukan hardware dan software untuk memprosesnya. Interpretasi data *remote sensing* untuk melihat struktur dan zona alterasi bisa dilakukan dengan dua metode yaitu secara digital dengan menggunakan software komputer dan menggunakan pengamatan manual. kedua metode ini memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing. Analisis struktur secara digital mempunyai kecenderungan menarik semua kelurusan-kelurusan yang terlihat dari citra. Sementara yang diperlukan dalam interpretasi struktur di permukaan adalah kelurusan-kelurusan yang bersifat alamiah dan bukan kelurusan non alamiah seperti lembah, sungai, pemukiman dan lain-lain.

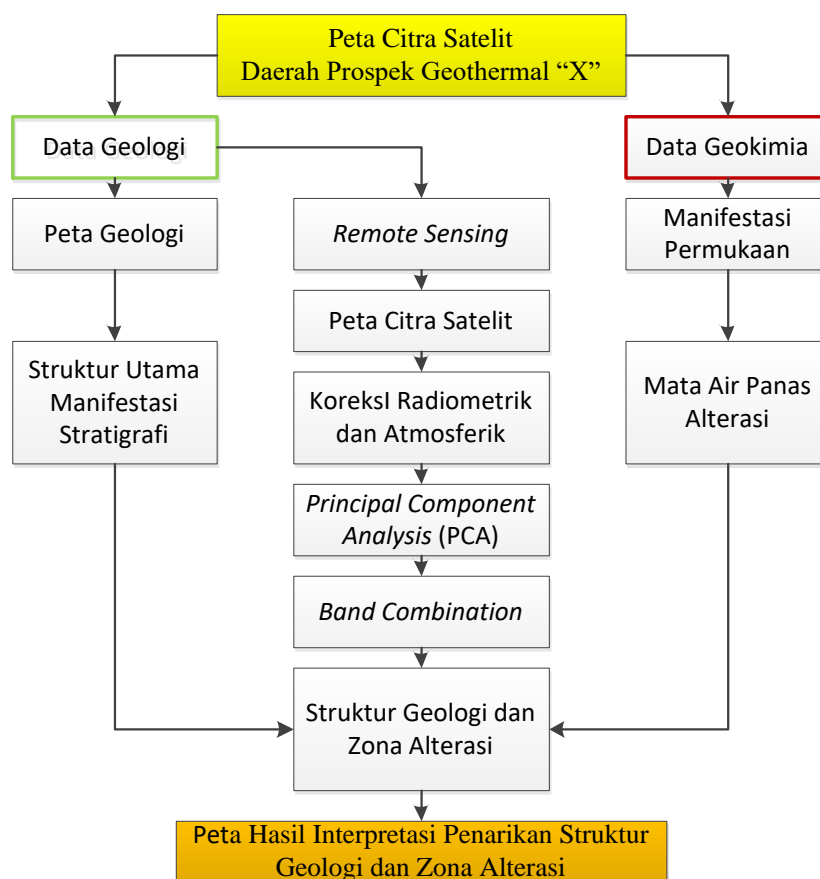
Penelitian ini menggunakan data landsat 8 secara pengamatan manual dengan menggunakan metode kombinasi band untuk melihat struktur dan zona alterasi. Secara umum, analisis citra landsat di daerah penelitian dilakukan dengan urutan sebagai berikut [12]: a) Analisis rona pada citra satelit dengan melihat perbedaan warna yang dihasilkan oleh citra satelit tersebut, b) Analisis tekstur dengan memperhatikan hubungan antar rona tersebut, c) Analisis pola yang mengindikasikan bentuk topografi terutama kelurusan-kelurusan yang terdapat pada citra satelit tersebut yang mengindikasikan struktur geologi, d) Hubungan dengan sekitarnya sehingga dapat membantu penafsiran dengan lebih baik, e) Analisis ukuran dan bayangan sehingga dapat memperjelas lagi penafsiran tentang daerah yang kita teliti. f) Analisis alterasi permukaan yang dicirikan berkurangnya vegetasi dan biasanya terdapat pada

daerah rekahan atau lembah. Analisis dibantu dengan menggunakan teknik *Pan-Sharpening* dan *Principal Component Analysis*. Sedangkan untuk mereduksi kemungkinan struktur yang disebabkan oleh non alamiah dalam interpretasi, maka dilakukan reduksi dengan menggunakan kombinasi band dengan target-target tertentu yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kombinasi Band RGB dan Target Identifikasi [18]

<i>Band Combination</i> RGB	Target Identifikasi
4 3 2	Warna alami landsat
7 6 4	Pemukiman (Urban)
5 4 3	Tumbuhan (Vegetation)
6 5 2	Agriculture
5 6 4	Land/ Water
5 6 7	Struktur Geologi, Manifestasi, litologi
6 5 4	Analysis Vegetation
7 6 5	Filter Atmosferik
7 5 4	Gelombang pendek Inframerah (struktur)

Keseluruhan proses pengerjaan dalam penelitian ini disajikan dalam diagram alir pada Gambar 5 untuk mengetahui bagaimana cara kerja dari metode-metode yang digunakan.



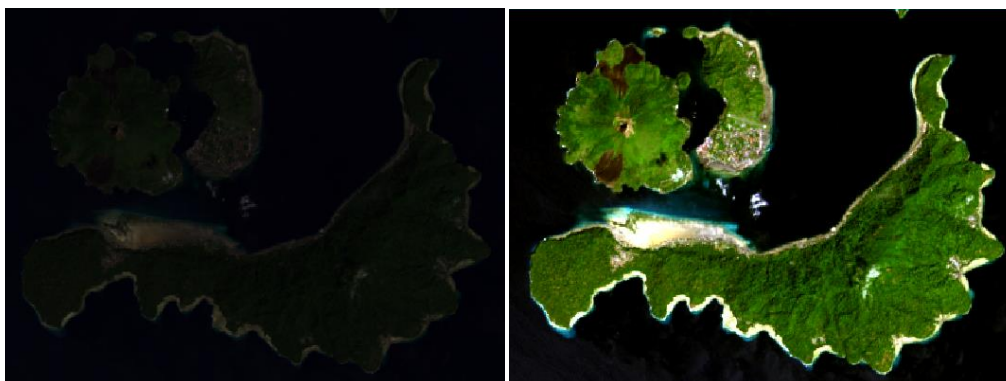
Gambar 5. Metodologi Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Remote sensing merupakan salah satu aspek penting dalam eksplorasi geothermal. Peranan teknologi *remote sensing* memiliki peranan penting pada tahap awal studi pendahuluan pengembangan dan pemanfaatan geothermal sebagai bagian energi terbarukan. Dengan menggunakan teknologi *remote sensing* diperoleh peta hasil interpretasi data geologi dan geokimia yang dijadikan sebagai acuan penentuan titik survei geofisika. Selain itu, memudahkan peneliti dalam perencanaan dan persiapan terjun kelapangan. Teknologi *remote sensing* memanfaatkan data landsat 8 OLI/TIRS dengan menggunakan metode kombinasi band untuk pemetaan struktur dan zona alterasi secara manual yang dibantu dengan peta geologi dan manifestasi permukaan. Pemetaan struktur ini bertujuan untuk mendapatkan arah relatif struktur utama yang berkorelasi erat dengan munculnya manifestasi dan zona alterasi permukaan pada sistem geothermal.

Sensor Satelit Landsat berfungsi merekam dan menyimpan informasi dari permukaan bumi dalam bentuk *digital number* (DN). Informasi dalam bentuk *digital number* (DN) ini harus dikalibrasikan terlebih dahulu dengan menggunakan kalibrasi radiometrik dan kalibrasi atmosferik. Kegunaan dari koreksi radiometrik dan atmosferik ini untuk memperbaiki kualitas citra dari kesalahan pantulan akibat permukaan bumi yang tidak rata atau dipengaruhi oleh faktor lainnya seperti kondisi atmosfer, arah sinar matahari, dan kondisi

cuaca. Informasi yang dihasilkan setelah dikalibrasi radiometrik dan kalibrasi atmosferik menjadi lebih akurat dan lebih merepresentasikan keadaan permukaan bumi yang sesungguhnya.



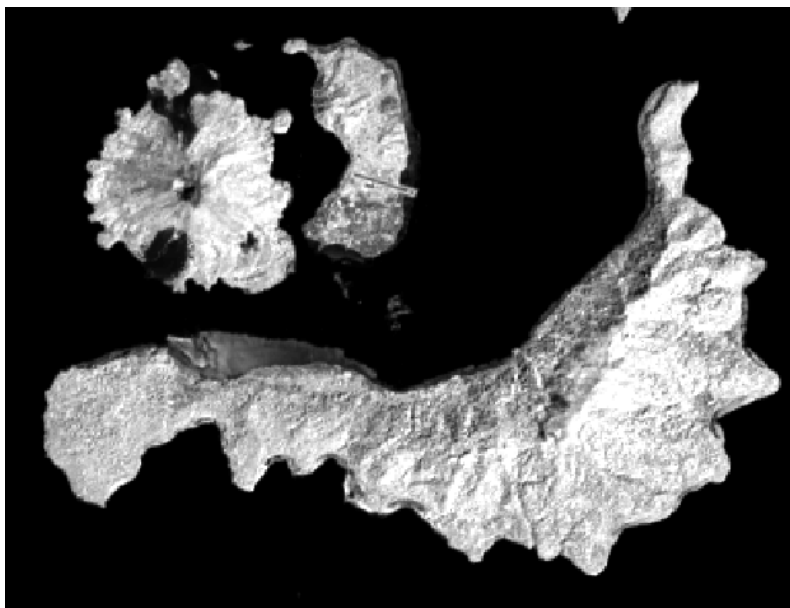
Gambar 6. Hasil Citra Satelit sebelum Koreksi Atmosferik (Kiri) Citra Satelit Koreksi Setelah Koreksi Atmosferik (kanan)

Penelitian ini menggunakan teknik *Pan-Sharpening* dan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk menghasilkan citra dengan kualitas yang baik dan representatif dalam interpretasi dan mengekstrak fitur-fitur kelurusan. *Pan-Sharpening* digunakan untuk meningkatkan resolusi *spasial band* yang beresolusi rendah (band multispektral) yang awalnya 30 m menjadi 15 m dengan penajaman pada band resolusi spasial tinggi (band-8 pankromatik).



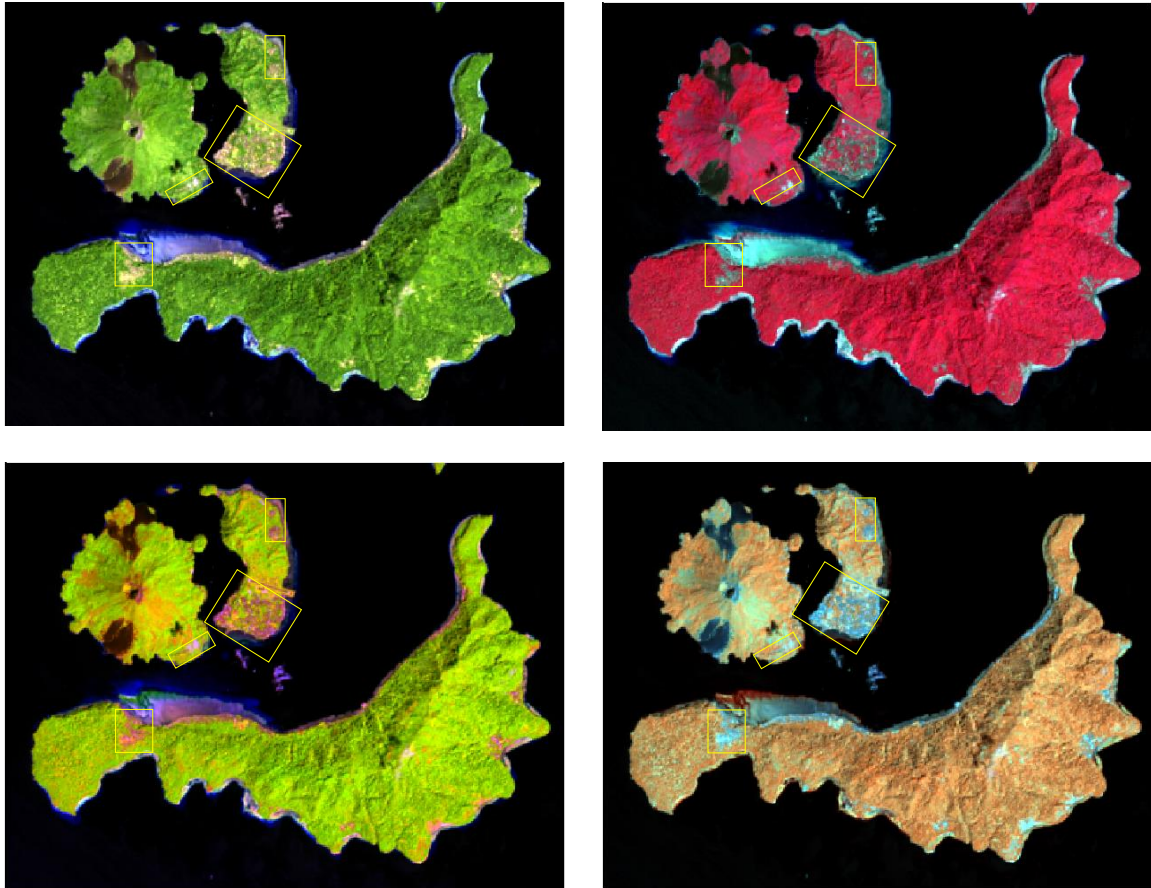
Gambar 7. Citra Landsat yang Sudah ditingkatkan Resolusinya menggunakan Metode *Pan-Sharpening*

Teknik PCA yaitu metode statistika multivarian yang digunakan untuk mereduksi dimensi input yang kehilangan informasi minimum yang berdasarkan pada hasil dari PC1 (*1st Principal Component*).



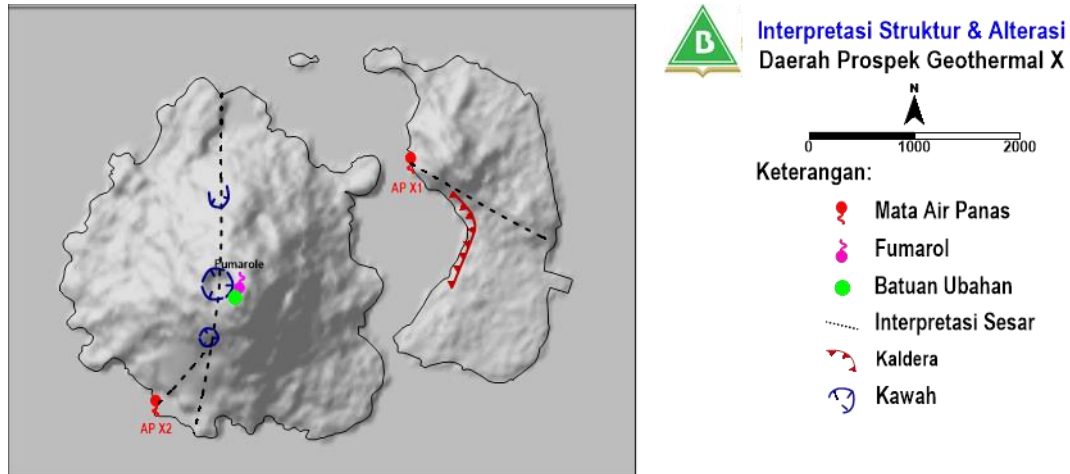
Gambar 8. Citra Landsat yang Direduksi Dimensi Input menggunakan Metode *Principal Component Analysis* (PCA)

Pada citra satelit akan terlihat seluruh kelurusan-kelurusan morfologi seperti kelurusan lembah, sungai, punggung, zona patahan, dan rekahan yang muncul di permukaan. Penelitian ini fokus untuk mencari struktur geologi permukaan. Oleh sebab itu diperlukan metode yang bisa mereduksi kelurusan-kelurusan yang tidak diperlukan. Salah satu metodenya adalah dengan menggunakan metode *Band Combination*. Metode ini dapat digunakan untuk membantu mereduksi fitur-fitur yang tidak berkaitan dengan kondisi geologi alamiah. Metode ini juga berguna sebagai validator terhadap stuktur geologi nonalamiah seperti daerah pemukiman, perkebunan, ladang, jalan atau fitur lainnya atas buatan manusia.



Gambar 9. Reduksi Fitur-Fitur Kelurusan Nonalamiah

Setelah dilakukan reduksi terhadap kelurusan-kelurusan nonalamiah. Selanjutnya melakukan penarikan kelurusan berupa struktur geologi. Struktur geologi dalam pada daerah geothermal “X” berkorelasi dengan munculnya manifestasi permukaan. Hasil interpretasi data *remote sensing* secara pengamatan manual menunjukkan bahwa arah utama dari kelurusan-kelurusan yang berkembang di daerah geothermal “X” adalah Utara – Selatan dan Barat Laut – Tenggara . Sedangkan interpretasi penarikan lokasi alterasi dapat dilakukan menggunakan metode *Band Combination* dengan memperhatikan atau mempertimbangkan rona dan zona rekahan. Berdasarkan pengamatan peneliti dari citra landsat, diinterpretasikan terdapat satu lokasi alterasi di daerah geothermal “X”.



Gambar 10. Interpretasi Penarikan Struktur Geologi dan Zona Alterasi Secara Manual Daerah Prospek Geothermal “X”

KESIMPULAN

Interpretasi data *remote sensing* dengan menggunakan metode *band combination* dan pengamatan secara manual menunjukkan bahwa arah utama dari kelurusan-kelurusan yang berkembang di daerah “X” adalah Utara-Selatan dan Barat Laut - Tenggara. Struktur-struktur tersebut berkorelasi dengan kemunculan manifestasi permukaan berupa fumarol, batuan teralterasi dan mata air panas. Selain itu juga ditemukan satu titik dugaan sebagai batuan teralterasi yang berada di sekitar puncak Gunung BA.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) dan Staf Dosen Teknik Fisika Universitas Binawan yang telah memberikan dukungan sehingga penelitian berjalan dengan lancar dan semua pihak yang telah membantu penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM. *Peluang Investasi Panas Bumi Indonesia*, Jakarta. Exploration Geophysics, 2015.
- [2] A. F. Ritonga, "Delineasi Zona Permeable Dengan Menggunakan Metode Gravitasi Dan Audio Magnetotellurik Di Daerah Prospek Geothermal “X”," Universitas Indonesia, Depok, 2017.
- [3] D. A. Agustiyanto, M. Suparman, E. Partoyo, and D. Sukarna, *Peta Geologi Regional Lembar Moa, Damar, dan Bandanaira Maluku*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1994.
- [4] J. Matahelemual, *G. Banda Api Berita Berkala Vulkanologi*, No.115 Direktorat Vulkanologi, 1988.

- [5] L. A. Permana, A. E. A. Wibowo, E. Purwoto, “Geologi dan Geokimia Daerah Banda Neira dan Hubungannya terhadap Sistem Panas Bumi Kepulauan Banda, “*PSDG*, 2015. [Online]. Available: http://psdg.geologi.esdm.go.id/kolokium/2015_2/pb/1.1/. [Accessed Dec. 2, 2019].
- [6] A. Abdullah, S. Nassr, and A. Ghaleeb, “Landsat ETM-7 for Lineament Mapping using Automatic Extraction Technique in the SW part of Taiz area, Yemen. *Global J. Hum. Soc. Sci. Geogr. Geo-Science, Environ. Disaster Manag.* 13, 35-38, 2013.
- [7] R. G. Burdick, and R. A. Speirer, Development of a Method to Detect Geologic Faults and Other Linear features from Landsat Images. US. Bureau of Mines Report Inv, 8413;74, 1980.
- [8] M. H. Podwysocki, J. G. Moik, W. D Shoup, Quantification of Geologic Lineament by Manual and Machine Processing Techniques. Proc. NASA Earth Resources Survey Symposium, Houston, Texas, pp. 885-903, 1975.
- [9] U. Ibrahim, and F. Mutua, Lineament Extraction using Landsat 8 (OLI) in Gedo, Somalia. *Int. J. Sci. Res.* 3, 291-296, 2014.
- [10] A. Madani, Selection of the Optimum Landsat Thematic Mapper Bands for Automatic Lineament Extraction, Wadi Natash Area, South Eastern Desert, Egypt. *The 22nd Asian Conf. on Remote Sensing.* 2, 5-9, 2001.
- [11] S. Iswahyudi, A. Saepuloh, and A. Widagdo, Delineating Outflow Zones Using Linear Features Density (LFD) Derived From Landsat Imagery at Paguyangan, Brebes, Central Java. *Proc. 3rd. Int. ITB. Geoth. Workshop*, 2014.
- [12] S. Soengkono, Assessment of Faults and Fractures At the Mokai Geothermal Field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Proc. World Geotherm. Congr. 2000* 1937, 1771-1776, 2010.
- [13] Suryantini and H. Wibowo, Application of Fault and Fracture Density (FFD) Method for Geothermal Exploration in Non-Volcanic Geothermal System; a Case Study in Sulawesi-Indonesia. *J. Geoaplika* 5, 027-037, 2010.
- [14] H. K. Yuhendra, and J. T. Sumatyo, Performance Analyzing of High Resolution Pan-sharpening Techniques: Increasing Image Quality for Classification using Supervised Kernel Support Vector Machine. *Res, J. Inf. Technol.* 3, 12-23, 2010.
- [15] T.M. Lillesand, R.W. Kieffer, and J.W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2004.
- [16] KMS. Novranza, “Delineasi Karakteristik dan Geometri Reservoir Berdasarkan Interpretasi Data 3G pada Lapangan Geothermal “A”,” UI, 2016.
- [17] R. D. Martasari, Y. Daud, and S. Tarmidi, “Optimizing Remote Sensing Data for Guiding Geothermal Exploration,” IIGCE. Jakarta, Indonesia, 2015.
- [18] USGS. United State America, 2015.