



Pemantauan Suhu Puncak Gunung Merapi menggunakan *Land Surface Temperature* (LST) Citra Landsat Tahun 2020-2025 untuk Analisis Aktivitas Vulkanik

Monitoring Merapi Volcano Peak Temperature using Landsat Land Surface Temperature (LST) Imagery from 2020-2025 for Volcanic Activity Analysis

Dani Mardiaty, M. Gazali Rachman, Ikhwannur Adha, Peter Pratistha Utama, Oki Kurniawan, Alfathony Krisnabudhi
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia.

Article Info:

Received: 09-01-2025

Accepted: 05-02-2025

Published: 30-04-2025

Kata Kunci:

Merapi,
Land Surface Temperature,
Citra Landsat,
Aktivitas Vulkanik

DOI:

[10.31315/imagi.v5i1.14886](https://doi.org/10.31315/imagi.v5i1.14886)

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan suhu permukaan puncak Gunung Merapi dengan memanfaatkan data *Land Surface Temperature* (LST). Hasil penelitian menunjukkan adanya dinamika suhu permukaan yang signifikan pada area puncak, yang menunjukkan korelasi temporal dengan fase-fase peningkatan aktivitas vulkanik seperti ekstrusi kubah lava dan letusan efusif pada tahun 2021 dan 2023. Kenaikan suhu yang konsisten sebelum peristiwa erupsi utama mengindikasikan potensi pemanfaatan data LST sebagai indikator awal dalam sistem peringatan dini aktivitas vulkanik. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pemantauan vulkanik berbasis penginderaan jauh yang efisien, non-invasif, dan bersifat operasional, serta relevan untuk diterapkan dalam sistem mitigasi bencana di wilayah gunung api aktif di Indonesia.

Abstract: This study aims to analyze the surface temperature variations at the summit of Mount Merapi using *Land Surface Temperature* (LST). The results reveal significant surface temperature dynamics at the summit area, temporally correlated with increased volcanic activity, such as lava dome extrusions and effusive eruptions in 2021 and 2023. A consistent temperature increase prior to major eruptive events indicates the potential use of LST as an early indicator in volcanic early warning systems. This study contributes to the development of an efficient, non-invasive, and operational remote sensing-based volcanic monitoring method, which is highly relevant for disaster mitigation systems in Indonesia's active volcanic regions.

How to Cite:

Mardiaty, D., Rachman, M. G., Adha, I., Utama, P. P., Kurniawan, O., Krisnabudhi, A. (2025). Pemantauan Suhu Puncak Gunung Merapi menggunakan *Land Surface Temperature* (LST) Citra Landsat Tahun 2020-2025 untuk Analisis Aktivitas Vulkanik. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 5(1), 35-43. <https://doi.org/10.31315/imagi.v5i1.14886>.

*Corresponding Author:

Email : dani.mardiaty@upnyk.ac.id
Address : Jalan SWK Jl. Ring Road Utara
No.104, Sleman, 55283

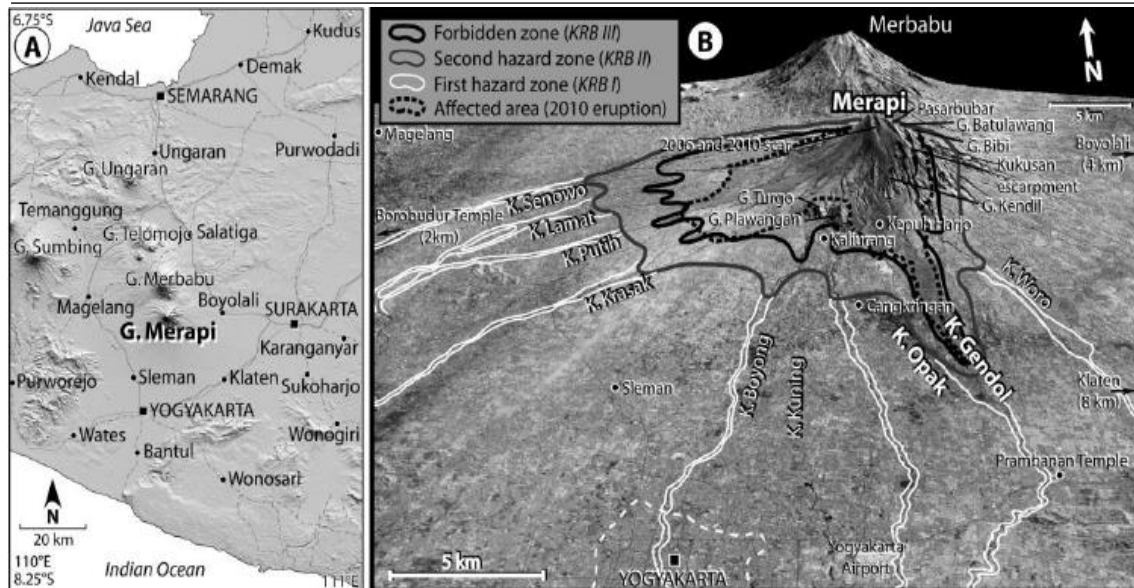
PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada zona Cincin Api Pasifik yang menjadikannya salah satu negara dengan jumlah gunung api aktif terbanyak di dunia. Di antara gunung-gunung tersebut, Gunung Merapi dikenal sebagai salah satu yang paling aktif, dengan sejarah erupsi yang panjang dan dampak yang signifikan terhadap lingkungan serta keselamatan masyarakat sekitarnya (Siswamidjono dkk., 1995; Surono dkk., 2012). Aktivitas vulkanik Merapi bersifat efusif hingga eksplosif, sehingga memerlukan pemantauan yang cermat dan berkelanjutan guna mengantisipasi potensi bencana. Pemantauan konvensional melalui observasi visual, seismik, dan deformasi masih menjadi metode utama, namun memiliki keterbatasan spasial dan temporal. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi alternatif seperti penginderaan jauh menjadi semakin relevan dalam konteks mitigasi risiko bencana vulkanik.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh, khususnya melalui pemanfaatan citra satelit Landsat, telah membuka peluang baru dalam pemantauan geodinamika permukaan bumi, termasuk aktivitas vulkanik. Produk suhu permukaan lahan atau *Land Surface Temperature* (LST) yang dihasilkan dari kanal termal satelit Landsat OLI/TIRS memungkinkan deteksi anomali panas di permukaan gunung api dengan resolusi spasial yang memadai (Weng dkk., 2004; Chander dkk., 2009). Studi terdahulu menunjukkan bahwa fluktuasi LST dapat berkorelasi dengan aktivitas vulkanik seperti ekstrusi lava dan peningkatan aktivitas fumarol (Ramadani dkk., 2020; Pungky dkk., 2021). Namun demikian, pemanfaatan data LST Landsat secara sistematis dan jangka panjang pada Gunung Merapi masih terbatas, khususnya untuk rentang waktu terbaru pasca erupsi besar 2010 dan perkembangan aktivitas hingga pertengahan dekade 2020-an.

Meskipun sejumlah studi telah mengidentifikasi keterkaitan antara anomali termal permukaan dan aktivitas vulkanik, belum banyak penelitian yang secara khusus memanfaatkan data LST Landsat 8–9 Collection 2 Level 2 secara konsisten untuk memantau suhu puncak Gunung Merapi dalam jangka waktu panjang. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren perubahan LST pada area puncak Gunung Merapi selama periode 2020–2025 guna mengevaluasi potensinya sebagai indikator awal aktivitas vulkanik.

Penelitian sebelumnya yang memanfaatkan data LST umumnya berfokus pada periode waktu terbatas atau mengandalkan sensor dengan resolusi spasial yang lebih kasar seperti MODIS (Trunk & Bernard, 2008; Harris dkk., 2012), yang kurang optimal dalam menangkap dinamika termal pada area sempit seperti puncak Merapi. Selain itu, pendekatan integratif yang mengaitkan data LST dengan kronologi aktivitas vulkanik Merapi secara temporal belum dilakukan secara komprehensif. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan memanfaatkan citra Landsat 8–9 OLI/TIRS C2 L2, yang memiliki resolusi spasial 30 meter dan temporal menengah, untuk mengevaluasi perubahan LST di puncak Merapi selama enam tahun terakhir. Dengan demikian, studi ini berkontribusi dalam memperluas pendekatan pemantauan berbasis penginderaan jauh pada sistem peringatan dini aktivitas vulkanik yang lebih adaptif, presisi, dan berkelanjutan.



Gambar 1. (a) Lokasi Gunung Merapi, yang merupakan gunung api termuda dan paling selatan dalam rangkaian kerucut vulkanik komposit yang berarah 165° , yang terdiri dari Gunung Ungaran, Telomoyo, Merbabu, dan Merapi dari utara ke selatan, serta kota-kota di sekitarnya. (b) Citra SPOT-5 wilayah Merapi–Merbabu tanggal 10 Juni 2011 yang mengarah ke barat laut dan diproyeksikan pada model elevasi digital ASTER-GDEM memperlihatkan keberadaan gunung Merbabu dan Merapi (Solikhin dkk., 2015).

Geologi Daerah Penelitian

Gunung Merapi terletak di bagian selatan Pulau Jawa, tepatnya di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan sebagian wilayah Jawa Tengah, dalam zona pegunungan vulkanik yang merupakan bagian dari Busur Vulkanik Sunda. Secara geografis, gunung ini menempati posisi strategis di antara kota-kota besar seperti Yogyakarta, Magelang, dan Klaten, dengan elevasi puncak mencapai ± 2.930 meter di atas permukaan laut. Gunung Merapi merupakan stratovolcano aktif yang tersusun atas endapan lava, piroklastik, dan lahar hasil aktivitas vulkanik berulang sejak kala Kuartar (Camus dkk., 2000). Litologi utamanya mencakup lava andesit-basaltik hingga andesit, tufa, breksi piroklastik, dan aliran lahar yang tersebar di sekeliling tubuh gunung. Stratigrafi kawasan ini menunjukkan akumulasi produk erupsi efusif dan eksplosif yang bertumpuk membentuk kerucut kompleks, diselingi dengan formasi lahar yang menyelimuti lereng.

Lingkungan pengendapan dari satuan-satuan batuan di Merapi mencerminkan pengaruh dari aktivitas vulkanik aktif yang bersifat poligenetik, dengan produk yang terus diperbarui melalui erupsi berkala. Zona puncak Merapi didominasi oleh kubah lava dan kolom fumarol, yang terbentuk dari aktivitas magmatik dangkal. Sistem saluran fluida panas ini berkontribusi terhadap anomali suhu permukaan yang dapat direkam oleh sensor termal satelit. Dalam konteks ini, informasi mengenai litologi dan lingkungan geologi sekitar menjadi penting dalam memahami pola distribusi panas permukaan, yang dipengaruhi oleh sifat termal dari batuan penyusunnya.

Secara tektonik, Gunung Merapi terletak di zona subduksi aktif antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, dengan arah subduksi dari selatan ke utara di sepanjang Palung Jawa. Subduksi ini menghasilkan deretan busur vulkanik aktif yang membentang dari Sumatera hingga Kepulauan Nusa Tenggara (Hall & Morley, 2004). Posisi Merapi berada dalam lintasan yang dikenal sebagai Zona Magmatik Jawa Tengah, yang terbentuk akibat migrasi fluida dan pencairan mantel di bawah kerak benua sebagai respons terhadap subduksi. Aktivitas tektonik ini memainkan peran penting dalam pasokan magma dan pembentukan sistem hidrotermal dangkal di tubuh gunung.

Struktur geologi di sekitar Gunung Merapi ditandai oleh keberadaan sesar-sesar aktif dan sistem rekahan radial yang berkembang akibat tekanan dari akumulasi magma di bawah permukaan. Di bagian puncak, zona rekahan ini menjadi jalur utama keluarnya gas vulkanik dan fluida hidrotermal, yang berkontribusi terhadap peningkatan suhu lokal pada permukaan tanah. Beberapa studi menunjukkan bahwa sistem hidrotermal Merapi terdiri atas kolom uap dan air panas yang terperangkap dalam rekahan batuan vulkanik, dan menjadi sumber panas utama dalam sistem permukaan (Williams dkk., 2001). Struktur ini dapat menjadi kanal penghantar energi panas dari dalam bumi menuju permukaan, yang terekam sebagai anomali termal dalam citra satelit.

Beberapa penelitian menyebutkan bahwa sistem hidrotermal Merapi cenderung tidak stabil dan berubah-ubah tergantung pada intensitas suplai magma dan tekanan bawah permukaan (Allard dkk., 1991; Surono dkk., 2012). Namun demikian, studi lain berpendapat bahwa sistem hidrotermal Merapi memiliki kestabilan spasial tertentu dan dapat menjadi indikator temporal yang akurat bagi aktivitas vulkanik. Dalam konteks ini, penelitian ini berpihak pada pendekatan bahwa anomali suhu permukaan yang konsisten secara spasial dan temporal dapat mencerminkan dinamika sistem hidrotermal aktif yang terhubung langsung dengan proses magmatik di bawah puncak. Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh terhadap kondisi geologi dan tektonik regional Merapi menjadi dasar penting dalam interpretasi citra LST dan korelasinya dengan aktivitas vulkanik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis penginderaan jauh dengan tujuan utama untuk menganalisis dinamika suhu permukaan (*Land Surface Temperature*/LST) di puncak Gunung Merapi sebagai indikator aktivitas vulkanik. Data utama yang digunakan berasal dari citra satelit Landsat 8-9 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS) Collection 2 Level 2 (C2 L2) periode 2020 hingga 2025. Produk C2 L2 dipilih karena telah melalui proses koreksi atmosferik dan radiometrik secara sistematis oleh USGS, sehingga menghasilkan data LST yang dapat langsung dianalisis tanpa perlu konversi lanjutan dari nilai digital number (DN).

Proses akuisisi data dilakukan melalui platform EarthExplorer USGS, dengan pemilihan scene yang mencakup area puncak Gunung Merapi dan kondisi tutupan awan <20%. Band yang digunakan untuk ekstraksi LST adalah Band 10 TIRS, dengan resolusi spasial 100 meter yang telah dikoreksi menjadi 30 meter secara resampling. Penggunaan Band 10 didasarkan pada rekomendasi USGS karena Band 11 pada sensor TIRS mengandung noise radiometrik yang tidak direkomendasikan untuk estimasi suhu permukaan (USGS, 2021). Nilai LST diperoleh dari layer "ST_B10" yang

tersedia dalam produk C2 L2 dengan satuan Kelvin, dan dikonversi ke Celsius untuk keperluan interpretasi.

Ekstraksi nilai suhu difokuskan pada area puncak Gunung Merapi dengan radius ± 500 meter dari koordinat puncak utama. Teknik zonal statistics diterapkan untuk memperoleh nilai rata-rata, maksimum, dan standar deviasi suhu pada tiap scene. Selanjutnya, dilakukan analisis spasial menggunakan perangkat lunak GIS untuk memvisualisasikan distribusi suhu permukaan dalam bentuk peta termal. Analisis temporal dilakukan dengan pendekatan deret waktu (time series) untuk mengidentifikasi tren perubahan suhu dan mendeteksi potensi anomali yang mendahului aktivitas vulkanik.

Integrasi antara data LST dan catatan aktivitas vulkanik dilakukan melalui komparasi temporal dengan laporan resmi dari PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi) terkait periode erupsi, peningkatan status aktivitas, dan ekstrusi kubah lava. Korelasi kualitatif antara anomali LST dan kejadian vulkanik digunakan untuk validasi interpretasi hasil serta memperkuat argumen tentang efektivitas LST sebagai indikator aktivitas vulkanik. Pendekatan ini memungkinkan penyusunan kerangka evaluasi sistem pemantauan berbasis satelit yang mendukung sistem peringatan dini di kawasan Gunung Merapi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Korelasi LST dan Aktivitas Vulkanik

Analisis data Land Surface Temperature (LST) yang diperoleh dari citra satelit Landsat 8 dan 9 OLI/TIRS Collection 2 Level 2 menunjukkan adanya dinamika suhu permukaan yang mencolok di area puncak Gunung Merapi selama periode 2020 hingga 2025 (Gambar 2). Fluktuasi suhu ini merepresentasikan perubahan kondisi termal akibat aktivitas vulkanik subsurficial, termasuk migrasi magma, tekanan gas, dan aliran fluida hidrotermal yang keluar melalui sistem rekahan puncak (Harris dkk., 2012; Williams dkk., 2001).

Pada tahun 2020, suhu maksimum puncak tercatat sebesar $56,33^{\circ}\text{C}$, mencerminkan kondisi relatif stabil pasca fase erupsi 2018–2019, dengan aktivitas dominan berupa degassing ringan. Memasuki tahun 2021, terjadi lonjakan suhu signifikan hingga mencapai $84,39^{\circ}\text{C}$. Peningkatan ini bertepatan dengan ekstrusi kubah lava dan peningkatan emisi gas vulkanik yang tercatat oleh PVMBG, serta status peningkatan aktivitas ke level Siaga. Tren penurunan suhu terjadi pada tahun 2022, dengan suhu maksimum $54,36^{\circ}\text{C}$, yang mengindikasikan meredanya suplai magma dan menurunnya tekanan hidrotermal.

Pada tahun 2023, suhu kembali meningkat secara signifikan menjadi $94,09^{\circ}\text{C}$, merupakan suhu tertinggi dalam kurun pengamatan. Peningkatan suhu ini mendahului fase erupsi efusif dan pertumbuhan kubah lava baru, sesuai dengan laporan aktivitas vulkanik intensif di awal hingga pertengahan tahun 2023 (PVMBG, 2023). Tahun 2024 menunjukkan penurunan suhu menjadi $78,71^{\circ}\text{C}$, yang masih menunjukkan keberadaan sumber panas aktif. Sementara itu, suhu pada tahun 2025 tercatat menurun drastis menjadi $45,75^{\circ}\text{C}$, mengindikasikan fase istirahat relatif dalam sistem magmatik dangkal. Korelasi antara puncak-puncak suhu dan peristiwa vulkanik utama menunjukkan bahwa LST dari citra satelit dapat merekam perubahan kondisi termal yang berkaitan erat dengan aktivitas vulkanik. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang

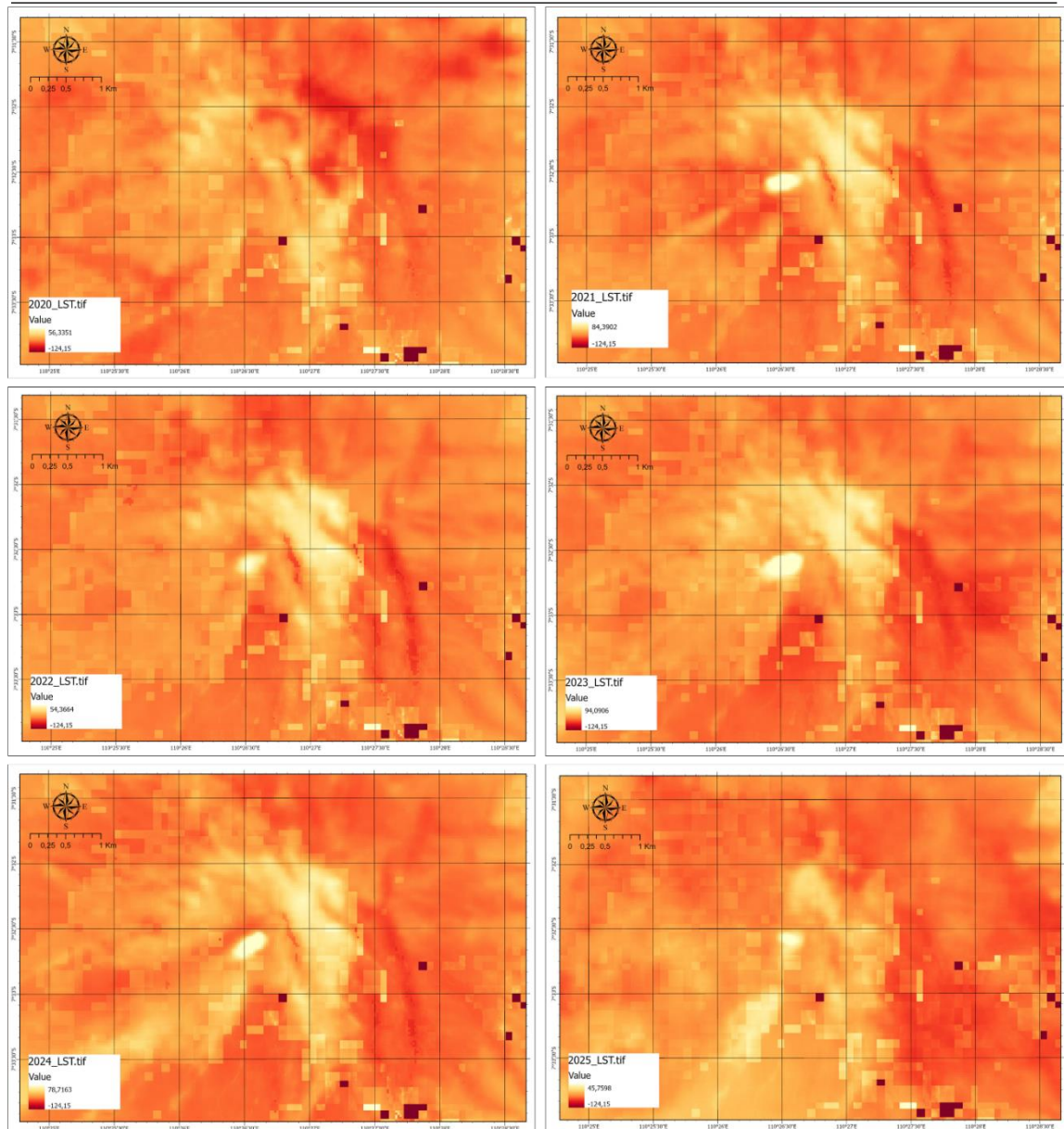
menyatakan bahwa peningkatan LST dapat menjadi indikator awal dari aktivitas vulkanik yang akan datang (Ramadani dkk., 2020; Trunk & Bernard, 2008). Oleh karena itu, pengamatan jangka panjang terhadap fluktuasi LST memiliki potensi signifikan dalam pengembangan sistem peringatan dini berbasis penginderaan jauh untuk gunung api aktif seperti Merapi.

Dalam analisis ini, sejumlah faktor lingkungan dan atmosferik seperti tutupan awan, kelembaban atmosfer, serta variasi sudut pencitraan satelit telah diperhitungkan dengan menerapkan seleksi data berbasis kriteria kualitas citra (cloud cover <20%) dan pemrosesan data C2 L2 yang telah mengalami koreksi atmosferik. Walaupun demikian, efek residu dari awan tipis (thin cirrus) dan uap air tetap dapat menyebabkan deviasi kecil dalam estimasi suhu, khususnya pada musim hujan. Untuk mengurangi pengaruh tersebut, hanya data dengan nilai pixel quality tinggi dan tanpa interferensi signifikan yang diikutsertakan dalam analisis akhir.

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan korelasi kuat antara anomali LST dan aktivitas vulkanik Merapi, metode ini memiliki keterbatasan dari sisi resolusi temporal, mengingat frekuensi akuisisi citra Landsat hanya setiap 16 hari. Selain itu, keterbatasan resolusi spasial (30 meter) dapat mempengaruhi deteksi perubahan suhu skala mikro di dalam kawah aktif. Temuan ini sejalan dengan studi oleh Ramadani dkk. (2020) dan Pungky dkk. (2021) yang menggunakan pendekatan serupa di gunung api lain dan melaporkan keterbatasan serupa. Namun, kelebihan pendekatan ini terletak pada kestabilan data jangka panjang dan konsistensi kualitas citra dari sensor OLI/TIRS dibandingkan dengan sensor resolusi rendah seperti MODIS.

Hasil penelitian ini memberikan landasan kuat untuk pengembangan sistem peringatan dini berbasis pemantauan suhu permukaan. Deteksi kenaikan suhu yang konsisten dan terukur sebelum fase erupsi menunjukkan bahwa LST dapat dijadikan sebagai indikator awal perubahan kondisi termal di puncak Merapi. Integrasi LST dengan parameter pemantauan lainnya seperti seismik dan deformasi akan memperkuat sistem pemantauan multivarian yang lebih akurat dan responsif. Dalam jangka panjang, pendekatan ini berpotensi diadopsi sebagai bagian dari sistem operasional mitigasi bencana vulkanik di Indonesia, terutama pada gunung api bertipe efusif dengan aktivitas permukaan yang terfokus seperti Gunung Merapi.

Beberapa literatur sebelumnya menyatakan bahwa fluktuasi suhu permukaan hanya mencerminkan variasi lingkungan dan tidak selalu berkorelasi langsung dengan dinamika magmatik (Harris dkk., 2012; Trunk & Bernard, 2008). Namun, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa, dalam konteks Gunung Merapi, tren LST menunjukkan koherensi temporal yang tinggi terhadap fase-fase aktivitas vulkanik yang tercatat secara resmi. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan bahwa LST, apabila dianalisis secara spasial dan temporal secara sistematis, dapat menjadi parameter indikator dini yang kredibel dalam mendeteksi dinamika vulkanik, khususnya dalam konteks sistem hidrotermal aktif di puncak gunung api.



Gambar 2. Citra LST dari tahun 2020-2025 yang menunjukkan fluktuasi suhu puncak Gunung Merapi. Tahun 2020 suhu puncak maksimum 56,33°C, tahun 2021 terjadi kenaikan sampai 84,39°C, tahun 2022 terjadi penurunan menjadi 54,36°C, tahun 2023 suhu puncak naik signifikan menjadi 94,09°C, tahun 2024 sebesar 78,71°C dan tahun 2025 semakin menurun mencapai 45,75°C.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Land Surface Temperature (LST) yang dihasilkan dari citra satelit Landsat 8–9 OLI/TIRS Collection 2 Level 2 dapat digunakan secara efektif untuk memantau dinamika termal puncak Gunung Merapi selama periode 2020–2025. Hasil analisis mengungkapkan adanya fluktuasi suhu yang berkorelasi erat dengan fase-fase aktivitas vulkanik, seperti ekstrusi kubah lava dan peningkatan emisi gas. Kenaikan suhu permukaan yang signifikan tercatat sebelum peristiwa erupsi pada tahun 2021 dan 2023, mengindikasikan potensi LST sebagai indikator awal dalam sistem peringatan dini.

Pemrosesan data telah mempertimbangkan faktor-faktor atmosferik serta keterbatasan resolusi temporal, dan meskipun terdapat kendala, pendekatan ini terbukti memberikan gambaran yang relevan mengenai kondisi permukaan vulkanik. Penurunan suhu pada tahun 2025 mengonfirmasi fase istirahat relatif dalam sistem magmatik dangkal Merapi. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat pemahaman mengenai hubungan antara anomali termal permukaan dan aktivitas vulkanik, serta mendorong pemanfaatan teknologi penginderaan jauh sebagai komponen integral dalam sistem mitigasi bencana gunung api di Indonesia.

UCAPAN TERI MAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) atas ketersediaan data aktivitas vulkanik Gunung Merapi yang menjadi acuan penting dalam validasi hasil penelitian ini. Penghargaan juga disampaikan kepada United States Geological Survey (USGS) atas penyediaan data citra Landsat 8 dan 9 OLI/TIRS Collection 2 Level 2 secara terbuka. Penulis turut berterima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan teknis maupun akademik selama proses penyusunan penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Allard, P., Maurenas, J. M., Briole, P., & Zlotnicki, J. (1991). Sulphur output and magma degassing budget of Merapi volcano, Indonesia. *Nature*, 351, 387-391.
- Camus, G., Gourgaud, A., Mossand-Berthommier, P. C., & Vincent, P. M. (2000). *Merapi (Central Java, Indonesia): Behaviour of a Persistently Active Volcano*. Academic Press.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903.
- Hall, R., & Morley, C. K. (2004). *Sundaland basins*. In P. Clift, W. Kuhnt, P. Wang, & D. Hayes (Eds.), *Continent-Ocean Interactions Within East Asian Marginal Seas*. American Geophysical Union.
- Harris, A. J. L., Lodato, L., & Dehn, J. (2012). Volcano monitoring with satellite thermal imaging. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.015>.
- PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi). (2023). *Laporan Aktivitas Gunung Merapi Tahun 2023*. Badan Geologi, Kementerian ESDM.
- Pungky, F. W., Kartadinata, M. N., & Pribadi, A. (2021). Pemantauan suhu permukaan Gunung Merapi menggunakan citra satelit Landsat. *Jurnal Geomatika dan Sains Informasi Geospasial*, 4(2), 145-154.

- Ramadani, R., Putra, D. R., & Ardiansyah, R. (2020). Analisis perubahan suhu permukaan lahan untuk mendeteksi aktivitas vulkanik Gunung Sinabung. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 26(1), 17-26.
- Siswowidjono, S., Tilling, R. I., & Burford, R. O. (1995). Monitoring and eruption forecasting of Mount Merapi, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 64(1-2), 1-17.
- Solikhin, A., Thouret, J.-C., Oehler, J.-F., Gupta, A., Sayudi, D. S., & Liew, S. C. (2015). Effects and Behavior of Pyroclastic and Lahar Deposits of the 2010 Merapi Eruption based on High-Resolution Optical Imagery. *Procedia Earth and Planetary Science*, 12, 1-10.
- Surono, Jousset, P., Pallister, J., Boichu, M., Buongiorno, M. F., Budisantoso, A., ... & Lavigne, F. (2012). The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano—A '100-year' event. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241-242, 121-135.
- Trunk, L., & Bernard, A. (2008). Mapping volcanic thermal anomalies using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 113(2), 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.002>.
- United States Geological Survey (USGS). (2021). *Landsat 8-9 (OLI/TIRS) Collection 2 Level-2 Science Products Guide*. U.S. Department of the Interior.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483.
- Williams, S. N., Self, S., & Calvache, M. L. (2001). *Volcanology and geothermal energy*. In M. H. L. Bailey (Ed.), *Geothermal Energy and Volcanism in Java*. Smithsonian Institution.