

Karakterisasi Zona Geotermal Menggunakan Pendekatan Dekomposisi Polarimetrik Yamaguchi pada Citra SAR

*Zahratunnisa, Tika Hapsari, Puncak Joyontono, Nazla Syafitri Rangkuti,
dan Husein Sadewa Wiguna

Program Studi Teknik Geologi, Universitas Syiah Kuala, Kota Banda Aceh, Indonesia

*Corresponding: zahratunnisa@usk.ac.id

Manuscript received: July 29, 2025; Revised: August 6, 2025; Accepted: August 10, 2025

ABSTRACT

The Kotamobagu region in North Sulawesi, Indonesia, is known for its significant geothermal potential and has been the focus of feasibility studies by various institutions, including PT Pertamina Geothermal Energy (PGE). To support further exploration efforts, this study investigated the geothermal potential of Kotamobagu using a remote sensing approach based on polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) image decomposition employing the Yamaguchi algorithm. Polarimetric SAR imagery can identify surface characteristics such as vegetation, soil moisture, and geological structures, which serve as indirect indicators of geothermal systems. The data used in this study were high-level processed SAR images that underwent geometric correction, reprojection, and radiometric calibration to ensure spatial and radiometric accuracy. Using the Yamaguchi decomposition method, we focused on four primary scattering components: surface, double-bounce, volume, and helix scattering. This analysis was used to identify fracture zones, alteration zones, and land cover types relevant to the presence of geothermal systems in the study area. The results indicate that the Kotamobagu area exhibits scattering patterns consistent with the surface geological characteristics of active geothermal systems, supporting the findings of previous feasibility studies. This study confirmed that the integration of polarimetric SAR imagery with spatial remote sensing analysis offers an effective and efficient preliminary approach to geothermal prospect mapping.

Keywords: Geothermal, Kotamobagu, Yamaguchi Decomposition, SAR

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi panas bumi menggunakan pendekatan penginderaan jauh berbasis citra Synthetic Aperture Radar (SAR) melalui metode dekomposisi polarimetrik dengan algoritma Yamaguchi. Metode ini digunakan untuk mendeteksi karakteristik permukaan yang berkaitan dengan sistem geotermal, seperti zona rekahan dan perubahan litologi. Salah satu wilayah yang dipilih sebagai studi kasus adalah daerah Kotamobagu, Sulawesi Utara, Indonesia, yang telah dikenal memiliki potensi panas bumi dan menjadi lokasi studi kelayakan oleh berbagai institusi, termasuk PT Pertamina Geothermal Energy (PGE). Citra SAR polarimetrik memiliki kemampuan dalam mengidentifikasi karakteristik permukaan seperti vegetasi, kelembapan tanah, serta struktur geologi yang berperan penting sebagai indikator tidak langsung sistem geotermal. Data yang digunakan merupakan citra dengan level pemrosesan tinggi yang telah melalui koreksi geometrik, reproyeksi, dan kalibrasi radiometrik untuk menjamin akurasi spasial dan radiometrik. Melalui

metode dekomposisi Yamaguchi, analisis dilakukan terhadap empat komponen hamburan utama: hamburan permukaan, hamburan ganda, hamburan volume, dan hamburan heliks. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi zona rekahan serta jenis tutupan lahan yang relevan dengan keberadaan sistem panas bumi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah Kotamobagu memperlihatkan pola hamburan yang konsisten dengan ciri-ciri geologi permukaan dari sistem panas bumi aktif dan dapat menjadi pendekatan awal yang efektif dan efisien dalam pemetaan prospek geotermal.

Kata Kunci: Geotermal, Kotamobagu, Dekomposisi Yamaguchi, SAR

1. PENDAHULUAN

Wilayah Kotamobagu, yang terletak di Provinsi Sulawesi Utara, Indonesia, memiliki potensi panas bumi yang signifikan berdasarkan karakteristik geologi dan manifestasi termal di permukaan. Secara geografis, Kotamobagu berada sekitar 200 km di sebelah barat daya Kota Manado. Secara geologi, daerah ini tersusun atas batuan dari tiga kala berbeda: Paleogen, Neogen, dan Kuartar. Batuan Paleogen terdiri atas batuan sedimen seperti serpih dan batupasir yang tersisipkan batugamping dan batupadat, kemudian ditindih oleh produk vulkanik dari kala Neogen dan Kuartar seperti lava andesit, dasit, riolit, breksi, dan tuf yang berasal dari aktivitas gunung api seperti Gunung Simut, Gunung Lemibut, dan Gunung Ambang [1]. Keberadaan sistem sesar berarah barat-timur dan barat laut-tenggara di daerah ini memainkan peran penting dalam mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi berupa mata air panas di Pusian, Bakan, Lobong, Liberia, dan Bongkudai, yang mengindikasikan adanya sistem hidrotermal aktif di bawah permukaan.

Dalam eksplorasi geotermal, salah satu pendekatan non-invasif yang semakin banyak digunakan adalah penginderaan jauh [2], [3], [4], [5]. Namun, sensor optis yang lazim digunakan dalam penginderaan jauh memiliki keterbatasan utama dalam hal cuaca, terutama karena ketergantungannya pada pencahayaan matahari dan ketidakmampuannya menembus

awan. Hal ini menjadi kendala besar di wilayah tropis seperti Indonesia yang sering tertutup awan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, digunakan sistem Synthetic Aperture Radar (SAR) yang menggunakan gelombang mikro dan mampu beroperasi secara aktif, baik siang maupun malam, serta dapat menembus awan, kabut, dan asap [6], [7]. Sensor radar yang umum digunakan di antaranya adalah ALOS PALSAR, Radarsat-2, TerraSAR-X, dan Sentinel-1.

Namun, salah satu tantangan utama dalam pemrosesan citra radar adalah munculnya *speckle noise*, yaitu derau granular akibat interferensi antara sinyal hamburan balik dari target-target dalam satu sel resolusi. Untuk itu, tahap *speckle filtering* diperlukan sebagai bagian dari pra-pemrosesan citra sebelum analisis lanjutan dilakukan. Setelah proses *filtering*, informasi fisik yang lebih bermakna dapat diekstrak menggunakan pendekatan tertentu, salah satunya adalah dekomposisi polarimetrik.

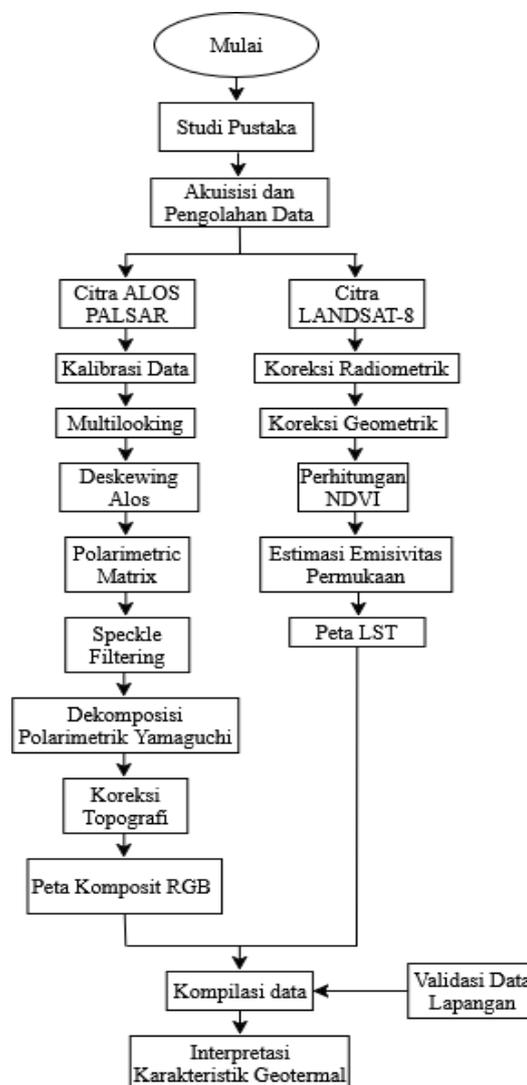
Salah satu metode yang telah terbukti efektif dalam menganalisis citra SAR polarimetrik adalah metode dekomposisi polarimetrik Yamaguchi. Metode ini bukan hanya merupakan metode *filtering*, tetapi merupakan teknik analisis lanjutan untuk memisahkan jenis-jenis hamburan elektromagnetik berdasarkan sifat fisik objek di permukaan. Metode ini memungkinkan pemisahan sinyal radar menjadi empat komponen hamburan utama, yaitu: *surface*

scattering, yang berhubungan dengan pantulan dari permukaan halus seperti tanah atau air; *double-bounce scattering*, yang biasanya dikaitkan dengan struktur buatan atau formasi vertikal seperti rekahan; *volume scattering*, yang umum terjadi pada vegetasi atau zona alterasi; serta *helix scattering*, yang meskipun jarang terjadi, dapat mengindikasikan bentuk atau orientasi objek yang kompleks [8].

Meskipun metode dekomposisi polarimetrik telah banyak digunakan untuk studi vegetasi, pertanian, dan struktur buatan, penelitian mengenai penerapannya secara integratif dalam eksplorasi panas bumi di wilayah vulkanik Indonesia, khususnya dengan pendekatan SAR polarimetrik, masih sangat terbatas. Hal ini menjadi fokus utama yang akan dijawab pada penelitian ini. Berdasarkan potensi geologi Kotamobagu dan kemajuan dalam teknologi radar, penelitian ini bertujuan untuk mengkaraktirasi zona geotermal menggunakan pendekatan dekomposisi polarimetrik Yamaguchi pada citra SAR polarimetrik ALOS PALSAR level 1.1. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini meliputi: (1) melakukan pemrosesan citra radar untuk mengidentifikasi klasifikasi lahan dan struktur geologi yang relevan dengan sistem panas bumi, serta (2) mengevaluasi hasil dekomposisi dalam mengidentifikasi zona alterasi dan rekahan yang menjadi indikator penting dalam sistem geotermal. Dengan pendekatan ini, diharapkan metode dekomposisi polarimetrik dapat menjadi alat bantu yang efektif dalam eksplorasi panas bumi tahap awal, yang tidak hanya efisien dari segi biaya dan waktu, tetapi juga adaptif terhadap kondisi cuaca tropis Indonesia.

2. DATA DAN METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan citra Synthetic Aperture Radar (SAR) dari sensor ALOS PALSAR sebagai data utama untuk menganalisis dan mengkaraktirasi zona geotermal. Data yang digunakan merupakan ALOS PALSAR level 1.1 (Single Look Complex) dengan resolusi spasial sekitar 12,5 meter, diperoleh dari satelit NASA. Langkah awal yang dilakukan adalah menentukan tingkat pemrosesan (*product processing level*) dari citra yang digunakan, yaitu level 1.1 (*Single Look Complex*). Penentuan ini penting untuk memastikan jenis praproses dan algoritma kalibrasi yang akan diterapkan sesuai dengan format data. Secara rinci, tahapan analisis akan dijelaskan di Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

2.1 Kalibrasi Radiometrik dan Backscatter

Salah satu tahapan penting dalam pengolahan data SAR adalah kalibrasi radiometrik, yaitu mengubah nilai amplitudo digital (Digital Number/DN) menjadi nilai fisis berupa koefisien backscattering atau sigma nought (σ^0). Nilai ini merepresentasikan energi pantulan dari permukaan bumi ke sensor SAR. Rumus kalibrasi radiometrik yang digunakan adalah:

$$\sigma_{i,j}^0 = K \cdot DN_{i,j}^2; \beta_{i,j}^0 = \frac{\sigma_{i,j}^0}{\sin(\alpha_{i,j})}; \gamma_{i,j}^0 = \frac{\sigma_{i,j}^0}{\cos(\alpha_{i,j})}$$

Dengan: σ^0 (*sigma nought*): koefisien backscatter; β^0 (*beta nought*): nilai kecerahan; γ^0 (*gamma nought*): representasi koreksi berdasarkan sudut datang; K: konstanta kalibrasi; DN: nilai digital amplitudo; α : sudut datang gelombang radar. Nilai sigma nought kemudian dikonversikan ke satuan desibel (dB) menggunakan rumus:

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \log_{10}(\sigma^0) = 20 \log_{10}(DN) + K_{dB}$$

2.2 Dekomposisi Polarimetrik Yamaguchi

Untuk memahami mekanisme hamburan elektromagnetik pada permukaan bumi yang berkaitan dengan zona geotermal, digunakan pendekatan Dekomposisi Polarimetrik Yamaguchi. Dekomposisi polarimetrik Yamaguchi digunakan untuk memisahkan sinyal SAR menjadi empat komponen utama hamburan, yaitu hamburan permukaan (*surface scattering*), hamburan volume (*volume scattering*), hamburan pantulan ganda (*double-bounce scattering*), dan hamburan heliks (*helix scattering*). Masing-masing komponen ini memberikan informasi yang berbeda tentang kondisi permukaan bumi.

- a. Hamburan permukaan mencerminkan kondisi tanah atau batuan kasar yang

memantulkan gelombang secara langsung ke sensor.

- b. Hamburan volume merepresentasikan objek dengan struktur acak seperti vegetasi lebat atau batuan alterasi yang memiliki pori atau rekahan
- c. Hamburan pantulan ganda umumnya muncul pada struktur vertikal atau bidang patahan yang saling tegak lurus, dan dapat menjadi indikasi adanya rekahan atau manifestasi geotermal.
- d. Hamburan heliks, meskipun tidak selalu dominan, menunjukkan adanya pola rotasi sinyal dan dapat mengindikasikan struktur kompleks atau interferensi sinyal.

Seluruh proses analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pemrosesan data SAR seperti SNAP (Sentinel Application Platform) atau PolSARPro, yang mendukung pemrosesan data polarimetrik dan dekomposisi Yamaguchi. Hasil dekomposisi divisualisasikan dalam bentuk citra komposit warna (RGB), di mana masing-masing warna mewakili komponen hamburan tertentu, sehingga memudahkan dalam interpretasi zona-zona anomali yang berpotensi sebagai sistem geotermal. Langkah akhir dari metodologi ini adalah melakukan interpretasi spasial terhadap hasil dekomposisi untuk mengidentifikasi dan memetakan zona-zona yang menunjukkan ciri-ciri khas dari aktivitas geotermal, seperti dominasi hamburan volume di zona alterasi hidrotermal atau dominasi hamburan double-bounce di area rekahan batuan. Pendekatan ini memberikan cara yang efektif untuk mengkaji zona geotermal secara tidak langsung dan non-destruktif melalui data penginderaan jauh. Sebagai langkah validasi, interpretasi visual dari hasil dekomposisi dibandingkan dengan data observasi lapangan yang mencakup

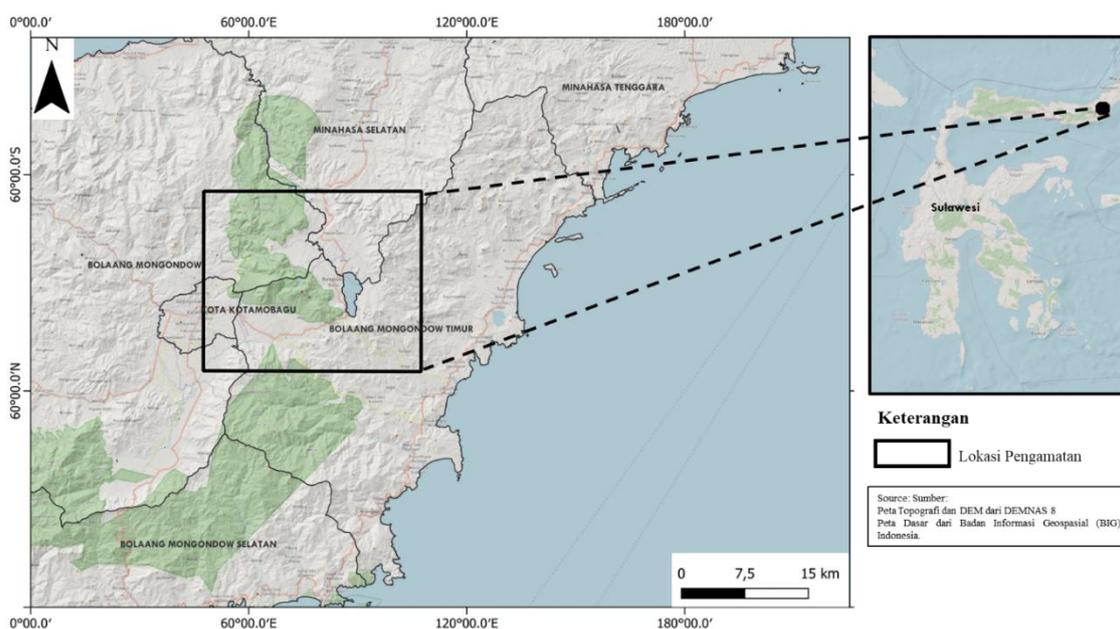
lokasi manifestasi geotermal dan zona rekahan dan data sekunder lainnya seperti peta geologi regional. Kesesuaian antara dominasi komponen hamburan tertentu (misalnya *Volume scattering* pada zona alterasi hidrotermal) dengan kondisi aktual lapangan digunakan sebagai indikator keakuratan metode ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Koreksi Citra

Data radar ALOS PALSAR yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data dengan jenis quad-polarization pada level 1.1, yang mencakup empat jenis polarisasi: HH, HV, VH, dan VV. Citra yang

digunakan adalah hasil akuisisi pada tanggal 30 Mei 2007 dengan *scene ID* ALPSRP071700000 dan ALPSRP0717000010 yang berlokasi di wilayah Kotamobagu, Sulawesi utara (Gambar 2). Citra yang didapatkan masih berada pada level *Single Look Complex* (SLC) dan belum mengalami proses proyeksi geometrik maupun kalibrasi radiometrik. Mode beam yang digunakan adalah PLR 21.5, dengan tipe data kompleks real 32-bit. Produk data ini merupakan citra dengan tampilan tunggal (*single look*), yang secara umum belum cocok langsung digunakan untuk analisis kuantitatif tanpa dilakukan proses pra-pemrosesan terlebih dahulu.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian yang terletak di Kotamobagu, Sulawesi Utara, Indonesia.

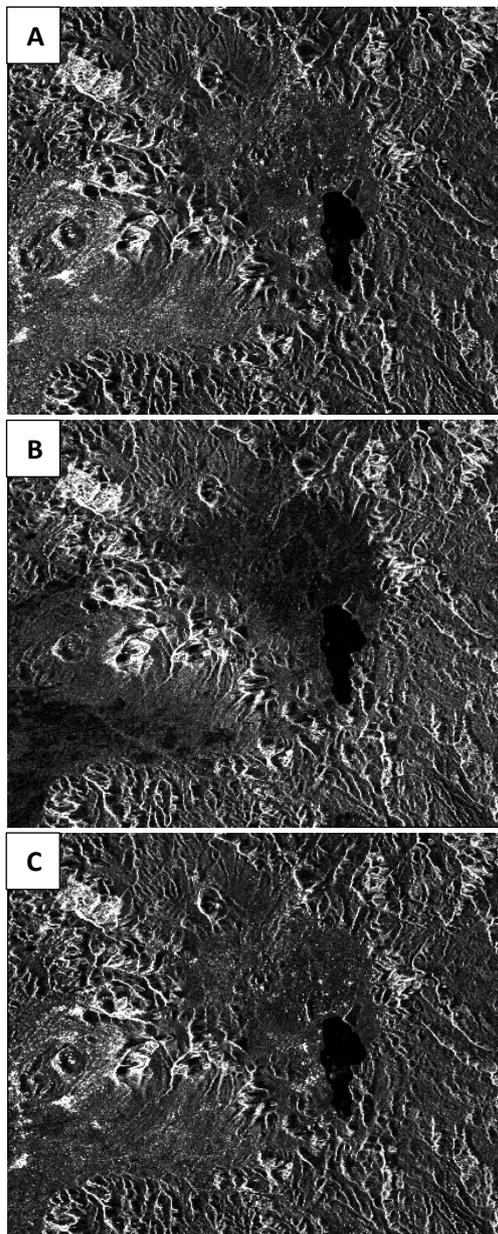
Sebelum data dapat dianalisis lebih lanjut, dilakukan koreksi geometrik untuk mengurangi distorsi yang terjadi akibat variasi topografi dan sudut kemiringan sensor. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa posisi geografis pada citra sesuai dengan koordinat lapangan sebenarnya. Koreksi dilakukan menggunakan metode *ortho-rectifikasi Range-Doppler*, yang memanfaatkan informasi data orbit

satelit, waktu perekaman, jarak miring dari sensor ke permukaan bumi, serta data elevasi dari DEM (*Digital Elevation Model*). Proses koreksi dilakukan dengan pendekatan transformasi backward, di mana indeks posisi range dan azimuth dari citra diperoleh kembali untuk setiap titik grid pada DEM. Transformasi ini digunakan untuk mengonversi posisi elemen hamburan balik dari sistem koordinat kartografis ke sistem

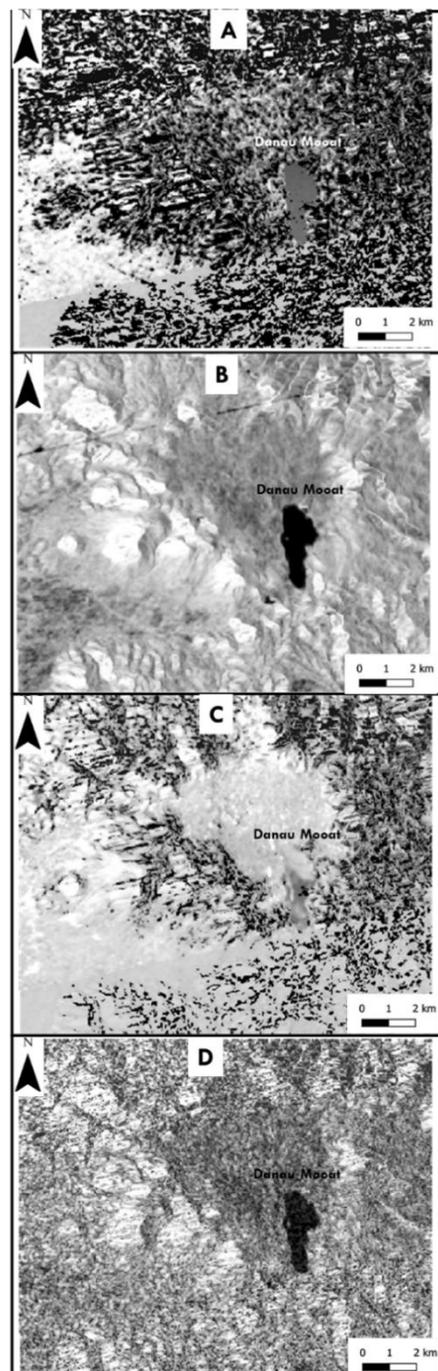
citra *slant-range*. DEM menyediakan informasi ketinggian medan, yang diperlukan untuk menghitung koordinat kartografis tiga dimensi. Selanjutnya, koordinat tersebut ditransformasikan ke sistem kartesian berdasarkan datum geodetik lokal, sehingga menghasilkan citra radar yang telah georeferensi dan siap untuk analisis spasial. Hasil koreksi geometrik dapat dilihat pada gambar 3.

3.2 Dekomposisi Polarimetrik Yamaguchi

Hasil pengolahan citra ALOS PALSAR Level 1.1 dengan pendekatan dekomposisi polarimetrik Yamaguchi menunjukkan bahwa data radar full polarimetric mampu mengungkap beragam tipe hamburan gelombang elektromagnetik yang berkaitan erat dengan karakteristik permukaan dan struktur bawah permukaan di wilayah penelitian.



Gambar 3. Citra ALOS PALSAR pada intensity HH (A), intensity HV (B), dan Intensity VV (C) yang telah dikoreksi geometrik



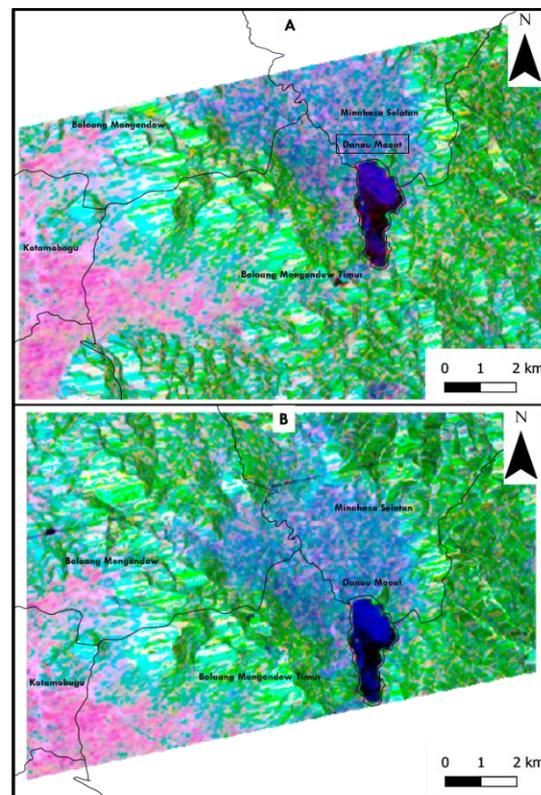
Gambar 4. Hasil dekomposisi Yamaguchi full polarisasi menghasilkan empat model scattering yaitu *double bounce* (A), *helix scattering* (B), *Surface scattering* (C), dan *Volume scattering* (D) dari citra ALOS PALSAR pada lokasi pengamatan.

Gambar 4 menunjukkan hasil klasifikasi dari metode dekomposisi Yamaguchi yang menghasilkan empat jenis model *scattering*, yaitu *double bounce* (A), *helix scattering* (B), *surface scattering* (C), dan *Volume scattering* (D). Masing-masing tipe hamburan ini memberikan indikasi fisik yang berbeda dari permukaan atau objek yang berinteraksi dengan gelombang radar. Sebelum dilakukan dekomposisi, citra polarimetrik mengalami beberapa tahap pemrosesan, di antaranya pembangkitan matriks koherensi (matrix generation) dan penyaringan speckle. Pada tahap *speckle filtering*, digunakan metode Refined Lee Filter, yang efektif dalam mereduksi *noise speckle* tanpa menghilangkan detail spasial penting. Filter ini mempertahankan kontras dan tekstur asli objek sembari memperhalus area yang homogen, sehingga meningkatkan kualitas interpretasi visual dan numerik dari citra.

3.3 Komposit RGB Polarimetrik Untuk Karakterisasi Permukaan Geotermal

Untuk meningkatkan interpretasi visual dari parameter hasil dekomposisi polarimetrik, pada penelitian ini digunakan komposit warna dari tiga saluran utama: *Double bounce Scattering* (merah), *Volume scattering* (hijau), dan *Surface scattering* (biru). Komposit warna ini dipilih karena mampu menyajikan informasi multi-dimensi dalam satu tampilan visual yang lebih mudah dibedakan oleh indera penglihatan manusia dibandingkan jika setiap parameter ditampilkan secara terpisah. Citra hasil komposit pada Gambar 5 menunjukkan

variasi intensitas warna yang mencerminkan dominansi mekanisme hamburan pada tiap piksel. Warna hijau cerah menandakan dominansi *Volume scattering* yang biasanya berasosiasi dengan tutupan vegetasi atau medium dengan kekasaran permukaan rendah. Warna merah hingga violet tua menunjukkan dominansi *Double bounce Scattering* dan *surface scattering* yang mengindikasikan kekasaran permukaan tinggi, kemungkinan besar berasal dari objek-objek keras seperti singkapan batuan, struktur geologi terangkat, atau bahkan area yang mengalami perubahan fisik akibat proses hidrotermal.



Gambar 5: RGB dekomposisi yamaguchi 00 (A) dan RGB dekomposisi yamaguchi 10 (B) di lokasi penelitian.

Selanjutnya, kami juga memvalidasi hasil pemrosesan dengan peta kekasaran permukaan yang didapatkan dari citra radar. Dari hasil tersebut diketahui bahwa piksel dengan warna hijau terbukti berasosiasi dengan area bertekstur halus atau datar,

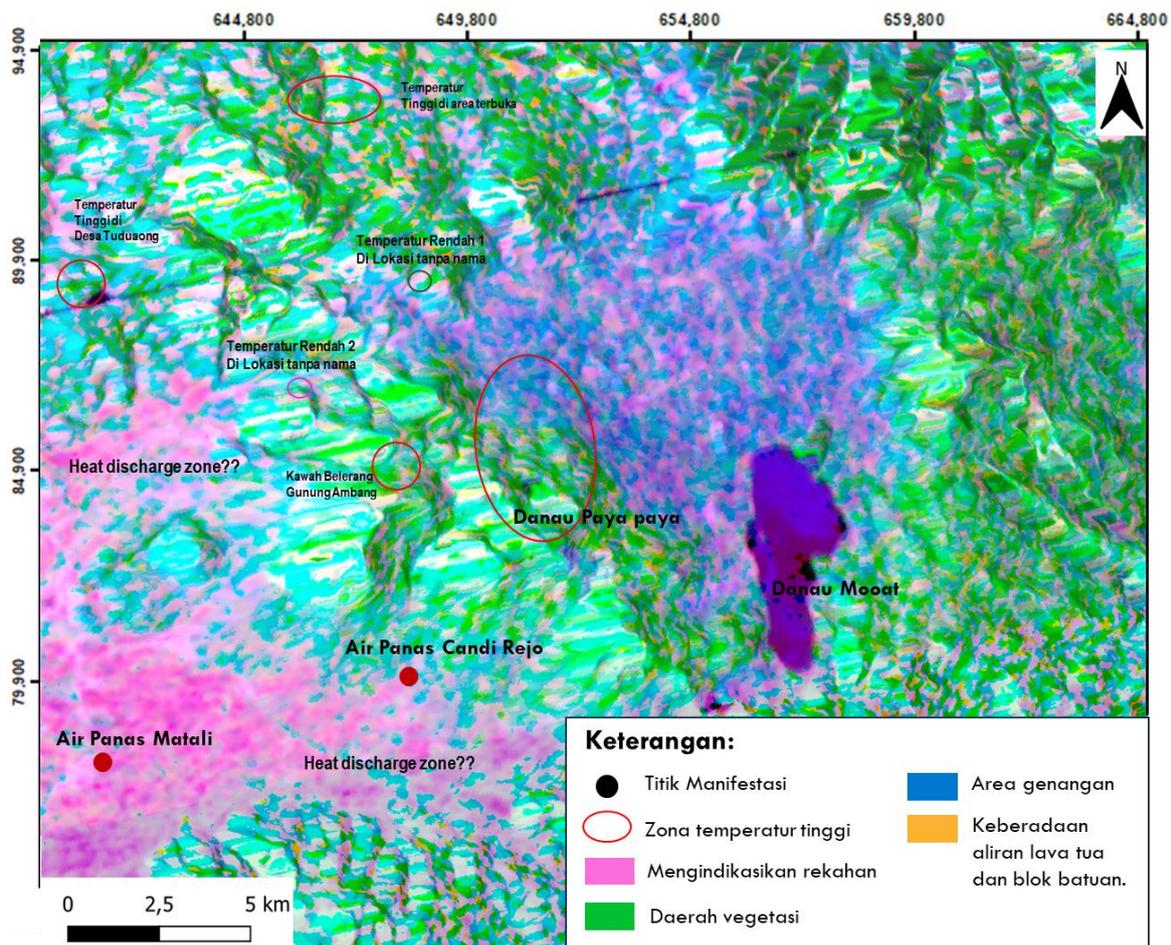
sedangkan warna merah hingga violet menunjukkan area dengan kekasaran tinggi yang berpotensi sebagai manifestasi permukaan dari aktivitas geotermal atau zona alterasi hidrotermal. Pola sebaran warna ini menjadi penting untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan zona target geotermal secara lebih presisi.

3.3 Karakterisasi permukaan geotermal berdasarkan citra RGB dekomposisi polarimetrik

Untuk mendukung identifikasi dan karakterisasi zona prospek geotermal, dilakukan integrasi antara citra RGB hasil dekomposisi polarimetrik Yamaguchi dari citra ALOS PALSAR, peta kekasaran permukaan, serta peta suhu permukaan (*Land*

Surface Temperature) yang diekstraksi dari citra Landsat 8 OLI tahun 2023 menggunakan algoritma *single-channel* berbasis kanal termal (band 10). Citra RGB yang dihasilkan dari dekomposisi polarimetrik memisahkan mekanisme hamburan gelombang radar menjadi tiga komponen utama, yaitu:

- Double-bounce scattering* (merah): mengindikasikan refleksi ganda dari objek tegak lurus seperti bangunan, retakan vertikal, atau rekahan.
- Volume scattering* (hijau): menunjukkan area dengan vegetasi lebat atau struktur poros.
- Surface scattering* (biru): menunjukkan area dengan permukaan keras dan kasar, seperti batuan terbuka atau tanah tanpa tutupan vegetasi.



Gambar 6. Interpretasi Zona Geotermal Berdasarkan Hasil Dekomposisi Polarimetrik Yamaguchi di Lokasi Penelitian

Kombinasi tiga komponen ini membantu mengenali ciri permukaan dan struktur bawah permukaan yang sering terkait dengan manifestasi geotermal. Zona dengan dominasi warna ungu atau violet mengindikasikan kombinasi kuat antara *surface scattering* dan *double-bounce*, yang umumnya berasosiasi dengan retakan atau struktur rekahan yang dapat menjadi jalur migrasi fluida hidrotermal. Hasil ini kemudian divalidasi dengan peta kekasaran permukaan yang diperoleh dari analisis DEM (Digital Elevation Model). Zona dengan kekasaran permukaan rendah ($\leq 0,02$ m) cenderung muncul dalam warna biru dan sering berhubungan dengan area genangan, tanah jenuh, atau endapan halus. Sementara itu, kekasaran sedang hingga tinggi (0,03–0,65 m) yang muncul dalam warna jingga dapat mengindikasikan keberadaan aliran lava tua, blok batuan, atau area rekahan yang kasar sesuai dengan karakteristik yang mendukung keberadaan sistem geotermal [9], [10], [11].

Selanjutnya, hasil pengamatan suhu dari citra LST juga menunjukkan bahwa suhu permukaan yang relatif lebih tinggi dibandingkan area sekitarnya (anomaly hotspot) sering kali berasosiasi dengan manifestasi seperti mata air panas, fumarol, atau tanah panas. Titik-titik dengan nilai LST tinggi yang tumpang tindih dengan zona *double-bounce* dan *surface scattering* memperkuat dugaan bahwa area tersebut merupakan zona keluaran panas (heat discharge zone) dari sistem hidrotermal bawah permukaan [2]. Hasil analisis ini diperkuat oleh keberadaan manifestasi panas bumi permukaan yang diketahui seperti Air Panas Matali dan Air Panas Candi Rejo. Keduanya menunjukkan korelasi spasial dengan zona violet pada citra RGB, area jingga dalam peta kekasaran, serta hotspot dalam peta LST. Hal ini mengindikasikan bahwa metode integratif ini efektif untuk

memetakan karakteristik permukaan zona geotermal, bahkan pada wilayah dengan tutupan vegetasi sedang hingga tinggi.

4. KESIMPULAN

Karakterisasi zona geotermal menggunakan citra SAR dengan pendekatan dekomposisi polarimetrik Yamaguchi, dikombinasikan dengan analisis kekasaran permukaan dan suhu permukaan (LST), menunjukkan hasil yang efektif dalam mengidentifikasi area prospek panas bumi. Efektivitas metode ini dibuktikan melalui konsistensi spasial antara zona anomali hasil analisis citra (polarimetri SAR, kekasaran permukaan, dan suhu LST) dengan lokasi manifestasi panas bumi di lapangan, sehingga valid untuk digunakan sebagai pendekatan awal eksplorasi panas bumi. Zona dengan hamburan *double bounce* dan *surface scattering* tinggi, yang ditampilkan dalam warna merah keunguan pada citra RGB, berasosiasi dengan daerah rekahan dan permeabilitas tinggi. Hal ini diperkuat dengan keberadaan anomali kekasaran dan suhu permukaan yang tinggi, terutama di sekitar manifestasi air panas.

Pendekatan integratif ini terbukti menjadi metode yang efisien dan akurat untuk pemetaan awal sistem geotermal, khususnya di wilayah dengan akses terbatas atau tertutup vegetasi. Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, terutama pada aspek resolusi spasial data satelit yang dapat mempengaruhi ketelitian interpretasi mikro di daerah panas bumi. Validasi lapangan juga masih terbatas pada beberapa titik manifestasi, sehingga generalisasi hasil harus dilakukan secara hati-hati. Untuk meningkatkan akurasi dan cakupan analisis, disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menambahkan data geofisika subsurface dan pengamatan lapangan yang lebih luas untuk

memperkuat interpretasi spasial sistem geotermal secara menyeluruh.

5. REFERENSI

- [1] Pertamina Geothermal Energy, "Feasibility Study Report of Geothermal Field," PGE, Jakarta, Indonesia, 2010.
- [2] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, dan H. Yamada, "Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 43, no. 8, hlm. 1699–1706, 2005.
- [3] H.-P. Chan, K. I. Konstantinou, dan M. Blackett, "Spatio-temporal surface temperature variations detected by satellite thermal infrared images at Merapi volcano, Indonesia," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 420, hlm. 107405, 2021.
- [4] J. L. Ball, P. H. Stauffer, E. S. Calder, dan G. A. Valentine, "The hydrothermal alteration of cooling lava domes," *Bulletin of Volcanology*, vol. 77, hlm. 1–16, 2015.
- [5] K. F. Mau, K. Subagiada, dan S. Supriyanto, "Analisis Pengaruh Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Suhu Permukaan Tanah di Kota Samarinda," *GEOSAINS KUTAI BASIN*, vol. 6, no. 1, hlm. 16–24, 2023.
- [6] J. A. Richards, *Remote sensing with imaging radar*, vol. 1. Springer, 2009.
- [7] F. T. Ulaby dan E. A. Wilson, "The microwave propagation and backscattering characteristics of vegetation," 1984.
- [8] Y. Yamaguchi, "Image-scale and look-direction effects on the detectability of lineaments in radar images," *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, hlm. 117–27, 1985.
- [9] D. T. Hodder, "Application of remote sensing to geothermal prospecting," *Geothermics*, vol. 2, hlm. 368–380, 1970.
- [10] C. Bignami, M. Chini, S. Amici, dan E. Trasatti, "Synergic use of multi-sensor satellite data for volcanic hazards monitoring: the Fogo (Cape Verde) 2014–2015 effusive eruption," *Frontiers in Earth Science*, vol. 8, hlm. 22, 2020.
- [11] R. P. Gupta, *Remote sensing geology*. Springer, 2017.