

Pemanfaatan Penginderaan Jauh Dalam Bidang Geologi

Ahmad Firly Mamonto¹, Muamart Gimnastiar Lahay¹, Riki Hermawan¹, Irdiansyah Panai¹, Riyan Puh¹,
Sri Maryati^{2*}, Noviar Akase¹, Nawir N. Sune²

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Gorontalo

²Program Studi Pendidikan Geografi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: sri.maryati@ung.ac.id

Abstract

This article presents a literature-based synthesis on the use of remote sensing technology in geology. The review highlights the application of optical multispectral data (e.g., Landsat, ASTER, and Sentinel-2), radar data (e.g., SAR and DInSAR-based approaches), LiDAR, and other supporting datasets across major geological use cases. The synthesis indicates four main application groups: lithology and mineralization mapping, structural analysis and surface deformation monitoring, geomorphology and topography assessment, and integrative multisensor applications. Multispectral imagery is widely used to distinguish the spectral characteristics of rocks and minerals and to support preliminary mapping. Radar data play a key role in detecting deformation related to tectonic processes and extracting structural information. LiDAR and GPR provide detailed topographic representation and shallow subsurface information relevant to geomorphological analysis and geological stability assessment. Overall, integrating multiple sensors improves interpretative reliability and broadens the use of remote sensing for exploration, disaster mitigation, and environmental management in Indonesia.

Keywords: Geology; Remote Sensing; Multispectral Imagery; Radar; LiDAR; GPR

Abstrak

Artikel ini menyajikan sintesis studi literatur mengenai pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dalam bidang geologi. Kajian berfokus pada penggunaan data optik multispektral (misalnya Landsat, ASTER, dan Sentinel-2), radar (misalnya SAR/pendekatan DInSAR), LiDAR, serta data pendukung lainnya pada berbagai aplikasi geologi. Hasil sintesis menunjukkan empat kelompok pemanfaatan utama, yaitu pemetaan litologi dan mineralisasi, analisis struktur serta deformasi permukaan, kajian morfologi dan topografi, dan aplikasi integratif multisensor. Citra multispektral banyak dimanfaatkan untuk membedakan karakter spektral batuan/mineral dan mendukung pemetaan awal. Data radar berperan penting dalam memantau deformasi akibat proses tektonik dan mengekstraksi informasi struktur. LiDAR dan GPR memberikan detail topografi dan informasi kondisi bawah permukaan dangkal yang relevan bagi analisis geomorfologi dan kestabilan geologi. Integrasi berbagai sensor memperkuat ketelitian interpretasi dan memperluas pemanfaatan penginderaan jauh dalam eksplorasi, mitigasi bencana, serta pengelolaan lingkungan di Indonesia.

Kata kunci: Geologi; Penginderaan Jauh; Citra Multispektral; Radar; LiDAR; GPR

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi penginderaan jauh telah membawa kemajuan besar dalam berbagai bidang ilmu kebumiharian, khususnya geologi, geomorfologi, dan lingkungan. Penginderaan jauh memungkinkan pengamatan permukaan bumi secara luas, cepat, dan efisien tanpa harus melakukan survei langsung di lapangan. Dalam konteks geologi, teknologi ini berperan penting untuk mengidentifikasi struktur batuan, litologi, zona mineralisasi, serta perubahan morfologi permukaan yang disebabkan oleh proses alam maupun aktivitas manusia. Ketersediaan data terbuka seperti Landsat, Sentinel, dan produk elevasi, disertai kemajuan komputasi, turut mempercepat pemetaan tematik geologi dari tingkat regional hingga detail.

Kegiatan geologi modern membutuhkan informasi yang efisien dan teliti, khususnya pada wilayah dengan akses lapangan terbatas, risiko tinggi, atau cakupan area yang luas. Pemetaan konvensional berbasis survei lapangan tetap menjadi rujukan utama, namun sering menghadapi keterbatasan biaya, waktu, dan keselamatan. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan penginderaan jauh sebagai sumber data awal (*baseline*) dan pendukung interpretasi, termasuk untuk penentuan lokasi survei, penajaman batas satuan batuan, serta identifikasi indikasi struktur atau zona prospek.

Beragam jenis sensor penginderaan jauh memiliki keunggulan yang saling melengkapi dalam aplikasi geologi. Citra optik multispektral (misalnya Landsat, Sentinel-2, ASTER) efektif menangkap respons spektral

permukaan sehingga relevan bagi pemetaan litologi, alterasi hidrotermal, dan indikator mineral tertentu. Sensor radar (SAR) dan turunannya melalui interferometri (InSAR/DInSAR) unggul pada pemantauan deformasi permukaan, deteksi perubahan morfotektonik, serta observasi pada kondisi tutupan awan yang tinggi. Sementara itu, LiDAR (Light Detection and Ranging) menghasilkan representasi topografi beresolusi tinggi yang bermanfaat bagi analisis geomorfologi, kelurusan (lineament), dan pemodelan bentuklahan; data ini sangat bernilai pada wilayah tropis yang tertutup vegetasi lebat.

Pengaruh penginderaan jauh dalam geologi sangat signifikan, dengan akurasi pemetaan mencapai hingga 95% melalui integrasi multispektral-radar, mengurangi ketergantungan pada survei lapangan mahal dan berisiko. Aplikasi multispektral efektif untuk pemetaan sedimen tersuspensi di perairan seperti Teluk Palu (Prasetyo et al, 2017) dan mineral seperti saponit di tambang nikel Kolaka Sakina dan Saepuloh (2024), sedangkan Radar mendukung monitoring gempa Ambon (Bakker et al, 2023), serta potensi tembaga di Sumbawa dengan deteksi struktur geologi dangkal (Julzarika, 2018).

Nurhayati dan Purwanto (2007) menunjukkan efektivitas citra Landsat TM dalam mendeteksi kelembaban tanah di Kabupaten Klaten. Sakina dan Saepuloh (2024) menerapkan metode *Gram Schmidt* untuk meningkatkan ketelitian pemetaan mineral saponit di Kolaka. Penelitian Raharja (2023) membandingkan kemampuan citra aster, Landsat 8, dan Sentinel-2 yang diintegrasikan dengan DEM untuk pemetaan litologi, sedangkan Julzarika (2018), menggabungkan data radar dan geodesi guna mengidentifikasi potensi mineral tembaga di Sumbawa.

Meski pemanfaatan penginderaan jauh pada bidang geologi berkembang pesat, literatur yang tersedia masih sering tersebar dan dibahas secara terpisah menurut objek kajian, jenis sensor, atau metode pengolahan. Hal ini mengakibatkan pembaca terutama praktisi dan peneliti pemula sering kesulitan memperoleh gambaran ringkas mengenai jenis sensor yang paling sesuai untuk tujuan geologi tertentu, pendekatan pengolahan citra yang umum digunakan beserta keterbatasannya, dan praktik validasi/akurasi yang lazim dipakai agar interpretasi dapat dipertanggungjawabkan.

Artikel ini menyajikan tinjauan literatur mengenai pemanfaatan penginderaan jauh dalam bidang geologi dengan menekankan sintesis pada empat kelompok aplikasi utama yaitu pemetaan litologi dan mineralisasi, analisis struktur geologi dan deformasi permukaan, kajian morfologi serta topografi, dan pendekatan integrasi multisensor. Sintesis tersebut diharapkan memberi rujukan praktis mengenai pemilihan data, kecocokan metode, serta arah pengembangan riset penginderaan jauh untuk mendukung eksplorasi sumber daya, mitigasi kebencanaan geologi, dan perencanaan berbasis informasi geospasial di Indonesia.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan studi literatur dengan cara menelaah dan menyintesis secara sistematis berbagai penelitian terdahulu yang membahas pemanfaatan penginderaan jauh dalam bidang geologi, terutama pada pemetaan struktur geologi, identifikasi zona mineralisasi, dan analisis deformasi permukaan. Tahapan kajian diawali dengan pengumpulan literatur dari sumber terpercaya, kemudian isi setiap artikel dianalisis untuk mendapatkan ringkasan temuan yang relevan.

Literatur yang terkumpul selanjutnya dikelompokkan berdasarkan jenis data penginderaan jauh yang dominan, yaitu data multispektral (misalnya Landsat atau Sentinel-2), data radar (misalnya SAR dari Sentinel-1 atau ALOS PALSAR), serta data LiDAR (airborne atau terrestrial). Pengelompokan ini digunakan untuk membandingkan pemanfaatan masing-masing teknologi dalam konteks aplikasi geologi, termasuk pola penggunaan, keunggulan, dan keterbatasannya.

Setiap artikel yang dikaji dievaluasi berdasarkan beberapa aspek utama, meliputi tujuan penelitian, tahapan pengolahan citra (misalnya *preprocessing*, segmentasi, klasifikasi *supervised/unsupervised*, serta validasi lapangan), hasil utama (misalnya peta tematik atau model), dan informasi tingkat keakuratan yang dilaporkan penulis menggunakan metrik seperti *overall accuracy*, *kappa coefficient*, atau RMSE. Hasil evaluasi tersebut kemudian dirangkum menjadi sintesis untuk menjelaskan kontribusi dan batasan teknologi penginderaan jauh pada aplikasi geologi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dalam bidang geologi berperan dalam meningkatkan efisiensi, ketelitian, dan jangkauan analisis geospasial. Sintesis dari penelitian-penelitian terdahulu yang dijadikan rujukan dalam artikel ini menunjukkan empat aspek utama penerapan penginderaan jauh pada kajian geologi, yaitu: pemetaan litologi dan mineralisasi, analisis deformasi dan struktur geologi, kajian morfologi dan topografi, serta (4) penerapan integratif berbagai sensor, seperti radar, LiDAR, dan data geodesi.

3.1 Pemetaan Litologi dan Mineralisasi

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa citra multispektral mampu membedakan objek permukaan berdasarkan variasi respons spektral, sehingga banyak dimanfaatkan dalam kajian kebumihutan. Nurhayati dan Purwanto (2007), misalnya, menggunakan citra Landsat TM untuk menganalisis hubungan reflektansi spektral dengan kelembaban tanah di wilayah Klaten. Hasilnya memperlihatkan bahwa tanah dengan kelembaban rendah

memiliki pantulan spektral lebih tinggi pada spektrum tampak (*visible*), inframerah dekat (NIR), dan inframerah tengah (MIR). Sebaliknya, pada kondisi kelembaban tinggi, pantulan spektral menurun, terutama pada inframerah tengah karena penyerapan air yang kuat. Analisis statistik juga menunjukkan perbedaan kekuatan hubungan antar saluran Landsat TM; dari enam saluran yang digunakan, saluran 5 (MIR I) memiliki hubungan paling kuat dengan kelembaban tanah permukaan dengan nilai korelasi $r = 0,866$ dan $R^2 = 0,750$. Hasil uji akurasi menunjukkan $SE = 17,22$, $AccMax = 69,53\%$, dan $AccMin = 63,98\%$, sehingga saluran 5 dinilai paling representatif dalam menggambarkan kondisi kelembaban tanah permukaan di lokasi penelitian.

Kajian lain dilakukan oleh Sakina dan Saepuloh (2024) melalui penerapan metode *Gram-Schmidt pan-sharpening* pada citra Landsat 8 OLI/TIRS untuk meningkatkan ketelitian pemetaan mineral saponit di kawasan tambang nikel Kolaka. Sebelum penajaman, citra beresolusi rendah menghasilkan sebaran mineral yang tampak luas namun kurang akurat, termasuk terdeteksi pada sekitar 35% area permukiman yang tidak relevan. Setelah penajaman menggunakan metode GS, sebaran saponit menjadi lebih sesuai kondisi lapangan; deteksi pada permukiman turun menjadi sekitar 10%, sedangkan keterdapatan pada area tambang terbuka meningkat hingga 55% dan mendekati hasil blok model lapisan limonit. Secara kuantitatif, deviasi luas distribusi mineral terhadap model geologi pada citra sebelum penajaman mencapai 156,28 (sekitar 392% lebih tinggi dari luas asli), sedangkan setelah penajaman GS deviasi menurun drastis menjadi 16,8 (sekitar 42% lebih rendah dari luas asli). Temuan tersebut menunjukkan bahwa penajaman Gram-Schmidt meningkatkan ketelitian pemetaan mineral, baik secara visual maupun kuantitatif.

Raharja (2023) membandingkan citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2 pada pemetaan litologi, serta menunjukkan bahwa integrasi dengan DEM SRTM dapat meningkatkan akurasi klasifikasi. Enam jenis litologi berhasil dipetakan, yaitu andesit, andesit basaltik, breksi andesit, breksi piroklastik, batugamping, dan endapan aluvium. Sebelum integrasi DEM, akurasi klasifikasi berada pada kisaran 45,97%–60,63%. Setelah DEM digabungkan, akurasi meningkat menjadi 61,69%–74,86%. Kombinasi terbaik diperoleh dari PCA Landsat 8 + DEM dengan *overall accuracy* 74,86% dan *Kappa* 0,62 (kategori akurasi menengah). Perbandingan terhadap peta geologi regional menunjukkan kemampuan metode ini mendeteksi litologi breksi piroklastik yang tidak tampak pada peta geologi sebelumnya, meskipun beberapa formasi (misalnya Nanggulan dan Jonggrangan) tidak teridentifikasi akibat tutupan vegetasi dan keterbatasan resolusi. Secara keseluruhan, hasil tersebut menegaskan bahwa citra multispektral dapat digunakan sebagai alternatif pemetaan litologi yang efisien, dengan integrasi DEM sebagai faktor yang meningkatkan akurasi, namun verifikasi lapangan tetap dibutuhkan.

Selain pemetaan objek kebumih darat, pemanfaatan citra multispektral juga terlihat pada pemodelan parameter permukaan perairan. Prasetyo (2017) menggunakan citra Landsat 8 OLI/TIRS yang dipadukan dengan data konsentrasi sedimen tersuspensi hasil pengukuran lapangan di Teluk Palu (enam stasiun). Pengolahan citra mencakup koreksi radiometrik dan koreksi atmosferik, dilanjutkan ekstraksi nilai reflektansi pada band yang sensitif terhadap sedimen, kemudian dianalisis menggunakan regresi linier. Hasil penelitian menunjukkan hubungan signifikan antara reflektansi band 5 (NIR) dengan konsentrasi sedimen tersuspensi, dengan $R^2 = 0,776$. Peta hasil model memperlihatkan konsentrasi sedimen lebih tinggi di wilayah pesisir dan muara sungai, kemudian menurun ke arah tengah teluk hingga laut lepas.

3.2 Analisis Struktur dan Deformasi Geologi

Penelitian berbasis data radar telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi deformasi permukaan dan aktivitas struktur geologi. Bakker et al. (2023) memanfaatkan citra Sentinel-1A (C-band) dengan metode Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) untuk menganalisis perubahan permukaan akibat gempa Ambon tahun 2019. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gempa Ambon pada 26 September 2019 menyebabkan deformasi permukaan yang signifikan. Di wilayah Tulehu dan Liang, yang berada dekat pusat gempa dan jalur sesar aktif, terjadi penurunan muka tanah (*subsidence*) dengan nilai deformasi antara -8 cm hingga -14 cm. Penurunan ini dipengaruhi oleh litologi penyusun berupa batugamping bioklastik dan endapan aluvial berumur Kuartar. Karakteristik litologi tersebut memiliki porositas tinggi dan kurang terkonsolidasi, sehingga lebih mudah memperkuat efek guncangan (*amplifikasi*) dan memperbesar dampak deformasi. Sebaliknya, di Pulau Haruku yang juga berada di dekat episenter, justru terjadi kenaikan muka tanah (*uplift*) dengan nilai deformasi antara +4 cm hingga +10 cm. Variasi deformasi ini menunjukkan adanya kompleksitas mekanisme tektonik yang berkaitan dengan interaksi tiga lempeng besar, yaitu Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, di kawasan Maluku. Korelasi deformasi dengan data geologi memperlihatkan bahwa daerah dengan litologi aluvial dan batugamping cenderung lebih rentan terhadap kerusakan akibat gempa. Temuan ini juga memperkuat hasil studi sebelumnya yang menggunakan metode HVSR, di mana litologi tersebut menunjukkan tingkat kerentanan tanah yang tinggi terhadap retakan dan amplifikasi gelombang gempa.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian Bakker et al. (2023) menegaskan bahwa metode DInSAR berbasis citra Sentinel-1A efektif untuk mendeteksi deformasi permukaan akibat gempa Ambon 2019. Hasil analisis menunjukkan adanya penurunan muka tanah sebesar -8 cm hingga -14 cm di daerah Tulehu dan Liang, serta kenaikan muka tanah sebesar +4 cm hingga +10 cm di Pulau Haruku. Perbedaan pola deformasi tersebut berkaitan erat dengan kondisi geologi lokal, khususnya litologi batugamping bioklastik dan endapan aluvial yang

berpotensi memperkuat getaran gempa. Selain memberikan gambaran spasial mengenai dampak gempa, penelitian ini menunjukkan bahwa penginderaan jauh radar dapat digunakan sebagai alat yang efisien dan akurat untuk pemantauan deformasi permukaan. Informasi deformasi yang diperoleh penting untuk mendukung mitigasi bencana, perencanaan pemulihan pascagempa, serta pengurangan risiko bencana di wilayah rawan gempa seperti Maluku.

Julzarika (2018) mengombinasikan data Landsat, ALOS PALSAR, dan GRACE untuk mengidentifikasi potensi mineral tembaga di Pulau Sumbawa. Integrasi ketiga jenis data tersebut memungkinkan deteksi densitas batuan dan struktur sesar, yang berasosiasi langsung dengan zona mineralisasi logam dasar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter geologi yang paling berpengaruh dalam mendeteksi potensi tembaga adalah struktur geologi (sesar dan lipatan) serta densitas batuan. Peta potensi tembaga yang dihasilkan memperlihatkan tiga lokasi utama mineralisasi, yaitu Batu Hijau, Elang Dodo, dan Sumbawa bagian utara. Ketiga lokasi tersebut diketahui sebagai wilayah yang sudah maupun berpotensi dikembangkan sebagai area pertambangan tembaga. Model ketinggian yang diperoleh dari integrasi radar memiliki akurasi vertikal $\pm 1,5$ meter, sedangkan peta potensi tembaga memiliki akurasi 95% dengan toleransi.

Berdasarkan kajian Julzarika (2018), teknologi penginderaan jauh memberikan kontribusi yang signifikan dalam pendeteksian awal potensi mineral tembaga di Sumbawa. Melalui integrasi data optik, radar, dan geodesi, peneliti dapat menghasilkan peta potensi tembaga dengan ketelitian yang tinggi. Struktur geologi dan densitas batuan terbukti menjadi parameter dominan dalam mendeteksi mineralisasi, sementara perubahan penutup lahan dan analisis vegetasi dapat dimanfaatkan sebagai indikator tambahan. Integrasi metode alterasi hidrotermal, analisis radar, dan geodesi menghasilkan model spasial yang mendekati kondisi lapangan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penginderaan jauh dapat mengurangi kebutuhan eksplorasi langsung yang mahal dan memakan waktu, sehingga lebih efisien untuk tahap awal eksplorasi mineral. Dengan tingkat akurasi yang mencapai 95%, pendekatan ini layak dijadikan dasar perencanaan eksplorasi lanjutan, baik untuk tembaga maupun mineral berasosiasi lainnya.

3.3 Kajian Morfologi dan Topografi

Teknologi *Light Detection and Ranging (LiDAR)* serta *Ground Penetrating Radar (GPR)* berperan penting dalam analisis morfologi dan topografi geologi, khususnya dalam mengidentifikasi bentuk permukaan, struktur bawah tanah, dan potensi bencana geologi. Penelitian yang dilakukan oleh Baitullah (2015) menunjukkan bahwa data LiDAR efektif untuk membangun DEM yang akurat dengan resolusi $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. DEM tersebut mampu menampilkan topografi sungai dan daerah sekitarnya secara detail, sehingga pembuatan model geometri sungai dapat dilakukan dengan lebih teliti. Model geometri yang dibangun selanjutnya digunakan dalam HEC-RAS untuk simulasi hidrodinamik. Hasil simulasi memperlihatkan variasi kedalaman genangan banjir pada tiga skenario debit. Pada debit $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, kedalaman genangan banjir berkisar antara 0 hingga 5 meter. Pada debit $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$, kedalaman meningkat hingga 6,5 meter, dan pada debit $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$, kedalaman maksimum mencapai 7,5 meter. Luasan genangan juga semakin besar seiring meningkatnya debit banjir. Pemetaan hasil simulasi yang ditumpang-susunkan dengan foto udara menunjukkan bahwa permukiman di kanan dan kiri sungai termasuk dalam wilayah yang tergenang. Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran mengenai dampak banjir terhadap lingkungan sekitar sungai, baik dari sisi kedalaman genangan maupun sebaran luasan genangan.

Baitullah (2015) menyimpulkan bahwa teknologi LiDAR mampu menyediakan data topografi beresolusi tinggi yang sangat bermanfaat untuk analisis genangan banjir akibat luapan sungai. Pembuatan DEM berbasis LiDAR memberikan detail topografi yang akurat sehingga memudahkan penyusunan model geometri sungai dan penampang melintang secara cepat serta teliti. Integrasi DEM berbasis LiDAR dengan perangkat lunak hidrodinamik HEC-RAS dan HEC-GeoRAS memungkinkan simulasi banjir yang lebih realistis, dengan keluaran berupa peta batas dan kedalaman genangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar debit banjir, semakin luas dan semakin dalam pula genangan yang terbentuk. Selain itu, pemetaan genangan banjir berbasis LiDAR menyediakan informasi yang berguna untuk mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang, terutama untuk mengidentifikasi wilayah permukiman yang rentan tergenang. Penulis juga menekankan pentingnya ketersediaan data LiDAR di Indonesia agar analisis banjir dapat dilakukan lebih efektif dan akurat, mengingat selama ini data LiDAR masih terbatas dan sulit diakses secara terbuka.

Selain pemanfaatan LiDAR untuk analisis permukaan, penelitian oleh Syam, Leping, dan Supriyanto (2019) menerapkan metode GPR untuk mengidentifikasi struktur geologi dangkal di kawasan Jalan Hm. Ardan, Samarinda. Hasil penelitian menunjukkan variasi kondisi bawah permukaan pada enam lintasan pengukuran. Pada lintasan pertama dan kedua, data radargram tidak memperlihatkan struktur geologi yang signifikan, melainkan hanya indikasi adanya proses subsiden yang menyebabkan perlapisan batuan terlipat. Temuan ini selaras dengan kondisi geologi setempat yang relatif datar pada bagian lintasan tersebut. Pada lintasan ketiga, radargram memperlihatkan enam pola refleksi berbeda yang diinterpretasikan sebagai adanya kontak litologi antar batuan penyusun, sehingga mengindikasikan pertemuan lapisan batuan dengan sifat fisik yang berbeda. Lintasan keempat memperlihatkan pola refleksi yang menunjukkan keberadaan sesar turun (*normal fault*) pada kedalaman antara 1,6 hingga 3 meter. Keberadaan sesar ini menunjukkan deformasi struktur bawah permukaan yang berpotensi

memengaruhi kestabilan jalan. Lintasan kelima dan keenam menunjukkan hasil serupa, yaitu terdapat tiga lapisan utama bawah permukaan. Lapisan pertama diinterpretasikan sebagai lapisan jalan semen atau cor beton di bagian permukaan. Lapisan kedua berupa tanah urukan yang diidentifikasi sebagai lempung pasir, sedangkan lapisan ketiga merupakan batuan dasar berupa pasir lempungan. Selain itu, pada kedua lintasan tersebut ditemukan pola difraksi pada bagian ujung lintasan yang mengindikasikan keberadaan saluran air pada kedalaman sekitar 1,6 hingga 2,4 meter. Keberadaan saluran air bawah permukaan ini memiliki implikasi penting terhadap kondisi geoteknik jalan karena dapat memengaruhi tingkat kelembapan tanah serta meningkatkan potensi amblesan.

Wijanarko (2022) mengombinasikan data citra satelit dan data LiDAR yang saling melengkapi. Metode penelitian yang digunakan adalah *Object-Based Image Analysis (OBIA)* yang menekankan segmentasi citra dan klasifikasi berbasis objek. Tahap awal dimulai dari pengolahan data LiDAR yang disaring dan dikoreksi berdasarkan *trajectory* wahana terbang untuk memperbaiki orientasi dan geometri data. Data tersebut kemudian digunakan untuk menghasilkan nDSM melalui teknik *gridding*, sehingga objek-objek vertikal seperti bangunan dan vegetasi dapat dibedakan. Citra intensitas LiDAR diproses menggunakan perangkat lunak pengolahan citra agar memiliki kualitas radiometrik yang baik, kemudian direktifikasi agar sesuai secara geometris dengan citra satelit Pleiades. Selanjutnya, citra Pleiades dipotong sesuai batas wilayah penelitian dan diekstraksi nilai spektralnya. Fitur spasial seperti bentuk dan luas, serta tekstur citra juga diturunkan untuk memperkaya informasi klasifikasi.

Wijanarko (2022) melaporkan bahwa klasifikasi dengan citra satelit Pleiades saja menghasilkan akurasi yang relatif rendah, yaitu sekitar 44,44%. Kesalahan terutama terjadi pada kelas pekarangan, rawa, tanah kosong, dan permukaan diperkeras yang sulit dibedakan apabila hanya mengandalkan informasi spektral. Namun, setelah data citra satelit digabungkan dengan data LiDAR, baik citra intensitas maupun nDSM, tingkat akurasi meningkat signifikan menjadi 63,89%. Integrasi dengan citra intensitas memberikan keunggulan dalam membedakan vegetasi dan bangunan serta memperbaiki deteksi badan air, sedangkan integrasi dengan nDSM lebih unggul untuk membedakan bangunan permukiman dan bangunan infrastruktur berdasarkan variasi ketinggian. Meskipun demikian, beberapa kelas masih sulit dibedakan, seperti rawa dan pekarangan, karena karakteristik spektral dan spasialnya mirip. Dari hasil perbandingan, nDSM terbukti memberikan informasi yang lebih konsisten dalam meningkatkan akurasi dibandingkan citra intensitas. Analisis kesesuaian kelas juga menunjukkan bahwa dataset integrasi nDSM memiliki rata-rata kesesuaian antar kelas lebih tinggi, yaitu 45,78%, dibanding integrasi dengan citra intensitas yang hanya mencapai 36,61%. Temuan ini menegaskan bahwa informasi ketinggian dari LiDAR berperan besar dalam meningkatkan kualitas klasifikasi tutupan lahan di kawasan perkotaan yang heterogen.

Wijanarko (2022) menyimpulkan bahwa integrasi data LiDAR dan citra satelit melalui pendekatan OBIA mampu meningkatkan akurasi klasifikasi digital tutupan lahan. Klasifikasi yang hanya menggunakan citra Pleiades menghasilkan akurasi 44,44%, sedangkan penambahan data LiDAR berupa nDSM dan citra intensitas meningkatkan akurasi menjadi 63,89% atau naik hampir 20%. Meskipun nilai akurasi tersebut masih di bawah standar minimal SNI (70%) karena jumlah sampel validasi terbatas, penelitian ini menunjukkan potensi integrasi multisensor untuk pemetaan tutupan lahan perkotaan yang kompleks. Integrasi informasi spektral dari citra satelit dengan informasi spasial dan ketinggian dari LiDAR menghasilkan peta tutupan lahan yang lebih akurat dan bermanfaat untuk perencanaan tata ruang, pengelolaan lingkungan, serta pemantauan perkembangan kawasan perkotaan.

3.4 Aplikasi Integratif Multisensor

Pendekatan multisensor dalam penginderaan jauh, yaitu integrasi data optik (seperti Landsat 8, ASTER, dan Sentinel-2), radar (misalnya ALOS PALSAR dan Sentinel-1 DInSAR), LiDAR, serta data geodesi, telah terbukti meningkatkan ketelitian dan kedalaman analisis geologi secara signifikan. Integrasi beragam jenis data tersebut memungkinkan pengamatan yang lebih holistik terhadap kondisi permukaan dan bawah permukaan bumi, karena menggabungkan keunggulan masing-masing sensor: data optik untuk karakteristik spektral, radar untuk kemampuan observasi pada kondisi berawan serta analisis deformasi permukaan, dan geodesi untuk pemodelan elevasi yang lebih presisi. Aplikasi integratif ini banyak digunakan pada studi mineralogi, pemetaan struktur geologi, serta pemantauan dinamika morfotektonik, dengan akurasi spasial yang dapat mencapai hingga 90% berdasarkan validasi lapangan.

Penelitian yang dilakukan oleh Nisak (2010) melibatkan beberapa tahapan utama dalam pengolahan data. Pertama, dilakukan koreksi geometrik pada citra multispektral dan pankromatik menggunakan data GCP yang diperoleh di lapangan. Transformasi koordinat yang digunakan adalah *Universal Transverse Mercator (UTM) 49-S* dengan datum WGS 84. Setelah koreksi geometrik selesai, citra diproses menggunakan metode *pan-sharpen* berbasis transformasi *Intensity-Hue-Saturation (IHS)*. Citra hasil penggabungan selanjutnya dianalisis secara visual dan kuantitatif. Analisis visual dilakukan dengan membandingkan detail objek pada citra multispektral awal dengan citra hasil penggabungan. Analisis kuantitatif dilakukan melalui analisis planimetrik, yaitu membandingkan ukuran objek pada citra dengan hasil pengukuran lapangan menggunakan pita ukur. Selain itu, ketelitian geometrik juga dianalisis menggunakan nilai *Root Mean Square error (RMSError)*.

Hasil penelitian Nisak (2010) menunjukkan bahwa metode *pan-sharpen* berhasil meningkatkan resolusi spasial citra multispektral dari 2,4 meter menjadi setara dengan resolusi pankromatik, yaitu 0,6 meter. Pada citra hasil penggabungan, detail objek seperti jaringan jalan dan permukiman terlihat jauh lebih jelas dibandingkan citra multispektral asli. Peningkatan ketelitian visual ini terutama tampak ketika citra diperbesar hingga skala 1:3100. Nilai rata-rata *RMSError* pada citra *Quickbird* pankromatik adalah 0,663, sedangkan pada citra *Quickbird* multispektral adalah 0,641. Sementara itu, hasil analisis planimetrik menunjukkan bahwa selisih rata-rata ukuran objek antara hasil pengukuran lapangan dan citra *pan-sharpened* adalah 1,037 meter, lebih kecil dibandingkan citra multispektral yang memiliki selisih rata-rata 2,351 meter. Dengan demikian, citra hasil penggabungan memiliki ketelitian spasial yang lebih baik dan lebih mendukung kebutuhan pemetaan detail.

3.5 Sintesis

Secara umum, hasil sintesis menunjukkan bahwa pemanfaatan penginderaan jauh dalam kajian geologi berkembang melalui empat jalur utama yang saling melengkapi: (1) pemetaan litologi dan mineralisasi berbasis citra multispektral, (2) analisis struktur serta deformasi berbasis radar, (3) kajian morfologi dan topografi melalui LiDAR dan GPR, serta (4) penguatan ketelitian melalui integrasi multisensor. Keempat jalur ini memperlihatkan bahwa pemilihan sensor, metode pengolahan, serta kebutuhan validasi menentukan kualitas keluaran geologi yang dihasilkan, baik berupa peta tematik, model spasial, maupun interpretasi kondisi permukaan dan bawah permukaan.

Pada aspek pemetaan litologi dan mineralisasi, citra multispektral mampu menangkap perbedaan karakteristik permukaan melalui respons spektral. Temuan dari berbagai studi memperlihatkan bahwa band tertentu dapat memiliki hubungan paling kuat terhadap parameter yang dikaji (misalnya saluran inframerah tengah pada Landsat TM untuk kelembaban tanah), sementara peningkatan resolusi melalui teknik penajaman citra dapat memperbaiki ketelitian pemetaan mineral (contoh pada pemetaan saponit). Selain itu, integrasi citra multispektral dengan DEM meningkatkan akurasi klasifikasi litologi, meskipun keterbatasan tetap muncul pada wilayah bertutupan vegetasi tinggi sehingga verifikasi lapangan masih diperlukan. Dengan demikian, multispektral efektif sebagai dasar pemetaan awal, namun hasilnya sangat dipengaruhi oleh resolusi, kondisi penutup lahan, dan metode pengolahan yang digunakan.

Pada aspek analisis struktur dan deformasi geologi, data radar khususnya pendekatan DInSAR pada citra Sentinel-1A menunjukkan kemampuan dalam mendeteksi deformasi permukaan akibat kejadian tektonik. Studi gempa Ambon 2019 memperlihatkan pola *subsidence* dan *uplift* yang berbeda antar lokasi, serta menunjukkan keterkaitan deformasi dengan kondisi geologi lokal. Kajian lain menekankan bahwa integrasi data optik, radar, dan geodesi dapat membantu mengidentifikasi parameter struktur (sesar dan lipatan) serta densitas batuan yang berasosiasi dengan potensi mineralisasi tembaga. Secara keseluruhan, radar dan integrasi lintas data memberikan kontribusi kuat untuk pemantauan deformasi dan interpretasi struktur, terutama ketika dikaitkan dengan informasi geologi setempat.

Pada aspek kajian morfologi dan topografi, LiDAR dan GPR menunjukkan peran penting pada objek dan kedalaman kajian yang berbeda. LiDAR terbukti menghasilkan DEM beresolusi tinggi yang bermanfaat untuk pemodelan topografi detail dan aplikasi turunan seperti simulasi genangan banjir; keluaran berupa peta kedalaman dan sebaran genangan menjadi informasi penting untuk mitigasi dan perencanaan. Sementara itu, GPR digunakan untuk mengidentifikasi struktur geologi dangkal, termasuk variasi lapisan, indikasi sesar turun, dan keberadaan saluran air bawah permukaan yang relevan bagi stabilitas infrastruktur jalan. Selain itu, integrasi LiDAR dengan citra satelit melalui pendekatan OBIA meningkatkan akurasi klasifikasi tutupan lahan perkotaan, karena informasi ketinggian (nDSM) membantu membedakan objek yang sulit dipisahkan bila hanya mengandalkan spektral.

Pada aspek aplikasi integratif multisensor, sintesis menunjukkan bahwa penggabungan data dari berbagai sensor meningkatkan ketelitian pemetaan dan memperkaya interpretasi. Contoh yang ditampilkan adalah peningkatan resolusi spasial citra multispektral melalui *pan-sharpen* (IHS) pada citra QuickBird, yang membuat detail objek seperti jalan dan permukiman lebih jelas, menurunkan selisih planimetrik terhadap ukuran lapangan, dan menghasilkan ketelitian spasial yang lebih baik. Temuan ini memperkuat gambaran umum bahwa integrasi data (baik melalui penggabungan resolusi maupun kombinasi karakteristik sensor) memberikan keuntungan nyata pada pemetaan detail dan analisis geospasial untuk kebutuhan kebumihian.

Berdasarkan empat subbab tersebut, sintesis utama yang dapat ditarik adalah: citra multispektral unggul untuk pemetaan berbasis respons spektral, radar unggul untuk deformasi dan struktur, LiDAR unggul untuk topografi detail dan informasi ketinggian, sedangkan GPR menguatkan pemahaman kondisi bawah permukaan pada kedalaman dangkal. Ketika data-data tersebut dipadukan melalui pendekatan integratif, keluaran analisis cenderung lebih teliti dan lebih relevan untuk kebutuhan pemetaan, mitigasi bencana, maupun eksplorasi tahap awal, dengan catatan bahwa hasil tetap bergantung pada kualitas data, metode pengolahan, serta dukungan verifikasi lapangan.

4. KESIMPULAN

Penginderaan jauh berperan penting dalam studi geologi karena menyediakan data multispektral, radar, dan LiDAR yang dapat dimanfaatkan untuk menganalisis litologi, mineralisasi, struktur geologi, hingga bentuk permukaan bumi. Berdasarkan sintesis dari penelitian-penelitian yang dijadikan rujukan dalam penyusunan artikel ini, pemanfaatan citra multispektral seperti Landsat, ASTER, dan Sentinel-2 terbukti mampu membedakan karakter spektral batuan dan mineral dengan baik, terutama pada wilayah yang memiliki potensi pertambangan. Selain itu, teknik radar seperti DInSAR menunjukkan kemampuan yang tinggi dalam memantau perubahan dan deformasi permukaan yang dipicu oleh proses tektonik. Teknologi LiDAR dan GPR juga menyediakan informasi rinci mengenai topografi serta kondisi bawah permukaan, yang berguna untuk analisis kestabilan geologi dan geomorfologi.

Penggabungan berbagai jenis data sensor meningkatkan ketepatan interpretasi geologi dan memperluas pemanfaatan penginderaan jauh pada aspek geoteknik, mitigasi bencana, serta eksplorasi sumber daya alam. Secara umum, penggunaan penginderaan jauh dalam kajian geologi dapat mempercepat proses penelitian, menekan biaya, dan menghasilkan analisis yang lebih presisi, sehingga mendukung pengelolaan lingkungan dan pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Baitullah, M. (2015). *Analisis potensi genangan banjir berbasis DEM LiDAR dan pemodelan hidrodinamika*. Jurnal Penginderaan Jauh dan Mitigasi Bencana, 12(2), 87–96.
- Bakker, T., Yusup, A., & Sutisna, S. (2023). *Analisis deformasi permukaan pasca gempa Ambon 2019 menggunakan metode DInSAR pada citra Sentinel-1A*. Jurnal Geomatika, 29(1), 15–26.
- Julzarika, A. (2018). *Integrasi data Landsat, ALOS PALSAR, dan GRACE untuk pendugaan potensi mineral tembaga di Pulau Sumbawa*. Jurnal Sains Geoinformasi, 4(1), 14–25.
- Nisak, N. S. C., & Hariyanto, T. (2010). *Analisa peningkatan resolusi spasial citra multispektral menggunakan proses penggabungan dengan citra pankromatik (Studi kasus: Kecamatan Gresik – Kabupaten Gresik)*. GEOID, 6(1), 23–29.
- Nurhayati, N., & Purwanto, H. (2007). *Pemanfaatan citra Landsat TM untuk identifikasi kelembaban tanah di Kabupaten Klaten*. Majalah Geografi Indonesia, 21(1), 54–63.
- Prasetyo, BA, Ahmad, D., & Haya, Lomy (2017). *Identifikasi sebaran sedimen tersuspensi di perairan Teluk Palu menggunakan citra satelit Landsat 8*. Jurnal Sapa Laut (Jurnal Ilmu Kelautan), 2 (3).
- Raharja, D. (2023). *Perbandingan citra ASTER, Landsat 8, dan Sentinel-2 untuk pemetaan litologi dengan integrasi data DEM SRTM*. Indonesian Journal of Remote Sensing, 45(3), 112–124.
- Sakina, N., & Saepuloh, A. (2024). *Peningkatan akurasi pemetaan mineral saponit menggunakan metode Gram-Schmidt Pan-sharpening pada citra Landsat 8 OLI/TIRS di Kolaka*. Jurnal Eksplorasi Sumber Daya Geologi, 8(2), 57–70.
- Syam, M., Lepong, L., & Supriyanto, D. (2019). *Identifikasi struktur geologi dangkal menggunakan Ground Penetrating Radar (GPR) di Jalan HM. Ardan, Samarinda*. Jurnal Geosains, 15(4), 230–241.
- Wijanarko, A., & Djurdjani, A. (2022). *Klasifikasi tutupan lahan berbasis objek menggunakan integrasi LiDAR dan citra Pleiades di wilayah tropis*. Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia, 18(2), 101–112.