

KONSEP DASAR PENGINDERAAN JAUH

LALU MUHAMAD JAELANI



IKAPI
IKATAN PENERBIT INDONESIA

ISBN: 978-634-7077-15-8
JANUARI 2026

LALU MUHAMAD JAELANI

KONSEP DASAR PENGINDERAAN JAUH



KONSEP DASAR PENGINDERAAN JAUH

Konsep Dasar Penginderaan Jauh

Author: Lalu Muhamad Jaelani

Editor: -

Desain cover dan Lay Outer: TIM LITPAM

Diterbitkan oleh: PENERBIT LITPAM

Alamat: Perumahan Lingkar Permai III, Blok Q4,
Tanjung Karang, Sekarbela, Kota Mataram, NTB

Email: litpam.press@gmail.com

Website: <https://penerbit.litpam.com>

No. Tanda Anggota IKAPI: [008/Anggota Luar
Biasa/NTB/2021](#)

Hp. +6287865262538

Tahun Cetak: Januari, 2026

ISBN: 978-634-7077-15-8

Hak cipta dilindungi Undang-undang

Dilarang mencetak atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku dalam bentuk dan cara apapun tanpa ijin tertulis dari Penerbit.



Kata Pengantar

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat-Nya, buku ajar berjudul "Konsep Dasar Penginderaan Jauh" ini dapat hadir di hadapan pembaca. Penginderaan jauh (remote sensing) kini bukan lagi sekadar alat pemetaan konvensional, melainkan telah menjadi instrumen utama dalam menjawab tantangan global. Berangkat dari Slide Presentasi (Bahan Ajar) Materi Kuliah Penginderaan Jauh untuk mahasiswa Program Sarjana, naskah ini kemudian disusun dan diperluas menggunakan bantuan Gemini AI. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk menyediakan referensi yang komprehensif namun tetap mudah dipahami, baik bagi mahasiswa, akademisi, maupun praktisi yang ingin mendalami prinsip-prinsip dasar teknologi ini.

Materi dalam buku ini disusun secara sistematis untuk memandu pembaca dari konsep paling dasar menuju pemahaman yang utuh. Dimulai dari fisika gelombang elektromagnetik, pengenalan sensor dan platform satelit modern, hingga strategi akuisisi data. Tujuannya adalah membentuk pola pikir analitis, di mana pembaca mampu memahami logika "mengapa" di balik fenomena perekaman data, sebelum melangkah ke tahap teknis "bagaimana" data tersebut diolah menjadi informasi.

Terbitnya buku ini tidak lepas dari dukungan banyak pihak. Penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada rekan sejawat di Departemen Teknik Geomatika ITS, tim riset, serta keluarga yang selalu menjadi sumber motivasi terbesar.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat dinantikan untuk perbaikan di masa depan. Besar harapan penulis, buku ini dapat menjadi fondasi yang kokoh bagi mahasiswa dan praktisi dalam mengembangkan ilmu geospasial di Indonesia.

Surabaya, Desember 2025

Lalu Muhamad Jaelani

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Halaman Balik Judul	ii
Kata Pengantar	iii
Daftar isi.....	iv
BAB I PENGANTAR.....	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Definisi Penginderaan Jauh	3
1.3 Sejarah Perkembangan Penginderaan Jauh	9
1.4 Manfaat dan Aplikasi Penginderaan Jauh	15
1.5 Keunggulan dan Keterbatasan Penginderaan Jauh.....	19
1.6 Struktur Buku	23
1.7 Rangkuman Bab	25
BAB II SPEKTRUM GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK.....	27
2.1. Pendahuluan	27
2.2. Definisi dan Sifat-Sifat Gelombang Elektromagnetik	27
2.3. Spektrum Elektromagnetik dan Penginderaan Jauh.....	30
2.4. Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Atmosfer.....	38
2.5. Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Objek di Permukaan Bumi.....	43
2.6. Rangkuman Bab	52
BAB III SENSOR DAN PLATFORM PENGINDERAAN JAUH	54
3.1. Sensor Penginderaan Jauh.....	54
3.2. Platform Penginderaan Jauh.....	67
3.3. Aplikasi Sensor dan Platform di Indonesia.....	79
3.4. Rangkuman Bab	82
BAB IV RESOLUSI DALAM PENGINDERAAN JAUH	84
4.1 Pendahuluan Konsep Resolusi	84
4.2 Resolusi Spasial.....	86
4.3 Resolusi Spektral.....	92
4.4 Resolusi Temporal.....	97
4.5 Resolusi Radiometrik	102
4.6 Interaksi dan <i>Trade-off</i> Antar Resolusi	107
4.7 Pemilihan Resolusi yang Tepat untuk Aplikasi Penginderaan Jauh	112

4.8 Rangkuman Bab	119
BAB V AKUISISI DATA PENGINDERAAN JAUH.....	121
5.1 Pendahuluan Akuisisi Data Penginderaan Jauh	121
5.2 Komponen Utama dalam Perencanaan Akuisisi Data.....	122
5.3 Level Pemrosesan Data Penginderaan Jauh	144
5.4 Tahapan Dasar Pengolahan Data Pasca Akuisisi (Pengantar)	151
5.5 Faktor-Faktor Lain yang Mempengaruhi Akuisisi dan Kualitas Data	158
5.6 Rangkuman Bab	162
BAB VI PENGOLAHAN CITRA DIGITAL	164
6.1 Pendahuluan Pengolahan Citra Digital	164
6.2 Konsep Dasar Citra Digital	167
6.3. Pra-pemrosesan Citra	168
6.4. Peningkatan Kualitas Citra.....	175
6.5. Transformasi Citra.....	179
6.6. Fusi Citra (<i>Image Fusion</i>)	185
6.7. Klasifikasi Citra dalam Penginderaan Jauh.....	189
6.8. Perangkat Lunak Pengolahan Citra Digital	211
6.9. Rangkuman Bab	216
BAB VII INTERPRETASI CITRA PENGINDERAAN JAUH	219
7.1 Pendahuluan Interpretasi Citra	219
7.2 Tahapan dalam Proses Interpretasi Citra.....	222
7.3 Unsur-Unsur Kunci Interpretasi Citra Visual.....	225
7.4 Kegiatan Dasar dalam Interpretasi Citra	231
7.5 Pengantar Interpretasi Citra Digital.....	233
7.6 Uji Akurasi Hasil Interpretasi dan Klasifikasi	237
7.7 Contoh Aplikasi Interpretasi Citra dalam Studi Kasus	238
7.8 Rangkuman Bab	241
BAB VIII APLIKASI PENGINDERAAN JAUH	243
8.1 Pendahuluan	243
8.2 Spektrum Aplikasi Penginderaan Jauh.....	244
8.3 Teknologi dan Sensor Utama dalam Aplikasi Penginderaan Jauh... 266	
8.4 Keterbatasan dan Tantangan dalam Aplikasi Penginderaan Jauh.... 285	
8.5 Rangkuman Bab	289

BAB IX TREN TERKINI DAN MASA DEPAN PENGINDERAAN	
JAUH	291
9.1 Dinamika Inovasi dan Pergeseran Paradigma	291
9.2 Tren Teknologi Sensor dan Platform	292
9.3 Revolusi Analisis Data (AI, Cloud, Big Data).....	303
9.4 Program Unggulan Global dan Nasional	313
9.5 Tantangan Utama di Era Modern (Big Data, Etika, SDM).....	322
9.6 Rangkuman Bab	325
Daftar Istilah Kunci (Glosarium)	327
Daftar Pustaka	332

BAB I PENGANTAR

1.1 Pendahuluan

Sejak dahulu kala, manusia dianugerahi rasa ingin tahu yang besar terhadap dunia di sekitarnya. Dorongan intrinsik untuk memahami lingkungan, bahkan dari kejauhan, telah ada jauh sebelum teknologi canggih hadir seperti saat ini. Rasa ingin tahu ini bukan hanya sekadar pemenuhan intelektual, melainkan juga terkait erat dengan kebutuhan mendasar untuk bertahan hidup, beradaptasi dengan kondisi alam yang dinamis, dan memanfaatkan sumber daya yang tersedia. Dalam upaya memenuhi kebutuhan tersebut, tanpa disadari, manusia telah menerapkan prinsip dasar “penginderaan jauh” dengan mengandalkan ketajaman indra yang mereka miliki (Campbell dan Wynne 2011). Mata manusia, sebagai sensor alami pertama, bekerja dengan menangkap energi elektromagnetik dalam spektrum cahaya tampak yang dipantulkan oleh objek, sebuah proses yang menjadi analogi dasar bagi sistem sensor optik modern (T. Lillesand, Kiefer, dan Chipman 2015).

Upaya awal ini merupakan manifestasi dari kebutuhan adaptif manusia. Pengamatan terhadap lingkungan dari jarak tertentu memungkinkan leluhur kita untuk mengidentifikasi sumber makanan, menghindari bahaya, serta merencanakan perjalanan dan permukiman. Seiring dengan perkembangan peradaban, kompleksitas kebutuhan manusia pun meningkat. Navigasi untuk pelayaran jarak jauh, pemetaan wilayah untuk pengelolaan sumber daya atau kepentingan strategis, hingga pengintaian dalam konflik, semuanya mendorong inovasi dalam cara mengamati dan mengumpulkan informasi dari kejauhan (Tatem, Goetz, dan Hay 2008). Meskipun teknologi yang digunakan telah berevolusi secara dramatis, dari pengamatan visual sederhana hingga penggunaan sensor satelit yang canggih, prinsip fundamental untuk “mengamati tanpa

kontak langsung” (*sensing without contact*) tetap menjadi esensi dari penginderaan jauh (Jensen 2016; T. Lillesand dkk. 2015).

Di era modern, pemahaman terhadap penginderaan jauh menjadi semakin krusial. Teknologi ini telah bertransformasi menjadi alat vital yang memungkinkan umat manusia untuk memantau perubahan global dengan presisi yang belum pernah terjadi sebelumnya. Pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan, mitigasi dampak bencana alam, pemahaman terhadap fenomena kompleks seperti perubahan iklim, serta perencanaan tata ruang di tengah laju urbanisasi yang pesat, merupakan sebagian kecil dari tantangan global yang penanganannya sangat bergantung pada data dan informasi yang dihasilkan melalui penginderaan jauh (Li dkk. 2023). Studi literatur terbaru menunjukkan adanya pergeseran fokus yang signifikan dalam dekade terakhir, di mana penginderaan jauh tidak lagi hanya berfokus pada pengembangan teknologi sensor semata, melainkan semakin terintegrasi dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk aplikasi praktis dalam pemantauan lingkungan dan keberlanjutan (Li dkk. 2023; Weiss, Jacob, dan Duveiller 2020). Oleh karena itu, penguasaan konsep dan aplikasi penginderaan jauh menjadi sebuah keniscayaan, tidak hanya bagi para ilmuwan dan praktisi di bidang terkait, tetapi juga bagi masyarakat luas yang ingin memahami dinamika planet Bumi secara lebih komprehensif. Evolusi penginderaan jauh, dari pemanfaatan indra alami hingga teknologi satelit, pada hakikatnya mencerminkan evolusi kemampuan kognitif dan kebutuhan adaptif manusia dalam berinteraksi dengan lingkungannya. Pemahaman ini penting agar penginderaan jauh tidak dipandang hanya sebagai sekumpulan teknik, melainkan sebagai sebuah pendekatan ilmiah yang memiliki akar sejarah panjang dalam upaya manusia memahami dunianya.

1.2 Definisi Penginderaan Jauh

1.2.1 Konsep Awal dan Tradisional (Pengamatan Alamiah)

Jauh sebelum istilah "penginderaan jauh" dirumuskan secara formal, prinsip-prinsip dasarnya telah diterapkan oleh manusia dalam interaksinya dengan alam. Dengan mengandalkan ketajaman indra penglihatan (mata), pendengaran (telinga), dan penciuman (hidung), manusia purba mampu mengumpulkan informasi penting tentang lingkungan sekitarnya tanpa harus melakukan kontak fisik langsung dengan objek yang diamati.

Bayangkan seorang pemburu ulung yang menelusuri hutan belantara. Ia tak hanya mengandalkan keberuntungan untuk menemukan buruannya. Matanya jeli mengamati jejak kaki di tanah, sisa-sisa makanan yang tertinggal, atau ranting-ranting yang patah tidak wajar. Dari petunjuk-petunjuk visual ini, ia dapat memperkirakan keberadaan, jenis, bahkan arah pergerakan mangsanya. Sementara itu, di lautan luas, para pelaut mengamati formasi awan, arah angin, dan riak gelombang untuk memprediksi perubahan cuaca. Kemampuan membaca tanda-tanda alam ini sangat penting bagi mereka untuk menentukan waktu yang tepat untuk berlayar, mencari ikan, atau berlindung dari badai. Bahkan, mereka telah lama mengandalkan posisi bintang-bintang sebagai penunjuk arah di tengah samudra, sebuah seni navigasi yang membutuhkan pengamatan cermat dan pengetahuan tentang pola langit.

Tak hanya mata, telinga pun menjadi instrumen penting dalam "penginderaan jauh" tradisional. Para pemburu mengasah pendengaran mereka untuk menangkap suara-suara samar di hutan, seperti kicauan burung, gemerisik dedaunan, atau ranting yang patah, yang menandakan keberadaan hewan buruan. Suara gemuruh petir di kejauhan menjadi alarm alami bagi penduduk desa, memberitahu mereka untuk bersiap menghadapi datangnya badai. Dari keras lemahnya suara dan jeda antara kilat dan

guntur, mereka dapat memperkirakan jarak dan intensitas badai yang akan datang.

Indra penciuman juga berperan penting dalam interaksi manusia purba dengan lingkungannya. Mereka dapat menemukan sumber makanan seperti buah matang, sarang lebah, atau bangkai hewan dengan mengikuti jejak aroma yang terbawa angin. Bau asap yang tajam menjadi pertanda bahaya, memberi sinyal adanya kebakaran hutan yang harus dihindari. Sementara itu, aroma busuk dari bangkai hewan dapat menjadi peringatan akan keberadaan predator di sekitar mereka.

Untuk keperluan praktis, metode mendapatkan data tanpa menyentuh objek juga dapat ditemukan dalam praktik masyarakat dalam mencari sumber air di bawah tanah, tanpa perlu melakukan pengeboran atau menggunakan instrumen geolistrik. Salah satu metode yang menarik adalah penggunaan batang pohon. Jenis-jenis pohon tertentu, seperti willow (kelompok pohon dan semak meranggas yang tumbuh cepat), memiliki ranting yang lentur dan diyakini sensitif terhadap keberadaan air. Ranting willow, ketika dipegang dan diarahkan ke tanah, akan bergetar atau menunduk jika di bawahnya terdapat sumber air. Daun pisang yang lebar juga dimanfaatkan untuk mendeteksi kelembaban tanah. Daun pisang yang dihamparkan di atas tanah pada sore hari akan basah oleh embun di pagi hari jika di bawahnya terdapat sumber air. Batok kelapa, setelah dibersihkan, dapat berfungsi sebagai indikator keberadaan uap air. Batok kelapa yang diletakkan terbalik di atas tanah akan menampung uap air yang naik dari dalam tanah, membentuk butiran-butiran embun di permukaannya. Taburan garam merupakan metode lain yang memanfaatkan sifat higroskopis garam, yaitu kemampuannya menyerap kelembaban. Garam yang ditaburkan di atas tanah akan menjadi lembab jika di bawahnya terdapat sumber air.

Contoh-contoh tersebut, meskipun tidak melibatkan teknologi

canggih, secara fundamental menerapkan prinsip "memperoleh informasi tentang suatu objek atau fenomena tanpa melakukan kontak fisik langsung dengan objek atau fenomena tersebut." "Jarak" dalam konteks ini bersifat relatif; bisa hanya beberapa meter (seperti mengamati jejak kaki hewan) hingga ribuan kilometer (seperti mengamati konfigurasi bintang untuk navigasi). Penting untuk dicatat bahwa beberapa metode tradisional, seperti penggunaan ranting willow untuk mencari air (*dowsing*), memiliki status ilmiah yang kontroversial dan belum sepenuhnya dapat dijelaskan melalui mekanisme fisika yang dikenal (Cracknell 2018). Namun demikian, contoh-contoh ini tetap relevan untuk menggambarkan upaya historis manusia dalam memahami lingkungannya secara non-invasif melalui observasi dan interpretasi tanda-tanda alam yang halus.

Lebih jauh, praktik-praktik tradisional ini menunjukkan bahwa konsep "data" dan "interpretasi" telah ada jauh sebelum era digital. Jejak kaki hewan yang ditemukan oleh pemburu adalah bentuk "data mentah". Pemburu kemudian "menginterpretasikan" data ini – jenis hewan, arah pergerakan, perkiraan waktu melintas – untuk mengambil keputusan. Demikian pula, formasi awan adalah "data" bagi pelaut, yang kemudian "diinterpretasikan" untuk memprediksi kondisi cuaca. Proses kognitif yang terlibat dalam penginderaan jauh modern, yaitu akuisisi data, pemrosesan, interpretasi, dan pengambilan keputusan, sejatinya memiliki akar historis dalam praktik-praktik tradisional ini. Pemahaman ini membantu menjembatani persepsi antara metode "tradisional" yang kualitatif dan metode "modern" yang lebih kuantitatif, menunjukkan bahwa teknologi modern pada dasarnya adalah alat yang lebih canggih untuk melakukan proses yang secara konseptual telah lama ada.

1.2.2 Definisi Modern dan Komponen Utama

Definisi penginderaan jauh terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi dan pemahaman manusia. Pada awalnya, penginderaan

jauh terbatas pada cara untuk mengamati objek dari kejauhan tanpa kontak fisik langsung. Observasi visual, seperti mengamati pergerakan awan atau satwa liar, termasuk dalam kategori ini. Kemampuan pendengaran untuk mendeteksi suara petir atau gemerisik hewan buruan juga merupakan bentuk awal penginderaan jauh. Bahkan, indera penciuman, yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan mangsa atau tumbuhan tertentu, dapat dianggap sebagai bagian dari penginderaan jauh primitif.

Namun, seiring berjalannya waktu, definisi penginderaan jauh mengalami pergeseran makna yang signifikan. Perkembangan teknologi, khususnya dalam bidang rekayasa sensor dan pemrosesan data, mendorong penginderaan jauh ke arah yang lebih spesifik dan kompleks. Kini, penginderaan jauh lebih merujuk pada pemanfaatan radiasi gelombang elektromagnetik untuk memperoleh informasi tentang objek, permukaan, atau fenomena di Bumi. Teknologi modern menjadi tulang punggung penginderaan jauh dalam definisi baru ini. Sensor canggih dirancang untuk merekam energi elektromagnetik yang dipancarkan, dipantulkan, atau dihamburkan oleh objek di permukaan Bumi. Data mentah yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis menggunakan perangkat lunak khusus untuk menghasilkan informasi yang bernilai guna.

Salah satu definisi formal penginderaan jauh yang diterima secara luas dalam literatur ilmiah adalah yang dikemukakan oleh Lillesand, Kiefer, dan Chipman (2015), yang menyatakan bahwa penginderaan jauh adalah "ilmu dan seni untuk memperoleh informasi tentang suatu objek, wilayah, atau fenomena melalui analisis data yang diperoleh dengan suatu alat tanpa kontak langsung dengan objek, wilayah, atau fenomena yang dikaji." Definisi ini menggarisbawahi dua aspek penting: "ilmu" dan "seni". Aspek "ilmu" merujuk pada landasan fisika yang kuat, terutama terkait sifat gelombang elektromagnetik, interaksinya dengan materi, serta prinsip-prinsip matematika dan statistik yang digunakan dalam pemrosesan dan

analisis data. Sementara itu, aspek "seni" terkait dengan kemampuan interpretasi, di mana pengalaman, keahlian visual, dan pemahaman kontekstual berperan penting dalam menerjemahkan data mentah menjadi informasi yang bermakna, terutama dalam interpretasi citra secara visual yang tidak selalu dapat diotomatisasi sepenuhnya (Campbell dan Wynne 2011; T. M. Lillesand, Kiefer, dan Chipman 2015).

Pergeseran dari pengamatan kualitatif berbasis indra manusia ke pengukuran kuantitatif berbasis sensor merupakan ciri utama penginderaan jauh modern. Untuk memahami bagaimana sistem penginderaan jauh modern bekerja, penting untuk mengenali komponen-komponen utamanya, yang saling berinteraksi secara sistematis:

1. **Sumber Energi (A):** Merupakan sumber iluminasi atau radiasi elektromagnetik. Sumber energi ini dapat bersifat pasif, seperti Matahari yang memancarkan energi ke permukaan Bumi (digunakan oleh sebagian besar sistem penginderaan jauh optik), atau aktif, di mana sensor itu sendiri memancarkan energi ke target dan kemudian merekam pantulannya (contoh: sistem RADAR dan LiDAR).
2. **Interaksi Energi dengan Atmosfer (B):** Energi elektromagnetik yang merambat dari sumber ke target, dan dari target ke sensor, akan berinteraksi dengan atmosfer. Partikel dan gas di atmosfer dapat menyebabkan penyerapan (absorpsi) dan penghamburan (hamburan) energi, yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas energi yang mencapai sensor.
3. **Interaksi Energi dengan Target/Objek (C):** Ketika energi elektromagnetik mencapai target di permukaan Bumi (misalnya, vegetasi, tanah, air, bangunan), sebagian energi akan dipantulkan, sebagian diserap, dan sebagian mungkin ditransmisikan. Karakteristik bagaimana objek memantulkan, menyerap, atau memancarkan energi pada berbagai panjang gelombang (dikenal sebagai tanda spektral atau

spectral signature) menjadi dasar untuk identifikasi dan diferensiasi objek.

4. **Sensor (D):** Merupakan alat yang dirancang untuk mendeteksi dan merekam energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh target. Sensor mengubah energi ini menjadi sinyal yang dapat diukur dan direkam, biasanya dalam format digital.
5. **Sistem Transmisi, Penerimaan, dan Pemrosesan Awal (E):** Data yang direkam oleh sensor (terutama yang berada di platform satelit atau pesawat terbang) ditransmisikan ke stasiun penerima di Bumi. Data mentah ini kemudian melalui tahap pemrosesan awal, seperti koreksi geometrik (untuk memperbaiki distorsi spasial) dan koreksi radiometrik (untuk memperbaiki gangguan atmosfer dan variasi sensor), agar siap untuk dianalisis lebih lanjut.
6. **Interpretasi dan Analisis (F):** Merupakan proses mengubah data penginderaan jauh yang telah diproses menjadi informasi yang berguna. Proses ini dapat dilakukan secara visual oleh seorang analis atau secara digital menggunakan algoritma komputer dan teknik pemrosesan citra.
7. **Aplikasi/Pengguna (G):** Informasi yang dihasilkan dari interpretasi dan analisis kemudian digunakan oleh berbagai pengguna untuk berbagai tujuan, seperti pemetaan, pemantauan lingkungan, manajemen sumber daya alam, perencanaan kota, mitigasi bencana, dan penelitian ilmiah.

Keterkaitan antar komponen dalam sistem penginderaan jauh ini bersifat fundamental dan berurutan. Kualitas data yang direkam oleh sensor (D) sangat dipengaruhi oleh karakteristik sumber energi (A), kondisi atmosfer saat akuisisi (B), dan sifat interaksi energi dengan target (C). Selanjutnya, proses interpretasi dan analisis (F) sangat bergantung pada kualitas data yang telah melalui tahap pemrosesan awal (E). Gangguan atau

kegagalan pada salah satu komponen akan berdampak signifikan pada keseluruhan sistem dan kualitas informasi akhir yang dihasilkan untuk pengguna (G). Oleh karena itu, pemahaman holistik terhadap seluruh komponen dan interaksinya sangat penting untuk merencanakan akuisisi data yang optimal, melakukan *troubleshooting* jika terjadi masalah, dan menghasilkan interpretasi yang akurat dan andal.

Transformasi definisi ini membawa dampak besar pada berbagai bidang. Pemetaan wilayah yang luas dan sulit dijangkau, misalnya, dapat dilakukan dengan cepat dan akurat. Monitoring lingkungan untuk melacak deforestasi, polusi, dan bencana alam dapat dilakukan secara berkala dan efisien. Manajemen sumber daya alam, seperti hutan, mineral, dan air, dipermudah dengan pemetaan dan pemantauan yang komprehensif. Di bidang pertanian, penginderaan jauh membantu dalam monitoring tanaman, estimasi hasil panen, dan identifikasi penyakit tanaman. Pergeseran definisi penginderaan jauh mencerminkan kemajuan teknologi yang luar biasa. Dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik, manusia dapat “melihat” dan memahami Bumi dengan cara yang lebih detail, komprehensif, dan efisien, membuka peluang baru dalam berbagai aspek kehidupan.

1.3 Sejarah Perkembangan Penginderaan Jauh

Upaya manusia untuk memahami dunia yang luas ini telah berlangsung sejak lama. Jauh sebelum teknologi canggih hadir, upaya untuk mengamati lingkungan dari kejauhan telah dimulai, menandai cikal bakal penginderaan jauh, sebuah bidang yang terus berkembang hingga kini. Sejarah penginderaan jauh modern dapat ditelusuri kembali ke pertengahan abad ke-19, bersamaan dengan penemuan fotografi.

Pada tahun 1859, seorang fotografer Prancis bernama Gaspar Felix Tournachon, yang lebih dikenal dengan nama Nadar, berhasil

mengabadikan foto udara pertama (Cracknell 2018). Ia menaiki balon udara dengan membawa kamera dan mengambil gambar Kota Paris dari ketinggian. Foto-foto ini, meskipun masih sederhana, membuka mata dunia tentang potensi melihat Bumi dari perspektif yang berbeda, mendemonstrasikan kemampuan untuk mendapatkan pandangan sinoptik yang sebelumnya tidak mungkin.

Tidak lama kemudian, potensi militer dari fotografi udara mulai disadari. Bermula dari demonstrasi pada tahun 1861, Presiden Amerika Abraham Lincoln merestui pembentukan *Union Army Balloon Corps* yang kemudian beroperasi secara luas di tengah berkecamuknya Perang Saudara pada tahun 1862 (Evans 2002). Korps ini memanfaatkan balon udara untuk tujuan pengintaian dan pemetaan, menandai penggunaan foto udara pertama untuk kepentingan militer. Informasi yang dikumpulkan dari balon udara terbukti sangat berharga bagi pasukan Union, memberikan keuntungan strategis di medan perang. Selain untuk kepentingan militer, balon udara pada masa itu juga mulai digunakan untuk pemetaan hutan, memberikan perspektif baru yang berguna untuk pengelolaan dan konservasi sumber daya alam.

Inovasi terus berlanjut dengan platform yang lebih beragam. Pada tahun 1889, Arthur Batut, seorang fotografer asal Perancis (Arthur Batut 1995), berhasil menerbangkan kamera dengan layang-layang dan mengambil foto udara pertama dengan metode ini di Labruguiere, Perancis. Pencapaian Batut ini menjadi alternatif yang lebih murah dan mudah diakses dibandingkan dengan penggunaan balon udara, yang pada saat itu masih merupakan teknologi yang mahal dan rumit. Foto-foto karya Batut membantu mempopulerkan teknik fotografi udara dengan layang-layang.

Metode yang lebih unik dikembangkan pada tahun 1908, ketika Julius Neubronner mematenkan temuannya dengan judul “Metode dan Sarana Memotret Bentang Alam dari Atas”, yang melibatkan kamera

miniatur yang dibawa oleh merpati pos (Julius Neubronner 1908). Neubronner, seorang apoteker Jerman, awalnya menggunakan merpati pos untuk pengiriman resep dan obat. Ia kemudian merancang kamera ringan yang dipasang pada merpati untuk mengambil foto udara secara otomatis pada interval waktu tertentu. Meskipun tidak terkontrol seperti platform lain, metode ini menunjukkan kreativitas dalam mencari cara baru untuk observasi dari udara.

Era penerbangan membawa lompatan besar berikutnya. Pada tahun 1909, Wilbur Wright, salah satu pelopor penerbangan dari Amerika Serikat, berhasil mengambil foto udara pertama dari pesawat terbang ringan di Centocelle, dekat Roma, Italia (Oliver dkk. 1954). Beberapa sumber menyebutkan Wilbur Wright sendiri yang mengambil foto tersebut, sementara sumber lain menyatakan bahwa foto tersebut diambil oleh penumpangnya, Louis Paul Bonvillain. Pesawat terbang menawarkan platform yang lebih stabil, terkontrol, dan mampu mencapai ketinggian yang lebih besar dibandingkan balon atau layang-layang, menjadikannya alat vital dalam penginderaan jauh.

Perang Dunia I (1914-1918) menjadi titik balik yang mempercepat perkembangan teknologi penginderaan jauh. Kebutuhan akan intelijen militer yang akurat mendorong penggunaan foto udara secara masif untuk pemetaan medan perang, identifikasi target, dan pengintaian. Jerman, misalnya, dilaporkan mampu memproduksi hingga 4.000 foto udara setiap harinya (Ernst von Hoepfner 1921). Angkatan Darat Amerika Serikat juga mengumpulkan lebih dari satu juta foto udara selama perang (Edgar S. Gorrell 1919). Periode ini juga menyaksikan pengembangan teknik interpretasi foto dan kamera yang lebih baik. Selama Perang Dunia II, pengembangan film inframerah menjadi penting untuk deteksi kamuflase, karena vegetasi sehat memantulkan radiasi inframerah dekat secara berbeda dari vegetasi buatan atau yang dicat.

Pasca Perang Dunia II, dan dipicu oleh Perlombaan Antariksa (*Space Race*) antara Amerika Serikat dan Uni Soviet, teknologi satelit mulai berkembang pesat. Program satelit mata-mata pertama Amerika Serikat, CORONA, beroperasi secara rahasia dari tahun 1959 hingga 1972 (Kevin C. Ruffner 1995). Selama periode tersebut, CORONA berhasil mengambil ribuan foto beresolusi tinggi untuk kepentingan militer dan intelijen. Salah satu aspek teknis paling unik dari CORONA adalah metode pengembalian datanya; karena teknologi transmisi digital belum memadai, satelit harus menjatuhkan kapsul berisi gulungan film fisik yang kemudian ditangkap di udara (*mid-air recovery*) oleh pesawat militer C-119 atau C-130 yang dilengkapi pengait khusus. Keberadaan program ini baru terungkap ke publik pada tahun 1995 ketika Presiden Bill Clinton memerintahkan deklasifikasi citra-citra tersebut, yang kemudian membuka potensi pemanfaatannya untuk penelitian lingkungan.

Era penginderaan jauh untuk tujuan sipil secara resmi dimulai pada tahun 1972 dengan peluncuran Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1) oleh NASA, yang kemudian berganti nama menjadi Landsat 1 (NASA Goddard Space Flight Center 1972). Satelit ini dirancang khusus untuk memantau sumber daya alam dan lingkungan Bumi secara berkelanjutan. Landsat 1 mampu merekam gambar permukaan Bumi dengan resolusi spasial sekitar 80 meter menggunakan sensor multispektral, dan mengirimkan data tersebut ke stasiun penerima di Bumi. Peluncuran Landsat 1 menandai tonggak penting, memulai sejarah pengamatan Bumi dari luar angkasa untuk aplikasi sipil dan ilmiah secara luas, serta mendemokratisasi akses terhadap data penginderaan jauh.

Sejak saat itu, perkembangan teknologi sensor, platform (termasuk berbagai jenis satelit dengan resolusi dan kemampuan yang beragam, serta *Unmanned Aerial Vehicles* atau UAV/drone), dan teknik analisis data terus berlanjut dengan pesat, didorong oleh institusi seperti NASA, ESA

(European Space Agency), dan badan antariksa negara-negara lain.

Pola perkembangan teknologi penginderaan jauh seringkali menunjukkan bahwa kebutuhan strategis, terutama militer, menjadi pendorong utama inovasi. Teknologi yang awalnya dikembangkan untuk pertahanan dan intelijen, setelah terbukti kemampuannya dan terkadang setelah dideklasifikasi, kemudian diadaptasi dan dimanfaatkan secara luas untuk aplikasi sipil, ilmiah, dan komersial. Selain itu, evolusi platform dari balon sederhana hingga satelit canggih telah secara fundamental mengubah kapabilitas penginderaan jauh, memungkinkan observasi dengan cakupan global, pengulangan reguler, dan dari perspektif di atas atmosfer yang bebas dari sebagian besar gangguan cuaca. Pemilihan platform yang tepat kini menjadi keputusan kunci dalam perancangan misi penginderaan jauh, bergantung pada tujuan spesifik, area cakupan yang diinginkan, dan frekuensi pengamatan yang dibutuhkan.

Berikut adalah tabel yang merangkum beberapa tonggak penting dalam sejarah perkembangan penginderaan jauh:

Tabel 1.1 Tonggak Sejarah Perkembangan Penginderaan Jauh

Tahun	Peristiwa/ Penemuan/ Peluncuran Penting	Tokoh/ Institusi Kunci	Kontribusi/ Signifikansi Utama
1859	Foto udara pertama dari balon udara	Gaspard F. Tournachon (Nadar)	Mendemonstrasikan potensi perspektif udara untuk observasi Bumi.
1862	Pembentukan Korps Balon Angkatan Darat AS	Militer AS (Abraham Lincoln)	Penggunaan foto udara pertama untuk tujuan militer (pengintaian dan pemetaan).
1889	Foto udara pertama dari layang-layang	Arthur Batut	Alternatif platform yang lebih murah dan mudah diakses untuk fotografi udara.
1908	Paten kamera merpati	Julius Neubronner	Metode inovatif untuk fotografi udara menggunakan merpati.

Tahun	Peristiwa/ Penemuan/ Peluncuran Penting	Tokoh/ Institusi Kunci	Kontribusi/ Signifikansi Utama
1909	Foto udara pertama dari pesawat terbang	Wilbur Wright / L. Bonvillain	Pesawat terbang sebagai platform yang lebih stabil dan terkontrol untuk penginderaan jauh.
1914-1918	Akselerasi penggunaan foto udara dalam Perang Dunia I	Militer berbagai negara	Peningkatan signifikan dalam teknologi kamera, teknik interpretasi, dan volume produksi foto udara untuk intelijen.
~1940-an	Pengembangan film inframerah	Militer (selama PD II)	Kemampuan mendeteksi kamuflase dan analisis vegetasi.
1959-1972	Program satelit mata-mata CORONA	Amerika Serikat	Penggunaan satelit pertama untuk pengintaian resolusi tinggi; data kemudian dideklasifikasi untuk penelitian lingkungan.
1972	Peluncuran satelit ERTS-1 (Landsat 1)	NASA (Amerika Serikat)	Satelit penginderaan jauh sipil pertama yang didedikasikan untuk pemantauan sumber daya alam dan lingkungan secara global.
1970-an dst	Pengembangan sensor multispektral dan hiperspektral, RADAR, LiDAR	Berbagai institusi riset	Peningkatan kemampuan untuk membedakan fitur permukaan Bumi berdasarkan respons spektral yang lebih detail.
1999	Peluncuran IKONOS	Space Imaging (sekarang Maxar)	Era satelit komersial resolusi sangat tinggi (sub-meter) untuk aplikasi sipil.
2000-an dst	Perkembangan pesat UAV/Drone untuk penginderaan jauh skala lokal	Industri komersial & riset	Platform fleksibel dan biaya relatif rendah untuk akuisisi data resolusi sangat tinggi sesuai permintaan.

Dari balon udara hingga satelit canggih dan drone, perjalanan teknologi penginderaan jauh menunjukkan rasa ingin tahu dan semangat inovasi manusia yang tak pernah padam. Di masa depan, teknologi ini diprediksi akan semakin canggih dengan hadirnya sensor yang lebih akurat, resolusi spasial, spektral, dan temporal yang semakin tinggi, serta kemampuan analisis data yang lebih canggih berbasis kecerdasan buatan,

membuka peluang baru dalam berbagai aspek kehidupan.

1.4 Manfaat dan Aplikasi Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh, dengan kemampuannya untuk merekam daerah dengan cakupan luas secara efisien, menyimpan data historis untuk analisis temporal, melakukan perekaman berulang untuk memantau perubahan, dan mengakses daerah yang sulit atau berbahaya dijangkau secara langsung, telah mengubah cara kita memahami dan berinteraksi dengan planet ini. Kemampuannya untuk mengamati dan mengumpulkan data dari kejauhan, tanpa kontak fisik langsung, membuka berbagai peluang di berbagai bidang.

Salah satu manfaat utama adalah kemampuan untuk menyediakan **cakupan sinoptik**, di mana area yang sangat luas dapat diamati dan direkam dalam satu waktu atau dalam periode yang relatif singkat. Hal ini sangat efisien dibandingkan survei lapangan konvensional yang membutuhkan waktu dan sumber daya yang jauh lebih besar untuk area yang sama. Kemampuan **perekaman berulang** pada interval waktu tertentu (resolusi temporal) memungkinkan pemantauan dinamika perubahan di permukaan Bumi, seperti deforestasi, perluasan perkotaan, perubahan garis pantai, atau dampak bencana alam dari waktu ke waktu. Ketersediaan **data historis** dari arsip citra satelit, seperti program Landsat yang telah beroperasi selama beberapa dekade, menjadi sumber daya tak ternilai untuk menganalisis tren jangka panjang, memahami proses perubahan lingkungan, dan memvalidasi model prediksi. Selain itu, penginderaan jauh memungkinkan **akses ke daerah terpencil, berbahaya, atau sulit dijangkau** secara fisik, seperti pegunungan tinggi, hutan lebat, daerah kutub, atau lokasi bencana.

Manfaat-manfaat ini telah mendorong aplikasi penginderaan jauh dalam berbagai sektor, di antaranya:

1. Pemantauan dan Pengelolaan Sumber Daya Alam:

- **Kehutanan:** Inventarisasi jenis dan kerapatan tegakan hutan, pemantauan laju deforestasi dan keberhasilan program reboisasi, deteksi dini dan pemetaan luas kebakaran hutan, serta estimasi biomassa dan karbon hutan.
- **Pertanian:** Estimasi luas tanam dan jenis komoditas, pemantauan kesehatan dan fase pertumbuhan tanaman secara spasial, identifikasi serangan hama dan penyakit, prediksi hasil panen, serta dukungan untuk praktik pertanian presisi seperti optimasi penggunaan pupuk dan irigasi.
- **Sumber Daya Air:** Pemetaan badan air (sungai, danau, waduk) dan perubahannya, pemantauan kualitas air (misalnya, kandungan sedimen, *blooming* alga), deteksi kelembaban tanah untuk manajemen irigasi, estimasi cadangan air dalam bentuk salju di pegunungan, dan pemetaan daerah potensi air tanah.
- **Geologi:** Pemetaan struktur geologi regional, identifikasi formasi batuan, dukungan untuk eksplorasi mineral, minyak, dan gas Bumi, serta pemantauan aktivitas vulkanik dan deformasi permukaan tanah.

2. Pemantauan Lingkungan dan Perubahan Iklim:

- **Pemantauan Polusi:** Deteksi dan pemantauan sebaran polusi udara (misalnya, asap, aerosol) dan polusi air (misalnya, tumpahan minyak, limbah industri).
- **Pemetaan dan Pemantauan Tutupan/Penggunaan Lahan (*Land Cover/Land Use*):** Identifikasi jenis tutupan lahan (hutan, pertanian, perkotaan, badan air, dll.) dan penggunaan lahan oleh manusia, serta

analisis perubahannya dari waktu ke waktu (*land use/land cover change* - LULCC) yang penting untuk perencanaan tata ruang dan studi dampak lingkungan.

- **Perubahan Iklim:** Pemantauan pencairan es di kutub dan gletser, kenaikan permukaan air laut, perubahan suhu permukaan laut, estimasi emisi gas rumah kaca dari perubahan tutupan lahan, dan pemantauan fenomena terkait iklim seperti kekeringan dan desertifikasi.

3. Manajemen Bencana:

- **Sebelum Bencana (Tahap Mitigasi dan Kesiapsiagaan):** Pemetaan daerah rawan bencana seperti banjir, tanah longsor, gempa Bumi, tsunami, dan letusan gunung berapi untuk penyusunan rencana mitigasi dan jalur evakuasi.
- **Saat Bencana (Tahap Tanggap Darurat):** Pemantauan perkembangan bencana secara cepat (misalnya, pemetaan luasan genangan banjir secara *near real-time*, arah sebaran asap kebakaran hutan, atau aliran lava) untuk mendukung operasi penyelamatan dan bantuan.
- **Setelah Bencana (Tahap Pemulihan dan Rehabilitasi):** Penilaian cepat dan akurat terhadap tingkat kerusakan infrastruktur dan wilayah terdampak, perencanaan lokasi pengungsian dan distribusi bantuan, serta pemantauan proses rekonstruksi dan rehabilitasi.

4. Perencanaan dan Pembangunan Wilayah:

- **Pemetaan Perkotaan:** Pemetaan infrastruktur kota, pemantauan perkembangan wilayah perkotaan (*urban sprawl*), analisis pola permukiman, dan dukungan untuk perencanaan transportasi dan utilitas publik.
- **Perencanaan Infrastruktur:** Pemilihan rute optimal untuk pembangunan jalan, jalur pipa, atau jaringan transmisi listrik dengan

mempertimbangkan kondisi topografi dan lingkungan.

- **Arkeologi:** Identifikasi potensi situs-situs arkeologi berdasarkan anomali vegetasi, pola tanah, atau sisa-sisa struktur yang terlihat dari udara atau melalui karakteristik spektral tertentu.

5. **Pertahanan dan Keamanan:**

- **Pengawasan Perbatasan:** Pemantauan aktivitas di wilayah perbatasan negara.
- **Intelijen dan Pengintaian:** Pengumpulan informasi strategis mengenai fasilitas atau aktivitas tertentu.

6. **Kelautan dan Pesisir:**

- **Pemetaan Batimetri Dangkal:** Estimasi kedalaman perairan dangkal menggunakan citra optik.
- **Pemantauan Ekosistem Pesisir:** Pemetaan dan pemantauan kondisi terumbu karang, padang lamun, dan hutan mangrove.
- **Deteksi Tumpahan Minyak:** Identifikasi dan pemantauan sebaran tumpahan minyak di laut untuk respons cepat.

Keluasan aplikasi ini menunjukkan bahwa penginderaan jauh adalah sebuah teknologi pemampu (*enabling technology*) yang bersifat lintas disiplin. Data yang sama, misalnya dari satelit Landsat atau Sentinel, dapat dimanfaatkan oleh ahli kehutanan untuk memantau deforestasi, oleh ahli hidrologi untuk mengkaji neraca air, oleh perencana kota untuk menganalisis perkembangan urban, dan oleh ilmuwan iklim untuk mempelajari dampak pemanasan global. Hal ini tidak hanya menunjukkan fleksibilitas teknologi penginderaan jauh tetapi juga mendorong perlunya kolaborasi interdisipliner untuk mengatasi masalah-masalah kompleks. Lebih lanjut, kemampuan perekaman historis dan pemantauan temporal yang konsisten dari sistem penginderaan jauh, terutama dari program satelit jangka panjang, sangat krusial. Banyak fenomena lingkungan dan sosial,

seperti degradasi lahan, urbanisasi, atau dampak perubahan iklim, terjadi secara bertahap dalam skala waktu tahunan hingga dekade. Tanpa arsip data satelit yang sistematis, akan sangat sulit untuk mengukur, memodelkan, dan memprediksi tren perubahan ini secara kuantitatif dan akurat. Dengan demikian, penginderaan jauh tidak hanya berfungsi sebagai "alat potret kondisi saat ini" tetapi juga sebagai "mesin waktu" yang memungkinkan kita mempelajari dinamika masa lalu untuk lebih memahami kondisi masa kini dan merencanakan masa depan yang lebih berkelanjutan.

Dalam dunia yang semakin kompleks dan saling terhubung, penginderaan jauh telah menjadi teknologi yang sangat penting. Kemampuannya untuk menyediakan data yang komprehensif dan *near real-time* menjadikannya aset berharga dalam berbagai bidang, mendorong pengambilan keputusan yang lebih baik, dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

1.5 Keunggulan dan Keterbatasan Penginderaan Jauh

Sebagai sebuah teknologi yang sangat berpengaruh, penginderaan jauh menawarkan berbagai keunggulan signifikan, namun juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipahami oleh para penggunanya. Pemahaman yang seimbang terhadap kedua aspek ini penting untuk memastikan aplikasi penginderaan jauh yang efektif, efisien, dan bertanggung jawab.

Keunggulan Penginderaan Jauh:

- **Cakupan Sinoptik (Pandangan Luas):** Sensor penginderaan jauh, terutama yang terpasang pada platform satelit, mampu merekam area yang sangat luas dalam satu kali sapuan (*swath*) atau dalam satu adegan citra (*scene*). Hal ini memungkinkan pengamatan fenomena skala regional hingga global.

- **Aksesibilitas ke Daerah Sulit:** Teknologi ini mampu menjangkau daerah-daerah yang terpencil, berbahaya, atau sulit diakses secara terestrial karena alasan geografis (pegunungan, rawa, lautan luas), keamanan (daerah konflik), atau logistik.
- **Perekaman Berulang (Monitoring Temporal):** Banyak sistem satelit dirancang untuk melewati kembali area yang sama secara periodik (misalnya, harian, mingguan, atau bulanan). Kemampuan ini sangat vital untuk memantau perubahan lingkungan, dinamika perkotaan, pertumbuhan tanaman, atau dampak bencana dari waktu ke waktu.
- **Ketersediaan Data Historis:** Arsip data penginderaan jauh, terutama dari misi satelit jangka panjang seperti Landsat (sejak 1972), menyediakan catatan historis yang berharga untuk analisis tren perubahan jangka panjang dan studi retrospektif.
- **Kemampuan Perekaman Multi-Spektral dan Hiperspektral:** Sensor modern dapat merekam energi elektromagnetik dalam banyak saluran spektral sempit, termasuk di luar jangkauan spektrum tampak yang bisa dilihat mata manusia (misalnya, inframerah dekat, inframerah termal, gelombang mikro). Ini memungkinkan identifikasi material dan fenomena yang tidak dapat dibedakan hanya dengan penglihatan visual.
- **Relatif Hemat Biaya untuk Skala Luas:** Meskipun biaya pengembangan dan peluncuran satelit sangat tinggi, biaya perolehan data per unit area untuk cakupan yang luas seringkali lebih rendah dibandingkan dengan survei lapangan konvensional yang intensif tenaga kerja dan waktu. Banyak data satelit kini juga tersedia secara gratis atau dengan biaya rendah untuk pengguna.
- **Objektivitas Relatif dalam Perekaman Data:** Data direkam oleh sensor berdasarkan prinsip fisika, sehingga mengurangi potensi bias subjektif yang mungkin timbul dari pengamat lapangan. Namun, perlu dicatat bahwa proses interpretasi data tetap dapat melibatkan unsur

subjektivitas.

- **Non-Destruktif dan Non-Invasif:** Penginderaan jauh memperoleh informasi tanpa merusak atau mengganggu objek atau area yang diamati.

Keterbatasan Penginderaan Jauh:

- **Biaya Awal dan Infrastruktur yang Tinggi:** Pengembangan, peluncuran, dan operasionalisasi sistem satelit atau sensor udara canggih, beserta infrastruktur stasiun Bumi dan sistem pemrosesan data, memerlukan investasi finansial yang sangat besar.
- **Keterbatasan Resolusi:** Setiap sensor memiliki batasan dalam hal resolusi spasial (detail objek terkecil yang dapat dibedakan), resolusi spektral (kemampuan membedakan interval panjang gelombang), resolusi temporal (frekuensi perekaman ulang), dan resolusi radiometrik (sensitivitas terhadap perbedaan intensitas energi). Seringkali terdapat *trade-off* antar jenis resolusi ini; misalnya, satelit dengan resolusi spasial sangat tinggi mungkin memiliki cakupan area yang lebih sempit atau resolusi temporal yang lebih rendah.
- **Pengaruh Atmosfer:** Keberadaan awan, kabut, asap, debu, dan partikel atmosfer lainnya dapat mengganggu atau bahkan menghalangi perolehan data, terutama untuk sensor optik pasif yang mengandalkan energi Matahari. Koreksi Atmosfer diperlukan untuk meminimalkan efek ini, namun tidak selalu sempurna.
- **Kebutuhan Validasi Lapangan (*Ground Truth*):** Informasi yang diekstrak dari data penginderaan jauh seringkali memerlukan verifikasi, kalibrasi, atau validasi dengan data yang dikumpulkan langsung di lapangan (*ground truth*). Penginderaan jauh tidak sepenuhnya menggantikan kebutuhan akan survei lapangan, melainkan seringkali bersifat komplementer.

- **Kompleksitas Data dan Pemrosesan:** Data penginderaan jauh, terutama dari sensor modern, dapat berukuran sangat besar dan kompleks. Pemrosesan, analisis, dan interpretasi data ini memerlukan perangkat keras komputer yang memadai, perangkat lunak khusus, serta keahlian dan pengetahuan teknis yang spesifik.
- **Interpretasi Tidak Selalu Langsung (Ambiguitas):** Objek atau fenomena yang berbeda di permukaan Bumi terkadang dapat memiliki respons spektral yang mirip (fenomena *spectral confusion* atau kebingungan spektral), sehingga menyulitkan identifikasi yang akurat hanya berdasarkan data spektral. Informasi tambahan, konteks spasial, atau teknik analisis yang lebih canggih mungkin diperlukan.
- **Keterbatasan Informasi Aspek Vertikal (untuk Sensor Pasif 2D):** Sebagian besar citra satelit optik tradisional menyediakan pandangan dua dimensi (2D) dari atas ke bawah. Informasi mengenai dimensi vertikal (misalnya, tinggi pohon, ketinggian bangunan, kedalaman badan air) mungkin tidak secara langsung tersedia dan memerlukan penggunaan sensor khusus (seperti LiDAR atau RADAR dengan teknik interferometri/InSAR) atau teknik analisis lanjutan (seperti fotogrametri stereo).
- **Ketergantungan pada Teknologi dan Kebijakan Data:** Akses terhadap data dan teknologi penginderaan jauh dapat dipengaruhi oleh kebijakan penyedia data (pemerintah atau komersial), serta ketersediaan teknologi dan infrastruktur di tingkat pengguna.

Pemahaman yang mendalam terhadap keterbatasan-keterbatasan ini sama pentingnya dengan mengenali keunggulannya. Kesadaran akan potensi masalah seperti pengaruh atmosfer pada citra optik, resolusi yang mungkin tidak memadai untuk aplikasi tertentu, atau kebutuhan akan validasi lapangan, akan membantu pengguna dalam memilih jenis data dan sensor yang paling sesuai, merencanakan akuisisi data secara lebih efektif,

menerapkan metode analisis yang tepat, dan pada akhirnya, menilai tingkat kepercayaan terhadap informasi yang dihasilkan. Sikap kritis dan realistis terhadap kemampuan teknologi penginderaan jauh akan menuntun pada penggunaannya yang lebih bijaksana dan bermanfaat.

1.6 Struktur Buku

Buku ini dirancang untuk memandu pembaca dalam memahami dunia penginderaan jauh secara komprehensif dan sistematis. Struktur buku ini disusun secara logis, dimulai dari konsep-konsep paling mendasar hingga aplikasi dan perkembangan terkini, sehingga pembaca dapat membangun pemahaman yang kokoh secara bertahap.

Dimulai dengan **BAB 1: Pendahuluan** (bab yang sedang Anda baca saat ini), yang memaparkan esensi penginderaan jauh, melacak sejarah perkembangannya dari konsep tradisional hingga teknologi modern, menguraikan berbagai manfaat dan aplikasinya di berbagai bidang, serta menyoroti keunggulan dan keterbatasan yang dimilikinya. Bab pertama ini juga akan menguraikan struktur keseluruhan buku ini sebagai peta jalan bagi pembaca.

Selanjutnya, tulisan ini akan membawa pembaca menyelami fondasi ilmiah yang mendasari teknologi ini. Setelah memahami definisi dan sejarah, bagian ini akan membekali Anda dengan konsep-konsep fisika fundamental. Dimulai dengan pemahaman tentang **Bab 2: Spektrum Elektromagnetik**, meliputi definisi, sifat-sifat gelombang elektromagnetik, dan interaksinya dengan atmosfer serta objek di permukaan Bumi. **Bab 3: Sensor dan Platform**, akan mengulas tentang berbagai jenis sensor yang digunakan dalam penginderaan jauh, platform wahana yang membawa sensor tersebut (mulai dari pesawat hingga satelit), serta karakteristik masing-masing. Bagian ini ditutup dengan pembahasan mengenai **Bab 4: Resolusi dalam Penginderaan Jauh**, yang menjelaskan

empat jenis resolusi utama (spasial, spektral, temporal, dan radiometrik) dan signifikansinya dalam menentukan kualitas dan kegunaan data.

Fokus pembahasan selanjutnya beralih ke aspek praktis bagaimana data penginderaan jauh diperoleh dan disiapkan untuk analisis. **Bab 5: Akuisisi Data Penginderaan Jauh**, akan menguraikan tahapan-tahapan dalam proses akuisisi data, faktor-faktor yang mempengaruhinya, dan jenis-jenis citra yang dihasilkan oleh berbagai sistem sensor. **Bab 6: Pengolahan Citra Digital**, selanjutnya akan membahas tentang konsep dasar citra digital, teknik-teknik penting dalam pra-pemrosesan citra (seperti koreksi geometrik dan radiometrik), metode perbaikan kualitas citra (*image enhancement*), transformasi citra, serta berbagai metode klasifikasi citra untuk mengekstrak informasi tematik.

Pembaca diarahkan untuk memahami bagaimana data yang telah diolah kemudian diubah menjadi informasi yang bermakna dan diterapkan dalam berbagai konteks. **Bab 7: Interpretasi Citra Penginderaan Jauh**, membahas tentang elemen-elemen kunci dalam interpretasi citra, metode interpretasi visual yang mengandalkan kemampuan kognitif analis, serta metode interpretasi digital yang menggunakan algoritma komputer. **Bab 8: Aplikasi Penginderaan Jauh**, akan mengeksplorasi secara lebih mendalam berbagai aplikasi konkret penginderaan jauh di berbagai bidang, seperti pemetaan sumber daya alam, pemantauan lingkungan, manajemen bencana, perencanaan kota, pertanian presisi, dan aplikasi-aplikasi penting lainnya.

Memasuki bagian akhir, buku ini akan membahas tren dan inovasi terkini dalam bidang penginderaan jauh. **Bab 9: Perkembangan Teknologi Penginderaan Jauh**, mengulas tentang kemajuan dalam teknologi sensor dan platform (misalnya, sensor hiperspektral, LiDAR, UAV/drone, konstelasi satelit kecil), teknik pengolahan data yang lebih maju (seperti pemanfaatan kecerdasan buatan dan *big data analytics*), serta

tren dan inovasi yang sedang berkembang.

Struktur buku yang demikian diharapkan dapat mencerminkan alur kerja ilmiah yang umum dalam disiplin penginderaan jauh: dimulai dari pemahaman konsep dasar dan prinsip fisika, berlanjut ke bagaimana data diperoleh dan diproses secara teknis, kemudian bagaimana data tersebut diinterpretasi untuk menghasilkan informasi yang relevan, dan akhirnya bagaimana informasi tersebut diaplikasikan untuk memecahkan masalah nyata serta bagaimana teknologi ini terus berkembang. Alur ini dirancang untuk membantu mahasiswa membangun kerangka berpikir yang sistematis dan komprehensif tentang penginderaan jauh, dari teori hingga aplikasi praktis.

1.7 Rangkuman Bab

Bab Pendahuluan ini telah meletakkan dasar bagi pemahaman mengenai penginderaan jauh sebagai sebuah ilmu dan teknologi. Beberapa poin kunci yang telah dibahas meliputi:

- **Definisi Penginderaan Jauh:** Penginderaan jauh telah berkembang dari konsep tradisional yang mengandalkan indra manusia untuk observasi jarak jauh, menjadi sebuah disiplin ilmiah modern yang didefinisikan sebagai ilmu dan seni untuk memperoleh informasi tentang objek atau fenomena tanpa kontak fisik langsung, utamanya dengan memanfaatkan perekaman dan analisis radiasi gelombang elektromagnetik.
- **Komponen Sistem Penginderaan Jauh:** Sistem penginderaan jauh modern terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terkait, yaitu sumber energi, interaksi energi dengan atmosfer, interaksi energi dengan target, sensor, sistem transmisi-penerimaan-pemrosesan awal, interpretasi dan analisis, serta aplikasi oleh pengguna. Pemahaman terhadap fungsi dan interaksi antar komponen ini krusial.

- **Sejarah Perkembangan:** Sejarah penginderaan jauh ditandai oleh tonggak-tonggak penting, mulai dari foto udara pertama menggunakan balon pada abad ke-19, pemanfaatan masif selama perang dunia, hingga era satelit yang diawali dengan program militer dan kemudian berkembang pesat untuk aplikasi sipil dengan peluncuran Landsat 1. Perkembangan ini seringkali didorong oleh kebutuhan strategis dan kemajuan teknologi platform serta sensor.
- **Manfaat dan Aplikasi:** Penginderaan jauh menawarkan manfaat signifikan seperti cakupan area yang luas, kemampuan perekaman berulang untuk monitoring, akses ke daerah sulit, dan ketersediaan data historis. Aplikasinya sangat beragam, mencakup pengelolaan sumber daya alam, pemantauan lingkungan dan perubahan iklim, manajemen bencana, perencanaan wilayah, pertahanan, hingga studi kelautan.
- **Keunggulan dan Keterbatasan:** Meskipun memiliki banyak keunggulan, penginderaan jauh juga memiliki keterbatasan seperti biaya awal, pengaruh atmosfer, resolusi yang terbatas untuk aplikasi tertentu, dan kebutuhan akan validasi lapangan. Pemahaman yang seimbang terhadap kedua aspek ini penting untuk penggunaan teknologi yang efektif dan bertanggung jawab.
- **Struktur Buku:** Buku ini disusun secara sistematis untuk memandu pembaca dari konsep dasar, akuisisi dan pengolahan data, interpretasi dan aplikasi, hingga perkembangan terbaru dan masa depan penginderaan jauh.

Pemahaman terhadap materi dalam bab ini menjadi fondasi penting sebelum melangkah ke pembahasan yang lebih mendalam mengenai aspek-aspek teknis dan aplikasi penginderaan jauh pada bab-bab berikutnya.

BAB II SPEKTRUM GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

2.1. Pendahuluan

Gelombang elektromagnetik (GEM) memegang peranan sentral sebagai pembawa informasi utama dalam sistem penginderaan jauh. Kemampuannya untuk merambat melalui ruang angkasa dan berinteraksi secara khas dengan berbagai objek di permukaan Bumi menjadikannya wahana yang tak ternilai untuk observasi planet kita. Pemahaman mengenai definisi, sifat-sifat, dan perilaku interaksi gelombang elektromagnetik merupakan fondasi esensial bagi siapa pun yang ingin mempelajari dan menerapkan teknologi penginderaan jauh. Tanpa pemahaman ini, interpretasi data yang dihasilkan oleh sensor penginderaan jauh akan menjadi dangkal dan rentan terhadap kesalahan. Lebih lanjut, pemahaman ini bukan hanya bersifat teoritis, melainkan secara langsung memengaruhi bagaimana seorang analis nantinya akan memilih jenis data, sensor, dan metode analisis yang paling tepat untuk menjawab berbagai pertanyaan ilmiah dan aplikasi praktis. Sebagai contoh, mengapa citra satelit tertentu tampak dengan warna atau kecerahan tertentu, atau mengapa sensor tertentu lebih unggul untuk aplikasi pemetaan vegetasi dibandingkan pemetaan suhu permukaan, semuanya berakar pada prinsip-prinsip interaksi GEM yang akan dibahas dalam bab ini.

2.2. Definisi dan Sifat-Sifat Gelombang Elektromagnetik

Dalam dunia fisika, kita mengenal gelombang sebagai getaran yang merambat, membawa energi tanpa memindahkan materi secara permanen. Salah satu jenis gelombang yang memegang peranan penting, terutama dalam penginderaan jauh, adalah gelombang elektromagnetik (Elachi dan Van Zyl 2021). Gelombang elektromagnetik dapat didefinisikan sebagai bentuk energi yang merambat melalui ruang sebagai kombinasi medan

listrik (E) dan medan magnet (M) yang beresilasi. Kedua medan ini beresilasi secara tegak lurus satu sama lain dan juga tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Itulah gambaran dasar dari gelombang elektromagnetik. Gelombang ini unik karena tidak memerlukan medium untuk merambat; mereka dapat bergerak bebas bahkan dalam ruang hampa udara, seperti yang dibuktikan oleh cahaya Matahari yang sampai ke Bumi.

Kecepatan rambat gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa adalah konstanta universal, yang kita kenal sebagai kecepatan cahaya (c), yaitu sekitar 299.792.458 meter per detik (sering dibulatkan menjadi 3×10^8 m/s). Kecepatan ini dapat sedikit berkurang ketika gelombang melewati medium lain, seperti udara, air, atau media padat lainnya, fenomena yang terkait dengan indeks bias medium tersebut.

Sifat-sifat gelombang elektromagnetik dapat dijelaskan melalui beberapa parameter kunci:

- **Panjang gelombang (λ):** Jarak antara dua titik yang setara pada gelombang yang berurutan, misalnya, jarak antara dua puncak gelombang atau dua lembah gelombang. Panjang gelombang biasanya diukur dalam satuan meter (m) atau turunannya seperti mikrometer (μm , $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$) atau nanometer (nm, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$). Penggunaan satuan yang berbeda ini relevan karena rentang panjang gelombang dalam spektrum elektromagnetik sangatlah luas.
- **Frekuensi (f):** Jumlah siklus gelombang (atau jumlah puncak gelombang) yang melewati suatu titik tetap dalam satu satuan waktu (biasanya satu detik). Frekuensi diukur dalam Hertz (Hz), di mana 1 Hz sama dengan satu siklus gelombang per detik.
- **Amplitudo (A):** Simpangan maksimum gelombang dari posisi kesetimbangannya. Amplitudo berhubungan dengan intensitas atau "kekuatan" energi yang dibawa oleh gelombang. Semakin besar amplitudo, semakin besar energi yang dibawa.

Panjang gelombang dan frekuensi gelombang elektromagnetik memiliki hubungan terbalik yang fundamental, yang diatur oleh kecepatan cahaya. Semakin pendek panjang gelombang, semakin tinggi frekuensinya, dan sebaliknya. Hubungan ini dapat dirumuskan sebagai:

$$c = \lambda f$$

di mana c adalah kecepatan cahaya, λ adalah panjang gelombang, dan f adalah frekuensi. Pemahaman bahwa kecepatan cahaya (c) dalam vakum adalah konstan sangat penting. Ini berarti jika panjang gelombang (λ) berubah (misalnya, menjadi lebih pendek), maka frekuensi (f) harus berubah (dalam hal ini, menjadi lebih tinggi) untuk menjaga agar hasil perkalian λf tetap sama dengan c . Konsep ini menghindarkan kebingungan ketika kita beralih antara mendeskripsikan gelombang elektromagnetik berdasarkan panjang gelombang atau frekuensinya, karena keduanya adalah dua sisi dari mata uang yang sama.

Selain sifatnya sebagai gelombang, energi elektromagnetik juga dapat bersifat sebagai partikel diskrit yang disebut foton. Setiap foton membawa sejumlah energi tertentu (kuantum energi) yang berbanding lurus dengan frekuensi gelombang tersebut. Hubungan ini dijelaskan oleh persamaan Planck:

$$E = hf$$

di mana E adalah energi satu foton (dalam Joule), h adalah konstanta Planck (sekitar 6.626×10^{-34} Joule detik), dan f adalah frekuensi gelombang (dalam Hz). Karena $f = c/\lambda$, maka energi foton juga dapat dinyatakan sebagai:

$$E = hc/\lambda$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa energi foton berbanding terbalik dengan panjang gelombang. Artinya, gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang pendek (frekuensi tinggi) seperti sinar ultraviolet atau sinar-X membawa energi per foton yang jauh lebih besar dibandingkan

dengan gelombang elektromagnetik berpanjang gelombang panjang (frekuensi rendah) seperti gelombang radio atau mikro. Pemahaman mengenai energi foton ini krusial untuk menjelaskan bagaimana gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan materi pada tingkat atom dan molekul. Energi yang lebih tinggi per foton berarti potensi interaksi yang lebih "kuat". Ini menjelaskan mengapa, misalnya, sinar UV memiliki energi yang cukup untuk menyebabkan reaksi kimia tertentu atau merusak jaringan biologis, sementara gelombang radio cenderung melewati banyak objek tanpa interaksi signifikan pada level atomik (Jensen 2016; T. M. Lillesand dkk. 2015).

Pemahaman terkait definisi dan sifat-sifat gelombang elektromagnetik ini menjadi fondasi penting dalam mempelajari penginderaan jauh. Interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan objek di permukaan Bumi, yang sangat dipengaruhi oleh parameter-parameter ini, memberikan informasi berharga yang dapat diinterpretasi untuk berbagai keperluan.

2.3. Spektrum Elektromagnetik dan Penginderaan Jauh

Gelombang elektromagnetik, meskipun memiliki sifat dasar yang sama seperti yang telah dijelaskan, ternyata memiliki rentang frekuensi dan panjang gelombang yang sangat luas. Rentang inilah yang kita kenal sebagai **spektrum elektromagnetik**. Spektrum elektromagnetik adalah susunan kontinu dari semua jenis gelombang elektromagnetik, diurutkan berdasarkan panjang gelombang atau frekuensinya. Seperti pelangi yang indah dengan gradasi warna, spektrum elektromagnetik tersusun dari berbagai jenis gelombang dengan karakteristik unik, mulai dari gelombang radio dengan panjang gelombang bisa mencapai kilometer hingga sinar gamma dengan panjang gelombang yang jauh lebih kecil dari inti atom.

Mari kita coba untuk memahami lebih lanjut tentang gelombang

elektromagnetik ini. Gelombang ini terbentuk dari medan listrik dan medan magnet yang berosilasi secara tegak lurus satu sama lain dan juga tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Keunikannya? Gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium untuk merambat, mereka dapat bergerak bebas bahkan dalam ruang hampa udara dengan kecepatan konstan, yang kita kenal sebagai kecepatan cahaya (sekitar 299.792.458 meter per detik).

Lalu, apa hubungannya dengan penginderaan jauh? Di sinilah letak keajaibannya. Setiap objek di permukaan Bumi, baik itu tanah, vegetasi, air, atau bahkan bangunan, memiliki interaksi yang khas dengan gelombang elektromagnetik pada rentang spektrum tertentu. Interaksi ini dapat berupa pemantulan, penyerapan, atau transmisi gelombang, yang dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia objek tersebut. Penginderaan jauh memanfaatkan fenomena interaksi unik ini. Dengan merekam dan menganalisis energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek di permukaan Bumi, kita dapat memperoleh informasi berharga tentang objek tersebut tanpa kontak langsung.

Untuk memahaminya lebih lanjut, mari kita lihat klasifikasi spektrum elektromagnetik berdasarkan panjang gelombang atau frekuensinya, beserta contoh aplikasinya dalam penginderaan jauh:

- a) Gelombang Radio ($\lambda > 30$ cm, $f < 1$ GHz): Memiliki frekuensi terendah dan panjang gelombang terpanjang. Digunakan dalam komunikasi radio, televisi, dan beberapa jenis Radar cuaca. Dalam penginderaan jauh, Radar yang menggunakan gelombang radio dengan panjang gelombang sangat panjang (misalnya, P-band, sekitar 30-100 cm) dapat memiliki kemampuan penetrasi terhadap kanopi vegetasi yang lebat dan bahkan beberapa sentimeter ke dalam lapisan tanah kering. Ini berguna untuk estimasi biomassa hutan dan pemantauan kelembaban tanah pada lapisan yang lebih dalam.

- b) Gelombang Mikro ($1 \text{ mm} < \lambda < 30 \text{ cm}$, $1 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$): Rentang ini sangat penting untuk sistem penginderaan jauh aktif seperti RADAR (Radio Detection and Ranging). Mampu menembus awan, kabut, asap, dan hujan ringan, sehingga dapat dioperasikan dalam berbagai kondisi cuaca, siang maupun malam. Dalam penginderaan jauh, gelombang mikro yang digunakan oleh sensor Synthetic Aperture Radar (SAR) seperti pada satelit Sentinel-1 atau TerraSAR-X dimanfaatkan untuk pemetaan topografi, pemantauan pergerakan permukaan tanah (menggunakan teknik InSAR), deteksi tumpahan minyak di laut, pemantauan banjir, pengukuran kelembaban tanah, dan pemantauan es laut.
- c) Inframerah ($700 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$, $300 \text{ GHz} < f < 430 \text{ THz}$): Wilayah spektrum inframerah sangat luas dan biasanya dibagi lagi menjadi beberapa sub-wilayah berdasarkan karakteristik dan aplikasinya:
- Inframerah Jauh (Far Infrared) / Termal (Thermal Infrared - TIR): Umumnya didefinisikan pada rentang panjang gelombang sekitar $8 \text{ }\mu\text{m}$ hingga $15 \text{ }\mu\text{m}$, meskipun sensor satelit sering beroperasi pada jendela atmosfer yang lebih sempit, misalnya $10.5 - 12.5 \text{ }\mu\text{m}$, untuk meminimalkan serapan oleh ozon di sekitar $9.6 \text{ }\mu\text{m}$. Energi dalam rentang ini dirasakan sebagai panas dan dipancarkan oleh semua objek dengan suhu di atas nol absolut. Dalam penginderaan jauh, inframerah termal digunakan untuk memantau suhu permukaan darat (LST) dan suhu permukaan laut (SST), mendeteksi titik api pada kebakaran hutan, memantau aktivitas vulkanik, memetakan pulau panas perkotaan (Urban Heat Island), dan mengidentifikasi perbedaan suhu pada berbagai material atau fenomena (misalnya, rembesan air tanah). Contoh sensor yang bekerja pada rentang ini adalah Thermal Infrared Sensor (TIRS) pada satelit Landsat.
 - Inframerah Tengah (Mid Infrared - MIR atau Shortwave Infrared -

SWIR bagian panjang): Rentang panjang gelombang umumnya antara 3 μm hingga 8 μm . Wilayah ini sensitif terhadap karakteristik geologi (jenis batuan dan mineral), kandungan air dalam vegetasi, dan juga berguna untuk deteksi kebakaran aktif karena energi panas yang dipancarkan.

- Inframerah Dekat (Near Infrared - NIR): Rentang panjang gelombang umumnya antara 700 nm (0,7 μm) hingga sekitar 3 μm . Dalam konteks penginderaan jauh vegetasi, rentang yang paling sering dirujuk adalah sekitar 0,7 μm hingga 1,3 μm . Energi pada rentang ini sangat kuat dipantulkan oleh vegetasi yang sehat karena struktur sel internal daun (sel mesofil) dan sangat kuat diserap oleh air. Karakteristik ini menjadikannya sangat berguna untuk pemantauan kesehatan dan vigor vegetasi (misalnya, melalui perhitungan Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), pemetaan biomassa, delineasi badan air (karena air tampak sangat gelap), dan pembedaan berbagai jenis tutupan lahan. Contoh sensor yang memiliki saluran pada rentang ini adalah Operational Land Imager (OLI) pada Landsat dan Multispectral Instrument (MSI) pada Sentinel-2.

d) Cahaya Tampak (Visible Light) (400 nm $<\lambda<$ 700 nm, 430 THz $<f<$ 750 THz): satu-satunya rentang spektrum elektromagnetik yang dapat dilihat secara langsung oleh mata manusia. Terdiri dari warna-warna pelangi yang berurutan dari panjang gelombang terpanjang ke terpendek: Merah, Jingga, Kuning, Hijau, Biru, Nila, dan Ungu (sering disingkat MEJIKUHIBINIU). Digunakan dalam fotografi, pencahayaan, dan berbagai instrumen optik. Dalam penginderaan jauh, cahaya tampak digunakan untuk pemetaan tutupan lahan secara visual, pemantauan perubahan lingkungan, batimetri (pengukuran kedalaman) perairan dangkal yang jernih, dan identifikasi konsentrasi sedimen

tersuspensi dalam air. Sensor seperti kamera udara dan saluran biru, hijau, merah pada satelit Landsat dan Sentinel-2 bekerja pada rentang ini.

- e) Ultraviolet (UV) ($10 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$, $750 \text{ THz} < f < 30 \text{ PHz}$): Memiliki energi yang cukup tinggi. Sebagian besar radiasi UV dari Matahari diserap oleh lapisan ozon (O_3) di atmosfer Bumi. Meskipun demikian, sebagian kecil yang mencapai permukaan dapat digunakan dalam aplikasi penginderaan jauh tertentu, seperti studi atmosfer (misalnya, pemantauan konsentrasi ozon), deteksi beberapa jenis polusi udara, dan pemetaan geologi tertentu yang melibatkan fenomena fluoresensi mineral. Penggunaannya untuk observasi permukaan Bumi dari satelit cukup terbatas karena kuatnya serapan atmosfer.
- f) Sinar-X ($0,01 \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ nm}$, $30 \text{ PHz} < f < 30 \text{ EHz}$): Memiliki energi yang sangat tinggi dan daya tembus yang besar terhadap jaringan lunak manusia dan material berdensitas rendah. Digunakan secara luas dalam pencitraan medis (Rontgen), pemeriksaan keamanan di bandara, dan studi struktur kristal dalam material. Sinar-X sepenuhnya diserap oleh atmosfer Bumi dan interaksinya dengan materi bisa bersifat destruktif, sehingga tidak umum digunakan dalam penginderaan jauh permukaan Bumi dari platform satelit.
- g) Sinar Gamma ($\lambda < 0,01 \text{ nm}$, $f > 30 \text{ EHz}$): Memiliki energi dan frekuensi tertinggi dalam spektrum elektromagnetik. Dipancarkan oleh inti atom radioaktif selama peluruhan radioaktif dan oleh beberapa proses astrofisika energi tinggi. Digunakan dalam pengobatan kanker (radioterapi), sterilisasi peralatan medis, dan studi proses nuklir serta fenomena alam semesta berenergi tinggi. Seperti Sinar-X, Sinar Gamma juga sepenuhnya diserap oleh atmosfer dan tidak digunakan untuk penginderaan jauh permukaan Bumi.

Pemilihan rentang spektrum yang tepat sangat penting dalam

penginderaan jauh. Setiap rentang spektrum memberikan informasi yang berbeda tentang objek yang diamati. Misalnya, untuk memetakan vegetasi, rentang spektrum inframerah dekat lebih efektif daripada cahaya tampak karena vegetasi memantulkan energi inframerah dekat dengan kuat. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada satu wilayah spektrum yang "terbaik" untuk semua aplikasi. Keputusan pemilihan wilayah spektrum, dan akibatnya sensor yang sesuai, sangat bergantung pada fenomena atau objek spesifik yang ingin dipelajari. Ini adalah konsep fundamental yang mendasari desain misi penginderaan jauh dan strategi pemilihan data oleh pengguna. Lebih lanjut, perlu diingat bahwa tidak semua gelombang elektromagnetik dapat dengan mudah mencapai permukaan Bumi dan kembali ke sensor di angkasa. Atmosfer Bumi bertindak sebagai filter selektif, yang mengarah pada konsep penting "jendela atmosfer", yang akan dibahas lebih detail pada bagian selanjutnya.

Berikut adalah tabel ringkasan spektrum elektromagnetik yang relevan untuk penginderaan jauh:

Tabel 2.1: Spektrum Elektromagnetik dan Aplikasinya dalam Penginderaan Jauh

Spektrum	λ	f	Karakteristik Utama	Aplikasi	Sensor/ Platform
Gelombang Radio	> 30 cm	< 1 GHz	Penetrasi tinggi, digunakan oleh Radar gelombang panjang.	Estimasi biomassa hutan (P-band), kelembaban tanah dalam.	Radar P-band (eksperimental/ udara)
Gelombang Mikro	1 mm – 30 cm	1 GHz – 300 GHz	Menembus awan, hujan ringan, asap; sensitif terhadap geometri dan kelembaban permukaan.	Pemetaan topografi (SAR), monitoring banjir, pergerakan tanah (InSAR), kelembaban	Sentinel-1 (C-band SAR), TerraSAR-X (X-band SAR), RADARSAT, SMAP (L-band Radar & Radiometer)

Spektrum	λ	f	Karakteristik Utama	Aplikasi	Sensor/ Platform
				tanah, es laut, tumpahan minyak, kecepatan angin laut (scatterometer).	
Inframerah Termal (TIR)	8 μm – 15 μm	20 TH z – 37.5 TH z	Dipancarkan sebagai energi panas oleh objek.	Suhu permukaan darat/laut (LST/SST), deteksi kebakaran hutan, aktivitas vulkanik, pulau panas perkotaan, identifikasi material berdasarkan emisivitas.	Landsat (TIRS), MODIS (Band 20-23, 29-36), ASTER (Band 10-14)
Inframerah Tengah (MIR/SWIR panjang)	3 μm – 8 μm	37.5 TH z – 100 TH z	Sensitif terhadap kandungan air, komposisi mineral, suhu tinggi.	Identifikasi mineral dan batuan, monitoring stres kekeringan vegetasi, deteksi kebakaran aktif, pemetaan kandungan air salju.	Landsat (SWIR bands), MODIS (Band 5-7, 20-26), ASTER (Band 4-9)
Inframerah Dekat (NIR)	0.7 μm – 3 μm	100 TH z – 430 TH z	Dipantulkan kuat oleh vegetasi sehat, diserap kuat oleh air.	Monitoring kesehatan vegetasi (NDVI), pemetaan biomassa, delineasi badan air,	Landsat (NIR, SWIR bands), Sentinel-2 (NIR, SWIR bands), MODIS (Band 1-2, 4-7), SPOT

Spektrum	λ	f	Karakteristik Utama	Aplikasi	Sensor/ Platform
				identifikasi jenis tutupan lahan, kandungan air daun.	
Cahaya Tampak (Visible)	400 nm – 700 nm	430 THz – 750 THz	Dapat dideteksi mata manusia; interaksi bervariasi (penyerapan pigmen, pantulan permukaan).	Pemetaan tutupan lahan, monitoring visual perubahan lingkungan, batimetri perairan dangkal, kualitas air (sedimen, klorofil-a), pemetaan warna sebenarnya.	Landsat (Blue, Green, Red bands), Sentinel-2 (Blue, Green, Red bands), kamera fotografi udara, sensor pankromatik
Ultraviolet (UV)	10 nm – 400 nm	750 THz – 30 PHz	Sebagian besar diserap ozon; energi tinggi.	Studi atmosfer (ozon, SO ₂), deteksi polusi tertentu, fluoresensi mineral (terbatas untuk permukaan dari satelit).	OMI (Aura), TOMS (historis)
<i>Sinar-X</i>	<i>0.01 nm – 10 nm</i>	<i>30 PHz – 30 EHz</i>	<i>Energi sangat tinggi, diserap total oleh atmosfer.</i>	<i>(Tidak digunakan untuk penginderaan jauh permukaan Bumi dari satelit).</i>	
<i>Sinar Gamma</i>	<i>< 0.01 nm</i>	<i>> 30 EHz</i>	<i>Energi tertinggi, diserap total oleh atmosfer.</i>		

2.4. Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Atmosfer

Interaksi gelombang elektromagnetik dengan atmosfer Bumi merupakan proses yang kompleks dan dinamis. Atmosfer bukanlah sekadar medium yang pasif dilewati oleh GEM, melainkan secara aktif memodifikasi energi tersebut sebelum mencapai permukaan Bumi dan sebelum kembali ke sensor di wahana (misalnya satelit atau pesawat terbang). Pemahaman mengenai interaksi ini sangat krusial karena dua alasan utama: pertama, untuk mengoreksi efek atmosfer pada data penginderaan jauh sehingga informasi yang diekstrak benar-benar merepresentasikan karakteristik objek di permukaan; dan kedua, karena interaksi itu sendiri dapat dimanfaatkan untuk mempelajari sifat-sifat atmosfer (Kaufman 1989).

Dua mekanisme interaksi utama antara GEM dan atmosfer adalah hamburan (*scattering*) dan serapan (*absorption*). Hamburan (Scattering) terjadi ketika partikel atau molekul gas besar yang terdapat di atmosfer menyebabkan perubahan arah rambat gelombang elektromagnetik. Tingkat dan jenis hamburan sangat bergantung pada ukuran partikel atmosfer relatif terhadap panjang gelombang GEM yang datang, serta konsentrasi partikel tersebut. Terdapat tiga jenis hamburan utama:

1. Hamburan Rayleigh (*Rayleigh Scattering*). Terjadi ketika diameter partikel atmosfer (misalnya, molekul-molekul gas seperti nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2)) jauh lebih kecil (setidaknya sepersepuluh) dibandingkan dengan panjang gelombang GEM yang mengenyainya. Hamburan Rayleigh berbanding terbalik dengan pangkat empat dari panjang gelombang (λ^{-4}). Ini berarti efek hamburan Rayleigh jauh lebih kuat pada panjang gelombang pendek (seperti biru dan ungu dalam spektrum cahaya tampak) dibandingkan pada panjang gelombang

panjang (seperti merah). Fenomena ini adalah penyebab utama mengapa langit pada siang hari tampak berwarna biru. Cahaya biru dari Matahari dihamburkan secara lebih efektif ke segala arah oleh molekul-molekul udara dibandingkan warna lain, sehingga dari berbagai arah kita melihat cahaya biru yang terhambur tersebut. Sebaliknya, pada saat Matahari terbit atau terbenam, cahaya Matahari harus menempuh jarak yang lebih jauh melalui atmosfer untuk mencapai pengamat. Selama perjalanan panjang ini, sebagian besar cahaya biru dan ungu telah terhambur keluar dari jalur langsung, sehingga cahaya yang dominan mencapai mata kita adalah cahaya dengan panjang gelombang lebih panjang, yaitu merah dan jingga. Dampak pada citra penginderaan jauh: Hamburan Rayleigh menyebabkan munculnya efek kabut (*haze*) yang berwarna kebiruan pada citra, terutama pada saluran biru. Efek ini mengurangi kontras, ketajaman, dan kejernihan objek, serta dapat mengganggu analisis spektral yang akurat. Oleh karena itu, Koreksi Atmosfer seringkali diperlukan untuk meminimalkan atau menghilangkan kontribusi hamburan Rayleigh dari data citra.

2. Hamburan Mie (*Mie Scattering*). Terjadi ketika diameter partikel atmosfer (misalnya, debu, serbuk sari, spora jamur, asap, uap air, atau partikel polutan industri) sebanding atau sedikit lebih besar dari panjang gelombang GEM yang mengenainya. Partikel-partikel ini umumnya ditemukan di bagian bawah atmosfer, terutama hingga ketinggian sekitar 5 km. Hamburan Mie cenderung lebih signifikan pada kondisi atmosfer yang berkabut, berdebu, atau berasap. Berbeda dengan hamburan Rayleigh yang sangat selektif terhadap panjang gelombang pendek, hamburan Mie mempengaruhi rentang panjang gelombang yang lebih luas, termasuk cahaya tampak dan inframerah. Arah hamburan Mie cenderung lebih dominan ke arah depan (*forward scattering*) dibandingkan hamburan Rayleigh yang lebih seragam ke

segala arah. Dampak pada citra penginderaan jauh: Hamburan Mie menyebabkan kabut yang tampak lebih putih atau abu-abu pada citra, mengurangi visibilitas dan kontras secara signifikan. Pada kondisi polusi asap tebal atau kabut, hamburan Mie dapat membuat permukaan Bumi hampir tidak terlihat oleh sensor optik.

3. Hamburan Non-selektif (*Non-selective Scattering*). Terjadi ketika diameter partikel atmosfer jauh lebih besar (misalnya, 5 hingga 100 kali) dibandingkan dengan panjang gelombang GEM yang mengenainya. Contoh partikel ini adalah butiran air besar pada awan, tetesan hujan, atau kristal es besar. Disebut non-selektif karena semua panjang gelombang cahaya tampak (biru, hijau, merah) dihamburkan secara merata. Fenomena ini menjelaskan mengapa awan umumnya tampak berwarna putih atau abu-abu terang. Karena semua panjang gelombang cahaya tampak dihamburkan dengan proporsi yang hampir sama, kombinasi warna yang kembali ke mata kita atau sensor adalah putih. Ini juga alasan mengapa sensor penginderaan jauh yang bekerja pada spektrum optik (cahaya tampak dan inframerah dekat/tengah) tidak dapat "melihat" atau menembus awan tebal. Dampak pada citra penginderaan jauh: Awan akan tampak sebagai area terang yang menutupi objek di permukaan Bumi di bawahnya pada citra optik. Bayangan awan juga seringkali terlihat, yang dapat mempersulit interpretasi.
4. Serapan (*Absorption*). Serapan adalah proses di mana energi gelombang elektromagnetik diserap oleh molekul-molekul gas tertentu di atmosfer dan diubah menjadi bentuk energi lain, biasanya energi kinetik atau panas, yang meningkatkan suhu atmosfer. Berbeda dengan hamburan yang hanya mengubah arah rambat energi, serapan secara efektif menghilangkan energi dari berkas GEM pada panjang gelombang tertentu. Gas-gas atmosfer utama yang berperan dalam serapan GEM

adalah Ozon (O_3), Karbon Dioksida (CO_2), dan Uap Air (H_2O). Masing-masing gas ini memiliki karakteristik serapan yang unik, artinya mereka menyerap energi GEM secara kuat hanya pada panjang gelombang tertentu. Rentang panjang gelombang di mana serapan kuat terjadi disebut pita serapan (absorption bands).

- **Ozon (O_3):** Sangat efektif menyerap radiasi ultraviolet (UV) berenergi tinggi, terutama pada panjang gelombang di bawah $0.3 \mu m$. Lapisan ozon di stratosfer berperan penting melindungi kehidupan di Bumi dari paparan radiasi UV yang berbahaya. Ozon juga memiliki pita serapan yang lebih lemah di wilayah inframerah termal sekitar $9.6 \mu m$.
- **Karbon Dioksida (CO_2):** Memiliki beberapa pita serapan kuat di wilayah inframerah, terutama di sekitar $2.7 \mu m$, $4.3 \mu m$, dan pita lebar di atas $13 \mu m$. CO_2 berperan penting dalam efek rumah kaca.
- **Uap Air (H_2O):** Merupakan penyerap GEM yang paling signifikan di atmosfer karena konsentrasinya yang bervariasi dan pita serapannya yang luas di berbagai bagian spektrum inframerah, terutama di sekitar $1,4 \mu m$, $1,9 \mu m$, $2,7 \mu m$, dan pita yang sangat kuat di atas $5 \mu m$ hingga $7 \mu m$, serta di atas $20 \mu m$. Uap air juga menyerap sebagian energi gelombang mikro.

Konsekuensi dari adanya pita-pita serapan oleh gas-gas atmosfer adalah tidak semua spektrum GEM dapat digunakan secara efektif untuk penginderaan jauh permukaan Bumi dari luar angkasa. Hanya rentang panjang gelombang tertentu, di mana serapan dan hamburan oleh atmosfer minimal, yang dapat dimanfaatkan. Rentang-rentang panjang gelombang ini disebut jendela atmosfer (atmospheric windows). Pada jendela atmosfer ini, transmisi GEM relatif tinggi, memungkinkan energi dari Matahari mencapai permukaan Bumi, berinteraksi dengan objek, dan energi yang

dipantulkan atau dipancarkan oleh objek tersebut dapat kembali melewati atmosfer menuju sensor.

Sensor-sensor penginderaan jauh dirancang untuk beroperasi pada panjang gelombang yang berada dalam jendela atmosfer ini. Jendela atmosfer utama yang penting untuk penginderaan jauh meliputi:

- Sebagian besar wilayah cahaya tampak (sekitar $0,4 \mu\text{m} - 0,7 \mu\text{m}$).
- Beberapa jendela di inframerah dekat (NIR) dan inframerah tengah (MIR/SWIR), misalnya sekitar $0,7 \mu\text{m} - 1,3 \mu\text{m}$, $1,5 \mu\text{m} - 1,8 \mu\text{m}$, $2,0 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$, dan $3,5 \mu\text{m} - 4,1 \mu\text{m}$.
- Jendela inframerah termal utama antara $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ (dengan sub-jendela yang sering digunakan sekitar $10,5 \mu\text{m} - 12,5 \mu\text{m}$).
- Sebagian besar wilayah gelombang mikro (di atas 1 mm), yang memungkinkan operasional Radar menembus awan.

Pemahaman akan interaksi atmosfer ini sangat fundamental. Di satu sisi, efek atmosfer seringkali dianggap sebagai "gangguan" atau "noise" yang perlu dikoreksi untuk mendapatkan informasi yang akurat tentang permukaan Bumi. Jika efek atmosfer tidak dihilangkan atau diminimalkan, perbandingan citra dari waktu akuisisi yang berbeda atau lokasi geografis yang berbeda menjadi tidak valid, karena variasi kondisi atmosfer akan ikut terhitung sebagai variasi karakteristik permukaan. Oleh karena itu, berbagai teknik Koreksi Atmosfer telah dikembangkan dan menjadi langkah penting dalam pra-pemrosesan data penginderaan jauh, terutama untuk analisis kuantitatif seperti perhitungan indeks vegetasi atau estimasi suhu permukaan. Di sisi lain, besarnya perubahan sinyal GEM akibat interaksi dengan atmosfer justru dapat memberikan informasi berharga tentang konstituen dan kondisi atmosfer itu sendiri, yang dimanfaatkan dalam aplikasi meteorologi, klimatologi, dan pemantauan kualitas udara. Jadi, apakah interaksi atmosfer dianggap sebagai gangguan atau sumber informasi sangat bergantung pada tujuan spesifik dari aplikasi

penginderaan jauh tersebut. Lebih jauh lagi, keberadaan jendela atmosfer merupakan batasan fisika fundamental yang sangat menentukan dalam perancangan dan pengembangan teknologi sensor penginderaan jauh. Tidak ada gunanya merancang sensor yang beroperasi pada panjang gelombang yang sepenuhnya diserap oleh atmosfer jika tujuannya adalah untuk mengamati permukaan Bumi.

Untuk visualisasi, dapat dibayangkan sebuah grafik yang menunjukkan persentase transmisi energi elektromagnetik melalui atmosfer (sumbu Y) terhadap panjang gelombang (sumbu X). Grafik tersebut akan menunjukkan nilai transmisi yang rendah pada pita-pita serapan gas (misalnya, UV oleh O₃, beberapa bagian IR oleh H₂O dan CO₂) dan nilai transmisi yang tinggi pada wilayah jendela atmosfer. Selain itu, diagram sederhana dapat mengilustrasikan perbedaan mekanisme hamburan Rayleigh (partikel kecil, dominan menghamburkan biru), Mie (partikel seukuran panjang gelombang, menghamburkan lebih merata ke depan), dan Non-selektif (partikel besar seperti tetesan awan, menghamburkan semua warna tampak secara merata).

2.5. Interaksi Gelombang Elektromagnetik dengan Objek di Permukaan Bumi

Setelah melewati atmosfer, gelombang elektromagnetik (GEM) akhirnya mencapai dan berinteraksi dengan berbagai objek di permukaan Bumi. Setiap objek di permukaan Bumi, baik itu tanah, vegetasi, air, bangunan, atau objek lainnya, memiliki interaksi yang khas dengan gelombang elektromagnetik. Interaksi ini menjadi dasar bagaimana penginderaan jauh bekerja untuk mengidentifikasi dan membedakan berbagai fitur permukaan. Ketika gelombang elektromagnetik mengenai suatu objek, energinya akan mengalami tiga perlakuan utama secara simultan, dengan proporsi yang bervariasi tergantung pada karakteristik

objek dan panjang gelombang GEM yang mengenainya (Swain dan Davis 1978):

1. Dipantulkan (*Reflected*): Sebagian energi gelombang elektromagnetik akan dipantulkan kembali oleh permukaan objek. Arah dan intensitas pantulan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kekasaran permukaan objek relatif terhadap panjang gelombang GEM, sudut datang gelombang, dan sifat material objek (misalnya, konduktivitas listrik, permitivitas dielektrik).
 - Pantulan Specular (*Specular Reflection*): Terjadi ketika permukaan objek sangat halus relatif terhadap panjang gelombang GEM (misalnya, permukaan air yang tenang, cermin). Pada pantulan specular, energi dipantulkan secara dominan dalam satu arah, di mana sudut pantul sama dengan sudut datang ($\theta_i = \theta_r$). Objek yang bersifat pemantul specular akan tampak sangat terang jika sensor berada pada posisi geometris yang tepat untuk menangkap pantulan langsung, dan tampak sangat gelap jika tidak.
 - Pantulan Difus (*Diffuse Reflection*) atau *Lambertian*: Terjadi ketika permukaan objek kasar relatif terhadap panjang gelombang GEM (misalnya, tanah, vegetasi, beton kasar). Pada pantulan difus, energi dihamburkan atau dipantulkan secara merata ke berbagai arah. Kebanyakan objek alami di permukaan Bumi bersifat sebagai pemantul difus atau kombinasi antara difus dan specular. Sensor penginderaan jauh pasif umumnya dirancang untuk merekam energi yang dipantulkan secara difus ini.
2. Diserap (*Absorbed*): Sebagian energi gelombang elektromagnetik akan diserap oleh objek dan diubah menjadi bentuk energi lain, paling umum adalah energi panas, yang kemudian dapat dipancarkan kembali sebagai radiasi termal. Kemampuan objek dalam menyerap energi

elektromagnetik bergantung pada komposisi kimia dan struktur fisik material objek tersebut, serta panjang gelombang GEM yang datang. Misalnya, vegetasi menyerap kuat energi pada saluran merah dan biru dari cahaya tampak untuk proses fotosintesis, sementara memantulkan sebagian besar energi inframerah dekat. Objek yang tampak gelap pada citra cahaya tampak adalah objek yang menyerap sebagian besar energi cahaya tampak yang mengenainya.

3. Diteruskan (*Transmitted*): Sebagian energi gelombang elektromagnetik dapat juga diteruskan atau menembus objek. Proses transmisi ini sangat dipengaruhi oleh sifat optik material objek (misalnya, transparansi, ketebalan) dan panjang gelombang GEM. Misalnya, air jernih relatif transparan terhadap cahaya tampak (memungkinkan transmisi cahaya hingga kedalaman tertentu), tetapi sangat kuat menyerap sebagian besar radiasi inframerah. Untuk sebagian besar objek padat dan buram (*opaque*) di permukaan Bumi yang diamati dalam penginderaan jauh, energi yang diteruskan (E_T) seringkali dianggap mendekati nol, terutama untuk panjang gelombang optik.

Ketiga proses interaksi ini (pemantulan, penyerapan, dan transmisi) terjadi secara simultan. Menurut hukum kekekalan energi, total energi datang ($E_I(\lambda)$) pada panjang gelombang tertentu harus sama dengan jumlah energi yang dipantulkan ($E_R(\lambda)$), diserap ($E_A(\lambda)$), dan diteruskan ($E_T(\lambda)$):

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda)$$

Dalam penginderaan jauh, sensor pada umumnya merekam energi elektromagnetik yang dipantulkan (*reflected*) atau dipancarkan (*emitted*) oleh objek. Untuk objek yang buram (tidak tembus pandang), energi yang diteruskan dapat diabaikan ($E_T(\lambda) \approx 0$), sehingga $E_I(\lambda) \approx E_R(\lambda) + E_A(\lambda)$.

Interaksi yang khas antara GEM dan berbagai jenis material di permukaan Bumi menghasilkan apa yang disebut kurva respons spektral

atau tanda spektral (spectral signature). Tanda spektral adalah pola unik dari pantulan (atau emisi) energi GEM oleh suatu objek sebagai fungsi dari panjang gelombang. Ini sering digambarkan sebagai grafik yang menunjukkan persentase pantulan (reflectance) pada sumbu Y terhadap panjang gelombang pada sumbu X. Tanda spektral ini dapat dianggap sebagai "sidik jari" spektral suatu material, yang memungkinkan kita untuk mengidentifikasi dan membedakan berbagai jenis objek dan kondisi permukaan dari data penginderaan jauh.

Berikut adalah contoh kurva respons spektral tipikal untuk beberapa objek umum di permukaan Bumi:

- **Vegetasi Sehat:**

Cahaya Tampak ($0,4 - 0,7 \mu\text{m}$): Menunjukkan penyerapan yang tinggi pada saluran biru (sekitar $0,45 \mu\text{m}$) dan merah (sekitar $0,67 \mu\text{m}$) akibat adanya pigmen klorofil (a dan b) yang digunakan dalam proses fotosintesis. Terdapat puncak pantulan relatif yang lebih kecil pada saluran hijau (sekitar $0,55 \mu\text{m}$), yang menyebabkan daun tampak berwarna hijau bagi mata manusia.

Inframerah Dekat (NIR) ($0,7 - 1,3 \mu\text{m}$): Menunjukkan pantulan yang sangat tinggi. Hal ini bukan disebabkan oleh pigmen, melainkan oleh struktur internal sel mesofil pada daun (terutama *spongy mesophyll*). Hamburan ganda GEM pada batas antara dinding sel dan ruang udara di dalam daun menyebabkan sebagian besar energi NIR dipantulkan. Tingginya pantulan NIR adalah salah satu karakteristik paling diagnostik untuk vegetasi sehat.

"Red Edge" (Tepi Merah): Merupakan wilayah transisi yang tajam antara penyerapan kuat di saluran merah dan pantulan tinggi di NIR, biasanya terletak antara $0,68 \mu\text{m}$ hingga $0,75 \mu\text{m}$. Posisi dan kemiringan *red edge* sangat sensitif terhadap kandungan klorofil, stres air, dan kondisi kesehatan vegetasi secara umum. Pergeseran *red edge* ke arah

panjang gelombang yang lebih pendek seringkali mengindikasikan vegetasi yang mengalami stres.

Inframerah Tengah (MIR) atau Shortwave Infrared (SWIR) (1,3 – 2,5 μm): Pantulan pada wilayah ini terutama dipengaruhi oleh kandungan air dalam jaringan daun. Terdapat beberapa lembah serapan air yang signifikan, terutama di sekitar 1,4 μm , 1,9 μm , dan 2,5 μm . Semakin tinggi kandungan air dalam daun, semakin rendah pantulannya pada panjang gelombang ini.

- **Tanah:**

Kurva respons spektral tanah umumnya menunjukkan peningkatan pantulan secara bertahap dari panjang gelombang pendek (biru) ke panjang gelombang yang lebih panjang (NIR dan SWIR), tanpa adanya fitur penyerapan atau pantulan tajam seperti pada vegetasi. Beberapa faktor utama yang memengaruhi tanda spektral tanah antara lain:

Kandungan Air (Kelembaban): Tanah yang basah akan tampak lebih gelap (pantulan lebih rendah) dibandingkan tanah kering di seluruh spektrum optik, karena air mengisi pori-pori tanah dan meningkatkan penyerapan.

Tekstur Tanah: Tanah dengan tekstur kasar (misalnya, pasir) cenderung memiliki pantulan lebih tinggi dibandingkan tanah dengan tekstur halus (misalnya, lempung), terutama jika kering.

Kandungan Bahan Organik: Peningkatan kandungan bahan organik cenderung menurunkan pantulan tanah (membuatnya tampak lebih gelap).

Komposisi Mineral: Keberadaan mineral tertentu seperti oksida besi (misalnya, hematit, goetit) dapat menyebabkan peningkatan pantulan pada saluran merah dan NIR, memberikan warna kemerahan atau kecoklatan pada tanah. Mineral lempung sering menunjukkan fitur serapan di wilayah SWIR.

Kekasaran Permukaan: Permukaan tanah yang kasar dapat menyebabkan lebih banyak bayangan dan variasi pantulan.

- **Air Jernih:**

Cahaya Tampak: Air jernih memiliki pantulan tertinggi pada saluran biru dan menurun secara signifikan ke arah saluran merah. Penyerapan energi oleh air meningkat seiring dengan meningkatnya panjang gelombang di spektrum tampak.

Inframerah Dekat (NIR) dan seterusnya: Air menyerap energi NIR dan panjang gelombang yang lebih panjang dengan sangat kuat. Akibatnya, air jernih akan tampak sangat gelap (pantulan mendekati nol) pada citra NIR dan SWIR. Karakteristik ini sangat berguna untuk membedakan badan air dari daratan.

- **Air Keruh (mengandung sedimen tersuspensi):** Berbeda dengan air jernih, air keruh akan menunjukkan pantulan yang lebih tinggi di seluruh spektrum cahaya tampak, terutama pada saluran merah dan bahkan NIR bagian pendek. Hal ini disebabkan oleh hamburan cahaya oleh partikel-partikel sedimen yang tersuspensi dalam air. Semakin tinggi konsentrasi sedimen, semakin tinggi pantulannya.

- **Air dengan Kandungan Fitoplankton (Alga):** Kehadiran fitoplankton (yang mengandung klorofil) akan menyebabkan pola serapan yang mirip dengan vegetasi di cahaya tampak, yaitu serapan di saluran biru dan merah, serta puncak pantulan di hijau. Ini dapat digunakan untuk memetakan sebaran dan konsentrasi alga.

- **Salju dan Es:** Salju segar memiliki pantulan yang sangat tinggi di seluruh spektrum cahaya tampak dan sebagian NIR. Namun, pantulannya menurun drastis di wilayah inframerah tengah (SWIR), terutama di atas 1,5 μm . Perbedaan pantulan antara NIR dan SWIR ini dapat digunakan untuk membedakan salju dari awan, karena awan umumnya memiliki pantulan tinggi di kedua wilayah tersebut.

- **Area Terbangun (misalnya, aspal, beton, atap bangunan):** Respons spektral area terbangun sangat bervariasi tergantung pada material penyusunnya. Aspal cenderung memiliki pantulan rendah dan relatif datar di seluruh spektrum optik. Beton mungkin menunjukkan pantulan yang lebih tinggi dan meningkat secara bertahap dengan panjang gelombang. Atap bangunan memiliki variasi yang sangat besar tergantung warna dan materialnya. Secara umum, material buatan manusia seringkali tidak memiliki fitur serapan atau pantulan tajam seperti yang ditemukan pada vegetasi.

Data satelit penginderaan jauh pasif, seperti yang dihasilkan oleh sebagian besar satelit penginderaan jauh, merekam energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek di permukaan Bumi. Perbedaan karakteristik pantulan dan serapan energi pada setiap objek menghasilkan kenampakan yang unik pada citra. Air, misalnya, umumnya tampak gelap pada citra Penginderaan Jauh pasif, terutama pada panjang gelombang tampak dan inframerah dekat. Fenomena ini disebabkan oleh tingginya tingkat absorpsi energi oleh air pada panjang gelombang tersebut. Interaksi gelombang elektromagnetik dengan objek air sangat dipengaruhi oleh kejernihan dan kandungan material di dalamnya. Pada air jernih, tingkat penyerapan energi sangat tinggi, terutama pada spektrum inframerah dekat (*Near Infrared*), sehingga air akan tampak sangat gelap atau hitam pada citra. Namun, karakteristik ini berubah jika air mengandung material tersuspensi. Semakin keruh air akibat tingginya kadar sedimen, pantulan gelombang pada spektrum cahaya tampak akan meningkat, yang menyebabkan air terlihat lebih cerah atau berwarna kecokelatan dibandingkan air jernih. Sebaliknya, jika kekeruhan disebabkan oleh polutan organik tertentu yang menyerap cahaya, maka air dapat menunjukkan rona yang berbeda atau lebih gelap.

Berbeda dengan air, awan tampak cerah atau putih pada citra

Penginderaan Jauh pasif. Hal ini disebabkan oleh tingginya kemampuan awan dalam memantulkan energi Matahari, terutama pada panjang gelombang tampak. Semakin tebal awan, semakin banyak energi yang dipantulkan, sehingga awan akan tampak semakin cerah. Sementara itu, kenampakan polutan pada citra Penginderaan Jauh pasif lebih bervariasi. Penampakannya bergantung pada jenis dan konsentrasi polutan, serta karakteristik perairan. Umumnya, polutan menyebabkan kenampakan kabur atau berwarna pada permukaan air. Sebagai contoh, pencemaran minyak dapat menyebabkan permukaan air tampak lebih gelap atau memiliki tekstur yang berbeda dari air di sekitarnya. Pencemaran sedimen dapat menyebabkan air tampak lebih cerah atau keruh. Penting untuk diingat bahwa interpretasi citra Penginderaan Jauh harus dilakukan dengan hati-hati dan mempertimbangkan berbagai faktor, seperti jenis sensor, waktu perekaman, dan kondisi atmosfer. Dengan menganalisis pola dan intensitas energi yang terekam, kita dapat mengidentifikasi objek, memetakan karakteristiknya, dan memantau perubahannya seiring waktu. Misalnya, vegetasi yang sehat akan memantulkan lebih banyak energi inframerah dekat dibandingkan dengan vegetasi yang stres, sehingga memungkinkan kita untuk memantau kesehatan tanaman dari jarak jauh.

Perbedaan tanda spektral inilah yang menjadi dasar utama bagi sebagian besar teknik klasifikasi citra dalam penginderaan jauh, baik itu klasifikasi tutupan lahan maupun identifikasi objek spesifik. Dengan mengukur respons spektral dari setiap piksel dalam citra multispektral atau hiperspektral, algoritma klasifikasi dapat membandingkannya dengan tanda spektral referensi yang telah diketahui (misalnya, dari pengukuran lapangan atau pustaka spektral) untuk menetapkan piksel tersebut ke dalam kelas objek tertentu. Namun, perlu dipahami bahwa tanda spektral untuk satu jenis objek (misalnya, jenis vegetasi tertentu) tidak selalu identik dan konstan. Terdapat variabilitas intra-kelas yang dapat disebabkan oleh

berbagai faktor seperti kondisi kesehatan objek (misalnya, vegetasi sehat vs. stres akibat kekeringan atau penyakit), umur atau tahap pertumbuhan, perbedaan spesies dalam satu kategori umum (misalnya, berbagai jenis pohon dalam kelas "hutan"), kondisi pencahayaan, dan kondisi atmosfer saat akuisisi data. Variabilitas ini menambah kompleksitas dalam proses interpretasi dan klasifikasi, dan memerlukan pendekatan analisis yang lebih canggih. Kemampuan sebuah sensor untuk membedakan antara tanda spektral yang mirip atau menangkap nuansa halus dalam tanda spektral sangat bergantung pada resolusi spektralnya, yaitu jumlah dan lebar pita (band) spektral yang dimilikinya. Sensor hiperspektral, yang memiliki ratusan pita spektral yang sempit dan bersebelahan, mampu menangkap detail tanda spektral yang mungkin tidak terlihat oleh sensor multispektral yang hanya memiliki beberapa pita spektral yang lebih lebar.

Untuk visualisasi, dapat dibayangkan sebuah grafik dengan sumbu X adalah panjang gelombang (misalnya, dari 0,4 μm hingga 2,5 μm) dan sumbu Y adalah persentase reflektansi (0-100%). Kemudian, beberapa kurva digambarkan pada grafik ini, masing-masing mewakili tanda spektral tipikal untuk vegetasi sehat (rendah di biru dan merah, puncak di hijau, sangat tinggi di NIR, turun di SWIR dengan lembah serapan air), tanah kering (meningkat landai dari visible ke SWIR), tanah basah (mirip tanah kering tapi reflektansi lebih rendah), dan air jernih (tinggi di biru, turun cepat ke merah, dan hampir nol di NIR dan SWIR). Selain itu, ilustrasi sederhana dapat menunjukkan perbedaan antara pantulan specular (sinar datang pada permukaan halus dipantulkan ke satu arah) dan pantulan difus (sinar datang pada permukaan kasar dipantulkan ke berbagai arah) (Jensen 2016; T. M. Lillesand dkk. 2015).

2.6. Rangkuman Bab

Bab ini telah membahas secara mendalam mengenai spektrum gelombang elektromagnetik (GEM) dan peran fundamentalnya dalam penginderaan jauh. Poin-poin kunci yang telah diuraikan meliputi:

- **Definisi dan Sifat Dasar GEM:** Gelombang elektromagnetik didefinisikan sebagai energi yang merambat sebagai medan listrik dan magnet yang berosilasi, tidak memerlukan medium, dan bergerak dengan kecepatan cahaya dalam vakum. Sifat-sifat utamanya adalah panjang gelombang (λ), frekuensi (f), amplitudo (A), dan energi foton (E), yang saling terkait melalui rumus $c=\lambda f$ dan $E=hf$.
- **Spektrum Elektromagnetik:** Merupakan rentang kontinu semua jenis GEM, dari gelombang radio berpanjang gelombang panjang hingga sinar gamma berenergi sangat tinggi. Setiap wilayah spektrum (Radio, Mikro, Inframerah Termal, Inframerah Tengah, Inframerah Dekat, Cahaya Tampak, Ultraviolet, Sinar-X, Sinar Gamma) memiliki karakteristik interaksi yang unik dan aplikasi spesifik dalam penginderaan jauh.
- **Interaksi GEM dengan Atmosfer:** Atmosfer secara signifikan memodifikasi GEM melalui proses hamburan (Rayleigh, Mie, Non-selektif) dan serapan oleh gas-gas atmosfer (O_3 , CO_2 , H_2O). Konsep "jendela atmosfer" menjelaskan rentang panjang gelombang di mana transmisi GEM relatif tinggi, yang dimanfaatkan oleh sensor penginderaan jauh.
- **Interaksi GEM dengan Objek di Permukaan:** Ketika GEM mencapai permukaan, terjadi proses pemantulan (specular dan difus), penyerapan, dan penerusan. Pola interaksi ini, yang bergantung pada sifat fisik-kimia objek dan panjang gelombang, menghasilkan "tanda spektral" (spectral signature) yang khas untuk setiap jenis objek (misalnya, vegetasi, tanah,

air), yang menjadi dasar identifikasi dan klasifikasi dalam penginderaan jauh.

Pemahaman terhadap konsep-konsep yang disajikan dalam bab ini dapat menjadi landasan yang kokoh untuk memahami bab-bab selanjutnya dalam buku ini, yang akan membahas lebih detail mengenai akuisisi data, pra-pemrosesan, analisis, interpretasi, dan aplikasi data penginderaan jauh dalam berbagai bidang.

BAB III SENSOR DAN PLATFORM PENGINDERAAN JAUH

3.1. Sensor Penginderaan Jauh

3.1.1. Pengantar Sensor Penginderaan Jauh

Dalam dunia penginderaan jauh, sensor berperan sebagai “kamera atau mata” yang bertugas merekam energi elektromagnetik yang dipancarkan atau dipantulkan oleh objek di permukaan Bumi. Seperti halnya mata manusia yang beragam, sensor penginderaan jauh juga hadir dalam berbagai jenis dengan karakteristik dan kemampuan yang berbeda-beda. Pemilihan jenis sensor yang tepat sangat krusial untuk memperoleh data yang optimal sesuai dengan tujuan dan aplikasi yang diinginkan. Keberhasilan suatu aplikasi penginderaan jauh sangat ditentukan oleh kesesuaian antara karakteristik sensor dengan sifat objek atau fenomena yang diamati serta informasi yang ingin diekstrak. Sensor merekam energi elektromagnetik yang berinteraksi dengan objek, dan karakteristik sensor inilah yang menentukan jenis dan kualitas informasi yang dapat diperoleh dari data yang direkam.

3.1.2. Klasifikasi Sensor Penginderaan Jauh

Secara umum, sensor penginderaan jauh dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria, yaitu berdasarkan 1). sumber energi, 2) mekanisme perekaman, 3) rentang spektrum elektromagnetik, dan 4) platform. Jika tidak disebutkan dasar kriterianya, maka klasifikasi sensor penginderaan jauh biasanya merujuk pada jenis sumber energi yang digunakan (Campbell dan Wynne 2011; T. Lillesand dkk. 2015).

A. Berdasarkan Sumber Energi

Berdasarkan sumber energi yang digunakan, sensor penginderaan jauh dapat dibedakan menjadi dua jenis utama: sensor pasif dan sensor aktif.

- Sensor Pasif. Sensor pasif mengandalkan sumber energi alami yang berasal dari luar sensor itu sendiri. Terdapat dua jenis sumber energi alami yang umum digunakan:
 1. Matahari: Sebagian besar sensor pasif memanfaatkan energi Matahari. Sensor ini merekam energi Matahari yang dipantulkan (reflektansi) oleh objek di permukaan Bumi, atau energi yang diserap kemudian dipancarkan kembali (emisivitas termal) oleh objek. Contoh sensor pasif yang memanfaatkan energi Matahari adalah kamera fotografi, sensor multispektral (seperti yang terdapat pada satelit Landsat atau Sentinel-2), sensor pankromatik, dan sebagian operasional sensor inframerah termal yang mendeteksi emisi termal akibat pemanasan oleh Matahari. Kualitas data dari sensor pasif yang mengandalkan energi Matahari sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti waktu akuisisi data (yang menentukan sudut datang penyinaran Matahari), kondisi atmosfer (keberadaan awan, kabut, atau aerosol yang dapat menghalangi atau menghamburkan energi Matahari), dan musim yang mempengaruhi intensitas penyinaran Matahari.
 2. Radiasi Objek (Emisi Termal): Beberapa sensor pasif dirancang khusus untuk merekam energi yang dipancarkan langsung oleh objek di permukaan Bumi. Energi ini, yang dikenal sebagai radiasi termal, dipancarkan oleh semua objek yang memiliki suhu di atas nol mutlak ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Sensor inframerah termal (TIR) merupakan contoh sensor pasif yang memanfaatkan radiasi objek sebagai sumber energi. Kemampuan ini memungkinkan aplikasi seperti pemantauan titik panas (misalnya, kebakaran hutan atau aktivitas vulkanik), pemetaan suhu permukaan laut, atau identifikasi kehilangan energi pada bangunan.

Kelebihan sensor pasif umumnya terletak pada desainnya yang lebih sederhana, bobot yang lebih ringan, dan kebutuhan daya yang lebih rendah dibandingkan sensor aktif. Hal ini dapat berimplikasi pada biaya pengembangan dan operasional yang relatif lebih rendah. Namun, sensor pasif memiliki keterbatasan utama yaitu ketergantungannya pada sumber energi eksternal. Untuk sensor optik, operasionalnya terbatas pada siang hari dan sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca seperti tutupan awan yang dapat menghalangi perekaman data. Intensitas sumber energi juga tidak dapat dikontrol oleh sensor.

- Sensor Aktif. Berbeda dengan sensor pasif, sensor aktif memiliki sumber energi sendiri untuk menyinari objek dan merekam energi yang dipantulkan kembali. Sumber energi ini umumnya berupa gelombang elektromagnetik yang dibangkitkan oleh sensor itu sendiri. Sensor aktif memancarkan gelombang elektromagnetik ke arah target dan kemudian mendeteksi pantulannya. Contoh sensor aktif meliputi:
 1. Microwave (Gelombang Mikro): Kategori ini mencakup *Radar (Radio Detection and Ranging)*. Radar bekerja dengan memancarkan pulsa gelombang mikro ke target dan menganalisis sinyal yang kembali (waktu tempuh untuk jarak, intensitas untuk sifat permukaan, pergeseran frekuensi untuk kecepatan, dan polarisasi untuk tekstur dan orientasi). Keunggulan utama Radar adalah kemampuannya untuk menembus awan, hujan, kabut, dan asap, serta dapat beroperasi pada siang maupun malam hari. Kemampuan ini sangat krusial untuk wilayah tropis seperti Indonesia yang sering tertutup awan, memungkinkan pemantauan yang konsisten. Aplikasi Radar sangat luas, mencakup pemetaan topografi (misalnya, misi SRTM yang menghasilkan model elevasi digital global), deteksi tumpahan minyak di laut,

pemantauan banjir, pemantauan perubahan tutupan lahan (terutama untuk perubahan struktural seperti deforestasi), pemetaan kelembaban tanah, pemantauan kondisi es di laut, dan deteksi kapal untuk keamanan maritim. Contoh sensor/satelit Radar yang populer adalah Sentinel-1 yang menggunakan C-band SAR dan ALOS PALSAR yang menggunakan L-band SAR.

2. LiDAR (Light Detection and Ranging): LiDAR memancarkan pulsa laser (cahaya) ke target dan mengukur waktu tempuh pulsa yang kembali untuk menentukan jarak dengan presisi sangat tinggi. Data yang dihasilkan berupa kumpulan titik-titik tiga dimensi (*point cloud*) yang sangat detail. Aplikasi LiDAR meliputi pemetaan topografi dengan detail sangat tinggi (menghasilkan *Digital Terrain Model/DTM* dan *Digital Surface Model/DSM*), pemodelan kota 3D, estimasi biomassa hutan dan analisis struktur kanopi vegetasi, pemantauan infrastruktur (seperti jaringan listrik atau pipa), serta dalam bidang arkeologi untuk mengungkap fitur tersembunyi di bawah vegetasi.
3. Sonar (Sound Navigation and Ranging): Meskipun umumnya digunakan untuk pemetaan bawah air, prinsip kerja Sonar serupa dengan Radar dan LiDAR, namun menggunakan gelombang suara. Sonar memancarkan pulsa suara dan menganalisis gema yang kembali untuk mendeteksi dan memetakan objek di bawah permukaan air.

Kelebihan sensor aktif adalah kemampuannya untuk beroperasi dalam berbagai kondisi cuaca dan waktu (siang maupun malam). Selain itu, karena sumber energi dikontrol oleh sensor, karakteristik sinyal yang dipancarkan (seperti panjang gelombang, polarisasi, dan arah) dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan deteksi target tertentu. Beberapa sensor

aktif, seperti Radar, juga memiliki kemampuan penetrasi terhadap tutupan tertentu seperti vegetasi ringan atau lapisan tanah kering. Namun, sensor aktif umumnya memiliki desain yang lebih kompleks, membutuhkan daya operasional yang lebih besar, dan biaya pengembangan serta akuisisinya cenderung lebih mahal. Interpretasi data dari sensor aktif, khususnya Radar, juga bisa lebih rumit karena sinyal yang direkam dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kekasaran permukaan target dan konstanta dielektrik material.

Kemampuan sensor aktif, khususnya Radar, untuk menembus awan memiliki implikasi strategis yang signifikan untuk pemantauan lingkungan di wilayah tropis seperti Indonesia. Tingginya tingkat tutupan awan di Indonesia seringkali menjadi kendala besar bagi sensor pasif optik. Dengan sensor aktif, pemantauan fenomena seperti banjir, tanah longsor, atau aktivitas ilegal seperti deforestasi dapat dilakukan secara lebih konsisten dan tepat waktu, tanpa terganggu oleh kondisi cuaca. Lebih lanjut, terdapat tren yang meningkat dalam penggunaan data gabungan dari sensor aktif dan pasif. Sensor pasif dapat memberikan informasi spektral yang kaya (misalnya, untuk identifikasi jenis tutupan lahan atau perhitungan indeks vegetasi), sementara sensor aktif dapat memberikan informasi struktural, kandungan kelembaban, atau citra saat kondisi berawan (Richards dan Jia 2006; Schott 2007). Kombinasi (fusi data) dari kedua jenis sensor ini dapat mengatasi keterbatasan masing-masing dan menghasilkan produk informasi yang lebih komprehensif dan akurat. Berikut adalah tabel yang merangkum perbandingan antara sensor pasif dan aktif:

Tabel 3.1: Perbandingan Sensor Pasif dan Aktif

Karakteristik	Sensor Pasif	Sensor Aktif
Sumber Energi	Energi alami dari luar sensor (Matahari, emisi termal objek)	Energi dibangkitkan oleh sensor itu sendiri
Contoh Sensor Utama	Kamera fotografi, sensor multispektral (Landsat OLI, Sentinel-2 MSI), sensor inframerah termal (TIRS, MODIS)	Radar (Sentinel-1 SAR, ALOS PALSAR), LiDAR, Sonar
Kemampuan Operasi	Umumnya siang hari (untuk sensor optik), dipengaruhi cuaca (awan, hujan untuk optik)	Siang dan malam hari, umumnya tidak terpengaruh cuaca (khususnya Radar)
Kelebihan Utama	Desain lebih sederhana, lebih ringan, kebutuhan daya rendah, biaya bisa lebih rendah	Operasional segala cuaca & waktu, kontrol atas sinyal, kemampuan penetrasi (Radar)
Kekurangan Utama	Tergantung sumber energi eksternal, terbatas waktu dan cuaca, intensitas energi tidak terkontrol	Desain kompleks, kebutuhan daya besar, biaya lebih mahal, interpretasi data bisa lebih rumit
Contoh Aplikasi Khas di Indonesia	Pemetaan tutupan lahan (Landsat, Sentinel-2), monitoring pertanian, deteksi kebakaran hutan (MODIS, VIIRS)	Pemantauan banjir (Sentinel-1), monitoring deforestasi saat berawan (Sentinel-1), pemetaan topografi (Radar)

B. Berdasarkan Mekanisme Perekaman

Berdasarkan mekanisme perekaman yang digunakan, sensor penginderaan jauh dapat dibedakan menjadi dua jenis utama: sensor fotografik dan sensor elektro-optik.

- **Sensor Fotografik**

Sensor fotografik memanfaatkan medium film yang sensitif terhadap cahaya untuk merekam energi elektromagnetik. Mekanisme

perekaman gambar pada sensor ini didasarkan pada reaksi kimia yang terjadi pada emulsi film ketika terpapar cahaya. Meskipun tergolong sebagai teknologi konvensional, sensor fotografik masih diaplikasikan dalam beberapa bidang penginderaan jauh karena keunggulannya dalam hal resolusi spasial. Tingginya resolusi spasial pada sensor fotografik disebabkan oleh kerapatan elemen sensitif cahaya yang tinggi pada film, sehingga memungkinkan perekaman objek dengan detail yang sangat baik. Keunggulan lain dari sensor fotografik adalah kemampuannya dalam mencakup area perekaman yang luas dalam satu kali pemotretan, terutama pada aplikasi pemotretan udara. Dari segi ekonomis, sensor fotografik relatif lebih murah dibandingkan dengan beberapa jenis sensor modern, baik dalam hal biaya pengadaan maupun operasional. Meskipun demikian, sensor fotografik memiliki beberapa keterbatasan. Proses pengembangan film dan pencetakan gambar yang memerlukan proses kimiawi membutuhkan waktu yang relatif lama. Rentang sensitivitas spektral film fotografi terbatas, umumnya hanya mencakup spektrum cahaya tampak. Keterbatasan lain dari sensor fotografik adalah sifat film yang hanya dapat digunakan sekali, sehingga membutuhkan biaya tambahan untuk setiap pemotretan. Walaupun demikian, sensor fotografik masih memiliki ceruk aplikasi khusus, misalnya dalam beberapa jenis survei udara untuk pemetaan skala besar dengan detail sangat tinggi di mana biaya dan kecepatan pemrosesan digital bukan merupakan kendala utama, atau untuk keperluan pengarsipan data historis.

- Sensor Elektro-optik

Sensor elektro-optik menggunakan detektor elektronik untuk merekam energi elektromagnetik dan mengubahnya menjadi sinyal digital. Sensor jenis ini lebih umum digunakan dalam penginderaan

jauh modern karena unggul dalam hal kepraktisannya, kecepatan pemrosesan data yang tinggi, dan kemampuannya dalam merekam data dalam berbagai rentang spektrum elektromagnetik. Penggunaan detektor elektronik, seperti *Charge-Coupled Device (CCD)* atau *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)*, memungkinkan sensor elektro-optik untuk merekam data secara langsung dalam format digital, sehingga memudahkan proses penyimpanan, pemrosesan, dan analisis data. Kecepatan akuisisi dan pemrosesan data yang tinggi pada sensor elektro-optik menjadikannya ideal untuk aplikasi *real-time* dan pemantauan yang memerlukan respon cepat. Fleksibilitas sensor elektro-optik dalam hal rentang spektral juga menjadikannya sebagai pilihan yang menarik. Sensor ini dapat dirancang untuk merekam energi elektromagnetik, tidak hanya pada spektrum cahaya tampak, tetapi juga pada spektrum inframerah dan gelombang mikro. Kemampuan ini membuka peluang yang luas dalam berbagai aplikasi penginderaan jauh. Di samping itu, sensor elektro-optik dapat digunakan berulang kali, sehingga lebih efisien dan ekonomis dalam jangka panjang. Keunggulan-keunggulan inilah yang menjadikan sensor elektro-optik sebagai pilihan utama dalam berbagai aplikasi penginderaan jauh modern. Peralihan dari sensor fotografik ke sensor elektro-optik mencerminkan evolusi teknologi yang lebih luas dari sistem analog ke sistem digital dalam dunia pencitraan. Keunggulan dalam pemrosesan, penyimpanan, transmisi, dan analisis data digital telah mendorong dominasi sensor elektro-optik. Kemampuan untuk menghasilkan data digital secara langsung menghilangkan tahapan pemrosesan kimiawi yang lambat dan mahal yang menjadi ciri khas sensor fotografik. Lebih lanjut, data digital yang dihasilkan oleh sensor elektro-optik lebih mudah didistribusikan dan diakses, misalnya melalui internet. Hal ini telah berkontribusi

secara signifikan terhadap demokratisasi penggunaan data penginderaan jauh, memungkinkan lebih banyak pihak untuk mengakses dan memanfaatkan data dari berbagai misi satelit, seperti data Landsat atau Sentinel yang tersedia secara gratis.

C. Berdasarkan Spektrum Elektromagnetik

Sebelum membahas klasifikasi sensor berdasarkan spektrum elektromagnetik, penting untuk memahami bahwa energi elektromagnetik merambat dalam bentuk gelombang dengan panjang gelombang dan frekuensi yang bervariasi, membentuk suatu spektrum elektromagnetik. Atmosfer Bumi bersifat selektif terhadap panjang gelombang tertentu; artinya, hanya bagian-bagian tertentu dari spektrum elektromagnetik yang dapat menembus atmosfer dan mencapai permukaan Bumi serta sensor penginderaan jauh. Bagian spektrum yang dapat melewati atmosfer ini dikenal sebagai "jendela atmosfer". Sensor penginderaan jauh dirancang untuk beroperasi pada jendela-jendela atmosfer ini. Berdasarkan spektrum elektromagnetik yang digunakan, sensor dapat dibedakan menjadi tiga jenis utama:

- **Sensor Pankromatik**

Sensor pankromatik bekerja layaknya mata manusia yang hanya melihat gradasi warna hitam dan putih. Sensor ini merekam energi elektromagnetik dalam rentang spektrum yang luas, biasanya mencakup seluruh atau sebagian besar spektrum cahaya tampak (*visible spectrum*), yaitu antara sekitar 400 hingga 700 nanometer (nm), dan kadang meluas hingga inframerah dekat. Data yang dihasilkan berupa citra hitam-putih dengan gradasi keabuan (*grayscale*) yang merepresentasikan intensitas pantulan energi pada rentang spektral tersebut. Meskipun tidak memiliki informasi warna, sensor pankromatik memiliki keunggulan utama dalam hal resolusi

spasial yang tinggi. Sensor ini mampu menghasilkan citra dengan detail objek yang sangat baik. Sebagai contoh, sensor pankromatik pada satelit WorldView-3 mampu menghasilkan citra dengan resolusi spasial mencapai 30 cm, memungkinkan identifikasi objek kecil seperti kendaraan dan pepohonan dengan jelas. Contoh lain adalah band pankromatik pada satelit resolusi tinggi seperti Pleiades dan GeoEye, serta pada satelit Landsat 8 (Band 8). Salah satu kegunaan utama data pankromatik adalah untuk meningkatkan resolusi spasial citra multispektral melalui teknik fusi citra yang dikenal sebagai *pansharpening*.

- Sensor Multispektral

Berbeda dengan sensor pankromatik, sensor multispektral mampu merekam energi elektromagnetik dalam beberapa rentang spektrum tertentu yang diskrit, yang disebut band atau saluran spektral. Hal ini memungkinkan dihasilkannya citra berwarna, baik dalam komposit warna asli (*true color composite*) maupun warna palsu (*false color composite*). Rentang spektrum yang direkam biasanya mencakup beberapa band dalam spektrum cahaya tampak (misalnya, band biru, hijau, dan merah), inframerah dekat (*Near-Infrared/NIR*), inframerah gelombang pendek (*Short-Wave Infrared/SWIR*), dan pada beberapa sensor juga inframerah termal (*Thermal Infrared/TIR*). Citra multispektral memberikan informasi warna dan spektral yang berguna untuk membedakan objek berdasarkan karakteristik pantulan atau emisinya pada band-band tersebut. Misalnya, vegetasi yang sehat akan tampak berwarna hijau terang pada komposit warna asli dan merah terang pada komposit warna palsu standar (yang menggunakan band NIR, merah, hijau) karena memantulkan spektrum NIR dengan kuat, sedangkan vegetasi yang tidak sehat atau tanah terbuka akan tampak berbeda. Contoh sensor/satelit multispektral yang banyak digunakan

adalah sensor pada seri satelit Landsat (seperti OLI/TIRS pada Landsat 8 & 9), Sentinel-2 (MSI), SPOT, MODIS, VIIRS, dan ASTER. Aplikasi sensor multispektral sangat beragam, meliputi pemetaan tutupan lahan, pemantauan kondisi vegetasi (termasuk perhitungan indeks vegetasi seperti NDVI), pemantauan kualitas air, identifikasi jenis tanaman, dan lain-lain.

- Sensor Hiperspektral

Jika sensor multispektral diibaratkan sebagai mata manusia yang mampu melihat berbagai warna, maka sensor hiperspektral adalah mata super yang mampu melihat ratusan bahkan ribuan "warna" atau nuansa spektral. Sensor ini merekam energi elektromagnetik dalam ratusan rentang spektrum yang sangat sempit dan bersebelahan (*contiguous narrow bands*), menghasilkan data citra dengan informasi spektral yang sangat detail untuk setiap piksel. Data ini sering disebut sebagai "kubus hiperspektral" (*hyperspectral cube*) yang merepresentasikan kurva pantulan spektral kontinu untuk setiap piksel, atau yang dikenal sebagai "sidik jari spektral" (*spectral signature*). Citra hiperspektral memungkinkan identifikasi objek dengan akurasi yang sangat tinggi, bahkan untuk objek atau material yang sangat mirip secara visual. Hal ini dimungkinkan karena setiap material cenderung memiliki sidik jari spektral yang unik. Sebagai contoh, sensor hiperspektral dapat digunakan untuk membedakan jenis mineral pada batuan, mengidentifikasi jenis spesies vegetasi tertentu, mendeteksi tingkat stres atau penyakit pada tanaman secara dini, bahkan mendeteksi keberadaan zat-zat pencemar di tanah atau air. Salah satu contoh sensor hiperspektral yang bersejarah adalah sensor Hyperion pada satelit EO-1. Contoh lainnya termasuk sensor airborne AVIRIS, dan sensor satelit yang lebih baru seperti PRISMA

dari Italia dan EnMAP dari Jerman. Meskipun memiliki kemampuan diskriminasi material yang superior, sensor hiperspektral juga memiliki beberapa keterbatasan, seperti volume data yang sangat besar yang memerlukan kapasitas penyimpanan dan kemampuan pemrosesan yang tinggi, teknik analisis data yang lebih kompleks, dan seringkali memiliki resolusi spasial yang lebih rendah dibandingkan sensor multispektral atau pankromatik. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan untuk mengumpulkan energi yang cukup dalam setiap band spektral yang sempit agar menghasilkan rasio sinyal terhadap derau (*signal-to-noise ratio*/SNR) yang baik. Peningkatan jumlah dan penyempitan lebar band dari sensor pankromatik ke multispektral, dan kemudian ke hiperspektral, secara fundamental meningkatkan "dimensi informasi" yang ditangkap oleh sensor. Pankromatik, dengan satu band spektral yang lebar, menangkap informasi intensitas total. Sensor multispektral, dengan beberapa band yang lebih sempit, menyediakan informasi warna dan beberapa karakteristik spektral dasar. Sensor hiperspektral, dengan ratusan band yang sangat sempit dan bersebelahan, mampu merekonstruksi kurva spektral yang detail, memungkinkan identifikasi material berdasarkan "sidik jari" spektral uniknya. Hal Ini merupakan peningkatan eksponensial dalam kekayaan informasi spektral. Namun, seringkali terdapat *trade-off* antara resolusi spektral dan resolusi spasial. Untuk mendapatkan energi yang cukup dalam setiap band spektral yang sempit (khususnya pada sensor hiperspektral), ukuran piksel di lapangan mungkin perlu diperbesar (yang berarti resolusi spasial lebih rendah) atau waktu sensor "menatap" target (*dwel time*) perlu diperlama, yang dapat berdampak pada cakupan area atau frekuensi kunjungan ulang (resolusi temporal). Tabel berikut menyajikan perbandingan karakteristik utama dari ketiga jenis sensor ini:

Tabel 3.2: Perbandingan Karakteristik Sensor Pankromatik, Multispektral, dan Hiperspektral

Karakteristik	Sensor Pankromatik	Sensor Multispektral	Sensor Hiperspektral
Jumlah Kanal Spektral Tipikal	1 kanal	Beberapa (misalnya 3-15) kanal diskrit	Ratusan (misalnya >30 hingga >200) kanal sempit dan bersebelahan
Lebar Kanal Spektral	Lebar	Sedang hingga lebar	Sangat sempit
Resolusi Spasial Tipikal	Tinggi hingga sangat tinggi	Sedang hingga tinggi	Rendah hingga sedang
Kemampuan Deteksi Warna	Tidak (citra hitam-putih/grayscale)	Ya (citra berwarna)	Ya (informasi spektral sangat detail, dapat menghasilkan berbagai komposit warna)
Kemampuan Diskriminasi Material	Rendah	Sedang (berdasarkan perbedaan pada beberapa band)	Sangat tinggi (berdasarkan "sidik jari spektral" kontinu)
Kompleksitas Data & Analisis	Rendah	Sedang	Tinggi hingga sangat tinggi
Contoh Sensor/Satelit Utama	WorldView (Pan), Pleiades (Pan), Landsat 8 (Band 8)	Landsat (OLI), Sentinel-2 (MSI), MODIS, VIIRS, SPOT	Hyperion (EO-1), AVIRIS (airborne), PRISMA, EnMAP
Aplikasi Khas	<i>Pansharpening</i> , pemetaan dasar detail, visualisasi	Pemetaan tutupan lahan, monitoring vegetasi	Identifikasi mineral, deteksi spesies vegetasi spesifik, monitoring stres

		(NDVI), kualitas air, pertanian	tanaman, deteksi polusi, karakterisasi material
--	--	---------------------------------------	---

D. Berdasarkan Platform/Wahana

Klasifikasi ini merujuk pada wahana atau tempat di mana sensor tersebut dipasang untuk melakukan perekaman. Sensor dapat dipasang pada platform yang berbasis di darat (terrestrial), di udara (pesawat atau drone), atau di luar angkasa (satelit). Karakteristik platform akan sangat memengaruhi cara data diperoleh, cakupan area, resolusi, frekuensi perekaman, dan jenis aplikasi yang dapat didukung. Pembahasan lebih lanjut mengenai platform akan diuraikan pada bagian berikutnya.

3.2. Platform Penginderaan Jauh

3.2.1. Pengantar Platform

Jika sensor adalah mata, maka platform adalah kepala yang membawa mata agar bisa menangkap objek yang diinginkan. Informasi tentang Bumi yang kita tinggali dapat diintip dari berbagai ketinggian, mulai dari permukaan tanah hingga luar angkasa. Perbedaan ketinggian ini menentukan platform yang digunakan dalam penginderaan jauh. Setiap platform memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan tujuan penginderaan, skala observasi yang diinginkan, resolusi data yang dibutuhkan, frekuensi pengamatan yang diperlukan, serta ketersediaan anggaran. Berbagai platform ini menyediakan kemampuan untuk mengamati Bumi pada skala yang berbeda-beda, mulai dari detail tingkat mikro yang diperoleh dari platform terrestrial, hingga cakupan regional dan global yang disediakan oleh platform luar angkasa, memungkinkan pendekatan multi-skala dalam analisis fenomena geospasial.

3.2.2. Platform Terrestrial (*Ground-based*)

Sesuai namanya, sensor terrestrial dioperasikan di permukaan Bumi, baik dalam keadaan statis maupun *mobile*. Sensor statis biasanya dipasang pada tripod atau bangunan, sedangkan sensor *mobile* dapat dibawa dengan tangan, kendaraan, atau robot. Contoh sensor terrestrial antara lain kamera terrestrial (untuk fotogrametri jarak dekat), *Terrestrial Laser Scanner (TLS)*, *Ground Penetrating Radar (GPR)* untuk deteksi objek bawah permukaan, dan spektrometer lapangan untuk pengukuran reflektansi spektral secara langsung.

Kedekatan sensor dengan objek memungkinkan pengamatan jarak dekat dan pemetaan dengan detail yang sangat tinggi. **Kelebihan** platform terrestrial mencakup resolusi spasial yang sangat tinggi, kemampuan untuk mengukur objek dari berbagai sudut pandang yang fleksibel, biaya akuisisi yang relatif rendah untuk area target yang kecil, dan kontrol penuh atas waktu akuisisi data. **Kekurangan** utamanya adalah cakupan area yang sangat terbatas per akuisisi, mobilitas yang bisa menjadi kendala untuk area yang luas atau memiliki medan yang sulit dijangkau, serta potensi gangguan dari obstruksi di lapangan seperti vegetasi atau bangunan lain yang dapat menghalangi pandangan sensor.

Aplikasi platform terrestrial meliputi pemetaan detail fasad bangunan, pemantauan deformasi struktur (jembatan, bendungan), dokumentasi situs arkeologi atau cagar budaya dengan presisi tinggi, studi vegetasi pada plot-plot kecil, dan survei forensik. Salah satu peran yang sangat penting dari platform terrestrial, khususnya penggunaan spektrometer lapangan, adalah dalam proses kalibrasi sensor yang dibawa oleh platform udara atau luar angkasa, serta untuk validasi produk informasi yang dihasilkan dari data penginderaan jauh tersebut (misalnya, peta tutupan lahan atau peta

kandungan klorofil). Pengukuran spektral langsung di lapangan menyediakan data referensi (*reference data*) yang akurat untuk membandingkan, mengkoreksi, dan memvalidasi data yang diperoleh dari sensor pada ketinggian yang lebih jauh.

3.2.3. Platform Udara (*Airborne*)

Sensor udara dibawa oleh wahana udara, baik berawak seperti pesawat terbang maupun tak berawak seperti *Unmanned Aerial Vehicles (UAV)* atau yang lebih populer dikenal sebagai *drone*. Platform ini menawarkan fleksibilitas dalam hal cakupan area dan resolusi spasial, yang dapat disesuaikan dari resolusi tinggi hingga sangat tinggi tergantung ketinggian terbang dan jenis sensor. Sensor udara dapat digunakan untuk memetakan area yang luas dalam waktu yang relatif singkat, serta dapat menjangkau area yang sulit diakses oleh manusia. Berbagai jenis sensor dapat dibawa oleh wahana udara, antara lain kamera digital format besar (untuk aplikasi fotogrametri dan pembuatan orthophoto), LiDAR udara, serta sensor multispektral dan hiperspektral udara.

- Pesawat Terbang Berawak:
 - Kelebihan: Mampu membawa muatan sensor yang lebih besar, lebih berat, dan lebih beragam. Memiliki daya tahan terbang (*endurance*) yang lebih lama sehingga dapat mencakup area yang lebih luas per misi dibandingkan drone. Umumnya dapat terbang pada ketinggian yang lebih tinggi, memberikan cakupan yang lebih lebar per frame citra.
 - Kekurangan: Biaya operasional yang tinggi (bahan bakar, pilot, perawatan). Proses mobilisasi dan perizinan terbang yang lebih kompleks. Memerlukan landasan pacu untuk lepas landas dan mendarat. Kurang fleksibel untuk akuisisi data pada area yang

relatif kecil atau untuk misi yang bersifat mendadak.

- UAV/Drone:
 - Kelebihan: Biaya operasional yang jauh lebih rendah dibandingkan pesawat berawak. Dapat di-*deploy* dengan cepat dan mudah. Ideal untuk pemetaan area kecil hingga menengah (misalnya, beberapa hektar hingga ratusan hektar). Kemampuan terbang pada ketinggian rendah memungkinkan dihasilkannya data dengan resolusi spasial sangat tinggi (hingga beberapa sentimeter). Dapat menjangkau area yang berbahaya atau sulit diakses oleh manusia secara langsung.
 - Kekurangan: Daya tahan terbang terbatas, sangat bergantung pada kapasitas baterai. Kapasitas muatan sensor lebih kecil dan lebih ringan dibandingkan pesawat. Regulasi penerbangan untuk drone semakin ketat di banyak negara. Lebih rentan terhadap kondisi cuaca buruk, terutama angin kencang.

Aplikasi platform udara sangat beragam, mencakup pemetaan topografi detail, survei koridor untuk perencanaan infrastruktur (jalan, jalur pipa, jaringan listrik), aplikasi pertanian presisi (pemantauan kesehatan tanaman, estimasi hasil panen), pemantauan bencana alam skala lokal (banjir, longsor, erupsi vulkanik), inspeksi infrastruktur (jembatan, menara, bangunan tinggi), dan produksi orthophoto serta model 3D resolusi tinggi.

Munculnya teknologi UAV/drone telah secara signifikan mendemokratisasi akses terhadap data penginderaan jauh dari platform udara. Sebelumnya, akuisisi data udara didominasi oleh survei menggunakan pesawat berawak yang mahal dan kompleks. Kemudahan penggunaan dan biaya yang relatif lebih rendah dari sistem UAV memungkinkan lebih banyak pihak, termasuk peneliti, perusahaan skala

kecil, hingga individu, untuk mengakuisisi data spasial resolusi tinggi sesuai kebutuhan. UAV mengisi celah penting antara platform terestrial (yang menyediakan detail sangat tinggi namun untuk area sangat kecil) dan platform satelit (yang menawarkan cakupan luas namun dengan resolusi spasial yang mungkin lebih rendah atau jadwal akuisisi yang tetap). UAV menawarkan solusi "sesuai permintaan" (*on-demand*) untuk akuisisi data resolusi tinggi pada area terbatas dengan fleksibilitas waktu yang tinggi.

3.2.4. Platform Luar Angkasa (*Spaceborne*)

Sensor dibawa oleh satelit yang mengorbit Bumi pada ketinggian tertentu, memungkinkan pengamatan berskala global dan pemantauan jangka panjang. Ketinggian orbit satelit bervariasi dan secara umum dapat dikelompokkan menjadi:

- *Low Earth Orbit (LEO)*: Ketinggian orbit ini berkisar antara 160 km hingga 2.000 km di atas permukaan Bumi. Sebagian besar satelit penginderaan jauh untuk observasi Bumi berada pada orbit LEO, termasuk jenis orbit khusus yang disebut *Sun-Synchronous Orbit (SSO)* atau Orbit Sinkron Matahari.
- *Sun-Synchronous Orbit (SSO)*: Ini adalah jenis orbit polar (melintasi dekat kutub Utara dan Selatan) di mana satelit melintasi garis ekuator pada waktu lokal Matahari yang sama setiap kalinya. Konsistensi waktu lokal ini sangat penting untuk sensor optik karena memastikan kondisi iluminasi (pencahayaan Matahari) yang relatif sama pada setiap akuisisi citra di area yang sama. Hal ini memudahkan perbandingan citra dari waktu ke waktu dan untuk deteksi perubahan. Ketinggian tipikal untuk satelit SSO adalah antara 600 km hingga 800 km. Contoh satelit yang menggunakan orbit LEO/SSO antara lain seri Landsat, seri Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3), SPOT,

satelit resolusi sangat tinggi komersial (seperti WorldView, Pleiades), serta satelit dengan sensor MODIS (pada platform Terra dan Aqua) dan VIIRS (pada platform Suomi NPP dan JPSS).

- *Medium Earth Orbit (MEO)*: Ketinggian orbit MEO berada di antara LEO dan GEO, yaitu sekitar 2.000 km hingga 35.786 km. Orbit ini terutama digunakan untuk satelit navigasi global seperti GPS (Amerika Serikat), GLONASS (Rusia), dan Galileo (Uni Eropa).
- *Geostationary Earth Orbit (GEO)*: Orbit geostasioner memiliki ketinggian sekitar 35.786 km tepat di atas ekuator. Pada ketinggian ini, periode orbit satelit sama dengan periode rotasi Bumi (sekitar 24 jam). Akibatnya, satelit tampak "stasioner" atau diam relatif terhadap satu titik di permukaan Bumi. Orbit GEO ideal untuk satelit komunikasi dan satelit meteorologi yang memerlukan pengamatan kontinu atas area geografis yang luas dan sama. Contoh satelit cuaca di orbit GEO adalah seri GOES (Amerika Serikat), Himawari (Jepang), dan Meteosat (Eropa). Citra GMS (Geostationary Meteorological Satellite), pendahulu Himawari, juga merupakan contoh satelit GEO.

Kelebihan platform luar angkasa meliputi cakupan area yang global atau sangat luas, kemampuan untuk melakukan pengamatan berulang secara periodik yang konsisten (penting untuk aplikasi pemantauan), biaya akuisisi per unit area yang bisa menjadi lebih rendah untuk pemetaan area yang sangat luas, dan kondisi pengamatan yang relatif stabil karena berada di atas sebagian besar atmosfer. Kekurangan utamanya adalah biaya peluncuran dan operasional satelit yang sangat tinggi. Resolusi spasial dari beberapa satelit mungkin lebih rendah dibandingkan yang dapat dicapai oleh platform udara (kecuali untuk satelit komersial resolusi sangat tinggi yang datanya umumnya mahal). Fleksibilitas misi lebih rendah karena

jadwal orbit satelit sudah tetap. Untuk sensor optik, data dapat terhalang oleh tutupan awan.

Berbagai jenis sensor dapat dipasang pada platform satelit, termasuk sensor pankromatik, multispektral, hiperspektral, Radar, dan bahkan LiDAR (meskipun lebih jarang, contohnya adalah misi ICESat untuk pemantauan es dan elevasi).

Berikut adalah beberapa contoh satelit penginderaan jauh modern dan aplikasinya yang relevan:

- Seri Landsat (NASA/USGS): Merupakan program observasi Bumi sipil dengan sejarah operasional terpanjang. Satelit terkini, Landsat 8 dan Landsat 9, membawa sensor *Operational Land Imager (OLI)* dan *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. Resolusi spasialnya adalah 15 meter untuk band pankromatik, 30 meter untuk band multispektral, dan 100 meter (di-resample ke 30m) untuk band termal. Periode kunjungan ulang (*revisit time*) adalah 16 hari untuk setiap satelit (8 hari dengan kombinasi keduanya). Data Landsat tersedia secara gratis untuk publik. Aplikasinya sangat luas, mencakup pemetaan tutupan lahan, pemantauan deforestasi, aplikasi pertanian, pemantauan kualitas air, dan studi perubahan lingkungan.
- Seri Sentinel (ESA/Copernicus): Merupakan program unggulan dari Badan Antariksa Eropa (ESA) dan Uni Eropa melalui program Copernicus.
 - Sentinel-1 (A/B/C): Terdiri dari konstelasi satelit yang membawa sensor Radar C-band (*Synthetic Aperture Radar/SAR*). Resolusi spasialnya bervariasi tergantung mode akuisisi, bisa mencapai hingga 5 meter. Dengan konstelasi dua satelit (Sentinel-1A dan Sentinel-1B, dengan Sentinel-1C sebagai pengganti), frekuensi

kunjungan ulangnya sangat cepat, bisa kurang dari satu hari di beberapa wilayah Eropa dan beberapa hari secara global. Data Sentinel-1 juga tersedia gratis. Aplikasinya meliputi pemantauan banjir, pemantauan deformasi permukaan tanah, pemantauan es di laut, deteksi tumpahan minyak, pemetaan sawah, dan dukungan untuk situasi darurat.

- Sentinel-2 (A/B): Terdiri dari konstelasi satelit yang membawa sensor multispektral inovatif (*MultiSpectral Instrument/MSI*) dengan 13 band spektral, termasuk beberapa band di area *red-edge* yang sensitif terhadap kondisi vegetasi. Resolusi spasialnya adalah 10 meter, 20 meter, dan 60 meter tergantung band spektral. Dengan konstelasi dua satelit (Sentinel-2A dan Sentinel-2B), periode kunjungan ulangnya adalah 5 hari di ekuator. Data Sentinel-2 juga tersedia gratis. Aplikasinya sangat luas untuk bidang pertanian (pemantauan pertumbuhan tanaman, estimasi kebutuhan air), kehutanan (pemantauan deforestasi, kesehatan hutan), pemantauan perubahan tutupan lahan, pemantauan kualitas air, dan pemetaan bencana.
- Sentinel-3: Fokus pada observasi laut dan daratan skala global, membawa sensor seperti altimeter Radar, sensor suhu permukaan laut dan warna laut (*Ocean and Land Colour Instrument/OLCI*).
- MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (NASA): Sensor multispektral dengan 36 band spektral yang terpasang pada satelit Terra (pagi) dan Aqua (sore). Resolusi spasialnya adalah 250 meter, 500 meter, dan 1 kilometer tergantung band. MODIS menyediakan cakupan harian global. Data MODIS tersedia gratis. Aplikasinya mencakup pemantauan atmosfer, daratan (vegetasi, kebakaran hutan, tutupan salju), dan lautan (suhu permukaan, warna laut, produktivitas primer).

- VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) (NOAA/NASA): Merupakan penerus sensor MODIS, terpasang pada satelit Suomi NPP dan seri JPSS. Memiliki resolusi spasial menengah dan kemampuan yang serupa dengan MODIS, termasuk untuk deteksi kebakaran aktif.
- TerraSAR-X & TanDEM-X (Jerman), PAZ (Spanyol): contoh konstelasi satelit yang membawa sensor SAR yang beroperasi pada X-band (panjang gelombang lebih pendek dari C-band pada Sentinel-1). Konstelasi ini mampu menghasilkan citra Radar dengan resolusi spasial sangat tinggi, bahkan hingga 25 cm dalam mode tertentu. Aplikasi utamanya meliputi pemetaan detail perkotaan dan infrastruktur, pemantauan presisi terhadap pergerakan permukaan tanah (InSAR), intelijen geospasial (GEOINT) untuk pertahanan dan keamanan, respons cepat terhadap bencana, dan pengawasan maritim.
- Satelit Resolusi Sangat Tinggi Komersial: Contohnya termasuk seri WorldView, Pleiades, GeoEye, dan IKONOS (yang bersejarah). Satelit-satelit ini mampu menghasilkan citra dengan resolusi spasial kurang dari 1 meter untuk band pankromatik dan beberapa meter untuk band multispektral. Data dari satelit ini bersifat komersial dan umumnya mahal. Aplikasinya meliputi pemetaan detail perkotaan, analisis untuk keperluan intelijen, pemantauan infrastruktur kritis, dan manajemen aset.
- PRISMA (*PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa*) (ASI, Italia): Merupakan satelit yang membawa sensor hiperspektral dan kamera pankromatik. Resolusi spasialnya adalah 30 meter untuk data hiperspektral dan 5 meter untuk data pankromatik. Aplikasinya mencakup identifikasi material permukaan, pertanian presisi, pemantauan kualitas lingkungan, dan manajemen sumber daya alam.

Perkembangan teknologi sensor penginderaan jauh terus menunjukkan tren

menuju resolusi spasial, spektral, dan temporal yang semakin tinggi. Selain itu, ketersediaan data yang semakin terbuka dan gratis dari program-program besar seperti Landsat dan Copernicus telah secara signifikan mendemokratisasi akses terhadap data penginderaan jauh, memicu gelombang inovasi dalam penelitian dan aplikasi di berbagai bidang. Kebutuhan akan informasi yang lebih detail, lebih akurat, dan lebih sering (mendekati waktu-nyata) terus mendorong pengembangan teknologi sensor baru dan metode analisis yang lebih canggih.

Program jangka panjang seperti Landsat sangat krusial karena menyediakan catatan historis yang konsisten dan tak ternilai harganya. Data historis ini memungkinkan para peneliti untuk memahami tren perubahan lingkungan global, seperti deforestasi, urbanisasi, degradasi lahan, dan dampak perubahan iklim, dalam skala waktu beberapa dekade. Tanpa data kontinu semacam ini, analisis perubahan jangka panjang yang andal akan sangat sulit dilakukan.

Penting juga untuk menyadari bahwa berbagai platform dan sensor menawarkan kemampuan yang berbeda dan seringkali saling melengkapi. Tidak ada satu jenis sensor "super" yang dapat melakukan segalanya dengan optimal. Pemilihan platform dan sensor yang paling tepat sangat bergantung pada tujuan spesifik aplikasi, skala area studi, anggaran yang tersedia, dan jenis informasi yang dibutuhkan. Misalnya, data Landsat atau Sentinel-2 sangat baik untuk pemantauan tutupan lahan dan vegetasi pada skala regional hingga nasional. Data Sentinel-1 sangat berguna untuk wilayah yang sering tertutup awan atau ketika informasi mengenai struktur permukaan dan kelembaban diperlukan. Data LiDAR dari platform udara adalah pilihan terbaik jika diperlukan Model Elevasi Digital (DEM) atau Model Permukaan Digital (DSM) dengan detail dan akurasi vertikal yang

sangat tinggi untuk area yang relatif terbatas.

Kebijakan data terbuka dari program-program seperti Landsat (NASA/USGS) dan Copernicus (ESA/Uni Eropa) yang menyediakan data satelit berkualitas tinggi secara gratis telah merevolusi aksesibilitas dan aplikasi penginderaan jauh secara global, termasuk di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Hal ini memungkinkan peneliti, lembaga pemerintah, sektor swasta, dan bahkan masyarakat umum untuk mengakses dan menggunakan data ini secara luas, yang pada gilirannya memicu inovasi dan pengembangan aplikasi yang lebih beragam untuk mengatasi berbagai tantangan. Selain itu, untuk meningkatkan frekuensi kunjungan ulang (resolusi temporal), tren dalam pengembangan misi satelit adalah meluncurkan konstelasi satelit yang identik atau komplementer, seperti yang dilakukan pada misi Sentinel-1 dan Sentinel-2. Kemampuan untuk mendapatkan data lebih sering sangat penting untuk aplikasi pemantauan fenomena yang dinamis, seperti pertumbuhan tanaman, laju deforestasi, atau perkembangan suatu bencana.

Dalam perkembangannya, istilah “penginderaan jauh” kini lebih fokus pada penggunaan platform luar angkasa, yaitu satelit. Hal ini dikarenakan platform lain, seperti platform udara dan terestrial, telah berkembang menjadi kajian keilmuan tersendiri. Platform udara kini lebih dikenal dengan istilah fotogrametri, sedangkan platform terestrial lebih dikenal dengan istilah pemetaan terestris. Meskipun demikian, prinsip dasar dan teknologi yang digunakan pada ketiga platform tersebut masih memiliki banyak kesamaan dan saling melengkapi.

3.2.5. Perbandingan Platform Penginderaan Jauh

Pemilihan platform yang tepat merupakan langkah krusial dalam perencanaan akuisisi data penginderaan jauh. Tabel berikut menyajikan

perbandingan karakteristik utama dari berbagai jenis platform:

Tabel 3.3: Perbandingan Karakteristik Platform Penginderaan Jauh

Karakteristik	Platform Terrestrial	Platform Udara (Pesawat)	Platform Udara (UAV/ Drone)	Platform Luar Angkasa (Satelit LEO)	Platform Luar Angkasa (Satelit GEO)
Ketinggian Operasi Tipikal	Permukaan tanah hingga beberapa puluh meter	Ratusan meter hingga >10 km	Beberapa meter hingga ratusan meter	~160 km - 2.000 km (umumnya 600-800 km untuk SSO)	~35.786 km
Cakupan Area per Akuisisi	Sangat kecil (m ² hingga ha)	Sedang hingga luas (puluhan hingga ribuan km ²)	Kecil hingga sedang (ha hingga ratusan ha)	Luas hingga sangat luas (ribuan hingga jutaan km ²)	Sangat luas (cakupan sebagian besar belahan Bumi per satelit)
Resolusi Spasial Tipikal	Sangat tinggi (mm hingga cm)	Tinggi hingga sangat tinggi (cm hingga beberapa m)	Sangat tinggi (cm hingga puluhan cm)	Rendah, sedang, hingga sangat tinggi (beberapa km hingga <1 m)	Sangat rendah (beberapa km)
Fleksibilitas Misi & Waktu Akuisisi	Sangat tinggi	Sedang (terjadwal, perlu mobilisasi)	Tinggi (cepat di-deploy, on-demand)	Rendah (jadwal orbit tetap)	Kontinu untuk area yang sama
Kemampuan Membawa Sensor Berat/Besar	Terbatas	Tinggi	Rendah hingga sedang	Sedang hingga tinggi	Tinggi

Ketergantungan Cuaca (untuk optik)	Dipengaruhi kondisi lokal	Dapat terbang di bawah awan (tergantung ketinggian)	Dipengaruhi kondisi lokal (angin, hujan)	Terhalang awan	Terhalang awan
Biaya Akuisisi Relatif	Rendah (per area kecil), tinggi (per area luas)	Tinggi	Rendah hingga sedang (per area kecil/ sedang)	Rendah (per area luas, terutama data gratis), tinggi (data komersial)	Sangat tinggi (pembangunan & peluncuran), rendah (data cuaca publik)
Contoh Aplikasi Utama	Kalibrasi/validasi, detail objek, arkeologi situs kecil	Pemetaan topografi regional, fotogrametri skala besar	Pertanian presisi, inspeksi, pemetaan area kecil-sedang	Monitoring global/regional, pemetaan tutupan lahan, iklim	Pemantauan cuaca kontinu, komunikasi

3.3. Aplikasi Sensor dan Platform di Indonesia

Pemahaman mengenai sensor, platform, dan resolusi menjadi lebih bermakna ketika dikaitkan dengan aplikasi nyata. Indonesia, sebagai negara kepulauan yang luas dengan dinamika lingkungan yang tinggi, menghadapi berbagai tantangan terkait pengelolaan sumber daya alam dan mitigasi bencana. Teknologi penginderaan jauh memainkan peran strategis dalam menyediakan data dan informasi untuk mendukung berbagai upaya tersebut. Berikut adalah beberapa contoh aplikasi sensor dan platform di Indonesia:

- Pemantauan Kebakaran Hutan dan Lahan (Karhutla):
 - Sensor dan Platform: Untuk deteksi dini titik panas (*active fire*),

sensor dengan resolusi temporal tinggi seperti MODIS (pada satelit Terra dan Aqua) dan VIIRS (pada satelit Suomi NPP dan JPSS) sangat diandalkan. Sensor-sensor ini menyediakan informasi harian mengenai lokasi kebakaran. Untuk pemetaan area terbakar yang lebih detail dan evaluasi tingkat kerusakan, data dari sensor dengan resolusi spasial dan spektral menengah seperti Landsat (OLI/TIRS) dan Sentinel-2 (MSI) digunakan. Semua platform ini adalah satelit yang beroperasi pada orbit LEO.

- Lembaga Terkait: Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN, yang sebelumnya mencakup LAPAN), Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), serta Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) aktif menggunakan data ini.
- Pemantauan Banjir:
 - Sensor dan Platform: Sensor Radar seperti yang terdapat pada satelit Sentinel-1 (SAR C-band) sangat efektif untuk pemantauan banjir karena kemampuannya menembus awan yang sering menyertai kejadian banjir, serta kemampuannya mendeteksi perbedaan antara permukaan air dan daratan. Sentinel-1 adalah satelit LEO.
 - Metode: Teknik analisis yang umum digunakan meliputi analisis perubahan citra sebelum dan sesudah banjir, serta metode *thresholding* untuk memisahkan area tergenang air.
- Pemantauan Deforestasi dan Perubahan Tutupan Lahan:
 - Sensor dan Platform: Data multitemporal (dari waktu ke waktu) dari satelit Landsat dan Sentinel-2 sangat vital untuk memantau laju deforestasi, degradasi hutan, dan perubahan tutupan lahan lainnya. Kombinasi resolusi spasial menengah dan kemampuan spektral dari sensor-sensor ini memungkinkan identifikasi

perubahan secara akurat. Platform yang digunakan adalah satelit LEO.

- Lembaga/Inisiatif: Berbagai lembaga dan inisiatif seperti Global Forest Watch, World Resources Institute (WRI) Indonesia, KLHK, dan BRIN memanfaatkan data ini untuk analisis dan pelaporan.
- Aplikasi Kelautan dan Perikanan:
 - Sensor dan Platform: Untuk pemantauan kondisi oseanografi skala luas seperti suhu permukaan laut (SPL) dan konsentrasi klorofil-a (indikator produktivitas primer), sensor seperti MODIS, VIIRS, dan OLCI (pada Sentinel-3) digunakan. Untuk pemetaan pesisir yang lebih detail, pemetaan tambak, atau pemantauan terumbu karang, platform udara seperti UAV/drone yang dilengkapi kamera resolusi tinggi atau sensor multispektral semakin banyak dimanfaatkan.
 - Layanan: BRIN (sebelumnya LAPAN) bekerja sama dengan Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) telah lama menyediakan layanan informasi Zona Potensi Penangkapan Ikan (ZPPI) yang didasarkan pada data satelit.
- Pemetaan dan Pemantauan Pertanian/Perkebunan:
 - Sensor dan Platform: Satelit seperti Sentinel-2 dan Landsat digunakan untuk pemetaan luas areal tanam, pemantauan fase pertumbuhan tanaman melalui indeks vegetasi (seperti NDVI), identifikasi jenis tanaman, dan estimasi produktivitas. Untuk skala yang lebih detail dan aplikasi pertanian presisi (misalnya, pemupukan variabel atau deteksi dini hama/penyakit pada plot tertentu), UAV/drone yang dilengkapi kamera multispektral atau termal menjadi pilihan yang efektif.

Contoh-contoh di atas menggarisbawahi peran penting penginderaan jauh dalam mendukung tata kelola sumber daya alam, mitigasi bencana, dan upaya pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Pemanfaatan data penginderaan jauh di Indonesia juga seringkali melibatkan kolaborasi antara berbagai pihak, termasuk lembaga pemerintah, lembaga riset dan universitas, organisasi non-pemerintah, serta kerjasama internasional, seperti aktivasi *Copernicus Emergency Management Service* oleh Uni Eropa atas permintaan pemerintah Indonesia dalam situasi bencana.

3.4. Rangkuman Bab

Bab ini telah membahas secara komprehensif mengenai dua komponen fundamental dalam sistem penginderaan jauh, yaitu sensor dan platform. Sensor, sebagai "mata" penginderaan jauh, berperan penting dalam merekam energi elektromagnetik dari objek di permukaan Bumi. Telah diuraikan klasifikasi sensor berdasarkan sumber energi (pasif dan aktif), mekanisme perekaman (fotografik dan elektro-optik), serta berdasarkan spektrum elektromagnetik yang digunakan (pankromatik, multispektral, dan hiperspektral). Masing-masing jenis sensor memiliki karakteristik, kelebihan, kekurangan, dan aplikasi yang spesifik.

Platform, sebagai "wahana" yang membawa sensor, juga memiliki peran krusial dalam menentukan bagaimana data penginderaan jauh diperoleh. Telah dibahas karakteristik, kelebihan, kekurangan, dan contoh aplikasi dari platform terestrial (*ground-based*), platform udara (*airborne* – baik pesawat berawak maupun UAV/drone), dan platform luar angkasa (*spaceborne* – termasuk berbagai jenis orbit satelit seperti LEO, SSO, MEO, dan GEO, beserta contoh-contoh misi satelit modern).

Terakhir, untuk memberikan konteks praktis, beberapa contoh aplikasi

sensor dan platform di Indonesia telah disajikan, menunjukkan relevansi teknologi penginderaan jauh dalam mengatasi berbagai isu lingkungan dan pengelolaan sumber daya di Indonesia.

Pemahaman yang baik mengenai jenis-jenis sensor, karakteristik berbagai platform, serta konsep dan implikasi dari keempat jenis resolusi merupakan landasan fundamental yang diperlukan untuk dapat melakukan interpretasi data penginderaan jauh secara efektif dan memilih teknologi yang tepat guna sesuai dengan tujuan aplikasi yang diinginkan.

BAB IV RESOLUSI DALAM PENGINDERAAN JAUH

4.1 Pendahuluan Konsep Resolusi

Konsep resolusi dalam penginderaan jauh memegang peranan penting dalam memahami kemampuan sensor untuk merekam dan menyajikan detail informasi objek di permukaan Bumi. Resolusi merupakan karakteristik dasar yang menentukan kualitas dan tingkat kedetailan informasi yang dapat diekstrak dari citra penginderaan jauh. Terdapat empat jenis resolusi utama yang saling terkait dan secara kolektif mendefinisikan kemampuan sebuah sistem sensor, yaitu resolusi spasial, resolusi spektral, resolusi temporal, dan resolusi radiometrik. Keempat aspek ini saling memengaruhi kemampuan sensor dalam merekam berbagai fenomena di permukaan Bumi.

Untuk memudahkan pemahaman awal, resolusi dapat diibaratkan seperti kemampuan indra manusia. Resolusi spasial mirip dengan seberapa kecil objek yang dapat kita lihat dengan jelas dari jarak tertentu; semakin baik resolusi spasial, semakin kecil objek yang dapat kita bedakan. Resolusi spektral dapat dianalogikan dengan kemampuan mata kita untuk membedakan berbagai nuansa warna; semakin tinggi resolusi spektral, semakin banyak "warna" atau panjang gelombang spesifik yang dapat dideteksi oleh sensor. Resolusi temporal, di sisi lain, serupa dengan seberapa sering kita memiliki kesempatan untuk mengamati kembali suatu lokasi atau peristiwa; frekuensi yang tinggi memungkinkan pemantauan perubahan yang cepat. Terakhir, resolusi radiometrik dapat dibandingkan dengan kemampuan kita untuk membedakan berbagai tingkat kecerahan atau kegelapan; sensor dengan resolusi radiometrik tinggi mampu menangkap gradasi nilai kecerahan yang lebih halus (Campbell dan Wynne

2011; T. Lillesand dkk. 2015).

Pemahaman yang komprehensif terhadap keempat jenis resolusi ini bukan hanya esensial bagi tahap interpretasi citra, tetapi juga krusial dalam tahap perencanaan akuisisi data. Seorang interpreter harus memahami spesifikasi resolusi ini untuk dapat memutuskan citra mana yang paling efektif dan efisien untuk digunakan dalam aplikasi tertentu. Kesalahan dalam memilih citra dengan resolusi yang tidak sesuai dengan kebutuhan analisis dapat berakibat pada kegagalan dalam mencapai tujuan penelitian, ketidakakuratan hasil, atau bahkan pemborosan sumber daya. Dengan demikian, pemahaman yang baik mengenai resolusi akan berdampak langsung pada keseluruhan alur kerja penginderaan jauh, mulai dari perencanaan akuisisi data, pemilihan citra, metode analisis, hingga interpretasi hasil akhir.

Lebih lanjut, kebutuhan akan resolusi tertentu seringkali bersifat sangat spesifik terhadap aplikasi yang dituju. Tidak ada satu jenis konfigurasi resolusi yang dapat dianggap "terbaik" untuk semua keperluan penginderaan jauh. Sebagai contoh, aplikasi pemetaan detail perkotaan akan menuntut resolusi spasial yang sangat tinggi, sementara aplikasi pemantauan cuaca global akan lebih memprioritaskan resolusi temporal yang tinggi. Hal ini mengarah pada suatu kenyataan penting dalam teknologi penginderaan jauh, yaitu adanya *trade-off* atau hubungan timbal balik antar berbagai jenis resolusi. Peningkatan pada satu jenis resolusi seringkali harus dibayar dengan penurunan pada jenis resolusi lainnya, atau dengan peningkatan biaya dan kompleksitas sistem. Perkembangan teknologi sensor, seperti pengembangan konstelasi satelit, terus berupaya untuk menyeimbangkan berbagai kebutuhan resolusi ini, namun batasan-batasan fundamental yang didasari oleh hukum fisika dan kendala rekayasa tetap ada. Dinamika antara kebutuhan pengguna yang semakin beragam dan kemampuan teknologi yang terus berkembang inilah yang mendorong

inovasi berkelanjutan dalam bidang penginderaan jauh.

4.2 Resolusi Spasial

Resolusi spasial berkaitan dengan ukuran objek terkecil di permukaan Bumi yang masih dapat dideteksi, dibedakan, dan dikenali sebagai entitas terpisah pada suatu citra penginderaan jauh. Secara lebih teknis, resolusi spasial seringkali dikaitkan dengan *Ground Sample Distance* (GSD), yaitu ukuran area di permukaan tanah yang diwakili oleh satu piksel dalam citra digital. Setiap piksel pada citra merepresentasikan sebagian kecil permukaan Bumi, dan ukuran objek yang dapat diwakili oleh satu piksel setara dengan ukuran area yang direkam oleh piksel tersebut. Sebagai contoh, pada citra dengan resolusi spasial 1 meter, satu piksel merepresentasikan area seluas 1 x 1 meter di permukaan Bumi. Objek yang lebih kecil dari ukuran tersebut tidak teridentifikasi dengan jelas atau hanya memengaruhi nilai campuran piksel tersebut. Contoh lain, citra dengan resolusi spasial 30 meter (seperti pada sebagian besar band multispektral satelit Landsat) berarti bahwa satu piksel pada citra tersebut merepresentasikan area seluas 30 meter x 30 meter di permukaan tanah. Objek-objek yang ukurannya lebih kecil dari 30 meter mungkin tidak akan terlihat jelas, atau akan tergabung (terata-rata) dengan fitur lain di dalam piksel tersebut. Sebaliknya, citra dengan resolusi spasial 0,5 meter (misalnya dari satelit Pleiades atau WorldView) mampu mengidentifikasi objek sekecil mobil dengan cukup jelas.

Secara teknis, resolusi spasial merupakan ukuran piksel minimum yang ditangkap oleh sensor, dan hal ini dikendalikan oleh *Instantaneous Field of View* (IFOV) sensor serta ketinggian terbang wahana (platform). IFOV adalah sudut pandang sesaat dari satu elemen detektor pada sensor. Ketika dikombinasikan dengan ketinggian terbang, IFOV menentukan dimensi area di permukaan tanah yang energinya terintegrasi ke dalam satu

piksel. Semakin kecil IFOV dan/atau semakin rendah ketinggian terbang wahana, maka semakin kecil area yang direkam per piksel, yang berarti resolusi spasial yang dihasilkan semakin tinggi (halus), sehingga detail objek yang terekam pada citra semakin tinggi.

Untuk mengilustrasikan perbedaan resolusi spasial, berikut adalah beberapa contoh sensor satelit penginderaan jauh beserta spesifikasi resolusi spasialnya:

- Resolusi Sangat Tinggi (kurang dari 1 meter): Sensor dalam kategori ini mampu menghasilkan citra dengan detail yang sangat tinggi, memungkinkan identifikasi objek-objek kecil seperti kendaraan, bangunan individual, bahkan detail pada bangunan tersebut.
 - WorldView-4: Memiliki resolusi spasial pankromatik 0.31 meter dan multispektral 1.24 meter. Namun, perlu dicatat bahwa satelit WorldView-4 telah dinonaktifkan sejak Januari 2019 akibat kegagalan pada *Control Moment Gyros* (CMG).
 - GeoEye-1: Awalnya diluncurkan dengan resolusi pankromatik 0.41 meter, namun setelah penyesuaian orbit, resolusinya menjadi 0.46 meter atau 0.50 meter untuk pankromatik dan 1.84 meter untuk multispektral.
 - Pleiades-1A/1B: Menawarkan resolusi pankromatik 0.5 meter dan multispektral 2 meter.
- Resolusi Tinggi (1 meter hingga 10 meter): Sensor-sensor ini banyak digunakan untuk pemetaan detail, pemantauan infrastruktur, dan analisis perkotaan.
 - IKONOS: Merupakan salah satu satelit komersial pertama yang menyediakan citra resolusi tinggi, dengan resolusi pankromatik 0.82 meter (sering dibulatkan menjadi 1 meter) dan multispektral 3.2 meter (atau 4 meter).
 - QuickBird: Menyediakan resolusi spasial pankromatik 0.61 meter

dan multispektral 2.4 meter.

- SPOT-6/7: Memiliki resolusi pankromatik 1.5 meter dan multispektral 6 meter.
- Resolusi Menengah (10 meter hingga 30 meter): Sensor-sensor ini cocok untuk pemetaan tutupan lahan skala regional, pemantauan sumber daya alam, dan analisis bencana alam.
 - Landsat 8 (Sensor OLI): Menyediakan band pankromatik dengan resolusi 15 meter dan band multispektral dengan resolusi 30 meter.
 - Sentinel-2 (Sensor MSI): Merupakan bagian dari program Copernicus Uni Eropa, menyediakan band multispektral dengan resolusi spasial yang bervariasi: 10 meter (untuk band tampak dan inframerah dekat tertentu), 20 meter (untuk band *red-edge* dan inframerah gelombang pendek), dan 60 meter (untuk band atmosferik).
- Resolusi Rendah (lebih dari 30 meter): Sensor-sensor ini umumnya digunakan untuk monitoring lingkungan global, seperti tutupan awan, suhu permukaan laut, dan indeks vegetasi skala luas.
 - MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): Terpasang pada satelit Terra dan Aqua, memiliki resolusi spasial yang bervariasi tergantung band: 250 meter (untuk band 1-2), 500 meter (untuk band 3-7), dan 1 kilometer (untuk band 8-36).
 - AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer): Terpasang pada satelit NOAA, memiliki resolusi spasial sekitar 1.1 kilometer pada titik nadir.

Perbedaan resolusi spasial ini akan sangat memengaruhi tampilan visual dan kemampuan analisis citra. Sebagai contoh, jika kita mengamati area Monumen Nasional (Monas) di Jakarta menggunakan citra dari satelit

yang berbeda, perbedaannya akan jelas terlihat. Pada citra Landsat (resolusi spasial 30 meter untuk multispektral), Monas mungkin hanya terlihat sebagai sebuah titik atau area kecil yang kurang detail, dan bangunan-bangunan di sekitarnya akan sulit dibedakan satu sama lain. Dengan citra SPOT (resolusi spasial 20 meter untuk multispektral pada SPOT-4), detail Monas dan bangunan-bangunan di sekitarnya akan mulai terlihat lebih jelas, dengan bentuk yang lebih tegas. Namun, jika kita menggunakan citra IKONOS (resolusi spasial 1 meter untuk pankromatik yang dapat dipertajam dengan multispektral 4 meter), maka Monas akan terlihat sangat detail, bahkan struktur individual, jalan-jalan kecil, kendaraan, dan vegetasi di sekitarnya dapat teridentifikasi dengan jelas. Analogi sederhananya, melihat citra resolusi spasial rendah seperti melihat sebuah kota dari pesawat yang sangat tinggi, di mana hanya blok-blok besar yang terlihat. Seiring dengan peningkatan resolusi spasial, seolah-olah kita terbang lebih rendah, sehingga detail-detail yang lebih kecil mulai tampak jelas.

Pemilihan resolusi spasial yang tepat sangat bergantung pada tujuan aplikasi penginderaan jauh:

- Detail Halus vs. Cakupan Luas: Resolusi spasial tinggi (misalnya, < 5 meter) sangat penting untuk aplikasi yang membutuhkan identifikasi objek secara detail, seperti pemetaan skala besar, perencanaan kota, inventarisasi infrastruktur (jalan, jembatan, jaringan utilitas), pemantauan konstruksi, pertanian presisi (misalnya, identifikasi pohon individu atau baris tanaman), dan intelijen. Sebagai contoh konkret, penelitian telah menunjukkan keberhasilan penggunaan citra satelit resolusi spasial tinggi (seperti dari Google Earth yang resolusinya bervariasi namun bisa sangat tinggi di beberapa area) dan foto udara dari wahana tanpa awak (drone) untuk melakukan

penghitungan otomatis pohon kelapa sawit (*automatic palm counting*) di area perkebunan.

- Pemetaan Regional dan Global: Untuk aplikasi yang mencakup area yang sangat luas, seperti pemetaan tutupan lahan nasional atau global, pemantauan deforestasi skala besar, analisis perubahan iklim, atau pemantauan sumber daya alam di tingkat regional, resolusi spasial menengah (misalnya, 10-30 meter seperti Landsat atau Sentinel-2) atau bahkan resolusi spasial rendah (misalnya, >250 meter seperti MODIS) seringkali lebih sesuai dan efisien. Sensor dengan resolusi spasial lebih rendah biasanya memiliki lebar sapuan (*swath width*) yang lebih besar, memungkinkannya untuk mencakup area yang lebih luas dalam satu kali lintasan orbit.
- Biaya dan Volume Data: Secara umum, citra dengan resolusi spasial yang lebih tinggi cenderung lebih mahal untuk diakuisisi, terutama data komersial. Selain itu, resolusi spasial yang lebih tinggi berarti jumlah piksel per unit area juga lebih banyak, yang menghasilkan volume data (ukuran file) yang jauh lebih besar. Hal ini membawa implikasi pada kebutuhan kapasitas penyimpanan, kemampuan pemrosesan komputasi, dan waktu analisis. Oleh karena itu, pemilihan resolusi spasial juga melibatkan pertimbangan praktis terkait anggaran dan sumber daya komputasi yang tersedia.

Resolusi spasial secara inheren terkait dengan konsep skala dalam kartografi dan analisis geospasial. Citra dengan resolusi spasial tinggi, yang mampu menangkap detail objek kecil, lebih cocok untuk analisis dan pembuatan peta pada skala besar (misalnya, skala 1:2.500 hingga 1:10.000). Sebagai contoh, citra QuickBird dengan resolusi spasial 61 cm mampu menyajikan penampakan objek yang cukup ideal untuk ditampilkan pada peta skala 1:2.500. Sebaliknya, citra dengan resolusi

spasial menengah atau rendah lebih sesuai untuk analisis dan pemetaan pada skala kecil (misalnya, skala 1:50.000, 1:250.000, atau bahkan lebih kecil), di mana fokusnya adalah pada pola-pola umum di area yang luas. Pemahaman akan hubungan antara resolusi spasial citra dan skala peta yang representatif ini sangat penting bagi mahasiswa agar dapat memilih data yang tepat dan memahami batasan serta potensi penggunaan citra untuk tujuan pemetaan tertentu.

Perkembangan teknologi sensor penginderaan jauh telah menyaksikan evolusi yang dramatis dalam hal peningkatan resolusi spasial. Jika pada era awal satelit sumber daya alam seperti Landsat generasi pertama resolusi spasialnya berada pada puluhan meter, kini telah tersedia data komersial dengan resolusi spasial sub-meter dari satelit seperti WorldView, GeoEye, dan Pleiades. Peningkatan resolusi spasial ini telah membuka pintu bagi berbagai aplikasi baru yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan dengan penginderaan jauh, memungkinkan analisis yang jauh lebih detail dan presisi. Meskipun demikian, aksesibilitas terhadap citra resolusi sangat tinggi, terutama dari segi biaya dan lisensi penggunaan, masih menjadi tantangan bagi sebagian besar pengguna, khususnya di kalangan akademisi atau lembaga dengan anggaran terbatas. Namun, di sisi lain, terdapat tren positif dengan semakin meningkatnya ketersediaan data citra resolusi menengah secara gratis dan terbuka, seperti data dari program Landsat dan Copernicus Sentinel, yang sangat mendorong pemanfaatan penginderaan jauh secara lebih luas. Dinamika antara kemajuan teknologi yang menawarkan resolusi lebih tinggi dan model bisnis serta kebijakan data yang memengaruhi aksesibilitas ini menunjukkan bahwa pemilihan sensor tidak hanya merupakan keputusan teknis, tetapi juga melibatkan pertimbangan ekonomis dan kebijakan.

4.3 Resolusi Spektral

Resolusi spektral berkaitan dengan kemampuan sensor dalam membedakan perbedaan karakteristik spektral objek di permukaan Bumi. Definisi resolusi spektral ini merupakan jawaban atas pertanyaan: seberapa sempit rentang panjang gelombang (*wavelength*) yang dapat direkam oleh sensor, atau berapa banyak *spectral band* (saluran spektral) yang dimiliki oleh sebuah sensor?. Lebih tepatnya, resolusi spektral mengacu pada kemampuan sensor untuk mendeteksi dan membedakan energi elektromagnetik pada interval panjang gelombang yang berbeda dan spesifik. Kemampuan ini ditentukan oleh dua faktor utama: jumlah band spektral yang dimiliki oleh sensor dan lebar (*bandwidth*) dari masing-masing band tersebut. Semakin banyak jumlah band spektral yang dimiliki dan semakin sempit *bandwidth* setiap band, maka semakin tinggi resolusi spektralnya. Hal ini memungkinkan sensor untuk menangkap informasi spektral yang lebih detail dan akurat dari objek yang diamati.

Berdasarkan kemampuan resolusi spektralnya, sensor penginderaan jauh dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama:

- Sensor Pankromatik: Sensor jenis ini merekam energi elektromagnetik pada satu band spektral yang lebar, biasanya mencakup sebagian besar spektrum cahaya tampak (misalnya, dari biru hingga merah) dan terkadang meluas hingga sebagian spektrum inframerah dekat. Citra yang dihasilkan oleh sensor pankromatik adalah citra hitam-putih (*grayscale*). Keunggulan utama dari band pankromatik adalah resolusi spasialnya yang umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan band multispektral dari sensor yang sama pada satelit yang sama. Contoh band pankromatik adalah Band 8 pada sensor OLI satelit Landsat 8.
- Sensor Multispektral: Sensor multispektral dirancang untuk merekam

energi elektromagnetik dalam beberapa band spektral yang lebih sempit dan terpisah satu sama lain. Jumlah band pada sensor multispektral umumnya berkisar antara 3 hingga belasan band. Setiap band sensitif terhadap rentang panjang gelombang tertentu, seperti merah, hijau, biru, inframerah dekat, inframerah gelombang pendek, dan kadang-kadang inframerah termal. Contoh sensor multispektral meliputi sensor OLI pada Landsat 8 (memiliki 9 band spektral untuk OLI, ditambah 2 band termal pada TIRS), sensor MSI pada Sentinel-2 (13 band spektral), dan sensor pada WorldView-4 (8 band multispektral selain band pankromatiknya).

- **Sensor Hiperspektral:** Ini merupakan kategori sensor dengan resolusi spektral tertinggi. Sensor hiperspektral mampu merekam energi elektromagnetik dalam ratusan band spektral yang sangat sempit dan berdekatan secara kontinu (contiguous). Hasilnya adalah kemampuan untuk menghasilkan kurva spektral yang sangat detail (mirip sidik jari spektral) untuk setiap piksel dalam citra. Contoh sensor hiperspektral yang terkenal adalah AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) yang dioperasikan oleh NASA dengan 224 band. Meskipun sudah tidak aktif, sensor Hyperion pada satelit EO-1 juga merupakan contoh penting sensor hiperspektral berbasis ruang angkasa. Sensor airborne lainnya seperti HyMap juga termasuk dalam kategori ini, misalnya dengan 126 band. Sensor MODIS, dengan 36 band spektralnya, kadang-kadang disebut sebagai sensor "super-spektral" karena jumlah bandnya yang signifikan, menjembatani antara multispektral konvensional dan hiperspektral.

Perbedaan kemampuan resolusi spektral ini akan sangat memengaruhi jenis informasi yang dapat diekstrak dari citra. Citra pankromatik, dengan resolusi spasialnya yang tinggi, sangat baik untuk

melihat detail bentuk dan struktur objek. Citra multispektral memungkinkan kita untuk membuat komposit warna, baik warna alami (menggunakan band biru, hijau, dan merah) maupun warna palsu (misalnya, menggunakan band inframerah dekat, merah, dan hijau untuk menonjolkan vegetasi), serta melakukan analisis kuantitatif berdasarkan nilai pantulan pada beberapa bagian spektrum. Sementara itu, citra hiperspektral, dengan kekayaan informasi spektralnya, membuka peluang untuk identifikasi material yang sangat spesifik berdasarkan "sidik jari" spektral uniknya, yang tidak mungkin dilakukan dengan sensor pankromatik atau multispektral konvensional.

Semakin tinggi resolusi spektral suatu sensor, semakin baik kemampuannya untuk berbagai aplikasi analisis, terutama yang berkaitan dengan identifikasi dan karakterisasi material:

- Identifikasi Objek yang Lebih Akurat: Resolusi spektral yang lebih tinggi memungkinkan sensor untuk membedakan objek-objek yang mungkin tampak serupa dalam spektrum cahaya tampak (misalnya, memiliki warna yang mirip bagi mata manusia), tetapi menunjukkan respons spektral yang berbeda pada panjang gelombang lain, seperti inframerah dekat atau inframerah gelombang pendek. Kemampuan ini sangat bermanfaat untuk membedakan berbagai jenis vegetasi, formasi batuan atau mineral, jenis material atap bangunan, atau bahkan tingkat kesehatan vegetasi.
- Analisis Komposisi Material: Sensor dengan resolusi spektral tinggi, khususnya sensor hiperspektral, memungkinkan dilakukannya analisis komposisi kimia atau fisik suatu material berdasarkan karakteristik penyerapan dan pemantulan spektral yang sangat detail. Setiap material memiliki pola interaksi yang unik dengan energi elektromagnetik pada berbagai panjang gelombang, yang sering disebut sebagai "sidik jari spektral". Sensor hiperspektral mampu

merekam sidik jari ini dengan presisi tinggi. Aplikasi utamanya meliputi bidang geologi (untuk identifikasi jenis mineral dan eksplorasi sumber daya), pertanian (untuk menentukan kandungan klorofil, tingkat stres air pada tanaman, atau defisiensi nutrisi), kehutanan (identifikasi spesies pohon), dan pemantauan lingkungan (misalnya, deteksi jenis polutan tertentu dalam air atau tanah, pemetaan kualitas air).

- Studi Kasus Kesehatan Vegetasi: Salah satu aplikasi yang paling umum dan penting dari resolusi spektral adalah dalam analisis kesehatan dan kondisi vegetasi. Band-band spektral tertentu pada citra multispektral, terutama band merah (di mana klorofil menyerap energi) dan band inframerah dekat (di mana struktur sel daun memantulkan energi dengan kuat), digunakan untuk menghitung berbagai indeks vegetasi, seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). NDVI merupakan indikator yang baik untuk kehijauan, kepadatan, dan kesehatan vegetasi. Data hiperspektral dapat memberikan analisis yang lebih mendalam lagi, memungkinkan deteksi stres tanaman pada tahap awal atau identifikasi spesies secara lebih akurat. Sebagai contoh, sebuah penelitian menggunakan data dari sensor MODIS (yang memiliki 36 band) untuk melakukan pemetaan Indeks Kesehatan Vegetasi (VHI) di Provinsi Bali. VHI ini dihitung berdasarkan kombinasi beberapa indeks turunan seperti NDVI, Suhu Permukaan Tanah (LST), *Vegetation Condition Index* (VCI), dan *Temperature Condition Index* (TCI) untuk menilai kondisi kekeringan dan dampaknya pada vegetasi. Studi lain memanfaatkan data Sentinel-2, dengan band-band spesifiknya di area *red-edge* (tepi merah), untuk melakukan analisis kesehatan vegetasi berdasarkan NDVI dengan lebih sensitif.

Kemampuan resolusi spektral yang tinggi adalah kunci untuk memanfaatkan konsep fundamental dalam penginderaan jauh yang dikenal sebagai "sidik jari spektral" (*spectral signature*). Setiap material atau objek di permukaan Bumi memiliki pola pantulan dan serapan energi elektromagnetik yang unik di berbagai panjang gelombang. Pola unik inilah yang diibaratkan sebagai sidik jari. Semakin detail resolusi spektral suatu sensor (yaitu, semakin banyak jumlah band spektral yang sempit dan berdekatan), maka semakin akurat dan lengkap "sidik jari" spektral ini dapat direkam dan dianalisis. Analogi dengan sidik jari manusia sangat tepat di sini: sebagaimana sidik jari manusia bersifat unik untuk setiap individu dan dapat digunakan untuk identifikasi, demikian pula sidik jari spektral dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan membedakan berbagai material di permukaan Bumi. Sensor dengan resolusi spektral rendah mungkin hanya menangkap gambaran kasar dari sidik jari ini, sementara sensor hiperspektral dapat mengungkap nuansa-nuansa halus yang membedakan satu material dari material lainnya yang sangat mirip.

Peningkatan resolusi spektral, terutama dengan kemunculan dan pengembangan sensor hiperspektral, telah mendorong pergeseran paradigma dalam aplikasi penginderaan jauh. Jika sebelumnya fokus utama adalah pada klasifikasi tutupan lahan secara kualitatif (misalnya, membedakan antara hutan, air, lahan terbangun, dan pertanian), kini penginderaan jauh semakin mampu melakukan estimasi parameter biofisik dan biogeokimia secara kuantitatif. Contohnya termasuk estimasi kandungan klorofil per unit luas daun (*Leaf Area Index - LAI*), konsentrasi sedimen tersuspensi dalam air, identifikasi jenis mineral spesifik beserta kelimpahannya, atau bahkan kandungan air dalam vegetasi. Kemampuan untuk mengukur parameter-parameter ini secara langsung dari data spektral, bukan hanya sekadar mengklasifikasikan objek, merupakan lompatan signifikan. Ini mengubah peran penginderaan jauh dari alat

pemetaan yang cenderung kualitatif menjadi alat pengukuran kuantitatif yang canggih, membuka pintu untuk pengembangan model-model lingkungan yang lebih kompleks dan akurat, serta pemahaman yang lebih mendalam tentang proses-proses yang terjadi di Bumi.

4.4 Resolusi Temporal

Resolusi temporal dalam penginderaan jauh mengacu pada frekuensi atau interval waktu yang diperlukan oleh sensor untuk merekam data pada lokasi geografis yang sama di permukaan Bumi. Faktor ini menentukan seberapa sering suatu area dapat diamati oleh sensor, atau dengan kata lain, seberapa sering sensor tersebut kembali merekam data untuk area yang sama. Istilah lain yang sering digunakan untuk resolusi temporal adalah waktu kunjungan ulang (*revisit time*) atau frekuensi liputan. Semakin tinggi resolusi temporal (yang berarti interval waktu antar perekaman semakin pendek), semakin sering suatu area dapat dipantau. Hal ini sangat krusial untuk mengamati dan menganalisis fenomena yang berubah dengan cepat, seperti progresivitas bencana alam (misalnya, penyebaran kebakaran hutan atau luasan genangan banjir), dinamika pertumbuhan tanaman sepanjang musim tanam, perubahan penggunaan lahan yang cepat di wilayah perkotaan, atau perubahan tutupan salju dan es.

Frekuensi perekaman data ini sangat bervariasi antar sistem satelit. Beberapa satelit, khususnya satelit cuaca yang berada di orbit geostasioner, mampu menyediakan data dengan resolusi temporal yang sangat tinggi, mulai dari hitungan menit hingga jam, karena mereka secara kontinu mengamati wilayah Bumi yang sama. Sebaliknya, satelit yang mengorbit secara polar, seperti Landsat, memiliki siklus ulang yang tetap, misalnya setiap 16 hari untuk Landsat 8/9.

Berikut adalah beberapa contoh satelit dan karakteristik resolusi

temporalnya:

- Landsat 8/9: Satu satelit Landsat memiliki resolusi temporal 16 hari. Dengan adanya dua satelit (Landsat 8 dan Landsat 9) yang beroperasi bersama dalam konstelasi, frekuensi observasi untuk area tertentu dapat meningkat menjadi setiap 8 hari.
- MODIS (Terra dan Aqua): Kedua satelit ini bekerja bersama untuk menyediakan liputan harian untuk sebagian besar permukaan Bumi.
- Sentinel-2 (A dan B): Konstelasi dua satelit Sentinel-2 (Sentinel-2A dan Sentinel-2B) memungkinkan resolusi temporal sekitar 5 hari di wilayah ekuator. Di lintang yang lebih tinggi, frekuensi kunjungan bisa lebih sering karena adanya tumpang tindih antar jalur orbit yang berdekatan.
- Sentinel-1 (Radar, A dan B): Konstelasi Radar Sentinel-1 juga terdiri dari dua satelit, mampu mencapai resolusi temporal hingga 6 hari secara global, dan bahkan bisa lebih cepat (kurang dari sehari) di beberapa wilayah prioritas seperti Eropa dengan menggabungkan mode observasi yang berbeda.
- Satelit Cuaca Geostasioner (misalnya, GOES, Himawari, Meteosat): Satelit-satelit ini "mengapung" di atas titik yang sama di ekuator pada ketinggian sekitar 36.000 km, memungkinkan pemantauan kontinu terhadap suatu belahan Bumi dengan resolusi temporal sangat tinggi, bisa setiap 10-15 menit atau bahkan lebih cepat untuk pemindaian area terbatas.
- Satelit Resolusi Spasial Sangat Tinggi (misalnya, Pleiades, WorldView, GeoEye): Waktu kunjungan ulang nominalnya bisa berkisar antara 1 hingga 3 hari, atau bahkan kurang dari sehari. Namun, ini sangat bergantung pada kemampuan sensor untuk melakukan *pointing* (mengarahkan sensor ke target di luar jalur nadir) dan jumlah satelit dalam konstelasi yang dioperasikan oleh vendor.

Beberapa faktor utama yang dapat mempengaruhi resolusi temporal suatu sistem satelit penginderaan jauh antara lain:

- Karakteristik Orbit Satelit: Ketinggian orbit adalah salah satu faktor penentu. Satelit dengan orbit yang lebih rendah (misalnya, *Low Earth Orbit* - LEO, berkisar beberapa ratus hingga seribu kilometer) cenderung mengelilingi Bumi lebih cepat dibandingkan satelit di orbit yang lebih tinggi, sehingga berpotensi memiliki resolusi temporal yang lebih tinggi untuk sistem *nadir-viewing*. Inklinasi orbit juga berperan; satelit polar-orbiting dirancang untuk melintasi hampir seluruh permukaan Bumi seiring rotasi Bumi, sementara satelit geostasioner tetap berada di atas area yang sama.
- Luas Liputan Sensor (*Swath Width*): *Swath width* adalah lebar area di permukaan tanah yang dapat direkam oleh sensor dalam satu kali lintasan. Sensor dengan *swath width* yang lebih lebar akan mampu mencakup area yang lebih luas, sehingga secara teoritis dapat meningkatkan frekuensi liputan global atau mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk meliput kembali area yang sama.
- Kemampuan *Pointing* Sensor (Pengarahan Sensor): Beberapa sensor satelit, terutama yang memiliki resolusi spasial tinggi, dilengkapi dengan kemampuan untuk diarahkan ke samping (menyimpang dari titik nadir atau *off-nadir viewing*). Kemampuan ini memungkinkan sensor untuk merekam area yang tidak berada tepat di bawah jalur terbang satelit, sehingga secara signifikan dapat meningkatkan peluang untuk merekam suatu target spesifik lebih sering daripada siklus orbit nominalnya.²¹ Contoh satelit dengan kemampuan ini adalah SPOT dan IKONOS.
- Jumlah Satelit dalam Konstelasi: Mengoperasikan beberapa satelit yang identik atau komplementer dalam sebuah formasi konstelasi

adalah strategi yang sangat efektif untuk meningkatkan resolusi temporal secara signifikan. Dengan lebih banyak satelit yang melintasi area yang sama pada waktu yang berbeda, interval waktu antar akuisisi data dapat dipersingkat. Program Copernicus dengan konstelasi Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3) adalah contoh utama dari pendekatan ini.

Resolusi temporal yang tepat adalah kunci keberhasilan berbagai aplikasi penginderaan jauh, terutama yang berfokus pada pemantauan perubahan, seperti:

- Manajemen Bencana Alam: Untuk bencana yang berkembang cepat seperti banjir, kebakaran hutan, erupsi gunung berapi, atau badai, ketersediaan citra satelit secara *near real-time* atau dengan interval yang sangat pendek sangat vital. Data ini digunakan untuk pemetaan area terdampak, pemantauan perkembangan bencana, perencanaan evakuasi, penilaian kerusakan pasca-bencana, dan mendukung upaya respons darurat serta bantuan kemanusiaan.
- Aplikasi Pertanian: Dalam bidang pertanian, resolusi temporal tinggi memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap fase pertumbuhan tanaman sepanjang musim tanam. Ini membantu dalam deteksi dini stres tanaman (akibat kekeringan, serangan hama atau penyakit), optimalisasi jadwal irigasi dan pemupukan, serta prediksi hasil panen yang lebih akurat.
- Pemantauan Perubahan Penggunaan Lahan: Analisis dinamika perubahan penggunaan lahan, seperti laju urbanisasi, deforestasi, ekspansi lahan pertanian, atau perubahan garis pantai, sangat bergantung pada ketersediaan data citra dari rentang waktu yang berbeda. Resolusi temporal yang memadai memungkinkan pelacakan perubahan ini secara periodik.

- Meteorologi dan Klimatologi: Satelit cuaca, terutama yang berada di orbit geostasioner, menyediakan data dengan resolusi temporal sangat tinggi yang esensial untuk pemantauan pembentukan dan pergerakan tutupan awan, sistem badai, suhu permukaan laut, dan parameter atmosfer lainnya. Data ini menjadi masukan penting untuk prakiraan cuaca dan model iklim.

Resolusi temporal merupakan fondasi dari salah satu teknik analisis penginderaan jauh yang paling kuat dan banyak digunakan, yaitu "deteksi perubahan" (*change detection*). Teknik ini melibatkan perbandingan dan analisis perbedaan antara dua atau lebih citra dari area yang sama yang diakuisisi pada waktu yang berbeda. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi, mengkuantifikasi, dan memetakan perubahan yang telah terjadi di permukaan Bumi selama interval waktu tersebut. Keberhasilan deteksi perubahan sangat bergantung pada ketersediaan data historis yang konsisten dan memiliki resolusi temporal yang sesuai dengan laju perubahan fenomena yang diamati. Oleh karena itu, keberadaan arsip data penginderaan jauh jangka panjang, seperti dari program Landsat yang telah beroperasi selama beberapa dekade, menjadi sumber daya yang tak ternilai untuk studi perubahan lingkungan global dan lokal.

Dengan semakin meningkatnya resolusi temporal, terutama melalui peluncuran konstelasi satelit yang terdiri dari banyak sensor, volume data penginderaan jauh yang dihasilkan juga meningkat secara eksponensial. Ini menciptakan tantangan signifikan dalam hal penyimpanan data, transmisi, pemrosesan, dan analisis, khususnya untuk data deret waktu (*time-series data*) yang panjang dan padat. Namun, di sisi lain, ketersediaan data deret waktu dengan resolusi temporal tinggi ini juga membuka peluang yang luar biasa untuk memahami proses-proses dinamis di Bumi dengan tingkat detail dan kompleksitas yang sebelumnya tidak mungkin teramati.

Fenomena dengan variabilitas temporal yang halus atau perubahan episodik yang singkat kini dapat ditangkap dan dianalisis. Untuk mengatasi tantangan data besar (*Big Data*) ini dan mengekstrak informasi yang bermakna, platform komputasi awan (seperti Google Earth Engine, Amazon Web Services) dan penerapan algoritma *machine learning* serta *deep learning* menjadi semakin penting dan tidak terpisahkan dari praktik penginderaan jauh modern.

4.5 Resolusi Radiometrik

Resolusi radiometrik dalam penginderaan jauh menunjukkan sensitivitas sensor dalam membedakan perbedaan tingkat energi elektromagnetik yang direkam. Resolusi ini secara fundamental berkaitan dengan berapa banyak bit yang digunakan untuk merepresentasikan nilai kecerahan (atau intensitas energi) setiap piksel pada citra. Semakin tinggi resolusi radiometrik, yang berarti semakin banyak bit yang digunakan per piksel, maka semakin banyak tingkatan energi atau gradasi kecerahan yang dapat dibedakan oleh sensor. Hal ini menghasilkan representasi objek dan fitur permukaan Bumi yang lebih detail dan halus pada citra, terutama dalam membedakan fitur-fitur dengan kontras rendah atau variasi pantulan energi yang subtil.

Jumlah tingkatan energi yang dapat direkam oleh sensor ditentukan oleh jumlah bit (n) yang dialokasikan untuk setiap piksel, dengan rumus 2^n . Nilai ini sering disebut sebagai *bit depth*. Setiap tingkatan energi ini kemudian direpresentasikan sebagai sebuah nilai digital atau *Digital Number (DN)*, yang juga dikenal sebagai *pixel value*, *digital count*, atau *grayscale value*.

Sebagai ilustrasi, sebagian besar kamera digital yang beredar saat ini dan beberapa sensor satelit generasi lama menggunakan resolusi radiometrik 8-bit. Sensor 8-bit, seperti yang terdapat pada satelit Landsat 7

(sensor ETM+), menggunakan 8 bit untuk merekam data pada setiap piksel. Hal ini berarti sensor tersebut dapat membedakan 28, atau 256, tingkat kecerahan yang berbeda. Nilai DN untuk citra 8-bit biasanya berkisar dari 0 (merekam intensitas energi terendah, seringkali ditampilkan sebagai hitam) hingga 255 (merekam intensitas energi tertinggi, seringkali ditampilkan sebagai putih).

Peningkatan signifikan dalam resolusi radiometrik dapat ditemukan pada sensor-sensor yang lebih modern. Sebagai contoh:

- Sensor dengan 11-bit *depth*, seperti pada satelit IKONOS dan QuickBird, mampu merekam 211 atau 2.048 tingkat kecerahan. Satelit WorldView-4 juga memiliki resolusi radiometrik 11-bit.
- Sensor dengan 12-bit *depth*, seperti pada sensor OLI (Operational Land Imager) di satelit Landsat 8 (data asli direkam dalam 12-bit meskipun dikirimkan dalam format 16-bit), sensor MODIS, dan sensor MSI pada Sentinel-2, mampu merekam 2^{12} atau 4.096 tingkat kecerahan.
- Ketika data dikirimkan atau disimpan dalam format 16-bit, seperti pada produk data Landsat 8, sensor tersebut secara efektif mampu merepresentasikan hingga 2^{16} atau 65.536 tingkat kecerahan. Ini menghasilkan detail dan gradasi warna atau skala abu-abu yang jauh lebih baik pada citra dibandingkan dengan sensor 8-bit (USGS 2013).

Kemampuan untuk merekam rentang nilai kecerahan yang lebih luas ini sangat penting, terutama dalam aplikasi yang memerlukan sensitivitas tinggi terhadap variasi halus dalam energi elektromagnetik. Contohnya termasuk analisis vegetasi (misalnya, membedakan stres ringan pada tanaman), identifikasi mineral (di mana perbedaan spektral antar mineral bisa sangat tipis), pemantauan kualitas air (mendeteksi perbedaan konsentrasi material terlarut atau tersuspensi), dan deteksi perubahan

tutupan lahan yang bersifat gradual.

Penting untuk dicatat bahwa kenaikan resolusi radiometrik ini berbanding lurus dengan kenaikan volume data atau memori yang dibutuhkan untuk menyimpan data citra. Jika sebuah citra 8-bit membutuhkan sejumlah X memori untuk area tertentu, maka citra 16-bit untuk area yang sama dengan resolusi spasial dan spektral yang identik akan membutuhkan sekitar $2X$ memori penyimpanan, karena setiap pikselnya menyimpan informasi dua kali lebih banyak.

Untuk memvisualisasikan perbedaan resolusi radiometrik, bayangkan sebuah gambar skala abu-abu (*grayscale*). Pada citra dengan resolusi radiometrik rendah (misalnya, 4-bit, yang hanya memiliki $2^4=16$ tingkatan abu-abu), transisi antara area gelap dan terang akan terlihat sangat kasar dan bertangga (efek *banding* atau *posterization*). Seiring dengan peningkatan resolusi radiometrik menjadi 8-bit (256 tingkatan abu-abu), gradasi akan terlihat jauh lebih halus. Pada resolusi 16-bit (65.536 tingkatan abu-abu), gradasi akan tampak sangat halus dan kontinu, memungkinkan detail-detail halus pada area yang sangat gelap (bayangan) atau sangat terang (area jenuh) untuk tetap dapat dibedakan. USGS menyediakan contoh visual yang baik yang membandingkan citra Chicago, Illinois, dalam resolusi radiometrik 4-bit, 8-bit, dan 16-bit, di mana peningkatan detail dan kehalusan gradasi sangat jelas terlihat pada resolusi yang lebih tinggi.

Peningkatan sensitivitas yang ditawarkan oleh resolusi radiometrik tinggi membawa manfaat signifikan dalam berbagai bidang aplikasi, diantaranya:

- Pemantauan Kualitas Air: Perbedaan subtil dalam warna air dapat mengindikasikan variasi konsentrasi sedimen tersuspensi, keberadaan klorofil-a (indikator *algal bloom*), atau adanya polutan tertentu. Sensor dengan resolusi radiometrik tinggi lebih mampu menangkap

perbedaan warna air yang tipis ini, yang mungkin terlewatkan oleh sensor dengan resolusi radiometrik lebih rendah.

- Analisis Vegetasi Detail: Dalam studi vegetasi, resolusi radiometrik tinggi memungkinkan pembedaan kondisi kesehatan vegetasi yang sedikit berbeda, deteksi stres tanaman pada tahap awal sebelum terlihat secara visual oleh mata manusia, atau identifikasi variasi kecil dalam jenis vegetasi berdasarkan respons spektral yang terekam lebih akurat.
- Pemetaan Batimetri Perairan Dangkal: Untuk memetakan kedalaman perairan dangkal menggunakan data optik, sensor perlu mendeteksi variasi pantulan energi dari dasar perairan yang telah melewati kolom air. Resolusi radiometrik yang tinggi meningkatkan kemampuan sensor untuk menangkap sinyal lemah ini dan membedakan variasi pantulan yang halus, sehingga membantu dalam estimasi kedalaman yang lebih akurat. Penelitian yang menggunakan citra WorldView-3 dan Sentinel-2A menunjukkan potensi citra resolusi tinggi (yang juga mencakup resolusi radiometrik tinggi) untuk pemetaan kedalaman pada rentang 0-5 meter.
- Studi Atmosfer dan Awan: Dalam aplikasi meteorologi dan klimatologi, resolusi radiometrik tinggi dapat membantu dalam membedakan tipe-tipe awan yang berbeda dengan lebih baik, atau mengkarakterisasi properti aerosol di atmosfer berdasarkan variasi halus dalam radian yang diukur.

Manfaat utama dari resolusi radiometrik yang tinggi sejatinya melampaui sekadar peningkatan kualitas visual citra menjadi lebih halus. Yang lebih fundamental adalah kemampuannya untuk mendukung analisis kuantitatif yang lebih sensitif dan akurat. Dengan lebih banyaknya level diskriminasi nilai digital, model-model matematis yang digunakan untuk

menghubungkan nilai piksel dengan parameter biofisik atau geofisik di permukaan Bumi (seperti suhu permukaan, konsentrasi klorofil, kandungan mineral, atau indeks vegetasi) dapat menjadi lebih presisi. Jika nilai digital (DN) yang direkam oleh sensor lebih sensitif terhadap perubahan kecil dalam energi yang diterima, maka nilai-nilai fisik yang diturunkan dari DN tersebut melalui proses kalibrasi juga akan lebih sensitif dan berpotensi memiliki akurasi yang lebih tinggi. Ini berarti, peningkatan resolusi radiometrik bukan hanya soal estetika tampilan citra, tetapi lebih kepada peningkatan presisi dan keandalan dalam pengukuran kuantitatif menggunakan data penginderaan jauh.

Namun, untuk benar-benar dapat memanfaatkan potensi penuh dari resolusi radiometrik yang tinggi, proses kalibrasi sensor yang akurat dan konsisten memegang peranan yang sangat krusial. Tanpa kalibrasi radiometrik yang baik, peningkatan *bit depth* mungkin tidak sepenuhnya dapat diterjemahkan menjadi peningkatan kualitas informasi ilmiah yang diekstrak. Nilai digital mentah (DN) yang direkam oleh sensor perlu dikonversi secara akurat menjadi unit-unit fisik yang bermakna dan standar (seperti radian atau reflektansi) melalui serangkaian prosedur kalibrasi. Proses ini menghilangkan atau mengurangi efek variasi sensor dan atmosfer. Sebagai contoh, metadata yang menyertai produk data Landsat 8 menyediakan koefisien kalibrasi yang memungkinkan pengguna untuk mengubah nilai DN menjadi reflektansi pada puncak atmosfer (TOA) atau radian spektral. Jika proses kalibrasi ini tidak dilakukan dengan cermat atau jika sensor mengalami degradasi sensitivitas dari waktu ke waktu yang tidak dikoreksi, maka sensitivitas yang lebih tinggi yang secara teoritis ditawarkan oleh *bit depth* yang lebih besar dapat tertutupi oleh *noise* (derau) atau bias sistematis dalam data. Oleh karena itu, resolusi radiometrik yang tinggi dan praktik kalibrasi radiometrik yang cermat harus berjalan beriringan untuk memastikan dihasilkannya data

penginderaan jauh yang berkualitas tinggi dan dapat diandalkan untuk analisis ilmiah.

4.6 Interaksi dan *Trade-off* Antar Resolusi

Keempat jenis resolusi dalam penginderaan jauh—spasial, spektral, temporal, dan radiometrik—tidaklah bersifat independen satu sama lain. Sebaliknya, seringkali terdapat hubungan timbal balik atau *trade-off* yang kompleks di antara mereka. *Trade-off* ini muncul akibat batasan-batasan fundamental dalam fisika energi, teknologi sensor, kendala rekayasa dalam desain satelit (seperti ukuran, berat, daya, dan biaya), serta volume data yang dapat ditangani. Memahami berbagai *trade-off* ini sangat penting bagi pengguna data penginderaan jauh, karena hal ini akan memengaruhi pemilihan jenis sensor atau citra yang paling sesuai untuk aplikasi tertentu dan membantu dalam menginterpretasikan data dengan benar, serta menyadari batasan-batasan yang ada.

Berikut adalah beberapa *trade-off* utama yang umum dijumpai:

- **Resolusi Spasial vs. Resolusi Temporal:** Secara umum, terdapat hubungan terbalik antara resolusi spasial dan resolusi temporal. Sensor yang dirancang untuk menghasilkan citra dengan resolusi spasial sangat tinggi (misalnya, piksel berukuran sub-meter hingga beberapa meter) biasanya memiliki lebar sapuan (*swath width*) yang relatif sempit. Akibatnya, untuk dapat mencakup area permukaan Bumi yang luas atau untuk dapat mengunjungi kembali lokasi yang sama, sensor tersebut memerlukan lebih banyak waktu atau lebih banyak lintasan orbit. Hal ini menyebabkan resolusi temporalnya cenderung lebih rendah (interval waktu antar kunjungan lebih lama). Sebaliknya, sensor yang diprioritaskan untuk memiliki resolusi temporal tinggi (misalnya, satelit pemantau cuaca seperti MODIS atau satelit geostasioner) seringkali harus mengorbankan resolusi

spasialnya. Sensor-sensor ini memiliki piksel yang lebih besar (resolusi spasial lebih rendah) agar dapat mencakup area yang sangat luas dengan cepat dan sering. Sebagai contoh, satelit resolusi sangat tinggi seperti Pleiades mungkin memerlukan beberapa hari untuk dapat merekam kembali lokasi yang sama (jika hanya mengandalkan lintasan orbit nadir dan tanpa kemampuan pengarah sensor yang signifikan), sementara MODIS mampu mencitrakan hampir seluruh permukaan Bumi setiap satu hingga dua hari. Namun, trade-off ini dapat dimitigasi atau dikurangi melalui beberapa pendekatan teknologi. Salah satunya adalah penggunaan konstelasi satelit, di mana beberapa satelit identik atau komplementer dioperasikan secara bersamaan. Dengan lebih banyak satelit yang melintasi suatu area, frekuensi kunjungan ulang efektif dapat ditingkatkan secara signifikan sambil tetap mempertahankan resolusi spasial yang relatif tinggi (contoh: konstelasi PlanetScope, Sentinel). Selain itu, kemampuan sensor untuk melakukan pengarah (pointing atau off-nadir viewing) juga dapat memperpendek waktu kunjungan ulang ke target tertentu di luar jadwal lintasan nadir regulernya.

- Resolusi Spasial vs. Resolusi Spektral: Untuk sistem sensor yang sama, seringkali terdapat trade-off antara resolusi spasial dan jumlah atau kehalusan band spektral. Banyak satelit penginderaan jauh (seperti Landsat, IKONOS, QuickBird, SPOT) dilengkapi dengan band pankromatik (yang merekam energi pada satu rentang panjang gelombang lebar) dan beberapa band multispektral (yang merekam energi pada beberapa rentang panjang gelombang yang lebih sempit). Umumnya, band pankromatik pada sensor-sensor ini memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi (piksel lebih kecil) dibandingkan dengan band-band multispektralnya. Hal ini sebagian disebabkan oleh kebutuhan untuk mengumpulkan jumlah energi (foton) yang cukup

agar menghasilkan sinyal yang baik (rasio sinyal terhadap derau/SNR yang tinggi). Lebih mudah untuk mengumpulkan energi yang cukup pada satu band spektral yang lebar daripada pada beberapa band spektral yang sempit untuk ukuran piksel dan waktu integrasi yang sama. Sebagai contoh, sensor OLI pada Landsat 8 memiliki band pankromatik dengan resolusi spasial 15 meter, sementara band-band multispektralnya memiliki resolusi spasial 30 meter. Untuk mengatasi trade-off ini dan memanfaatkan keunggulan keduanya, teknik pemrosesan citra yang disebut pan-sharpening (atau fusi citra) sering digunakan. Pan-sharpening adalah proses menggabungkan citra pankromatik beresolusi spasial tinggi dengan citra multispektral beresolusi spasial lebih rendah (namun memiliki informasi warna) untuk menghasilkan citra multispektral baru yang memiliki resolusi spasial setara dengan citra pankromatik aslinya.

- Resolusi Spasial/Spektral vs. Rasio Sinyal terhadap Derau (SNR): Rasio Sinyal terhadap Derau (SNR) adalah ukuran kualitas sinyal yang direkam oleh sensor relatif terhadap tingkat derau (noise) yang ada. Semakin tinggi SNR, semakin baik kualitas data. Terdapat trade-off antara resolusi spasial dan/atau spektral dengan SNR. Jika ukuran piksel semakin kecil (resolusi spasial semakin tinggi), atau jika lebar band spektral semakin sempit (resolusi spektral semakin tinggi), maka jumlah foton (energi elektromagnetik) yang diterima oleh setiap elemen detektor sensor per satuan waktu akan semakin sedikit. Hal ini dapat mengakibatkan SNR yang lebih rendah, yang berarti sinyal yang berguna mungkin lebih sulit dibedakan dari derau acak. Kualitas data bisa menurun, terutama pada kondisi pencahayaan yang kurang optimal (misalnya, pada pagi atau sore hari, atau di daerah lintang tinggi), atau ketika mengamati permukaan dengan tingkat reflektansi yang sangat rendah. Oleh karena itu, dalam perancangan sensor, para

insinyur harus mencari keseimbangan antara keinginan untuk mencapai resolusi spasial dan spektral yang setinggi mungkin dengan kebutuhan untuk mempertahankan SNR yang memadai agar data yang dihasilkan tetap berkualitas baik dan dapat diandalkan. Upaya untuk meningkatkan SNR pada sensor beresolusi tinggi dapat melibatkan penggunaan detektor yang lebih sensitif, optik dengan apertur yang lebih besar (untuk mengumpulkan lebih banyak cahaya), atau waktu integrasi yang lebih lama saat perekaman. Namun, peningkatan waktu integrasi dapat berkonflik dengan resolusi spasial jika wahana bergerak cepat, karena dapat menyebabkan efek blur.

- Resolusi Radiometrik vs. Volume Data: Seperti yang telah dibahas sebelumnya, peningkatan resolusi radiometrik (yaitu, penggunaan lebih banyak bit per piksel untuk merekam data) secara langsung akan meningkatkan volume data (ukuran file citra) untuk area liputan yang sama. Jika peningkatan resolusi radiometrik ini dikombinasikan dengan resolusi spasial yang tinggi (yang berarti lebih banyak piksel per unit area) dan/atau resolusi spektral yang tinggi (yang berarti lebih banyak band spektral per piksel), maka total volume data yang dihasilkan bisa menjadi sangat besar. Hal ini memberikan tantangan signifikan dalam hal kebutuhan kapasitas penyimpanan data, lebar pita untuk transmisi data dari satelit ke stasiun Bumi, dan kemampuan komputasi untuk pemrosesan dan analisis data.
- Kendala Rekayasa dan Biaya dalam Desain Satelit: Perancangan dan peluncuran misi satelit penginderaan jauh adalah upaya yang sangat kompleks dan mahal. Setiap keputusan desain melibatkan serangkaian trade-off yang dipengaruhi oleh berbagai kendala rekayasa dan pertimbangan biaya. Pilihan jenis orbit (misalnya, LEO yang lebih dekat ke Bumi, MEO, atau GEO yang jauh namun stasioner relatif terhadap Bumi), protokol komunikasi data, arah tautan kuantum

(untuk teknologi masa depan), pemilihan panjang gelombang operasional, dan jenis detektor yang digunakan, semuanya memiliki implikasi terhadap kinerja sensor, biaya pengembangan dan operasional, serta kelayakan teknis misi secara keseluruhan. Faktor-faktor seperti ukuran, berat, dan kebutuhan daya (dikenal dengan akronim SWaP – Size, Weight, and Power) adalah kendala kritis, terutama untuk platform satelit yang lebih kecil seperti CubeSats. Keterbatasan SWaP ini secara langsung membatasi kompleksitas, ukuran, dan kemampuan sensor yang dapat dibawa oleh satelit. Akibatnya, hampir tidak mungkin untuk membuat satu sistem sensor tunggal yang sempurna dalam semua aspek resolusi (spasial, spektral, temporal, dan radiometrik) secara bersamaan. Oleh karena itu, setiap misi satelit penginderaan jauh biasanya dirancang dengan fokus pada tujuan aplikasi tertentu, yang kemudian menentukan prioritas jenis resolusi mana yang harus dioptimalkan.

Pemahaman akan *trade-off* ini membawa kita pada kesimpulan bahwa tidak ada konfigurasi resolusi yang "terbaik" secara universal untuk semua aplikasi penginderaan jauh. Sebaliknya, pemilihan kombinasi resolusi yang optimal selalu bergantung pada pertanyaan penelitian spesifik yang ingin dijawab atau masalah aplikasi praktis yang ingin dipecahkan. Pengguna data penginderaan jauh harus secara cermat mempertimbangkan beberapa faktor, seperti tingkat detail objek atau fenomena yang perlu diidentifikasi (menentukan kebutuhan resolusi spasial), seberapa cepat fenomena tersebut berubah (menentukan kebutuhan resolusi temporal), karakteristik spektral unik dari target yang diamati (menentukan kebutuhan resolusi spektral), dan tingkat presisi radiometrik yang dibutuhkan untuk analisis kuantitatif.

Meskipun *trade-off* fundamental yang didasari oleh hukum fisika dan

batasan teknologi akan selalu ada, kemajuan dalam teknologi penginderaan jauh terus berupaya untuk meminimalkan dampak dari *trade-off* tersebut atau menggeser batas-batas kemampuannya. Beberapa contoh perkembangan teknologi yang membantu mengatasi *trade-off* ini meliputi: pengembangan material detektor yang lebih sensitif yang dapat meningkatkan SNR bahkan dengan ukuran piksel yang lebih kecil atau band spektral yang lebih sempit; penggunaan konstelasi satelit yang secara efektif meningkatkan resolusi temporal tanpa harus mengorbankan resolusi spasial secara signifikan; pengembangan algoritma pemrosesan citra yang lebih canggih, seperti teknik *super-resolution* yang bertujuan untuk meningkatkan resolusi spasial citra secara artifisial), *pan-sharpening* (untuk menggabungkan keunggulan spasial dan spektral), dan algoritma reduksi derau yang lebih efektif. Selain itu, kemajuan dalam bidang komputasi berkinerja tinggi dan platform komputasi awan telah memungkinkan pemrosesan dan analisis volume data yang sangat besar yang dihasilkan oleh sensor-sensor beresolusi tinggi modern. Oleh karena itu, penting bagi mahasiswa untuk memahami bahwa bidang penginderaan jauh bersifat sangat dinamis, dan batasan-batasan yang ada saat ini mungkin dapat diatasi atau dikurangi secara signifikan di masa depan berkat inovasi teknologi yang berkelanjutan (Jonathan W. Lillesand Thomas; Kiefer 1999; Richards dan Jia 2006).

4.7 Pemilihan Resolusi yang Tepat untuk Aplikasi Penginderaan Jauh

Setelah memahami definisi, karakteristik, dan interaksi antar keempat jenis resolusi—spasial, spektral, temporal, dan radiometrik—langkah penting berikutnya bagi pengguna data penginderaan jauh adalah bagaimana memilih kombinasi resolusi yang paling tepat dan efektif untuk aplikasi spesifik yang dihadapi. Keputusan ini merupakan salah satu aspek

paling krusial dalam perencanaan proyek penginderaan jauh, karena akan sangat memengaruhi kualitas hasil, biaya, dan kelayakan analisis. Tidak ada satu set resolusi "satu ukuran untuk semua"; pilihan harus selalu didasarkan pada tujuan analisis yang jelas, skala fenomena yang diamati, karakteristik target, dan sumber daya (data, perangkat lunak, perangkat keras, anggaran, waktu) yang tersedia.

Berikut adalah beberapa faktor pertimbangan utama dalam proses pemilihan resolusi citra:

1. Ukuran Objek atau Fenomena yang Diamati (Relevan dengan Resolusi Spasial):

Pertanyaan mendasar adalah seberapa detail informasi spasial yang dibutuhkan. Apakah aplikasi bertujuan untuk mengidentifikasi objek-objek individual yang berukuran kecil, seperti jenis bangunan tertentu, kendaraan, pohon tunggal, atau batas-batas persil lahan yang sempit? Jika ya, maka resolusi spasial tinggi hingga sangat tinggi (misalnya, <1m hingga 5m) akan menjadi prioritas. Sebaliknya, jika aplikasi berfokus pada pemantauan fenomena skala luas, seperti pola cuaca regional, tutupan hutan nasional, atau perubahan iklim global, maka resolusi spasial menengah hingga rendah (misalnya, 10m hingga 1km) mungkin sudah mencukupi dan bahkan lebih efisien dari segi cakupan area dan volume data.

2. Kecepatan dan Frekuensi Perubahan Fenomena (Relevan dengan Resolusi Temporal):

Seberapa dinamis fenomena yang ingin diamati? Untuk fenomena yang berubah dengan sangat cepat, seperti perkembangan banjir bandang, penyebaran kebakaran hutan, pertumbuhan harian tanaman pada fase kritis, atau pergerakan armada kapal, maka resolusi temporal yang tinggi (misalnya, harian, beberapa kali sehari, atau bahkan per jam) sangat diperlukan. Untuk fenomena yang

perubahannya lebih lambat, seperti perubahan geologis, suksesi vegetasi jangka panjang, atau urbanisasi dalam skala dekade, resolusi temporal yang lebih rendah (misalnya, bulanan, tahunan, atau bahkan beberapa tahun sekali) mungkin sudah memadai.

3. **Karakteristik Spektral Target (Relevan dengan Resolusi Spektral):**
Apakah objek atau fenomena target memiliki respons atau "sidik jari" spektral yang unik dan dapat dibedakan dari lingkungannya? Jika target dapat diidentifikasi dengan baik hanya berdasarkan perbedaan kecerahan umum atau warna dasar, maka sensor pankromatik atau multispektral dengan beberapa band lebar mungkin cukup. Namun, jika identifikasi memerlukan perbedaan nuansa spektral yang halus—misalnya, untuk membedakan jenis mineral tertentu, spesies tanaman yang mirip, tingkat stres vegetasi, atau komposisi material permukaan—maka resolusi spektral yang lebih tinggi (banyak band sempit, seperti pada sensor multispektral canggih atau hiperspektral) akan sangat dibutuhkan.
4. **Tingkat Detail Radiometrik yang Dibutuhkan (Relevan dengan Resolusi Radiometrik):**
Apakah aplikasi memerlukan kemampuan untuk mendeteksi dan mengkuantifikasi variasi energi yang sangat halus atau perbedaan kontras yang tipis? Misalnya, dalam studi kualitas air untuk mendeteksi konsentrasi rendah sedimen atau klorofil, atau dalam analisis vegetasi untuk membedakan tingkat kesehatan yang sedikit berbeda, resolusi radiometrik tinggi (misalnya, 12-bit atau lebih) akan memberikan sensitivitas yang lebih baik. Untuk aplikasi yang fokus pada identifikasi objek dengan kontras tinggi terhadap latar belakangnya, resolusi radiometrik standar (misalnya, 8-bit) mungkin sudah cukup.
5. **Ketersediaan Data dan Anggaran: Faktor praktis seperti ketersediaan**

data dengan spesifikasi resolusi yang diinginkan dan anggaran yang tersedia seringkali menjadi penentu utama. Citra dengan resolusi spasial dan spektral sangat tinggi dari sumber komersial biasanya mahal. Di sisi lain, banyak data dengan resolusi menengah (seperti Landsat, Sentinel) tersedia secara gratis. Penting untuk menyeimbangkan kebutuhan resolusi ideal dengan realitas ketersediaan dan biaya data.

6. Kemampuan Pemrosesan dan Analisis: Volume data meningkat secara signifikan dengan peningkatan resolusi (terutama spasial, spektral, dan radiometrik). Pengguna harus memastikan bahwa mereka memiliki infrastruktur perangkat keras (kapasitas penyimpanan, kecepatan prosesor), perangkat lunak yang sesuai, dan keahlian teknis yang memadai untuk menangani, memproses, dan menganalisis data beresolusi tinggi jika itu yang dipilih.

Untuk memberikan gambaran yang lebih konkret, berikut adalah tabel yang menyajikan kebutuhan resolusi umum untuk berbagai domain aplikasi penginderaan jauh:

Tabel 4.1 Kebutuhan Resolusi Umum untuk Berbagai Aplikasi Penginderaan Jauh

Domain Aplikasi	Contoh Aplikasi Spesifik	Kebutuhan Resolusi Spasial Tipikal	Kebutuhan Resolusi Spektral Tipikal	Kebutuhan Resolusi Temporal Tipikal	Kebutuhan Resolusi Radiometrik Tipikal
Kehutan	Pemantauan deforestasi	Menengah (10-30m)	Multispektral (NIR penting)	Bulanan - Tahunan	Standar - Tinggi (≥ 12 -bit)
	Identifikasi spesies pohon (area)	Tinggi - Sangat Tinggi	Multispektral Tinggi / Hiperspektral	Musiman - Tahunan	Tinggi (≥ 12 -bit)

	terbatas)	(<5m)			
	Deteksi kebakaran hutan	Menengah - Rendah (30m - 1km)	Multispektral (Termal penting)	Harian - Beberapa kali sehari	Standar
Pertanian	Estimasi hasil panen (skala regional)	Menengah (10-30m)	Multispektral	Mingguan - Bulanan	Standar - Tinggi (≥ 12 -bit)
	Pertanian presisi (pemetaan variabilitas dalam petak)	Tinggi - Sangat Tinggi (<5m)	Multispektral Tinggi / Hiperspektral	Beberapa hari - Mingguan	Tinggi (≥ 12 -bit)
	Identifikasi stres tanaman	Tinggi (<10m)	Multispektral (Red-edge, Termal) / Hiperspektral	Beberapa hari - Mingguan	Tinggi (≥ 12 -bit)
Perkotaan	Pemetaan perluasan kota	Tinggi - Menengah (1-30m)	Pankromatik / Multispektral	Tahunan - Beberapa Tahun	Standar
	Perencanaan tata ruang detail	Sangat Tinggi (<1m)	Pankromatik / Multispektral	Sesuai kebutuhan proyek (jarang)	Standar - Tinggi (≥ 12 -bit)
	Pemantauan kualitas udara (partikulat)	Rendah (>250m)	Multispektral (Aerosol)	Harian	Tinggi (≥ 12 -bit)
Hidrologi	Pemantauan kualitas air (kekeruhan, klorofil)	Menengah (10-30m)	Multispektral	Mingguan - Bulanan	Tinggi (≥ 12 -bit)
	Pemetaan luas genangan banjir	Menengah - Tinggi (tergantung skala)	Multispektral / Radar	Segera setelah kejadian, Harian	Standar

	Pemantauan tutupan salju	Menengah - Rendah	Multispektral	Harian - Mingguan	Standar
Manajemen Bencana	Penilaian kerusakan cepat pasca gempa/tsunami	Sangat Tinggi (<1m)	Pankromatik / Multispektral	Segera setelah kejadian	Standar
	Pemantauan aktivitas gunung api	Menengah - Tinggi	Multispektral (Termal, SWIR)	Harian - Mingguan (saat krisis)	Tinggi (≥12-bit)
Geologi	Pemetaan jenis batuan dan struktur geologi (regional)	Menengah (15-30m)	Multispektral (SWIR penting) / Hiperspektral	Jarang (beberapa tahun sekali)	Tinggi (≥12-bit)
	Eksplorasi mineral	Tinggi - Menengah	Hiperspektral	Sesuai kebutuhan eksplorasi	Tinggi (≥12-bit)
Oseanografi	Pemantauan suhu permukaan laut (SST)	Rendah (≥1km)	Termal	Harian	Tinggi (≥12-bit)
	Pemetaan terumbu karang dangkal	Tinggi (1-5m)	Multispektral (Biru, Hijau penting)	Tahunan - Beberapa Tahun	Tinggi (≥12-bit)

Catatan: Tabel ini menyajikan panduan umum. Kebutuhan spesifik dapat bervariasi tergantung pada detail proyek, kondisi lokasi, dan ketersediaan data. NIR = Near Infrared (Inframerah Dekat), SWIR = Shortwave Infrared (Inframerah Gelombang Pendek).

Tabel di atas sangat berharga bagi mahasiswa karena memberikan panduan praktis dan ringkas tentang bagaimana berbagai jenis resolusi relevan dengan berbagai bidang aplikasi. Ini membantu mereka menghubungkan konsep teoritis resolusi dengan skenario dunia nyata dan

memfasilitasi pemahaman tentang mengapa sensor tertentu lebih cocok untuk tugas tertentu. Ini juga berfungsi sebagai titik awal bagi mahasiswa ketika mereka mulai merencanakan proyek penginderaan jauh mereka sendiri.

Proses pemilihan resolusi seringkali bukanlah proses linear sekali jalan. Peneliti atau pengguna mungkin perlu melakukan evaluasi awal dengan data yang sudah tersedia atau mudah diakses, kemudian menyesuaikan pilihan mereka berdasarkan hasil pendahuluan atau kendala yang baru muncul. Ketersediaan beragam platform sensor, mulai dari satelit hingga wahana tanpa awak (drone) yang menawarkan fleksibilitas tinggi dalam akuisisi data beresolusi sangat tinggi secara temporal, memberikan lebih banyak opsi dan kompleksitas dalam pengambilan keputusan.

Untuk mengatasi keterbatasan yang mungkin timbul dari penggunaan satu jenis sensor atau resolusi tunggal, tren dalam penginderaan jauh modern adalah menuju pendekatan multi-sensor dan pemanfaatan teknik fusi data. Pendekatan multi-sensor melibatkan penggunaan data dari berbagai platform atau sensor yang berbeda untuk melengkapi satu sama lain. Sebagai contoh, seorang peneliti mungkin menggabungkan resolusi temporal tinggi dari data MODIS untuk memantau dinamika musiman vegetasi secara umum, dengan resolusi spasial yang lebih tinggi dari data Landsat atau Sentinel-2 untuk analisis detail pada area-area tertentu yang menarik. Teknik fusi data, seperti *pan-sharpening* yang telah disebutkan, bertujuan untuk mengintegrasikan keunggulan dari jenis data yang berbeda (misalnya, resolusi spasial tinggi dari band pankromatik dengan informasi spektral dari band multispektral) untuk menghasilkan produk data baru yang lebih kaya informasi. Kemampuan untuk secara cerdas mengkombinasikan kekuatan dari berbagai sumber data ini menjadi semakin penting untuk melakukan analisis yang lebih komprehensif dan

mengatasi keterbatasan inheren dari masing-masing sistem sensor tunggal.

4.8 Rangkuman Bab

Dalam bab ini, kita telah menjelajahi konsep fundamental resolusi dalam penginderaan jauh, yang merupakan kunci untuk memahami kemampuan dan batasan data citra satelit. Empat jenis resolusi utama, diantaranya: spasial, spektral, temporal, dan radiometrik, telah dibahas secara mendalam. Resolusi Spasial menentukan ukuran objek terkecil di permukaan Bumi yang dapat dideteksi dan dibedakan pada citra. Semakin tinggi resolusi spasial, semakin detail objek yang dapat diamati. Resolusi Spektral berkaitan dengan kemampuan sensor untuk merekam energi elektromagnetik dalam berbagai interval panjang gelombang (band). Semakin banyak dan sempit band spektral, semakin tinggi resolusi spektralnya, memungkinkan identifikasi material yang lebih baik berdasarkan "sidik jari spektral" uniknya. Resolusi Temporal mengacu pada frekuensi atau seberapa sering sensor dapat merekam kembali area yang sama. Resolusi temporal tinggi sangat penting untuk memantau fenomena yang berubah dengan cepat. Resolusi Radiometrik menunjukkan sensitivitas sensor dalam membedakan perbedaan tingkat energi yang direkam, yang direpresentasikan oleh jumlah bit per piksel. Resolusi radiometrik tinggi memungkinkan deteksi variasi energi yang lebih halus.

Penting untuk dipahami bahwa keempat jenis resolusi ini tidak independen dan seringkali terdapat hubungan timbal balik atau *trade-off* di antaranya. Misalnya, peningkatan resolusi spasial seringkali mengorbankan resolusi temporal atau meningkatkan volume data secara signifikan. Demikian pula, ada *trade-off* antara resolusi spasial dan spektral, serta antara resolusi dan rasio sinyal terhadap derau (SNR). Kendala rekayasa, biaya, dan tujuan misi juga memainkan peran penting dalam desain sensor dan karakteristik resolusi yang dihasilkannya.

Oleh karena itu, pemilihan resolusi yang tepat adalah langkah krusial dalam setiap aplikasi penginderaan jauh dan harus didasarkan pada pemahaman yang jelas tentang tujuan spesifik analisis, skala fenomena yang diamati, karakteristik target, dan sumber daya yang tersedia. Tidak ada satu jenis resolusi yang "terbaik" untuk semua keperluan. Sebaliknya, pengguna harus secara cermat mempertimbangkan kebutuhan aplikasinya untuk memilih kombinasi resolusi yang paling optimal.

Bidang penginderaan jauh terus berkembang pesat, dengan kemajuan teknologi yang terus berupaya untuk meningkatkan kemampuan resolusi dan meminimalkan dampak *trade-off*. Pendekatan multi-sensor dan teknik fusi data menjadi semakin penting untuk menghasilkan informasi yang lebih komprehensif dan akurat dari berbagai sumber data penginderaan jauh. Pemahaman yang kuat tentang konsep resolusi akan membekali mahasiswa untuk dapat memanfaatkan teknologi penginderaan jauh secara efektif dan kritis dalam berbagai bidang studi dan aplikasi profesional.

BAB V AKUISISI DATA PENGINDERAAN JAUH

5.1 Pendahuluan Akuisisi Data Penginderaan Jauh

Akuisisi data merupakan tahapan fundamental dan paling awal dalam keseluruhan alur kerja penginderaan jauh. Keputusan yang diambil pada tahap ini akan sangat menentukan kualitas, karakteristik, dan relevansi data yang diperoleh. Kualitas dan karakteristik data yang diakuisisi akan secara langsung memengaruhi validitas dan akurasi informasi yang dapat diekstrak, serta pada akhirnya berdampak pada ketepatan keputusan yang diambil berdasarkan analisis data tersebut. Kesalahan atau ketidaktepatan dalam perencanaan dan pelaksanaan akuisisi dapat menghasilkan data yang tidak representatif terhadap fenomena yang dikaji, sulit untuk diolah, atau bahkan tidak dapat digunakan sama sekali untuk mencapai tujuan studi yang telah ditetapkan. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai berbagai aspek dalam akuisisi data menjadi sangat krusial bagi setiap pengguna data penginderaan jauh.

Secara umum, tahapan dalam akuisisi data penginderaan jauh meliputi serangkaian pertimbangan dan keputusan penting. Diantaranya adalah pemilihan jenis sensor dan platform yang akan digunakan, penetapan kriteria data yang diinginkan seperti toleransi maksimum tutupan awan dan batasan sudut perekaman, perencanaan akuisisi yang mencakup penentuan waktu dan lokasi geografis perekaman, pemahaman mengenai proses pengolahan data awal yang mungkin telah dilakukan oleh penyedia data, pemilihan level pemrosesan data yang sesuai dengan kebutuhan analisis, serta pertimbangan aspek biaya yang terkait dengan pengadaan data, terutama untuk data komersial. Setiap tahapan ini tidak berdiri sendiri, melainkan saling terkait dan membutuhkan pertimbangan

yang matang dan terintegrasi untuk memastikan bahwa data yang diperoleh bersifat optimal dan mampu menjawab pertanyaan penelitian atau aplikasi yang dituju.

5.2 Komponen Utama dalam Perencanaan Akuisisi Data

Perencanaan akuisisi data penginderaan jauh melibatkan beberapa komponen utama yang harus dipertimbangkan secara cermat. Komponen-komponen ini akan menentukan bagaimana data diperoleh dan sejauh mana data tersebut dapat memenuhi kebutuhan pengguna.

5.2.1 Pemilihan Sensor dan Platform

Pemilihan sensor dan platform merupakan salah satu keputusan paling krusial dalam perencanaan akuisisi data. Keputusan ini sangat bergantung pada tujuan spesifik dari aplikasi penginderaan jauh yang akan dilakukan, karakteristik objek atau fenomena yang menjadi target pengamatan, skala spasial dan temporal dari studi, serta ketersediaan sumber daya, baik teknis maupun finansial.

- **Karakteristik Sensor:** Sensor penginderaan jauh memiliki berbagai karakteristik yang menentukan kemampuannya dalam merekam informasi dari permukaan Bumi. Empat resolusi utama menjadi parameter penting dalam pemilihan sensor:
 - **Resolusi Spasial:** Resolusi spasial didefinisikan sebagai ukuran terkecil objek di permukaan Bumi yang dapat dibedakan atau dikenali sebagai entitas terpisah pada citra. Resolusi ini umumnya dinyatakan dalam satuan jarak, misalnya meter (m) atau sentimeter (cm). Implikasinya adalah semakin tinggi resolusi spasial (yang berarti nilai meternya semakin kecil), maka semakin detail objek-objek di permukaan Bumi yang dapat terlihat dan diidentifikasi. Sebagai contoh, untuk aplikasi pemetaan perkotaan yang memerlukan identifikasi bangunan secara individual atau detail jaringan jalan, diperlukan sensor dengan resolusi spasial sangat

tinggi seperti Pléiades dengan resolusi 0,5m atau WorldView-3 dengan resolusi hingga 0,3m. Sebaliknya, untuk analisis tutupan lahan pada skala regional atau nasional, sensor dengan resolusi spasial menengah seperti Landsat (30m untuk band multispektral) atau Sentinel-2 (10m hingga 20m untuk band multispektral) seringkali sudah memadai. Satelit PlanetScope menawarkan resolusi spasial antara 3 hingga 5 meter, yang dapat menjembatani kebutuhan antara analisis detail dan cakupan area yang lebih luas. Perlu dipahami bahwa tingginya resolusi spasial seringkali membawa konsekuensi lain. Ukuran piksel yang lebih kecil berarti untuk mencakup area geografis yang sama, dibutuhkan jumlah piksel yang jauh lebih banyak dibandingkan dengan citra beresolusi spasial lebih rendah. Konsekuensinya, volume data atau ukuran berkas citra akan menjadi jauh lebih besar. Hal ini memerlukan kapasitas penyimpanan data yang lebih besar dan kemampuan pemrosesan komputasi yang lebih tinggi. Selain itu, sensor yang mampu menghasilkan resolusi spasial sangat tinggi umumnya merupakan teknologi yang lebih canggih dan mahal untuk dikembangkan serta dioperasikan. Biaya operasional ini seringkali tercermin dalam harga data citra komersial yang lebih tinggi per satuan luasnya. Oleh karena itu, pemilihan resolusi spasial harus mempertimbangkan keseimbangan antara tingkat kedetailan informasi yang dibutuhkan dengan ketersediaan anggaran dan infrastruktur komputasi.

- Resolusi Spektral: Resolusi spektral mengacu pada kemampuan sensor untuk merekam energi elektromagnetik dalam beberapa rentang panjang gelombang (dikenal sebagai kanal atau band) yang spesifik dan sempit. Berdasarkan kemampuan ini, sensor dapat dibedakan menjadi beberapa jenis:
 - Sensor Pankromatik: Merekam energi elektromagnetik dalam satu

kanal spektral yang lebar, biasanya mencakup sebagian besar spektrum tampak (visible). Citra yang dihasilkan adalah citra hitam-putih (grayscale) namun seringkali memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi dibandingkan band multispektral dari sensor yang sama.

- **Sensor Multispektral:** Merekam energi dalam beberapa kanal spektral yang diskrit (umumnya berkisar antara 3 hingga 15 band). Contohnya adalah sensor MSI (MultiSpectral Instrument) pada satelit Sentinel-2 yang memiliki 13 kanal spektral, mulai dari spektrum tampak (biru, hijau, merah), tepi merah (*red edge*), inframerah dekat (NIR), hingga inframerah gelombang pendek (SWIR). Satelit PlanetScope dapat memiliki 4 hingga 8 band spektral, sementara sensor OLI (Operational Land Imager) pada Landsat 8 dan 9 memiliki 9 band multispektral.
- **Sensor Hiperspektral:** Mampu merekam energi dalam ratusan kanal spektral yang sangat sempit dan bersebelahan (kontinu). Kemampuan ini memungkinkan pembentukan kurva spektral yang sangat detail untuk setiap piksel, sehingga dapat digunakan untuk identifikasi material atau objek yang sangat spesifik berdasarkan sidik spektralnya (*spectral signature*). Pemilihan kanal spektral sangat bergantung pada karakteristik pantulan atau emisi dari objek atau fenomena yang diamati. Sebagai contoh, untuk studi vegetasi, kanal merah (dimana klorofil menyerap energi) dan kanal inframerah dekat (dimana struktur sel daun memantulkan energi dengan kuat) sangat penting. Sensor Sentinel-2, dengan adanya beberapa band pada posisi "tepi merah" (seperti Band 5 pada ~704nm, Band 6 pada ~740nm, dan Band 7 pada ~783nm), menjadi sangat berguna untuk analisis kesehatan vegetasi dan estimasi kandungan klorofil. Kemampuan untuk

membedakan antara objek-objek yang mungkin tampak serupa secara visual namun memiliki karakteristik spektral yang berbeda (misalnya, beberapa jenis vegetasi yang berbeda, atau variasi jenis mineral dalam tanah) sangat ditentukan oleh resolusi spektral sensor. Objek yang berbeda akan memantulkan dan menyerap energi pada panjang gelombang yang berbeda, menciptakan "sidik spektral" yang unik atau khas. Sensor pankromatik hanya menangkap informasi intensitas keseluruhan, sehingga kehilangan informasi warna dan spektral. Sensor multispektral menangkap intensitas pada beberapa bagian penting dari spektrum, memungkinkan diferensiasi objek berdasarkan respons spektralnya pada band-band tersebut. Sensor hiperspektral, dengan kemampuannya menangkap variasi halus di seluruh spektrum, memberikan potensi terbesar untuk diskriminasi objek yang sangat detail. Semakin banyak dan semakin sempit band spektral yang dimiliki sebuah sensor, maka semakin besar pula potensi untuk membedakan berbagai jenis objek di permukaan Bumi.

- Resolusi Radiometrik: Resolusi radiometrik menunjukkan sensitivitas sensor dalam membedakan perbedaan intensitas atau kecerahan energi elektromagnetik yang diterima dari permukaan Bumi. Karakteristik ini biasanya dinyatakan dalam jumlah bit yang digunakan untuk merekam data, misalnya 8-bit, 10-bit, 12-bit, atau 16-bit. Jumlah bit ini menentukan jumlah level keabuan (nilai digital atau Digital Number - DN) yang dapat direkam oleh sensor. Sebagai contoh, sensor dengan resolusi radiometrik 8-bit dapat merekam $2^8=256$ level intensitas, sedangkan sensor 12-bit dapat merekam $2^{12}=4096$ level intensitas. Implikasinya, semakin tinggi resolusi radiometrik sebuah sensor, maka semakin banyak tingkatan

intensitas yang dapat direkam, yang berarti sensor tersebut lebih sensitif terhadap perbedaan-perbedaan kecil dalam energi yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek. Sensor MSI pada Sentinel-2 memiliki resolusi radiometrik 12-bit, yang berarti setiap piksel dapat memiliki nilai antara 0 hingga 4095.9. Sensor pada satelit Landsat 8 dan 9 juga merekam data pada 12-bit, yang kemudian diskalakan menjadi produk 16-bit. Resolusi radiometrik yang tinggi sangat penting untuk analisis kuantitatif, seperti studi kualitas air dimana variasi pantulan bisa sangat halus, pemantauan kesehatan vegetasi, atau estimasi biomassa. Resolusi radiometrik yang lebih tinggi menjadi sangat bermanfaat ketika melakukan analisis pada area-area dengan kontras yang rendah, misalnya pada permukaan air yang cenderung gelap, area bayangan, atau pada permukaan salju dan es yang sangat terang. Kemampuan untuk membedakan lebih banyak gradasi warna atau intensitas memungkinkan deteksi variasi yang lebih halus pada permukaan objek, yang mungkin akan terlewat atau tidak terdeteksi oleh sensor dengan resolusi radiometrik yang lebih rendah. Hal ini juga penting ketika mencoba mendeteksi perubahan-perubahan subtil pada permukaan Bumi dari waktu ke waktu.

- Resolusi Temporal: Resolusi temporal mengacu pada frekuensi atau interval waktu dimana sebuah sensor satelit merekam ulang data pada lokasi geografis yang sama. Resolusi ini sering dinyatakan dalam satuan hari. Resolusi temporal menjadi faktor yang sangat penting untuk aplikasi-aplikasi yang bertujuan memantau fenomena yang bersifat dinamis atau berubah dengan cepat. Contohnya termasuk pemantauan bencana banjir, monitoring laju pertumbuhan tanaman pertanian, deteksi perubahan tutupan lahan seperti deforestasi, atau pemantauan kualitas air.

Satelit seperti MODIS memiliki resolusi temporal sangat tinggi, yaitu

mampu melakukan observasi harian untuk seluruh permukaan Bumi. Konstelasi dua satelit Sentinel-2 (Sentinel-2A dan Sentinel-2B) yang mengorbit secara bersamaan memungkinkan resolusi temporal hingga 5 hari di ekuator. Konstelasi satelit PlanetScope, yang terdiri dari ratusan satelit kecil, bahkan mampu mencapai resolusi temporal harian untuk hampir seluruh permukaan daratan Bumi. Sebaliknya, satelit seperti Landsat memiliki resolusi temporal 16 hari (yang dapat menjadi 8 hari jika mempertimbangkan kombinasi Landsat 8 dan Landsat 9). Perlu dicatat bahwa resolusi temporal efektif, yaitu frekuensi perolehan data yang benar-benar dapat digunakan, seringkali dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti tutupan awan. Meskipun sebuah satelit dijadwalkan untuk melintasi dan merekam suatu area setiap 5 hari sekali, jika pada saat perekaman area tersebut tertutup oleh awan tebal, maka data optik yang berguna tidak akan dapat diperoleh. Sensor optik pada umumnya tidak dapat menembus awan. Oleh karena itu, frekuensi aktual perolehan citra yang bebas awan mungkin akan lebih rendah dibandingkan dengan resolusi temporal nominal satelit, terutama di wilayah-wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki karakteristik tingkat tutupan awan yang tinggi sepanjang tahun. Ini menjadi tantangan signifikan yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan akuisisi data untuk aplikasi monitoring di daerah tersebut.

- **Jenis Platform:** Platform adalah wahana yang membawa sensor penginderaan jauh. Pemilihan platform juga sangat bergantung pada tujuan aplikasi, skala, dan sumber daya.
 - **Satelit Penginderaan Jauh:** Satelit merupakan platform yang paling umum digunakan untuk akuisisi data penginderaan jauh skala luas hingga global. Karakteristik orbit satelit, seperti ketinggian dan inklinasinya, akan mempengaruhi resolusi spasial, cakupan area perekaman (lebar sapuan atau swath width), dan resolusi

temporalnya. Beberapa jenis orbit yang umum adalah orbit sun-synchronous (sinkron Matahari), dimana satelit melintasi ekuator pada waktu lokal yang sama setiap harinya, sangat berguna untuk monitoring perubahan karena kondisi iluminasi Matahari relatif konsisten. Contoh satelit dengan orbit ini adalah Landsat, Sentinel 4, dan SPOT. Orbit geostasioner, dimana satelit tampak stasioner relatif terhadap satu titik di permukaan Bumi, biasanya digunakan untuk satelit cuaca atau komunikasi, yang memerlukan pengamatan kontinu pada area yang sama. Terdapat berbagai jenis satelit penginderaan jauh, yang dapat dikategorikan berdasarkan ketersediaan datanya:

Contoh Satelit Sumber Terbuka (Data Gratis):

- Seri Landsat (NASA/USGS): Merupakan program observasi Bumi sipil tertua yang berkelanjutan. Data Landsat menyediakan arsip historis yang sangat panjang (sejak 1972), dengan resolusi spasial 30m untuk band multispektral (OLI/TIRS pada Landsat 8/9) dan 15m untuk band pankromatik (pada Landsat 7/8/9). Resolusi temporalnya adalah 16 hari untuk satu satelit. Data Landsat sangat vital untuk analisis perubahan tutupan lahan jangka panjang, pemantauan sumber daya alam, dan berbagai aplikasi lingkungan lainnya.
- Seri Sentinel (ESA Copernicus): Merupakan bagian dari program Copernicus Uni Eropa. Sentinel-1 adalah satelit Radar yang mampu mengakuisisi data siang-malam dan menembus awan. Sentinel-2 adalah satelit optik dengan sensor MSI yang memiliki 13 band spektral, resolusi spasial 10m, 20m, dan 60m, serta resolusi temporal 5 hari dengan konstelasi dua satelit. Sentinel-3 fokus pada observasi kelautan dan atmosfer. Data Sentinel, khususnya Sentinel-2, sangat populer untuk berbagai aplikasi monitoring pertanian, kehutanan, dan perubahan lahan.

- MODIS (NASA): Sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) terpasang pada satelit Terra dan Aqua. Meskipun memiliki resolusi spasial yang relatif kasar (250m, 500m, dan 1km), MODIS menawarkan resolusi temporal yang sangat tinggi (harian hingga dua kali sehari) dan cakupan global. Ini menjadikannya ideal untuk pemantauan fenomena skala besar seperti kebakaran hutan, banjir, produktivitas vegetasi global, dan parameter atmosfer.

Contoh Satelit Komersial Resolusi Sangat Tinggi (Data Berbayar):

- Pléiades (Airbus): Konstelasi satelit ini menyediakan citra dengan resolusi spasial hingga 0.5m (produk pankromatik dan *pan-sharpened*). Pléiades juga memiliki kemampuan untuk mengakuisisi data stereo untuk pembuatan model elevasi digital (DEM) dan memiliki frekuensi kunjungan ulang harian ke area manapun di dunia.
- Seri WorldView (Maxar Technologies): Satelit seperti WorldView-3 mampu menghasilkan citra dengan resolusi spasial hingga 0.3m untuk band pankromatik dan memiliki banyak band multispektral. WorldView-4 (seperti yang disebutkan dalam naskah awal pengguna) juga memiliki kemampuan resolusi spasial yang serupa.
- PlanetScope (Planet Labs): Merupakan konstelasi yang terdiri dari lebih dari 430+ satelit kecil (tipe Dove dan SuperDove). Konstelasi ini mampu mencitrakan hampir seluruh permukaan daratan Bumi setiap hari dengan resolusi spasial antara 3 hingga 5 meter. Sensornya memiliki hingga 8 band spektral. European Space Agency (ESA) menyediakan akses ke sebagian data arsip PlanetScope untuk penggunaan non-komersial melalui pengajuan

proposal proyek di bawah program Third Party Missions (TPM).

Satelit Nasional (Indonesia): Indonesia, melalui Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) yang kini terintegrasi dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), juga telah mengembangkan beberapa satelit penginderaan jauh. Contohnya antara lain:

- LAPAN-A1 (atau LAPAN-TUBSAT): Diluncurkan pada tahun 2007, satelit ini membawa muatan kamera video dengan resolusi spasial 5m dan 200m untuk observasi Bumi.
- LAPAN-A2 (atau LAPAN-ORARI): Diluncurkan pada tahun 2015, satelit ini membawa kamera RGB untuk observasi Bumi dan sensor AIS (*Automatic Identification System*) untuk pemantauan lalu lintas kapal laut.
- LAPAN-A3 (atau LAPAN-IPB): Diluncurkan pada tahun 2016, satelit ini membawa kamera multispektral 4-band dengan resolusi spasial 18m dan juga sensor AIS. Keberadaan satelit nasional seperti seri LAPAN menunjukkan kapasitas dan kemandirian bangsa dalam pengembangan teknologi antariksa. Pengembangan satelit nasional sangat penting karena beberapa alasan. Pertama, ini mendukung kemandirian data geospasial strategis untuk negara. Kedua, satelit dapat dirancang dengan muatan yang secara spesifik menjawab kebutuhan nasional, misalnya untuk pemantauan maritim yang luas di Indonesia (seperti penggunaan sensor AIS pada LAPAN-A2 dan LAPAN-A3), monitoring pertanian, atau manajemen bencana. Ketiga, program pengembangan satelit mendorong riset dan inovasi di dalam negeri, serta berkontribusi pada pengembangan sumber daya manusia yang ahli di bidang teknologi antariksa dan penginderaan jauh. Hal ini juga dapat mengurangi ketergantungan pada data dari

negara lain untuk beberapa aplikasi yang bersifat strategis dan sensitif.

- Wahana Udara Berawak dan Nirawak (UAV/Drone): Selain satelit, platform udara juga digunakan untuk akuisisi data penginderaan jauh.
 - Pesawat Terbang Berawak: Secara tradisional digunakan untuk akuisisi foto udara format besar menggunakan kamera metrik atau untuk membawa sensor LiDAR (Light Detection and Ranging). Mampu menghasilkan data dengan resolusi spasial sangat tinggi, namun biaya operasionalnya cenderung tinggi dan kurang fleksibel dibandingkan UAV.
 - Wahana Udara Nirawak (UAV atau Drone): Penggunaan UAV atau drone untuk pemetaan dan monitoring area terbatas telah meningkat pesat dalam beberapa tahun terakhir.
 - Kelebihan UAV: Biaya operasional per misi umumnya lebih rendah dibandingkan pesawat berawak atau akuisisi data satelit resolusi sangat tinggi untuk area kecil. UAV menawarkan fleksibilitas yang tinggi dalam perencanaan misi (waktu dan area terbang dapat ditentukan sesuai kebutuhan spesifik). Kemampuan terbang pada ketinggian rendah memungkinkan perolehan data dengan resolusi spasial sangat tinggi, bahkan hingga level sentimeter. Akuisisi data dapat dilakukan *on-demand* (sesuai permintaan). UAV juga lebih aman digunakan untuk survei di area-area yang berbahaya atau sulit dijangkau oleh manusia, seperti lereng curam atau area pasca-bencana.
 - Kekurangan UAV: Cakupan area yang dapat dipetakan dalam satu kali penerbangan relatif terbatas dibandingkan satelit atau pesawat berawak. Daya tahan baterai menjadi batasan utama untuk durasi terbang. Operasional UAV sangat sensitif terhadap kondisi cuaca,

terutama angin kencang dan hujan. Regulasi penerbangan drone semakin ketat dan bervariasi antar wilayah, memerlukan izin dan kepatuhan terhadap aturan. Potensi isu terkait privasi juga perlu dipertimbangkan. Risiko kecelakaan atau kegagalan sistem tetap ada. Meskipun biaya operasional per misi rendah, biaya investasi awal untuk drone profesional dan sensor berkualitas tinggi (misalnya, kamera multispektral atau sensor LiDAR yang dipasang di drone) bisa cukup mahal.

- Sensor pada UAV: Umumnya UAV dilengkapi dengan kamera RGB standar. Namun, untuk aplikasi yang lebih spesifik, UAV dapat membawa kamera multispektral, sensor termal, atau bahkan sensor LiDAR miniatur.
- Aplikasi UAV: Sangat beragam, meliputi pertanian presisi (misalnya, pemantauan kesehatan tanaman, deteksi stres air atau nutrisi), pemetaan progres konstruksi, inspeksi infrastruktur (jembatan, menara listrik), pembuatan model 3D permukaan atau bangunan, serta monitoring kehutanan skala kecil atau inventarisasi pohon. Wahana Udara Nirawak (UAV) secara efektif mengisi celah antara observasi lapangan yang detail namun lambat dan mahal untuk area luas, dengan citra satelit yang cakupannya luas namun mungkin kurang detail atau kurang fleksibel secara temporal untuk aplikasi tertentu. UAV menyediakan data dengan resolusi spasial dan temporal yang sangat tinggi untuk area lokal. Namun, perlu dicatat bahwa pemrosesan data yang diakuisisi oleh UAV (yang seringkali berupa ribuan foto yang saling tumpang tindih) memerlukan keahlian khusus dan perangkat lunak fotogrametri. Proses seperti pembuatan ortomosaik (gabungan foto yang terkoreksi geometrik) dan Digital Surface Model (DSM) yang akurat memerlukan

pemahaman teknis yang baik. Selain itu, integrasi data UAV dengan data dari sumber lain (misalnya, data satelit atau data GIS) juga dapat menjadi tantangan tersendiri karena perbedaan skala, resolusi, dan sistem koordinat.

Berikut adalah tabel yang merangkum perbandingan karakteristik beberapa sensor satelit utama yang sering digunakan:

Tabel 1: Perbandingan Karakteristik Sensor Satelit Utama

Nama Satelit/Sensor	Resolusi Spasial (Pankromatik, Multispektral)	Jumlah Band Spektral (Contoh Band Kunci)	Resolusi Temporal (dengan konstelasi)	Resolusi Radiometrik	Contoh Aplikasi Utama	Sumber Data
Landsat 8/9 OLI/TIRS	15m (Pan), 30m (MS), 100m (TIRS dire-sample ke 30m)	9 MS (Coastal, Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2, Cirrus), 2 TIRS	16 hari (8 hari dengan 2 satelit)	12-bit (dikalibrasi ke 16-bit)	Pemetaan tutupan lahan, monitoring perubahan lahan, kehutanan, pertanian, kualitas air	Gratis (USGS)
Sentinel-2 MSI	10m, 20m, 60m (MS)	13 MS (Coastal, Blue, Green, Red, 3xRed-Edge, NIR, Narrow NIR, Water Vapour, SWIR-Cirrus, 2xSWIR)	5 hari (dengan 2 satelit)	12-bit	Pertanian, kehutanan, tutupan lahan, monitoring pesisir, manajemen bencana	Gratis (Copernicus)
PlanetSco	3-5m	4-8 MS	Harian	12-bit	Monitoring	Komersial

pe (Dove, SuperDove)	(MS)	(Blue, Green, Red, NIR, Red-Edge, Coastal Blue, Yellow, Green I)		(umumnya)	ng pertanian detail, deteksi perubahan cepat, manajemen sumber daya, respon bencana	l (ESA TPM untuk riset)
Pléiades 1A/1B	0.5m (Pan), 2m (MS), 0.5m (Pan-sharpened)	5 (Pan, Blue, Green, Red, NIR)	Harian (kemampuan tasking)	12-bit	Pemetaan urban detail, infrastruktur, pertahanan, monitoring presisi	Komersial (Airbus)
WorldView-3	0.31m (Pan), 1.24m (MS), 3.7m (SWIR)	9 (Pan, Coastal, Blue, Green, Yellow, Red, Red-Edge, NIR1, NIR2), 8 SWIR, 12 CAVIS	<1 hari (kemampuan tasking)	11-bit hingga 14-bit	Pemetaan sangat detail, analisis vegetasi lanjut, identifikasi material, pertahanan	Komersial (Maxar)
MODIS	250m, 500m, 1km (MS)	36 MS (VNIR, SWIR, TIR)	Harian (1-2 kali sehari)	12-bit	Monitoring global (vegetasi, kebakaran, suhu permukaan laut, awan, aerosol)	Gratis (NASA)

LAPAN-A3 (IPB)	18m (MS)	4 MS (Blue, Green, Red, NIR)	Tergantung orbit (sekitar beberapa hari)	(Tidak disebutkan spesifik, umumnya 8 atau 12-bit untuk kelas ini)	Eksperimen penginderaan jauh, monitoring pertanian/lingkungan skala nasional, AIS	Nasional (BRIN)
----------------	----------	------------------------------	--	--	---	-----------------

Dan berikut adalah tabel yang merangkum kelebihan dan kekurangan platform UAV/Drone:

Tabel 2: Kelebihan dan Kekurangan Platform UAV/Drone untuk Akuisisi Data

Aspek	Kelebihan	Kekurangan
Biaya Akuisisi	Relatif rendah untuk area kecil dan misi spesifik	Biaya investasi awal drone dan sensor berkualitas tinggi bisa mahal (misal LiDAR)
Resolusi Spasial	Sangat tinggi (hingga level sentimeter) karena terbang rendah	-
Fleksibilitas Misi	Sangat tinggi, dapat dioperasikan <i>on-demand</i>	Daya tahan baterai terbatas, membatasi durasi dan jangkauan terbang per misi
Cakupan Area	Ideal untuk area terbatas atau lokal	Kurang efisien untuk pemetaan area yang sangat luas
Ketergantungan Cuaca	-	Sangat sensitif terhadap kondisi cuaca (angin, hujan, kabut)
Kebutuhan Keahlian	Pengoperasian drone dasar relatif mudah dipelajari	Perencanaan misi kompleks, pemrosesan data (fotogrametri), dan interpretasi memerlukan keahlian khusus

Regulasi	-	Regulasi penerbangan yang semakin ketat dan memerlukan izin
Keamanan Operasional	Dapat mengakses area berbahaya atau sulit dijangkau manusia	Risiko kecelakaan atau kegagalan sistem, potensi isu privasi
Ketersediaan Data	Data dapat diperoleh hampir seketika setelah misi	Data mentah memerlukan pemrosesan signifikan untuk menjadi produk peta yang berguna

5.2.2 Pemilihan Kriteria Akuisisi Data

Selain pemilihan sensor dan platform, beberapa kriteria terkait kondisi akuisisi data juga perlu dipertimbangkan dengan cermat untuk memastikan data yang diperoleh sesuai dengan kebutuhan analisis.

- Tutupan Awan: Keberadaan awan merupakan salah satu kendala utama dalam akuisisi data penginderaan jauh optik. Strategi pemilihan data berdasarkan tutupan awan sangat bergantung pada tujuan aplikasi. Untuk sebagian besar analisis yang berfokus pada permukaan tanah, seperti pemetaan tutupan lahan, analisis vegetasi, atau pemetaan geologi, data dengan tutupan awan minimum (biasanya di bawah 10% atau 20% dari total area citra) sangat diutamakan. Awan dan bayangannya akan menghalangi atau mengaburkan informasi objek di permukaan Bumi. Namun, untuk beberapa aplikasi spesifik seperti studi atmosfer, analisis pola awan, atau estimasi curah hujan berbasis satelit, keberadaan awan justru menjadi objek kajian utama. Wilayah tropis seperti Indonesia memiliki karakteristik tingkat tutupan awan yang tinggi sepanjang tahun. Hal ini menjadi tantangan signifikan dalam memperoleh citra optik yang bebas awan secara konsisten. Untuk mengatasi kendala ini, penggunaan citra Radar (misalnya dari satelit Sentinel-1) yang memiliki kemampuan untuk menembus awan, kabut, dan asap, serta dapat diakuisisi pada siang maupun malam hari, menjadi alternatif yang sangat penting dan

seringkali lebih diandalkan untuk monitoring berkelanjutan di wilayah tropis.

- Sudut Perekaman Sensor (Sudut Zenith Sensor dan Sudut Pandang): Sudut perekaman sensor, yang seringkali mengacu pada sudut pandang sensor relatif terhadap titik nadir (titik tepat di bawah sensor), dapat mempengaruhi baik geometri maupun kualitas radiometrik citra.
 - Pengaruh terhadap Geometri: Perekaman dengan sudut yang besar (jauh dari nadir, atau disebut *off-nadir*) dapat menyebabkan distorsi geometrik yang lebih signifikan. Efek paralaks, yaitu pergeseran semu posisi objek akibat perbedaan sudut pandang, akan lebih besar pada perekaman *off-nadir*, terutama untuk objek-objek yang memiliki ketinggian vertikal signifikan seperti gedung-gedung tinggi atau pohon.
 - Pengaruh terhadap Iluminasi dan Bayangan: Sudut perekaman juga berinteraksi dengan sudut datangnya sinar Matahari, mempengaruhi variasi iluminasi pada lereng-lereng dengan orientasi berbeda (*topographic shading*) dan panjang bayangan objek. Secara umum, citra yang diakuisisi dengan sudut perekaman mendekati nadir lebih disukai untuk meminimalkan distorsi geometrik dan efek bayangan yang berlebihan, terutama di daerah dengan topografi bergelombang atau pegunungan. Banyak satelit modern memiliki kemampuan untuk melakukan perekaman *off-nadir*, yaitu sensornya dapat diarahkan ke samping dari jalur terbang utamanya. Kemampuan ini secara signifikan meningkatkan resolusi temporal efektif, karena satelit dapat mencitrakan area tertentu lebih sering daripada jika hanya mengandalkan lintasan nadir. Namun, terdapat trade-off yang perlu dipertimbangkan. Semakin besar sudut *off-nadir*, semakin miring sudut pandang sensor terhadap permukaan, yang dapat

memperbesar distorsi geometrik. Selain itu, energi yang terekam sensor harus menempuh jarak yang lebih jauh melalui atmosfer, yang berpotensi meningkatkan pengaruh atmosferik pada data dan menurunkan kualitas radiometrik jika sudutnya terlalu ekstrim. Operator satelit biasanya mengelola trade-off ini dengan membatasi sudut *off-nadir* maksimum yang diizinkan untuk perekaman.

- Perencanaan Waktu dan Lokasi Akuisisi: Pemilihan waktu dan penetapan lokasi akuisisi yang tepat sangat krusial.

- Waktu dalam Sehari (dipengaruhi oleh Sudut Elevasi/Zenith Matahari):

Waktu perekaman dalam sehari akan menentukan posisi Matahari relatif terhadap area yang direkam, yang berdampak pada kondisi iluminasi dan bayangan.

- Meminimalkan Bayangan: Perekaman yang dilakukan saat Matahari berada pada posisi tinggi (sekitar tengah hari waktu lokal) akan menghasilkan bayangan objek yang minimal. Kondisi ini umumnya diinginkan untuk interpretasi objek di area perkotaan atau pada area dengan topografi curam dimana bayangan panjang dapat mengaburkan detail penting.
- Menonjolkan Relief: Sebaliknya, perekaman pada saat sudut Matahari rendah (pagi atau sore hari) akan menghasilkan bayangan yang lebih panjang, yang justru dapat membantu menonjolkan fitur-fitur relief topografi seperti punggung, lembah, atau struktur geologi halus. Ini bisa bermanfaat untuk analisis geomorfologi.
- Pengaruh pada Kualitas Spektral: Perlu diingat bahwa pada saat sudut Matahari rendah, sinar Matahari harus melewati lapisan atmosfer yang lebih tebal sebelum mencapai

permukaan Bumi dan kembali ke sensor. Hal ini dapat meningkatkan efek hamburan atmosferik, yang berpotensi mempengaruhi kualitas spektral data.

○ Musim:

Pemilihan musim untuk akuisisi data juga harus disesuaikan dengan karakteristik objek atau fenomena yang ingin diamati, serta kondisi lingkungan.

- Karakteristik Objek: Untuk analisis vegetasi, misalnya, perekaman pada musim pertumbuhan aktif (misalnya musim hujan di beberapa wilayah) mungkin lebih disukai untuk menangkap kondisi biomassa maksimum. Untuk pemetaan jenis tanah atau geologi permukaan, musim kemarau saat tutupan vegetasi minimal mungkin lebih ideal. Untuk analisis tutupan salju atau gletser, tentu saja perekaman pada musim dingin atau saat akumulasi salju maksimum menjadi pilihan.
- Ketersediaan Data Bebas Awan: Di banyak wilayah, musim tertentu memiliki probabilitas tutupan awan yang lebih rendah dibandingkan musim lainnya. Mempertimbangkan aspek ini dapat meningkatkan peluang untuk mendapatkan data berkualitas baik.

○ Batasan Geografis Area Studi (Area of Interest - AOI): Penentuan batas geografis area studi (AOI) secara akurat dan tepat sangat penting. AOI yang jelas memastikan bahwa seluruh area yang ingin dikaji akan tercakup oleh data yang diakuisisi atau dipesan. Hal ini sangat krusial, terutama ketika memesan data citra satelit komersial yang biayanya dihitung berdasarkan luasan. Definisi AOI yang tidak tepat dapat menyebabkan sebagian area studi tidak tercakup atau sebaliknya, memesan data yang lebih luas dari yang dibutuhkan sehingga meningkatkan biaya. Format

AOI yang umum digunakan adalah dalam bentuk data vektor digital seperti Shapefile (.shp), KML/KMZ (untuk Google Earth), atau sekumpulan koordinat geografis yang mendefinisikan batas-batas area.³

5.2.3 Aksesibilitas dan Perolehan Data

Setelah sensor, platform, dan kriteria akuisisi ditentukan, langkah selanjutnya adalah memperoleh data tersebut. Data penginderaan jauh dapat diakses melalui berbagai sumber, baik yang bersifat gratis (terbuka) maupun komersial (berbayar).

- Sumber Data Gratis (Open Access): Sejumlah besar data penginderaan jauh kini tersedia secara gratis untuk publik, terutama yang berasal dari program-program pemerintah. Beberapa portal utama untuk mengakses data gratis adalah:
 - Portal USGS EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov): Dikelola oleh Survei Geologi Amerika Serikat (USGS), portal ini menyediakan akses ke arsip data yang sangat kaya, termasuk seluruh seri data Landsat (mulai dari Landsat 1 hingga Landsat 9), data MODIS, data dari berbagai sensor lain (misalnya ASTER), serta produk-produk turunan seperti model elevasi digital (DEM). Pengguna umumnya perlu melakukan registrasi akun untuk dapat mengunduh data. Terdapat berbagai panduan dan tutorial yang menjelaskan cara melakukan pencarian dan pengunduhan data melalui portal ini.
 - Copernicus Open Access Hub (dataspace.copernicus.eu, sebelumnya dikenal sebagai scihub.copernicus.eu): Merupakan portal resmi dari European Space Agency (ESA) untuk mengakses data dari program Copernicus. Portal ini menyediakan akses gratis ke data dari satelit Sentinel, seperti Sentinel-1 (Radar), Sentinel-2 (optik multispektral), Sentinel-3 (kelautan dan

atmosfer), dan Sentinel-5P (kualitas udara). Sama seperti EarthExplorer, pengguna perlu melakukan registrasi akun. Tutorial untuk mengunduh data Sentinel juga tersedia secara luas.

- Portal Nasional Indonesia (Ina-Geoportal BIG - tanahair.indonesia.go.id atau geoportal.big.go.id): Dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG), portal ini merupakan gerbang utama untuk mengakses data dan informasi geospasial nasional Indonesia. Produk yang tersedia meliputi Peta RupaBumi Indonesia (RBI) dalam berbagai skala, data DEM Nasional (DEMNAS), dan data batas wilayah administrasi.²⁵ Meskipun fokus utama Ina-Geoportal adalah pada produk peta turunan dan data geospasial dasar, bukan pada penyediaan data citra satelit mentah secara langsung untuk diunduh publik umum²⁶, portal ini tetap menjadi sumber data geospasial otoritatif yang sangat penting untuk konteks Indonesia. Meskipun data-data ini disebut "gratis", bukan berarti tidak ada upaya yang diperlukan untuk mendapatkannya. Pengguna masih perlu meluangkan waktu untuk mempelajari antarmuka portal data, memahami metadata dan spesifikasi produk yang beragam, serta seringkali melakukan tahapan pra-pemrosesan tambahan (seperti Koreksi Atmosfer jika mengunduh data Level 1, pembuatan mosaik, atau pemotongan area studi) untuk membuat data tersebut siap digunakan untuk analisis. Selain itu, volume data penginderaan jauh, terutama untuk citra resolusi tinggi atau cakupan area yang luas, bisa sangat besar. Hal ini memerlukan koneksi internet yang stabil dan cepat untuk pengunduhan, serta kapasitas penyimpanan data yang memadai pada komputer pengguna.
- Sumber Data Komersial: Untuk kebutuhan data dengan resolusi spasial sangat tinggi (sub-meter), resolusi temporal yang sangat

spesifik (misalnya, perekaman pada tanggal dan jam tertentu), atau jenis sensor khusus yang tidak tersedia secara gratis, pengguna dapat beralih ke penyedia data komersial. Beberapa pemain utama di pasar data satelit komersial antara lain:

- Maxar Technologies (mengoperasikan satelit seperti seri WorldView dan GeoEye).
- Airbus Defence and Space (mengoperasikan satelit seperti seri Pléiades, Pléiades Neo, dan SPOT).
- Planet Labs (mengoperasikan konstelasi PlanetScope dan SkySat). Model bisnis yang ditawarkan oleh penyedia data komersial cukup beragam. Umumnya meliputi penjualan data per scene (satu kali perekaman) atau per kilometer persegi (km²), layanan *tasking* (perekaman baru sesuai dengan permintaan spesifik pengguna), layanan langganan untuk akses data berkelanjutan pada area tertentu, hingga platform analisis berbasis *cloud* yang menyediakan data sekaligus alat analisisnya. Beberapa penyedia juga mulai mengembangkan model "data-as-a-service" (DaaS), dimana pengguna membayar untuk akses ke data atau informasi turunan tanpa harus mengelola data mentahnya secara langsung.²⁷ Proses pemesanan data komersial biasanya dilakukan melalui vendor atau distributor resmi di masing-masing negara, atau langsung melalui platform online yang disediakan oleh perusahaan induk. Pemesanan umumnya memerlukan informasi detail mengenai Area of Interest (AOI) yang jelas, spesifikasi produk data yang diinginkan (misalnya, jenis sensor, tingkat pemrosesan, jumlah band, resolusi), dan periode waktu perekaman (untuk data arsip atau permintaan *tasking* baru).
- Aspek Biaya Pengadaan Data: Biaya pengadaan data penginderaan jauh komersial sangat bervariasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi

harga antara lain adalah resolusi spasial (semakin tinggi resolusi, umumnya semakin mahal), resolusi spektral (jumlah dan jenis band), tingkat pemrosesan data yang diminta, usia data (data arsip yang sudah ada biasanya lebih murah dibandingkan permintaan perekaman baru atau tasking), luas cakupan area yang dipesan, serta jenis lisensi penggunaan data (misalnya, untuk penggunaan internal, publikasi, atau komersialisasi produk turunan). Sebagai gambaran (harga dapat berubah dan sangat tergantung pada banyak faktor), harga untuk data arsip citra satelit Maxar WorldView-3 dengan resolusi 30cm yang sudah di-pan-sharpened (produk mono) dapat berkisar antara \$22.50 per km², sedangkan untuk produk perekaman baru atau produk stereo bisa mencapai \$65.00 per km² atau lebih.⁷ Data Airbus Pléiades Neo dengan resolusi 30cm (produk pan-sharpened, perekaman baru) dapat berkisar antara \$32.50 hingga \$63.75 per km². Data dari konstelasi PlanetScope, karena resolusi spasialnya sedikit lebih rendah (3-5m), mungkin memiliki harga yang lebih terjangkau per km² dengan model lisensi yang berbeda. Selain harga per satuan luas, banyak penyedia data komersial juga memberlakukan ketentuan biaya minimum order atau luasan minimum per pemesanan. Misalnya, untuk beberapa produk PlanetScope, minimal luasan order adalah 250 km², atau untuk produk Pléiades dan SPOT dari Airbus, minimal order untuk data arsip bisa 25 km² dan untuk perekaman baru 100 km². Biaya data komersial ini bisa menjadi penghalang yang signifikan, terutama untuk proyek-proyek penelitian akademis dengan anggaran terbatas atau untuk aplikasi yang memerlukan cakupan area yang sangat luas. Kondisi ini mendorong pemanfaatan maksimal data-data yang tersedia secara gratis seperti Landsat dan Sentinel. Selain itu, beberapa penyedia data komersial terkadang menawarkan skema khusus atau diskon untuk

komunitas akademik dan riset, atau melalui program kerjasama seperti akses data PlanetScope untuk tujuan non-komersial melalui program Third Party Missions (TPM) ESA. Kebutuhan akan data resolusi sangat tinggi untuk aplikasi tertentu seperti perencanaan infrastruktur detail, penegakan hukum, atau litigasi seringkali memvalidasi penggunaan data komersial yang mahal. Namun, untuk aplikasi monitoring lingkungan skala luas atau penelitian dasar, data gratis tetap menjadi tulang punggung utama bagi banyak pengguna.

5.3 Level Pemrosesan Data Penginderaan Jauh

Data penginderaan jauh tersedia dalam berbagai tingkatan atau level pemrosesan. Level pemrosesan ini mencerminkan sejauh mana data mentah dari sensor telah melalui berbagai tahapan koreksi dan transformasi. Pemahaman mengenai level produk data ini sangat penting karena akan menentukan kesesuaian data untuk aplikasi tertentu dan jenis pra-pemrosesan lanjutan yang mungkin masih diperlukan oleh pengguna. Berikut adalah penjelasan umum mengenai level produk data, dengan beberapa contoh spesifik:

- **Data Level 0 (Data Mentah atau *Raw Data*):**
 - Deskripsi: Ini adalah data mentah dalam bentuk telemetri yang diterima langsung dari sensor satelit, sebelum melalui proses dekompresi, pemformatan ulang, atau koreksi apapun. Data ini masih mengandung semua artefak, *noise* (derau) instrumen, dan informasi tambahan terkait operasional sensor.
 - Koreksi: Tidak ada koreksi yang diterapkan.
 - Penggunaan: Data Level 0 biasanya tidak didistribusikan kepada pengguna umum. Aksesnya terbatas pada insinyur sensor, tim kalibrasi dan validasi (*cal/val*) satelit, atau peneliti yang secara spesifik mengembangkan algoritma pemrosesan data tingkat

sangat rendah.

- Data Level 1: Level 1 umumnya merujuk pada data yang telah melalui beberapa koreksi radiometrik dasar dan memiliki informasi geometrik, namun tingkat koreksi geometriknya bisa bervariasi.
 - **Level 1A (L1A) / Level 1B (L1B):**
 - Deskripsi: Data pada level ini telah dikoreksi secara radiometrik, dimana nilai digital (DN) mentah telah dikonversi menjadi unit fisik yang lebih bermakna, seperti nilai radian spektral di sensor (energi yang mencapai sensor) atau reflektansi pada puncak atmosfer (TOA - *Top of Atmosphere Reflectance*). Data ini juga disertai dengan metadata geometrik yang berisi informasi mengenai posisi dan orientasi sensor saat perekaman. Namun, piksel-piksel pada citra L1A/L1B umumnya masih berada dalam geometri akuisisi sensor asli dan belum terkoreksi secara presisi terhadap distorsi akibat relief medan atau variasi platform.
 - Koreksi Utama: Koreksi radiometrik sistematis, kalibrasi sensor. Contoh produk pada level ini adalah data PlanetScope Basic Scene Product (Level 1B), yang merupakan data radian TOA yang diskalakan. Produk Sentinel-2 Level-1B juga merupakan data radian yang telah dikompresi dan diformat, namun belum diortorektifikasi.
 - Penggunaan: Data L1A/L1B sering digunakan sebagai input untuk proses koreksi geometrik presisi (ortorektifikasi) lebih lanjut dan untuk penerapan algoritma Koreksi Atmosfer yang lebih canggih oleh pengguna yang memiliki keahlian tersebut.
 - **Level 1T (L1T) / Level 1C (L1C) (Data Terkoreksi Terrain / Reflektansi TOA yang Diortorektifikasi):**
 - Deskripsi: Data pada level ini telah melalui koreksi

radiometrik (biasanya dikonversi hingga unit reflektansi TOA) dan juga telah terkoreksi secara geometrik dengan presisi tinggi. Koreksi geometrik ini, yang sering disebut ortorektifikasi, dilakukan dengan menggunakan titik kontrol tanah (*Ground Control Points* - GCPs) dan Model Elevasi Digital (*Digital Elevation Model* - DEM) untuk menghilangkan distorsi yang disebabkan oleh sensor, platform, dan variasi relief permukaan Bumi. Hasilnya adalah citra yang akurat secara spasial dan piksel-pikselnya telah diproyeksikan ke sistem koordinat peta standar (misalnya UTM/WGS84).

- Koreksi Utama: Koreksi radiometrik (hingga TOA reflectance), koreksi geometrik presisi (ortorektifikasi).
- Contoh: Produk Landsat Collection 2 Level-1 (misalnya L1TP - *Precision Terrain Corrected*) adalah contoh data pada level ini. Produk Sentinel-2 Level-1C juga merupakan data reflektansi TOA yang telah diortorektifikasi dan diproyeksikan ke sistem grid UTM/WGS84.
- Penggunaan: Data L1T/L1C merupakan input yang umum digunakan untuk proses Koreksi Atmosfer guna mendapatkan nilai reflektansi permukaan. Data ini juga dapat langsung digunakan untuk aplikasi yang tidak terlalu sensitif terhadap efek atmosfer, seperti deteksi perubahan visual, pembuatan mosaik citra untuk tampilan latar belakang, atau analisis spasial dasar.
- Data Level 2: Level 2 umumnya merujuk pada produk data yang telah diturunkan menjadi parameter geofisika permukaan, yang paling umum adalah reflektansi permukaan.
 - **Level 2A (L2A) (Reflektansi Permukaan atau *Surface***

Reflectance):

- Deskripsi: Data pada level ini telah melalui koreksi geometrik (ortorektifikasi) dan juga Koreksi Atmosfer. Hasilnya adalah nilai reflektansi permukaan (sering disebut juga reflektansi dasar atmosfer atau BOA - *Bottom of Atmosphere Reflectance*, atau *Surface Reflectance* - SR). Produk L2A merepresentasikan proporsi energi Matahari yang dipantulkan oleh permukaan Bumi setelah menghilangkan pengaruh hamburan dan serapan oleh atmosfer. Ini adalah representasi yang lebih akurat mengenai bagaimana permukaan Bumi sebenarnya memantulkan energi.
- Koreksi Utama: Koreksi geometrik, koreksi radiometrik, dan Koreksi Atmosfer.
- Contoh: Produk Landsat Collection 2 Level-2 menyediakan data reflektansi permukaan (L2SP - *Surface Reflectance Product*) dan suhu permukaan (L2ST - *Surface Temperature Product*). Produk Sentinel-2 Level-2A juga merupakan data reflektansi permukaan yang dihasilkan menggunakan prosesor seperti Sen2Cor.
- Penggunaan: Data Level 2A sangat direkomendasikan dan seringkali menjadi standar untuk sebagian besar analisis kuantitatif penginderaan jauh. Ini termasuk perhitungan berbagai indeks vegetasi (seperti NDVI, EVI), klasifikasi tutupan lahan yang akurat, estimasi parameter biofisik vegetasi (seperti LAI, FAPAR), pemantauan kualitas air, dan studi perubahan lingkungan.
- **Level 2B atau Produk Turunan Level 2 Lainnya:** Selain reflektansi permukaan, level 2 juga dapat mencakup produk-produk biofisik atau geofisika lain yang diturunkan secara

langsung dari data reflektansi permukaan atau data Level 1. Contohnya bisa berupa produk Indeks Luas Daun (*Leaf Area Index* - LAI), fraksi radiasi aktif fotosintesis yang diserap (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* - FAPAR), konsentrasi klorofil pada daun, atau parameter kualitas air seperti konsentrasi sedimen tersuspensi.

- **Data Level 3:**

- Deskripsi: Data Level 3 merupakan produk yang dihasilkan dari penggabungan atau agregasi beberapa akuisisi data Level 1 atau Level 2. Proses ini dapat berupa pembuatan mosaik citra dari beberapa *scene* yang bersebelahan untuk mencakup area yang lebih luas, pembuatan komposit citra dari beberapa waktu akuisisi untuk mendapatkan representasi bebas awan (misalnya, komposit bulanan atau musiman), atau agregasi data secara spasial (misalnya, dari resolusi tinggi ke resolusi lebih rendah) atau temporal (misalnya, rata-rata mingguan atau bulanan). Produk Level 3 dirancang untuk menjadi lebih siap pakai (*analysis-ready*) dan konsisten secara spasial dan temporal untuk analisis skala regional atau global.
- Koreksi Utama: Tergantung pada produk input (L1 atau L2), ditambah dengan proses mosaicking, *compositing*, *gridding*, atau agregasi lainnya.
- Contoh: Produk mosaik bebas awan Sentinel-2 yang mencakup suatu wilayah negara atau benua. Produk komposit NDVI mingguan atau bulanan yang dihasilkan dari data MODIS. Produk PlanetScope Ortho Tile Product (Level 3B) adalah contoh dimana citra-citra individu telah diortorektifikasi dan disusun dalam sistem grid ubin (tile) standar dengan proyeksi UTM. Copernicus juga menyediakan produk Sentinel-2 Level 3 Quarterly Mosaics

(mosaik triwulanan).

- Penggunaan: Analisis regional atau global, pemantauan perubahan jangka panjang, input untuk model iklim atau hidrologi, dan aplikasi lain yang memerlukan data yang konsisten dalam cakupan spasial atau temporal yang luas.

- **Data Level 4:**

- Deskripsi: Data Level 4 merupakan produk variabel geofisika atau biofisika turunan tingkat tinggi. Produk ini biasanya merupakan hasil dari aplikasi model-model kompleks atau analisis mendalam terhadap data dari level yang lebih rendah (Level 1, 2, atau 3). Data Level 4 seringkali menyajikan informasi tematik yang sudah sangat spesifik dan siap digunakan untuk pengambilan keputusan atau aplikasi praktis.
- Contoh: Peta tutupan lahan hasil klasifikasi citra satelit, peta indeks vegetasi yang sudah dikategorikan (misalnya, tingkat kehijauan rendah, sedang, tinggi), peta suhu permukaan laut, model prediksi hasil panen pertanian, peta risiko bencana (misalnya, peta kerawanan longsor atau banjir), atau model prediksi sebaran spasial suatu spesies.
- Penggunaan: Digunakan secara langsung dalam aplikasi praktis seperti perencanaan tata ruang, manajemen sumber daya alam, pertanian presisi, pembuatan kebijakan lingkungan, mitigasi bencana, dan berbagai sistem pendukung keputusan lainnya.

Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat tren yang signifikan dimana penyedia data, baik lembaga pemerintah maupun perusahaan komersial, semakin banyak menawarkan produk data pada level yang lebih tinggi, terutama produk yang dikategorikan sebagai *Analysis Ready Data* (ARD). ARD umumnya merujuk pada data Level 2A (reflektansi permukaan) atau Level 3 (mosaik, komposit) yang telah diproses sedemikian rupa sehingga

pengguna dapat langsung menggunakannya untuk analisis tanpa perlu melakukan banyak tahapan pra-pemrosesan yang rumit dan memakan waktu. Ketersediaan ARD ini sangat memudahkan pengguna, terutama mereka yang mungkin tidak memiliki keahlian atau sumber daya komputasi untuk melakukan semua koreksi sendiri. Namun, sangat penting bagi mahasiswa dan pengguna data penginderaan jauh untuk tetap memahami proses dan algoritma yang digunakan untuk menghasilkan produk ARD tersebut. Pemahaman ini krusial agar pengguna dapat menggunakan data secara kritis, menyadari potensi batasan atau asumsi yang terkandung dalam produk tersebut, dan mampu melakukan interpretasi hasil analisis dengan benar, terutama jika ditemukan anomali atau ketidaksesuaian dalam data.

Berikut adalah tabel yang merangkum berbagai level produk data penginderaan jauh:

Tabel 3: Level Produk Data Penginderaan Jauh

Level Produk	Deskripsi Singkat	Koreksi Utama yang Diterapkan	Contoh Produk Spesifik	Tingkat Kesiapan untuk Analisis
Level 0	Data telemetri mentah dari sensor, belum diproses.	Tidak ada.	Data mentah instrumen (biasanya tidak untuk pengguna umum).	Sangat rendah, memerlukan keahlian khusus.
Level 1A/1B	Data terkoreksi radiometrik (radian atau reflektansi TOA), geometri sensor asli, metadata geometrik tersedia.	Koreksi radiometrik sistematis, kalibrasi sensor.	PlanetScope Basic Scene Product (L1B), Sentinel-2 L1B.	Rendah, memerlukan koreksi geometrik dan atmosferik lebih lanjut.
Level 1T/1C	Data terkoreksi radiometrik (reflektansi TOA) dan terkoreksi geometrik presisi	Koreksi radiometrik, koreksi geometrik presisi	Landsat Collection 2 L1TP, Sentinel-2 L1C.	Sedang, siap untuk Koreksi Atmosfer atau analisis visual.

	(ortorektifikasi), terproyeksi.	(ortorektifikasi) .		
Level 2A	Data terkoreksi geometrik dan atmosferik, menghasilkan reflektansi permukaan (SR/BOA).	Koreksi geometrik, koreksi radiometrik, Koreksi Atmosfer.	Landsat Collection 2 L2SP (Surface Reflectance), Sentinel-2 L2A.	Tinggi, sangat direkomendasikan untuk analisis kuantitatif.
Level 2B	Produk biofisik atau geofisika turunan dari Level 2A atau Level 1 (misalnya, LAI, Suhu Permukaan).	Tergantung produk spesifik, dibangun di atas L2A atau L1.	Produk LAI MODIS, Produk Suhu Permukaan Laut (SST) Sentinel-3.	Tinggi, produk spesifik siap pakai.
Level 3	Data gabungan (mosaik, komposit), atau agregat spasial/temporal dari beberapa akuisisi L1/L2.	Tergantung input, ditambah mosaicking, compositing, gridding.	PlanetScope Ortho Tile Product (L3B), Sentinel-2 L3 Quarterly Mosaics, Komposit NDVI MODIS.	Sangat tinggi, siap untuk analisis regional/global.
Level 4	Produk variabel geofisika/biofisika turunan tingkat tinggi dari model atau analisis data level lebih rendah.	Pemodelan, analisis lanjut.	Peta tutupan lahan, peta prediksi hasil panen, peta risiko bencana.	Sangat tinggi, informasi tematik siap untuk pengambilan keputusan.

5.4 Tahapan Dasar Pengolahan Data Pasca Akuisisi (Pengantar)

Setelah data penginderaan jauh berhasil diakuisisi, serangkaian tahapan pengolahan data atau pra-pemrosesan seringkali diperlukan sebelum data tersebut siap untuk dianalisis lebih lanjut guna mengekstrak informasi yang diinginkan. Tingkat pra-pemrosesan yang dibutuhkan sangat bergantung pada level produk data yang diperoleh (seperti yang telah dibahas pada sub-bab 5.3) dan tujuan akhir dari analisis. Bab-bab selanjutnya dalam buku ini

mungkin akan membahas beberapa teknik ini secara lebih mendalam, namun bagian ini akan memberikan pengantar mengenai tahapan-tahapan dasar tersebut dan mengapa koreksi-koreksi ini penting dalam konteks akuisisi data (Jensen 2016).

- **Koreksi Geometrik:**

- Tujuan: Koreksi geometrik bertujuan untuk memperbaiki berbagai distorsi atau kesalahan geometrik yang terdapat pada citra penginderaan jauh. Distorsi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk pergerakan dan ketidakstabilan platform sensor (misalnya, variasi ketinggian, kecepatan, dan orientasi satelit atau pesawat), kelengkungan permukaan Bumi, rotasi Bumi selama proses perekaman, serta variasi relief topografi permukaan Bumi. Tujuan utama dari koreksi geometrik adalah untuk memastikan bahwa setiap piksel pada citra memiliki posisi geografis yang akurat dan sesuai dengan koordinat sebenarnya di lapangan.
- Metode Dasar: Salah satu metode dasar yang umum digunakan adalah rektifikasi citra menggunakan Titik Kontrol Tanah (*Ground Control Points* - GCPs). GCPs adalah titik-titik di permukaan Bumi yang lokasinya dapat diidentifikasi dengan jelas baik pada citra maupun pada peta referensi yang akurat (atau diukur langsung di lapangan menggunakan GPS). Dengan menggunakan sejumlah GCPs yang tersebar merata, model transformasi matematis (misalnya, transformasi polinomial orde tertentu) dapat dibangun untuk menghubungkan sistem koordinat citra dengan sistem koordinat peta. Untuk menghilangkan distorsi akibat relief medan secara lebih akurat, proses ortorektifikasi dilakukan dengan mengintegrasikan Model Elevasi Digital (DEM) ke dalam model koreksi. Proses koreksi geometrik dapat

berupa koreksi citra-ke-peta (*image-to-map*), dimana citra dikoreksi terhadap sistem koordinat peta, atau koreksi citra-ke-citra (*image-to-image*), dimana satu citra (yang belum terkoreksi) dikoreksi agar sesuai dengan citra lain yang sudah terkoreksi geometriknya (citra referensi).

- Pentingnya: Koreksi geometrik yang akurat bersifat krusial untuk berbagai aplikasi. Ini memungkinkan integrasi data citra dengan data geospasial lainnya dalam Sistem Informasi Geografis (SIG), seperti peta tematik, data vektor jalan, atau batas administrasi. Koreksi ini juga sangat penting untuk analisis multitemporal (studi perubahan dari waktu ke waktu) agar perubahan yang terdeteksi benar-benar merupakan perubahan di permukaan Bumi, bukan akibat pergeseran geometrik antar citra. Selain itu, pengukuran geometrik yang valid seperti jarak, luas, atau perimeter hanya dapat dilakukan pada citra yang telah terkoreksi geometrik dengan baik.
- **Koreksi Radiometrik:**
 - Tujuan: Koreksi radiometrik bertujuan untuk mengonversi nilai digital (DN) mentah yang direkam oleh setiap detektor pada sensor menjadi unit fisis yang bermakna dan konsisten. Nilai DN mentah umumnya belum merepresentasikan parameter fisik secara langsung. Koreksi ini juga mencakup upaya untuk memperbaiki variasi sensitivitas antar detektor dalam satu sensor (*destriping*), menghilangkan artefak atau *noise* yang disebabkan oleh sensor, serta mengompensasi efek iluminasi.
 - Proses Dasar: Tahap awal biasanya melibatkan konversi nilai DN menjadi nilai radian spektral di sensor ($L\lambda$), yaitu energi elektromagnetik yang mencapai sensor pada panjang gelombang tertentu. Konversi ini dilakukan dengan menggunakan parameter

kalibrasi sensor, yaitu *gain* (faktor pengali) dan *offset* atau *bias* (nilai penambah), yang biasanya disediakan dalam metadata file citra. Rumus umumnya adalah $L\lambda = \text{gain} \times \text{DN} + \text{offset}$.³¹ Selanjutnya, nilai radian spektral ini dapat dikonversi menjadi nilai reflektansi pada puncak atmosfer (*TOA reflectance*, $\rho\rho\lambda$), yang merupakan rasio antara energi yang dipantulkan oleh target dengan energi yang datang dari Matahari pada puncak atmosfer. Konversi ke reflektansi TOA ini memperhitungkan faktor-faktor seperti iradiasi Matahari di puncak atmosfer ($E_{\text{SUN}\lambda}$), sudut zenith Matahari (θ_s), dan jarak antara Bumi dan Matahari (d) pada saat akuisisi.

- Pentingnya: Koreksi radiometrik sangat penting karena memungkinkan perbandingan data dari sensor yang berbeda, atau dari sensor yang sama namun diakuisisi pada waktu yang berbeda (dengan kondisi iluminasi yang berbeda). Nilai reflektansi merupakan parameter fisik yang lebih stabil dan independen terhadap kondisi iluminasi dibandingkan nilai DN atau radian. Selain itu, konversi ke unit radian atau reflektansi TOA merupakan prasyarat penting sebelum melakukan Koreksi Atmosfer yang lebih akurat.
- **Koreksi Atmosfer:**
 - Tujuan: Koreksi Atmosfer bertujuan untuk menghilangkan atau setidaknya mengurangi pengaruh atmosfer Bumi terhadap energi elektromagnetik yang terekam oleh sensor. Saat energi Matahari merambat melalui atmosfer menuju permukaan Bumi, dan kemudian dipantulkan kembali oleh permukaan Bumi menuju sensor, energi tersebut mengalami interaksi dengan berbagai komponen atmosfer seperti molekul udara, partikel aerosol (debu, asap, polusi), dan uap air. Interaksi ini berupa proses hamburan

(*scattering*) dan serapan (*absorption*).

- Efek Atmosfer: Hamburan atmosferik cenderung meningkatkan kecerahan piksel (terutama pada panjang gelombang pendek seperti biru), menyebabkan citra tampak berkabut (*hazy*) dan mengurangi kontras antar objek. Serapan atmosferik oleh gas-gas tertentu (seperti ozon di UV, uap air di NIR dan SWIR, karbon dioksida) akan mengurangi jumlah energi yang mencapai sensor pada panjang gelombang spesifik tersebut. Akibatnya, nilai pantulan objek di permukaan Bumi yang terekam oleh sensor menjadi bukan merupakan nilai aslinya, tetapi bisa menjadi lebih besar karena adanya hamburan atau lebih kecil karena proses serapan.
- Metode Dasar (Contoh):
 - *Dark Object Subtraction* (DOS) atau *Haze Removal*: Ini adalah salah satu metode Koreksi Atmosfer yang paling sederhana dan banyak digunakan, terutama jika tidak tersedia informasi detail mengenai kondisi atmosfer saat perekaman. Metode DOS bekerja berdasarkan asumsi bahwa di dalam suatu *scene* citra terdapat beberapa piksel yang seharusnya memiliki nilai reflektansi yang sangat rendah atau mendekati nol (disebut *dark objects*). Contoh *dark objects* adalah air jernih yang dalam atau bayangan pekat dari awan atau topografi. Nilai digital (DN) minimum yang teramati pada setiap band spektral untuk *dark objects* ini dianggap sebagai kontribusi hamburan atmosferik (atau *haze value*). Nilai *haze* ini kemudian dikurangkan dari nilai DN semua piksel lain pada band yang bersangkutan. Rumus sederhananya adalah: $Y_{\text{koreksi}} = Y - Y_{\text{min}}$, dimana Y_{min} adalah nilai DN minimum (dianggap sebagai nilai *haze*) pada band tersebut.

- Metode Lanjutan (sebagai pengayaan): Untuk Koreksi Atmosfer yang lebih akurat, digunakan model transfer radiatif (*Radiative Transfer Models* - RTMs). Model-model ini secara fisik memodelkan interaksi energi elektromagnetik dengan atmosfer berdasarkan parameter-parameter atmosferik pada saat perekaman, seperti kandungan aerosol (*Aerosol Optical Depth* - AOD), total kolom uap air, dan konsentrasi ozon. Beberapa contoh RTMs yang populer adalah FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) dan 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*). FLAASH seringkali tersedia sebagai modul dalam perangkat lunak pengolahan citra komersial seperti ENVI, sementara 6S merupakan model yang banyak digunakan dalam komunitas ilmiah dan kodenya dapat diakses secara bebas atau melalui antarmuka online.
- Pentingnya: Koreksi Atmosfer sangat penting, bahkan krusial, untuk analisis kuantitatif yang akurat. Ini termasuk estimasi parameter biofisik vegetasi (misalnya, LAI, kandungan klorofil), klasifikasi tutupan lahan yang presisi (karena nilai spektral menjadi lebih murni), studi perubahan jangka panjang yang sangat sensitif terhadap variasi kondisi atmosfer dari waktu ke waktu, serta perbandingan citra dari sensor yang berbeda atau dari area geografis yang berbeda.
- **Peningkatan Kualitas Citra (Dasar):**
 - Tujuan: Teknik peningkatan kualitas citra (atau *image enhancement*) bertujuan untuk meningkatkan kualitas visual citra sehingga lebih mudah diinterpretasi secara visual oleh mata manusia. Teknik ini tidak selalu bertujuan untuk memperbaiki nilai data secara kuantitatif untuk analisis mesin, tetapi lebih fokus

pada penajaman fitur atau perbedaan antar objek.

- Teknik Dasar: Beberapa teknik dasar yang umum digunakan antara lain adalah peregangan kontras (*contrast stretching*) untuk meningkatkan perbedaan antara nilai piksel terang dan gelap, penajaman spasial menggunakan filter (*spatial filtering*) untuk menonjolkan batas-batas objek, dan pembuatan komposit warna (*color composite*) dengan menggabungkan beberapa band spektral ke dalam kanal warna RGB (Red, Green, Blue) untuk menghasilkan citra berwarna yang informatif.
- Pentingnya: Meskipun tidak selalu mengubah nilai data secara fundamental untuk analisis kuantitatif (beberapa teknik bersifat reversibel, beberapa tidak), peningkatan kualitas citra sangat membantu dalam tahap eksplorasi data, identifikasi objek secara visual, pemilihan area sampel untuk klasifikasi, dan pemahaman awal terhadap konten informasi dalam citra.

Pemilihan metode koreksi dan urutan penerapannya dapat mempengaruhi hasil akhir analisis. Sebagai contoh, konversi nilai DN mentah menjadi nilai radian spektral (koreksi radiometrik dasar) biasanya merupakan langkah pertama. Setelah itu, nilai radian dapat dikonversi menjadi reflektansi TOA. Koreksi Atmosfer kemudian diterapkan pada data reflektansi TOA (atau radian, tergantung modelnya) untuk menghasilkan reflektansi permukaan. Urutan ini logis karena setiap langkah membangun di atas hasil dari langkah sebelumnya untuk secara bertahap mendekati nilai reflektansi permukaan yang sebenarnya, yang lebih mewakili karakteristik intrinsik objek di permukaan Bumi. Penting juga untuk memahami asumsi-asumsi yang mendasari setiap metode koreksi yang digunakan. Misalnya, metode DOS mengasumsikan keberadaan objek yang benar-benar gelap (reflektansi nol) di dalam *scene*, yang mungkin tidak selalu terpenuhi di semua kondisi lingkungan.

5.5 Faktor-Faktor Lain yang Mempengaruhi Akuisisi dan Kualitas Data

Selain komponen-komponen utama yang telah dibahas, terdapat beberapa faktor lain yang secara signifikan dapat mempengaruhi proses akuisisi data penginderaan jauh dan kualitas data yang dihasilkan. Pemahaman terhadap faktor-faktor ini penting untuk mengantisipasi potensi masalah dan melakukan interpretasi data yang lebih akurat.

- Kondisi Atmosfer: Atmosfer Bumi memainkan peran ganda: sebagai medium yang harus ditembus oleh energi elektromagnetik, dan juga sebagai sumber distorsi.
 - Pengaruh Hamburan (*Scattering*): Terjadi ketika partikel-partikel di atmosfer (molekul gas, aerosol, tetesan air) menyebabkan perubahan arah rambat energi elektromagnetik. Jenis hamburan utama meliputi:
 - Hamburan Rayleigh: Disebabkan oleh molekul-molekul udara yang ukurannya jauh lebih kecil dari panjang gelombang energi. Hamburan ini lebih dominan pada panjang gelombang pendek (biru dan ungu), yang menjelaskan mengapa langit tampak biru. Efeknya adalah peningkatan kecerahan pada citra, terutama pada band biru.
 - Hamburan Mie: Disebabkan oleh partikel-partikel yang ukurannya sebanding dengan panjang gelombang energi, seperti debu, asap, kabut tipis, atau aerosol lainnya. Hamburan Mie mempengaruhi seluruh spektrum tampak dan inframerah dekat, menyebabkan citra tampak kabur (*hazy*) dan mengurangi kontras.
 - Hamburan Non-selektif: Disebabkan oleh partikel yang ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombang, seperti

tetes air besar pada awan atau kabut tebal. Hamburan ini mempengaruhi semua panjang gelombang secara merata, menyebabkan objek tampak putih atau abu-abu (seperti pada awan).

- Pengaruh Serapan (*Absorption*): Terjadi ketika energi elektromagnetik diserap oleh gas-gas tertentu di atmosfer dan diubah menjadi bentuk energi lain (misalnya, panas). Gas-gas penyerap utama meliputi ozon (O₃) yang menyerap radiasi ultraviolet (UV) dan sebagian kecil spektrum tampak, uap air (H₂O) yang memiliki pita serapan kuat di beberapa bagian spektrum inframerah dekat (NIR) dan inframerah gelombang pendek (SWIR), serta karbon dioksida (CO₂) yang juga memiliki pita serapan di spektrum inframerah. Serapan ini menyebabkan pengurangan jumlah energi yang mencapai sensor pada panjang gelombang spesifik tersebut.
- Karakteristik Objek yang Diamati: Sifat fisik dan kimia dari objek atau permukaan yang diamati juga sangat menentukan bagaimana energi elektromagnetik berinteraksi dengannya.
 - Sifat Permukaan: Tekstur permukaan (apakah halus seperti air tenang, atau kasar seperti vegetasi lebat atau area perkotaan), warna objek, komposisi material penyusunnya, tingkat kelembaban (misalnya, tanah basah akan memantulkan energi secara berbeda dari tanah kering), dan struktur tiga dimensi objek (misalnya, arsitektur kanopi vegetasi, bentuk bangunan) semuanya akan mempengaruhi bagaimana energi elektromagnetik dipantulkan, diserap, atau ditransmisikan oleh objek tersebut. Setiap jenis objek memiliki respons spektral yang unik.
 - Variabilitas Spasial dan Temporal Objek: Objek atau fenomena

yang sangat heterogen secara spasial (misalnya, lanskap pertanian campuran) atau yang berubah dengan sangat cepat secara temporal (misalnya, pertumbuhan tanaman, dinamika banjir) akan memerlukan strategi akuisisi data yang berbeda (misalnya, resolusi spasial dan temporal yang lebih tinggi) dibandingkan dengan objek yang homogen atau stabil.

- Geometri Pengambilan Gambar: Kombinasi antara posisi sensor dan posisi Matahari relatif terhadap target di permukaan Bumi juga mempengaruhi data yang terekam.
 - Sudut Sensor: Seperti yang telah dibahas pada sub-bab 5.2.2, sudut pandang sensor (nadir vs. *off-nadir*) mempengaruhi distorsi geometrik dan efek bayangan.
 - Sudut Zenith Matahari dan Azimuth Matahari: Sudut zenith Matahari (ketinggian Matahari di langit) dan sudut azimuth Matahari (arah datangnya sinar Matahari) secara bersama-sama menentukan intensitas dan arah iluminasi Matahari yang mencapai permukaan, serta panjang dan orientasi bayangan yang dihasilkan oleh objek-objek tiga dimensi. Perubahan sudut Matahari sepanjang hari dan sepanjang tahun (akibat musim) harus dipertimbangkan, terutama ketika melakukan analisis multitemporal yang membandingkan citra dari waktu akuisisi yang berbeda. Perbedaan kondisi iluminasi ini dapat menyebabkan variasi radiometrik pada citra yang bukan disebabkan oleh perubahan sebenarnya pada objek.
- Tantangan dalam Akuisisi dan Pemanfaatan Data: Meskipun teknologi penginderaan jauh terus berkembang pesat, masih terdapat sejumlah tantangan dalam proses akuisisi dan pemanfaatan datanya:
 - Kualitas dan Akurasi Data: Data penginderaan jauh dapat mengandung kesalahan atau ketidakpastian yang berasal dari

berbagai sumber, termasuk ketidaksempurnaan sensor, kesalahan dalam proses kalibrasi atau pemrosesan oleh penyedia data, maupun pengaruh kondisi lingkungan saat akuisisi. Data juga mungkin tidak selalu terbaru (*up-to-date*) atau tidak konsisten jika berasal dari sumber atau sensor yang berbeda.

- Integrasi Data: Menggabungkan atau mengintegrasikan data dari berbagai sensor atau sumber yang memiliki format, resolusi (spasial, spektral, temporal, radiometrik), sistem proyeksi, atau tingkat akurasi yang berbeda bisa menjadi proses yang kompleks dan memerlukan keahlian khusus.
- Aksesibilitas dan Keterampilan Pengguna: Meskipun ketersediaan data gratis semakin meluas, akses terhadap infrastruktur yang memadai (seperti koneksi internet berkecepatan tinggi untuk mengunduh data besar, perangkat keras komputer dengan spesifikasi tinggi untuk pemrosesan, dan perangkat lunak pengolahan citra) serta ketersediaan sumber daya manusia dengan keterampilan teknis yang cukup untuk memproses dan menganalisis data masih menjadi kendala bagi sebagian pengguna, terutama di negara-negara berkembang atau institusi dengan sumber daya terbatas.
- Biaya: Untuk data komersial dengan resolusi sangat tinggi atau fitur khusus, biaya pengadaan bisa sangat mahal. Demikian pula, beberapa perangkat lunak pengolahan citra canggih juga memerlukan lisensi berbayar.
- Volume Data Besar (*Big Data*): Data penginderaan jauh, terutama dari sensor-sensor modern dengan resolusi spasial, spektral, dan temporal yang tinggi, serta cakupan area yang luas, menghasilkan volume data yang sangat besar (sering disebut sebagai *Big Geodata*). Mengelola, menyimpan, memproses, dan menganalisis

volume data sebesar ini memerlukan solusi penyimpanan dan infrastruktur komputasi yang efisien dan seringkali mahal. Dalam beberapa tahun terakhir, munculnya platform pengolahan data penginderaan jauh berbasis *cloud computing* (komputasi awan) seperti Google Earth Engine (GEE), Microsoft Planetary Computer, atau Amazon Web Services (AWS) dengan layanan data satelitnya, telah membantu mengatasi beberapa tantangan terkait volume data, aksesibilitas perangkat lunak, dan kebutuhan akan daya komputasi tinggi. Platform-platform ini menyediakan akses ke arsip data satelit yang sangat besar (misalnya, seluruh arsip Landsat dan Sentinel) dan memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis skala besar langsung di *cloud* tanpa perlu mengunduh data ke komputer lokal. Hal ini secara signifikan "mendemokratisasi" akses ke kemampuan analisis penginderaan jauh yang canggih. Namun, pemanfaatan platform ini juga memunculkan kebutuhan baru akan keterampilan pemrograman (misalnya, JavaScript atau Python untuk GEE) dan pemahaman yang baik mengenai cara kerja, batasan, dan algoritma yang tersedia di platform tersebut.

5.6 Rangkuman Bab

Bab ini telah membahas secara komprehensif berbagai aspek fundamental yang terkait dengan akuisisi data penginderaan jauh. Dimulai dari pemahaman akan pentingnya perencanaan akuisisi yang cermat, dimana kualitas dan karakteristik data yang diperoleh akan sangat menentukan keberhasilan aplikasi penginderaan jauh. Komponen-komponen utama dalam perencanaan akuisisi, seperti pemilihan sensor dan platform yang tepat, telah diuraikan dengan detail. Karakteristik sensor meliputi resolusi spasial, spektral, radiometrik, dan temporal, dimana masing-masing

memiliki implikasi signifikan terhadap jenis informasi yang dapat diekstrak. Berbagai jenis platform, mulai dari satelit (sumber terbuka dan komersial, termasuk satelit nasional) hingga wahana udara nirawak (UAV/Drone), juga telah dibandingkan kelebihan dan kekurangannya.

Pemilihan kriteria akuisisi data, seperti toleransi tutupan awan, pertimbangan sudut perekaman sensor, serta perencanaan waktu dan lokasi akuisisi yang optimal, merupakan faktor-faktor kritis lainnya yang mempengaruhi kualitas data. Aksesibilitas dan cara perolehan data, baik dari sumber gratis maupun komersial, beserta aspek biaya yang terkait, juga menjadi pertimbangan praktis yang penting.

Pemahaman mengenai berbagai level pemrosesan data penginderaan jauh, mulai dari data mentah (Level 0) hingga produk informasi tematik siap pakai (Level 4), membantu pengguna dalam memilih data yang paling sesuai dengan kebutuhan analisis dan tingkat keahliannya. Pengantar mengenai tahapan dasar pengolahan data pasca akuisisi, seperti koreksi geometrik, radiometrik, atmosferik, dan peningkatan kualitas citra, memberikan landasan mengenai proses yang diperlukan untuk menyiapkan data sebelum analisis lebih lanjut.

Terakhir, faktor-faktor lain seperti kondisi atmosfer, karakteristik objek yang diamati, geometri pengambilan gambar, serta berbagai tantangan dalam akuisisi dan pemanfaatan data (termasuk kualitas data, integrasi, aksesibilitas, biaya, dan volume data besar) turut melengkapi gambaran mengenai kompleksitas dalam akuisisi data penginderaan jauh.

Secara keseluruhan, dapat ditegaskan kembali bahwa akuisisi data merupakan langkah awal yang sangat menentukan dalam keseluruhan alur kerja penginderaan jauh. Keputusan yang tepat dan pemahaman yang mendalam pada tahap ini akan menghasilkan data yang berkualitas, relevan, dan handal, yang pada gilirannya akan mendukung dihasilkannya informasi geospasial yang akurat dan bermanfaat untuk berbagai aplikasi.

BAB VI PENGOLAHAN CITRA DIGITAL

6.1 Pendahuluan Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan disiplin ilmu yang fundamental dan terus berkembang dalam bidang penginderaan jauh. Seiring dengan kemajuan teknologi sensor dan ketersediaan data citra satelit yang semakin melimpah, kemampuan untuk mengolah dan menganalisis data ini secara efektif menjadi kunci untuk mengekstrak informasi geospasial yang akurat dan bermakna. Bab ini akan membahas secara komprehensif berbagai aspek pengolahan citra digital, mulai dari konsep dasar hingga teknik-teknik analisis lanjutan dan tren terkini yang relevan bagi mahasiswa penginderaan jauh.

6.1.1 Pentingnya Pengolahan Citra Digital dalam Penginderaan Jauh

Pengolahan citra digital memegang peranan krusial sebagai jembatan antara akuisisi data mentah oleh sensor penginderaan jauh dan dihasilkannya produk informasi geospasial yang siap guna. Data citra yang diperoleh langsung dari sensor seringkali mengandung berbagai ketidaksempurnaan, seperti gangguan atmosfer, distorsi geometrik akibat pergerakan wahana dan kelengkungan Bumi, serta derau (*noise*) yang berasal dari sensor itu sendiri. Tanpa melalui tahapan pengolahan yang tepat, data mentah ini dapat menghasilkan interpretasi yang keliru atau analisis kuantitatif yang tidak akurat.

Proses pengolahan citra tidak hanya bertujuan untuk memperbaiki kualitas visual citra agar lebih mudah diinterpretasi secara manual, tetapi juga, yang lebih penting, mempersiapkan data untuk analisis digital yang lebih mendalam. Koreksi radiometrik, misalnya, mengubah nilai digital mentah menjadi satuan fisik yang bermakna seperti reflektansi atau radian, yang memungkinkan perbandingan antar citra dari waktu atau sensor yang

berbeda. Koreksi geometrik memastikan bahwa setiap piksel pada citra memiliki referensi geografis yang akurat, sehingga dapat diintegrasikan dengan data spasial lainnya dalam Sistem Informasi Geografis (SIG). Lebih lanjut, berbagai teknik peningkatan kualitas dan transformasi citra dapat menonjolkan fitur-fitur tertentu yang diminati, sementara teknik klasifikasi memungkinkan pengelompokan piksel atau objek ke dalam kelas-kelas tematik, seperti jenis tutupan lahan atau kondisi vegetasi. Dengan demikian, pengolahan citra digital adalah serangkaian langkah esensial untuk mengubah data penginderaan jauh menjadi pengetahuan yang dapat mendukung pengambilan keputusan dalam berbagai bidang aplikasi, mulai dari pengelolaan sumber daya alam, pemantauan lingkungan, perencanaan tata ruang, hingga mitigasi bencana.

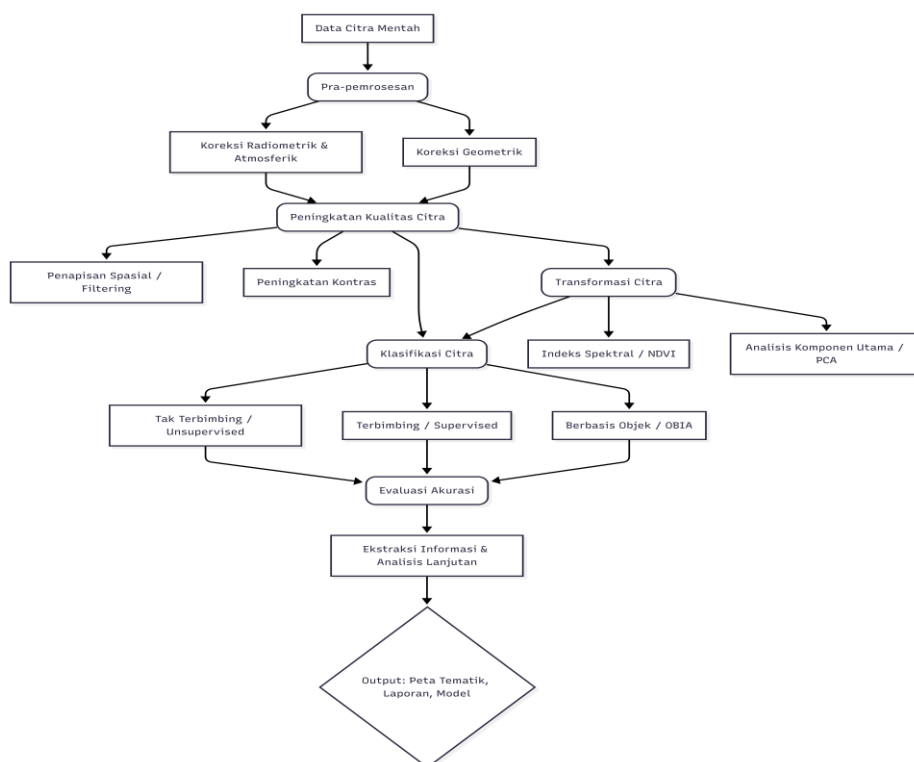
6.1.2 Diagram Alir Umum Pengolahan Citra Digital

Untuk memberikan pemahaman yang lebih terstruktur mengenai berbagai tahapan yang terlibat, Gambar 6.1 adalah diagram alir umum yang mengilustrasikan proses pengolahan citra digital dalam konteks penginderaan jauh.

Diagram tersebut menunjukkan bahwa proses pengolahan citra digital dimulai dari akuisisi data mentah. Tahap selanjutnya adalah pra-pemrosesan, yang mencakup koreksi radiometrik dan geometrik untuk memperbaiki berbagai distorsi. Setelah pra-pemrosesan, citra dapat ditingkatkan kualitasnya melalui teknik seperti pengurangan derau dan peningkatan kontras, atau ditransformasi untuk menonjolkan fitur tertentu melalui perhitungan indeks spektral atau analisis komponen utama. Tahap inti selanjutnya adalah klasifikasi citra, di mana piksel atau objek dikelompokkan ke dalam kelas-kelas tematik. Hasil klasifikasi kemudian dievaluasi akurasinya sebelum informasi akhir diekstrak dan disajikan dalam bentuk peta, laporan, atau input untuk pemodelan lebih lanjut.

Penting untuk dipahami bahwa setiap tahapan dalam alur kerja pengolahan

citra digital ini saling terkait erat. Kualitas output dari satu tahap akan secara signifikan mempengaruhi kinerja dan keandalan tahap berikutnya. Sebagai contoh, jika koreksi atmosfer pada tahap pra-pemrosesan tidak dilakukan secara adekuat, maka nilai reflektansi yang dihasilkan tidak akan akurat. Ketidakakuratan ini akan merambat dan berdampak negatif pada hasil perhitungan indeks vegetasi, yang pada gilirannya dapat menyebabkan kesalahan dalam analisis kesehatan tanaman atau estimasi biomassa. Demikian pula, jika data latih yang digunakan dalam klasifikasi terbimbing tidak representatif atau mengandung kesalahan, maka seaneh apapun algoritma klasifikasi yang digunakan, peta tutupan lahan yang dihasilkan kemungkinan besar akan memiliki akurasi yang rendah. Oleh karena itu, perhatian yang cermat terhadap detail dan kualitas pada setiap langkah proses adalah fundamental untuk menghasilkan informasi geospasial yang valid dan dapat diandalkan.



Gambar 6.1: Alur Kerja Umum Pengolahan Citra Digital dalam Penginderaan Jauh.

Lebih jauh lagi, bidang pengolahan citra digital sendiri terus mengalami evolusi. Metode-metode konvensional yang telah lama digunakan kini semakin dilengkapi, bahkan dalam beberapa kasus digantikan, oleh pendekatan-pendekatan yang lebih canggih, terutama yang berbasis pada kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence - AI*) seperti pembelajaran mesin (*machine learning*) dan pembelajaran mendalam (*deep learning*). Tren ini membawa kapabilitas baru dalam analisis data citra yang semakin kompleks dan bervolume besar, yang akan dibahas lebih lanjut pada bagian akhir bab ini.

6.2 Konsep Dasar Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan salah satu aspek penting dalam penginderaan jauh, yang melibatkan analisis dan interpretasi citra yang diperoleh dari sensor yang terpasang pada satelit atau pesawat terbang. Dalam konteks ini, terdapat beberapa konsep dasar yang perlu dipahami, antara lain resolusi spasial, resolusi spektral, resolusi radiometrik, dan resolusi temporal (yang penjelasannya dapat dilihat kembali di Bab IV), serta konsep terkait pixel. Pixel, atau *picture element*, adalah unit terkecil dari citra digital. Setiap pixel mewakili nilai tertentu yang berkaitan dengan informasi yang ada dalam citra, seperti warna atau intensitas cahaya. Dalam penginderaan jauh, setiap pixel biasanya merepresentasikan area tertentu di permukaan Bumi dan menyimpan nilai numerik yang dikenal sebagai *Digital Number (DN)*. Nilai DN ini merepresentasikan intensitas energi elektromagnetik yang direkam oleh sensor untuk area permukaan Bumi yang diwakilinya. Misalnya, jika citra diambil dari ketinggian tertentu, maka setiap pixel akan mencakup area yang lebih besar di permukaan Bumi, tergantung pada resolusi spasial citra. Contoh: Dalam citra satelit, satu pixel dengan resolusi spasial 30 m mewakili area 30×30 meter di permukaan Bumi. Jika resolusi citra lebih tinggi, maka ukuran area yang

diwakili oleh satu pixel akan lebih kecil, memberikan detail yang lebih baik.

6.3. Pra-pemrosesan Citra

Perbaikan citra, atau yang lebih umum dikenal sebagai pra-pemrosesan citra, pada data penginderaan jauh adalah serangkaian proses penting yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas data citra mentah yang diperoleh dari sensor satelit, pesawat, atau drone. Citra penginderaan jauh sering kali mengandung berbagai bentuk derau (*noise*), distorsi, atau masalah kualitas lainnya yang dapat disebabkan oleh faktor atmosfer, karakteristik dan kondisi sensor, atau geometri pengambilan citra. Pra-pemrosesan bertujuan untuk mengoreksi berbagai kesalahan dan distorsi ini, sehingga memastikan bahwa data yang dihasilkan akurat secara radiometrik dan geometrik, konsisten, dan siap untuk analisis lebih lanjut, seperti klasifikasi tutupan lahan, deteksi perubahan, ekstraksi fitur, atau pemetaan tematik.

Tujuan utama dari pra-pemrosesan citra dalam penginderaan jauh meliputi:

- **Meningkatkan Kualitas Visual:** Memperbaiki tampilan citra agar lebih jelas, lebih tajam, dan lebih mudah diinterpretasi oleh pengguna. Contohnya termasuk memperjelas batas antara objek seperti vegetasi, badan air, atau area permukiman.
- **Meningkatkan Akurasi Analisis Kuantitatif:** Memastikan bahwa informasi numerik yang diekstrak dari citra (seperti indeks vegetasi, suhu permukaan, atau nilai reflektansi) adalah akurat dan dapat diandalkan. Ini sangat penting untuk analisis ilmiah dan aplikasi yang memerlukan pengukuran presisi.
- **Mengurangi atau Menghilangkan Gangguan:** Menghilangkan atau meminimalkan efek dari berbagai sumber gangguan seperti derau sensor, efek hamburan dan serapan atmosfer, bayangan awan, atau distorsi geometrik yang dapat mengganggu dan menghasilkan

kesalahan dalam analisis.

- Mempersiapkan Data untuk Analisis Lanjutan: Menyiapkan citra agar sesuai dengan format dan standar yang dibutuhkan untuk proses analisis selanjutnya, seperti klasifikasi, segmentasi, fusi citra, atau integrasi dengan data lain dalam Sistem Informasi Geografis (SIG).
- Mengonversi Nilai Digital (DN) menjadi Satuan Fisik: Mengubah nilai piksel mentah (DN) yang tidak memiliki satuan fisik menjadi nilai yang memiliki makna fisis, seperti radian sensor atau reflektansi permukaan. Hal ini memungkinkan perbandingan data dari sensor yang berbeda atau data yang diakuisisi pada waktu yang berbeda.

Terdapat beberapa teknik pra-pemrosesan citra yang umum digunakan pada data penginderaan jauh, yang secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi koreksi radiometrik dan koreksi geometrik.

6.3.1. Koreksi Radiometrik

Koreksi radiometrik bertujuan untuk memperbaiki distorsi pada nilai piksel yang disebabkan oleh faktor-faktor selain variasi intrinsik dari reflektansi atau emisi permukaan target. Faktor-faktor ini dapat mencakup ketidaksempurnaan sensor, pengaruh atmosfer, dan variasi iluminasi akibat topografi atau sudut datang Matahari.

a. Koreksi Kesalahan Sensor (Tambahan)

Data citra mentah dapat mengandung kesalahan yang berasal dari ketidaksempurnaan instrumen sensor itu sendiri. Masalah umum meliputi *striping* atau *banding*, yaitu munculnya garis-garis periodik horizontal atau vertikal pada citra akibat perbedaan respons antar detektor dalam sistem sensor. Masalah lain adalah *line dropouts*, di mana satu atau beberapa baris data piksel hilang atau rusak selama akuisisi atau transmisi.

Metode untuk mengatasi kesalahan sensor ini meliputi teknik *destriping*, yang mencoba menormalkan respons antar detektor, dan interpolasi, yang digunakan untuk mengisi nilai piksel yang hilang pada *line dropouts*

berdasarkan nilai piksel tetangganya. Koreksi ini penting untuk memastikan konsistensi radiometrik di seluruh area citra dan menghindari artefak yang dapat mengganggu interpretasi visual maupun analisis digital.

b. Koreksi Atmosfer

Koreksi atmosfer adalah salah satu tahapan koreksi radiometrik yang paling krusial. Atmosfer Bumi, yang terdiri dari molekul gas, aerosol (partikel debu, asap, polutan), dan uap air, berinteraksi dengan radiasi Matahari dalam perjalanannya menuju permukaan Bumi dan saat radiasi tersebut dipantulkan kembali ke sensor. Interaksi ini berupa proses hamburan (*scattering*) dan serapan (*absorption*) yang memodifikasi sinyal radiasi yang diterima sensor. Akibatnya, nilai piksel yang terekam oleh sensor (sering disebut sebagai radian atas atmosfer atau *Top-of-Atmosphere reflectance*) bukanlah representasi murni dari reflektansi objek di permukaan Bumi.

Koreksi atmosfer bertujuan untuk mengestimasi dan menghilangkan atau mengurangi efek-efek atmosfer ini, sehingga menghasilkan nilai reflektansi permukaan (*surface reflectance*) yang lebih akurat. Nilai reflektansi permukaan ini lebih stabil dan lebih dapat dibandingkan antar waktu dan antar sensor, serta merupakan input yang lebih baik untuk analisis kuantitatif seperti perhitungan indeks vegetasi (misalnya NDVI, EVI), klasifikasi tutupan lahan, dan pemodelan biofisik.

Beberapa metode koreksi atmosfer yang umum digunakan, mulai dari yang sederhana hingga yang kompleks berbasis model fisik, antara lain:

- **Dark Object Subtraction (DOS):** Metode sederhana yang mengasumsikan adanya objek gelap (misalnya, air jernih yang dalam atau bayangan pekat) dalam citra yang seharusnya memiliki reflektansi mendekati nol. Nilai minimum yang teramati pada setiap band untuk objek gelap ini dianggap sebagai kontribusi hamburan atmosfer (*haze*) dan dikurangkan dari seluruh piksel pada band

tersebut (Chavez 1988).

- QUAC (Quick Atmospheric Correction): Algoritma koreksi atmosfer otomatis yang tidak memerlukan parameter atmosfer tambahan dan bekerja dengan menganalisis statistik piksel dalam citra itu sendiri untuk mengestimasi parameter atmosfer.
- FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes): Modul koreksi atmosfer berbasis model fisik yang canggih, sering digunakan untuk data hiperspektral dan multispektral. FLAASH menggunakan model transfer radiasi MODTRAN untuk mensimulasikan efek atmosfer dan memerlukan input parameter seperti model atmosfer, jenis aerosol, dan informasi geometri akuisisi (Kruse 2004).
- 6SV (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector): Model transfer radiasi lain yang akurat dan sering digunakan sebagai dasar untuk koreksi atmosfer, terutama untuk data dari sensor seperti Landsat (Kotchenova dkk. 2006).
- Metode berbasis MODTRAN lainnya: Selain FLAASH, ada banyak algoritma yang menggunakan kode transfer radiasi MODTRAN sebagai intinya.

Penerapan koreksi atmosfer yang berhasil dapat secara signifikan meningkatkan kualitas visual citra, terutama dalam mengurangi efek kabut (*haze*) yang sering membuat citra tampak buram atau memiliki kontras rendah. Secara visual, citra yang telah terkoreksi atmosfer biasanya akan tampak lebih jernih, warna objek lebih alami dan representatif, serta detail pada area bayangan atau area dengan reflektansi rendah menjadi lebih terlihat. Sebagai contoh, citra sebelum koreksi atmosfer mungkin terlihat lebih gelap atau kebiruan karena hamburan Rayleigh, sedangkan setelah koreksi, warna objek seperti vegetasi hijau atau tanah coklat akan lebih sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Nilai piksel setelah koreksi

juga akan berada dalam rentang yang lebih standar (misalnya, reflektansi antara 0 dan 1), yang memudahkan interpretasi dan analisis lebih lanjut.

c. Koreksi Topografi

Di daerah dengan relief permukaan yang bervariasi, seperti pegunungan atau perbukitan, topografi dapat menyebabkan perbedaan iluminasi Matahari pada lereng-lereng yang menghadap ke arah yang berbeda atau memiliki kemiringan yang berbeda, meskipun jenis tutupan lahannya sama. Lereng yang menghadap Matahari akan tampak lebih terang, sedangkan lereng yang membelakangi Matahari atau berada dalam bayangan topografi akan tampak lebih gelap. Variasi iluminasi ini dapat mengganggu analisis spektral dan klasifikasi tutupan lahan.

Koreksi topografi bertujuan untuk menormalkan efek pencahayaan yang tidak merata ini. Beberapa metode yang dapat digunakan antara lain *C-Correction* atau *Minnaert Correction*, yang umumnya memerlukan data model elevasi digital (DEM) sebagai input untuk menghitung sudut datang Matahari dan orientasi lereng.

6.3.2. Koreksi Geometrik

Koreksi geometrik diperlukan untuk memperbaiki distorsi spasial dalam citra penginderaan jauh. Distorsi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk pergerakan dan ketidakstabilan wahana (satelit atau pesawat), rotasi dan kelengkungan Bumi, variasi ketinggian permukaan (relief topografi), dan karakteristik sistem sensor itu sendiri. Tujuan utama koreksi geometrik adalah untuk memastikan bahwa setiap piksel dalam citra memiliki posisi geografis yang akurat sesuai dengan sistem koordinat tertentu di permukaan Bumi. Hal ini memungkinkan citra untuk dioverlay secara presisi dengan data spasial lainnya, seperti peta, citra dari waktu atau sensor lain, atau data vektor dalam SIG.

a. Georeferencing

Georeferencing (atau registrasi citra) adalah proses penyesuaian citra agar

sesuai dengan sistem koordinat geografis dunia nyata (misalnya, Lintang dan Bujur, atau UTM). Proses ini biasanya melibatkan identifikasi sejumlah Titik Kontrol Tanah (*Ground Control Points* - GCPs) pada citra dan pada peta referensi atau sumber data lain yang sudah memiliki koordinat geografis yang akurat. GCP adalah fitur-fitur yang mudah diidentifikasi baik pada citra maupun di lapangan atau peta, seperti persimpangan jalan, ujung jembatan, atau bangunan khas.

Setelah sejumlah GCP yang memadai diidentifikasi, model transformasi matematis (misalnya, polinomial orde pertama atau kedua) digunakan untuk membangun hubungan antara sistem koordinat citra (baris dan kolom piksel) dan sistem koordinat geografis. Model ini kemudian digunakan untuk mentransformasi seluruh piksel dalam citra ke posisi geografisnya yang benar. Akurasi *georeferencing* sangat bergantung pada kualitas, jumlah, dan distribusi GCP yang digunakan.

b. Orthorektifikasi

Orthorektifikasi adalah bentuk koreksi geometrik yang lebih canggih yang tidak hanya mengoreksi distorsi sistematis dari sensor dan platform, tetapi juga menghilangkan distorsi yang disebabkan oleh perspektif sensor dan variasi relief topografi. Citra mentah, terutama yang diambil dengan sudut pandang miring (*off-nadir*) atau di daerah dengan topografi yang signifikan, akan mengalami pergeseran relief (*relief displacement*), di mana objek yang lebih tinggi tampak bergeser dari posisi sebenarnya relatif terhadap objek yang lebih rendah.

Proses orthorektifikasi menggunakan informasi detail mengenai model sensor, parameter orientasi sensor saat akuisisi (posisi dan sudut pandang), dan Model Elevasi Digital (DEM) yang akurat untuk mengoreksi pergeseran relief ini pada setiap piksel. Hasil dari orthorektifikasi adalah *orthoimage*, yaitu citra yang memiliki skala seragam di seluruh areanya, mirip dengan peta. Dalam *orthoimage*, fitur-fitur seperti bangunan akan

tampak tegak lurus (nadir) seolah-olah dilihat dari atas, dan jarak serta area dapat diukur secara akurat langsung dari citra. Sebagai contoh visual, pada citra sebelum orthorektifikasi, bangunan tinggi mungkin terlihat miring atau condong, sedangkan pada *orthoimage*, bangunan tersebut akan tampak vertikal dengan tapak yang sesuai dengan posisinya di permukaan tanah. Orthorektifikasi sangat penting untuk aplikasi yang memerlukan akurasi spasial tinggi, seperti pembaruan peta, perencanaan kota, dan analisis perubahan yang presisi.

Urutan pelaksanaan berbagai langkah pra-pemrosesan ini perlu dipertimbangkan dengan cermat. Secara umum, koreksi yang bersifat radiometrik, terutama yang sensitif terhadap nilai piksel asli seperti koreksi atmosfer berbasis model fisik, sebaiknya dilakukan sebelum koreksi geometrik. Hal ini disebabkan karena proses koreksi geometrik, khususnya yang melibatkan *resampling* piksel (seperti dalam orthorektifikasi), dapat mengubah nilai radiometrik asli piksel. Jika koreksi radiometrik dilakukan setelah *resampling*, akurasinya dapat berkurang. Oleh karena itu, alur kerja yang umum adalah melakukan koreksi kesalahan sensor terlebih dahulu, diikuti oleh koreksi atmosfer, dan kemudian baru dilakukan koreksi geometrik. Namun, beberapa perangkat lunak atau metodologi tertentu mungkin memiliki urutan yang sedikit berbeda, dan penting bagi pengguna untuk memahami implikasi dari urutan tersebut terhadap kualitas data akhir.

Selain itu, keberhasilan pra-pemrosesan sangat bergantung pada ketersediaan dan kualitas metadata yang menyertai data citra. Metadata ini berisi informasi krusial seperti parameter kalibrasi sensor, model sensor, informasi orbit dan waktu akuisisi, serta parameter atmosfer awal jika tersedia. Tanpa metadata yang lengkap dan akurat, pelaksanaan pra-pemrosesan yang benar dan andal menjadi sangat sulit, bahkan tidak mungkin untuk beberapa metode koreksi yang canggih. Ini

menggarisbawahi pentingnya tidak hanya mengunduh file data citra itu sendiri tetapi juga semua file pendukung dan dokumentasi metadata yang relevan.

6.4. Peningkatan Kualitas Citra

Setelah melalui tahap pra-pemrosesan yang bertujuan untuk mengoreksi berbagai kesalahan dan distorsi, citra penginderaan jauh seringkali masih memerlukan tahapan lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas visualnya atau untuk menonjolkan informasi tertentu yang terkandung di dalamnya. Tahapan ini dikenal sebagai peningkatan kualitas citra (*image enhancement*). Berbeda dengan pra-pemrosesan yang berusaha mengembalikan data ke kondisi fisik yang "benar", peningkatan kualitas citra lebih bersifat manipulatif, dengan tujuan utama untuk memodifikasi citra agar lebih mudah diinterpretasi oleh mata manusia atau untuk meningkatkan kinerja algoritma analisis digital pada tahap selanjutnya. Penting untuk diingat bahwa teknik peningkatan kualitas citra pada umumnya tidak menambah informasi baru ke dalam citra, melainkan hanya menyajikan kembali informasi yang sudah ada dengan cara yang lebih jelas atau lebih sesuai dengan tujuan analisis.

Beberapa teknik peningkatan kualitas citra yang umum digunakan meliputi:

6.4.1. Pengurangan Derau (*Noise Reduction*)

Derau atau *noise* pada citra penginderaan jauh dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk gangguan pada sensor saat akuisisi data, kesalahan selama transmisi data, atau bahkan efek atmosfer yang tidak sepenuhnya terkoreksi. Derau ini tampak sebagai variasi acak pada nilai piksel yang tidak merepresentasikan variasi sebenarnya di permukaan Bumi dan dapat mengganggu interpretasi visual serta analisis kuantitatif.

Beberapa jenis derau yang umum ditemui antara lain:

- *Salt-and-pepper noise*: Ditandai dengan munculnya piksel-piksel terang (putih, "salt") dan gelap (hitam, "pepper") secara acak di seluruh citra.
- *Speckle noise*: Merupakan derau granular yang khas pada citra Radar (SAR), disebabkan oleh interferensi konstruktif dan destruktif dari gelombang mikro yang dipantulkan dari banyak penghambur kecil dalam satu sel resolusi.

Untuk mengurangi efek derau, berbagai jenis filter dapat diterapkan:

- Filter Spasial: Filter ini bekerja dengan memodifikasi nilai suatu piksel berdasarkan nilai piksel-piksel tetangganya dalam suatu jendela (*window*) tertentu.
 - *Median Filter*: Sangat efektif untuk menghilangkan *salt-and-pepper noise* sambil tetap mempertahankan ketajaman tepi objek. Filter ini mengganti nilai piksel tengah dalam jendela dengan nilai median dari semua piksel dalam jendela tersebut.¹⁷ Secara visual, penerapan filter median pada citra yang mengandung *salt-and-pepper noise* akan menghasilkan citra yang jauh lebih bersih, dengan titik-titik acak terang dan gelap berkurang drastis atau hilang, sementara batas-batas antar objek tetap terlihat jelas.
 - *Gaussian Filter*: Merupakan filter penghalusan (*smoothing filter*) yang menggunakan kernel Gaussian untuk merata-ratakan nilai piksel. Efektif untuk mengurangi derau acak umum, namun dapat menyebabkan sedikit pengaburan (*blurring*) pada tepi objek.
- Filter Spektral (Domain Frekuensi): Teknik ini bekerja dengan mentransformasikan citra ke domain frekuensi (misalnya, menggunakan Transformasi Fourier). Derau periodik, seperti *striping*, seringkali muncul sebagai pola tertentu di domain frekuensi dan dapat dihilangkan dengan menyaring frekuensi tersebut sebelum mentransformasikan citra kembali ke domain spasial.

6.4.2. Peningkatan Kontras dan Ketajaman

Peningkatan kontras bertujuan untuk memperluas rentang nilai kecerahan piksel dalam citra sehingga perbedaan antara fitur-fitur yang gelap dan terang menjadi lebih jelas. Peningkatan ketajaman, di sisi lain, bertujuan untuk menonjolkan batas-batas atau tepi antar objek, membuat detail dalam citra tampak lebih tegas.

- *Histogram Equalization*: Teknik ini mendistribusikan ulang nilai-nilai piksel dalam citra sehingga histogram intensitasnya menjadi lebih merata atau seragam di seluruh rentang nilai yang mungkin. Hasilnya adalah peningkatan kontras global pada citra, di mana area yang sebelumnya memiliki kontras rendah menjadi lebih jelas.
- *Contrast Stretching* (Peregangan Kontras): Metode ini bekerja dengan meregangkan rentang nilai piksel asli yang mungkin sempit ke rentang nilai yang lebih lebar, misalnya dari nilai minimum dan maksimum aktual dalam citra ke rentang penuh yang diizinkan oleh tipe data citra (misalnya, 0-255 untuk citra 8-bit). Berbeda dengan *histogram equalization* yang menerapkan penskalaan non-linear, *contrast stretching* biasanya menerapkan penskalaan linear. Secara visual, citra yang telah mengalami *contrast stretching* akan tampak memiliki perbedaan yang lebih besar antara area gelap dan terang. Histogram citra yang awalnya terkonsentrasi pada rentang nilai yang sempit akan menyebar lebih luas setelah peregangan. Sebagai contoh, sebuah citra dengan histogram yang terkumpul di tengah (misalnya, nilai piksel antara 79-136) akan tampak datar; setelah *contrast stretching* ke rentang 0-255, histogram akan melebar dan visual kontras akan meningkat signifikan.
- *Sharpening* (Penajaman): Teknik ini menggunakan filter spasial untuk menonjolkan perbedaan nilai piksel yang tinggi, yang biasanya terjadi

pada tepi objek.

- *Laplacian Filter*: Merupakan filter orde kedua yang sangat sensitif terhadap perubahan intensitas yang cepat dan dapat menonjolkan tepi serta detail halus.
- *Unsharp Masking*: Proses ini bekerja dengan membuat versi citra yang dihaluskan (*blurred*), kemudian mengurangkannya dari citra asli untuk menghasilkan "masker" yang berisi detail frekuensi tinggi (tepi). Masker ini kemudian ditambahkan kembali ke citra asli untuk meningkatkan ketajamannya.

6.4.3. Penghapusan Awan dan Bayangan

Awan dan bayangan awan merupakan masalah yang persisten dalam penginderaan jauh optis, terutama di wilayah tropis yang sering tertutup awan. Keberadaan awan menutupi informasi permukaan di bawahnya, sedangkan bayangan awan mengubah karakteristik radiometrik area yang tertutupnya, membuatnya tampak lebih gelap dan sulit diinterpretasi.

- *Cloud Detection dan Removal*: Berbagai algoritma telah dikembangkan untuk mendeteksi area yang tertutup awan secara otomatis, seperti algoritma Fmask atau metode berbasis *thresholding* pada band spektral tertentu (misalnya, band termal atau band biru). Setelah terdeteksi, area awan dapat dihilangkan (di-masking) atau digantikan dengan data piksel dari citra lain pada waktu yang berbeda (jika tersedia dan bebas awan) atau melalui teknik interpolasi.
- *Shadow Removal*: Area bayangan juga dapat dideteksi dan dikoreksi. Teknik perbaikan area bayangan meliputi penyesuaian kecerahan berdasarkan area sekitarnya yang tidak berbayang atau menggunakan model pencahayaan untuk mengestimasi nilai piksel yang seharusnya.

Perlu dicatat bahwa beberapa teknik peningkatan kualitas, terutama yang melibatkan penyesuaian parameter secara manual oleh analis (seperti

penyesuaian kurva kontras secara interaktif), dapat bersifat subjektif. Apa yang dianggap sebagai "peningkatan" oleh satu analis mungkin berbeda bagi analis lain. Untuk aplikasi yang memerlukan objektivitas dan reproduktifitas, seperti dalam penelitian ilmiah atau pemetaan operasional, penting untuk menggunakan metode peningkatan yang lebih standar dan terdokumentasi dengan baik, atau setidaknya mencatat parameter yang digunakan secara rinci. Meskipun demikian, tujuan akhir dari peningkatan kualitas citra adalah untuk memaksimalkan ekstraksi informasi yang berguna, baik untuk interpretasi visual maupun untuk analisis digital lebih lanjut.

6.5. Transformasi Citra

Transformasi citra dalam penginderaan jauh merujuk pada proses menghasilkan citra baru dari satu atau lebih band citra asli melalui penerapan operasi matematis pada nilai-nilai piksel. Tujuan utama dari transformasi citra adalah untuk menonjolkan fitur-fitur atau fenomena tertentu yang mungkin tidak terlihat jelas pada citra aslinya, mereduksi dimensionalitas data (jumlah band), atau menghasilkan variabel baru yang memiliki interpretasi fisik atau biofisik yang lebih bermakna. Citra hasil transformasi ini kemudian dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut, seperti klasifikasi, deteksi perubahan, atau pemodelan.

Beberapa teknik transformasi citra yang umum digunakan adalah:

6.5.1. Indeks Spektral

Indeks spektral adalah kombinasi matematis dari nilai reflektansi pada dua atau lebih band spektral yang dirancang secara spesifik untuk meningkatkan informasi tentang fitur permukaan tertentu (seperti vegetasi, air, tanah, atau area terbangun) sambil meminimalkan pengaruh variasi iluminasi, kondisi atmosfer, dan topografi. Dengan menggabungkan informasi dari band-band di mana fitur target memiliki respons spektral

yang kontras (misalnya, penyerapan tinggi di satu band dan reflektansi tinggi di band lain), indeks spektral dapat menghasilkan citra baru di mana fitur target tersebut tampak lebih menonjol.

- NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*): Merupakan salah satu indeks vegetasi yang paling populer dan banyak digunakan, yang diperkenalkan untuk pertama kali oleh (Rouse dkk. 1973, 1974). NDVI dihitung menggunakan band merah (di mana klorofil menyerap kuat) dan band inframerah dekat (di mana struktur sel daun memantulkan kuat). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) adalah salah satu indeks vegetasi yang paling banyak digunakan untuk mengukur dan memantau kesehatan serta kerapatan vegetasi. NDVI dihitung berdasarkan perbedaan antara nilai pantulan pada saluran inframerah dekat (Near Infrared - NIR) dan saluran merah (Red) yang terekam oleh sensor satelit. Rumus untuk menghitung NDVI adalah sebagai berikut :

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red})$$

Prinsip dasar NDVI adalah bahwa vegetasi yang sehat akan menyerap sebagian besar radiasi pada saluran merah untuk fotosintesis dan memantulkan sebagian besar radiasi pada saluran inframerah dekat karena struktur sel daunnya. Sebaliknya, tanah kosong atau vegetasi yang tidak sehat (stres) akan memiliki pola pantulan yang berbeda. Nilai NDVI yang dihasilkan berkisar antara -1 hingga +1. Interpretasi umum dari nilai-nilai NDVI adalah sebagai berikut:

- NDVI < 0 (biasanya -1 hingga 0): Mengindikasikan area perairan, salju, es, atau awan. Permukaan ini umumnya memiliki pantulan pada saluran merah yang lebih tinggi daripada saluran inframerah dekat.

- NDVI sekitar 0 hingga 0,2: Mengindikasikan tanah kosong, batuan, atau area dengan vegetasi yang sangat sedikit atau jarang.
- NDVI sekitar 0,2 hingga 0,5: Mengindikasikan vegetasi dengan tingkat kerapatan atau kesehatan sedang, seperti padang rumput, semak belukar, atau tanaman pertanian pada tahap pertumbuhan awal atau yang mengalami sedikit stres.
- NDVI > 0,5 (biasanya 0,5 hingga +1): Mengindikasikan vegetasi yang hijau, rapat, dan sehat, seperti hutan lebat atau tanaman pertanian yang produktif pada puncak masa pertumbuhan.

Tabel 6.1 Interpretasi Umum Nilai NDVI

Rentang Nilai NDVI	Kondisi Umum Vegetasi/Permukaan
< 0	Area perairan, salju, es, awan
0 – 0,2	Tanah kosong, batuan, vegetasi sangat sedikit/jarang
0,2 – 0,5	Vegetasi dengan tingkat pertumbuhan/kerapatan/kesehatan sedang
> 0,5	Vegetasi hijau yang rapat, sehat, dan produktif

- EVI (*Enhanced Vegetation Index*): Merupakan indeks vegetasi yang dimodifikasi untuk meningkatkan sensitivitas di area dengan biomassa tinggi dan mengurangi pengaruh atmosfer serta sinyal latar belakang tanah dibandingkan NDVI (Liu dan Huete 1995). EVI memasukkan band biru untuk koreksi efek aerosol atmosfer.
- Indeks Lainnya: Selain NDVI dan EVI, terdapat banyak indeks spektral lain yang dirancang untuk aplikasi spesifik, misalnya:
 - NDWI (*Normalized Difference Water Index*): Menggunakan band hijau dan inframerah dekat untuk memetakan badan air secara

efektif(McFeeters 1996).

- NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*): Menggunakan band inframerah gelombang pendek (SWIR) dan inframerah dekat (NIR) untuk menonjolkan area terbangun atau perkotaan(Zha, Gao, dan Ni 2003).

6.5.2. Analisis Komponen Utama (PCA - *Principal Component Analysis*)

PCA adalah teknik statistik multivariat yang digunakan untuk mentransformasi satu set band citra asli yang mungkin saling berkorelasi menjadi satu set band baru yang tidak berkorelasi, yang disebut komponen utama (*principal components*). Diperkenalkan pertama kali oleh Karl Pearson pada tahun 1901(Pearson 1901) dan diperkenalkan ke kajian penginderaan jauh oleh John A. Richards pada tahun 2006 (Richards dan Jia 2006). Komponen utama diurutkan berdasarkan jumlah varians dari data asli yang dapat dijelaskannya. Komponen utama pertama (PC1) menjelaskan persentase varians terbesar, komponen kedua (PC2) menjelaskan persentase varians terbesar kedua dari sisa varians (dan tidak berkorelasi dengan PC1), dan seterusnya.

Dalam penginderaan jauh, PCA sering digunakan untuk:

- Reduksi Dimensi Data: Karena sebagian besar informasi dalam data multispektral sering terkonsentrasi pada beberapa komponen utama pertama, PCA dapat digunakan untuk mereduksi jumlah band yang perlu dianalisis tanpa kehilangan informasi signifikan. Ini berguna untuk mempercepat proses komputasi atau untuk visualisasi data multispektral yang kompleks (misalnya, menampilkan PC1, PC2, dan PC3 sebagai komposit warna RGB).
- Penghilangan Redundansi Spektral: Band-band dalam citra multispektral seringkali memiliki korelasi yang tinggi satu sama lain.

PCA menghilangkan korelasi ini, sehingga setiap komponen utama merepresentasikan aspek informasi yang unik.

- Peningkatan Citra: Komponen utama tertentu mungkin menonjolkan fitur-fitur yang tidak terlihat jelas pada band asli.

6.5.3. Transformasi Tasseled Cap

Transformasi Tasseled Cap (juga dikenal sebagai Transformasi Kauth-Thomas) adalah transformasi linear spesifik yang dirancang untuk data dari sensor seperti Landsat MSS, TM, ETM+, dan OLI (Kauth dan Thomas 1976). Transformasi ini mengubah data spektral asli menjadi serangkaian komponen baru yang memiliki interpretasi biofisik yang jelas, terutama relevan untuk aplikasi pertanian dan kehutanan. Tiga komponen utama yang dihasilkan adalah:

- *Brightness* (Kecerahan): Merupakan rata-rata tertimbang dari semua band dan berkaitan dengan kecerahan keseluruhan tanah atau permukaan.
- *Greenness* (Kehijauan): Menonjolkan kontras antara band tampak (terutama merah) dan band inframerah dekat, sehingga sangat sensitif terhadap jumlah dan kesehatan vegetasi hijau.
- *Wetness* (Kebasahan) atau *Yellowness* (Kekuningan): Berkaitan dengan kelembaban tanah dan vegetasi, serta menonjolkan perbedaan antara tanah dan vegetasi. Untuk sensor yang lebih baru, komponen ketiga ini sering disebut sebagai *Wetness*.

Transformasi Tasseled Cap berguna karena komponen-komponennya secara langsung terkait dengan karakteristik fisik permukaan, memudahkan interpretasi dan analisis perubahan biofisik dari waktu ke waktu.

6.5.4. Transformasi Ruang Warna

Transformasi ruang warna melibatkan pengubahan representasi warna citra dari satu model matematis ke model lain. Model warna yang paling umum

untuk tampilan digital adalah RGB (Merah, Hijau, Biru), di mana warna dihasilkan dari kombinasi aditif ketiga komponen warna primer ini. Namun, untuk beberapa aplikasi analisis dan manipulasi citra, model warna lain mungkin lebih sesuai.

Salah satu transformasi yang sering digunakan adalah dari RGB ke IHS (Intensitas, Hue, Saturasi) (Gonzalez dan Woods 2018):

- Intensitas (I): Merepresentasikan kecerahan keseluruhan warna.
- Hue (H): Merepresentasikan warna dominan (misalnya, merah, kuning, hijau).
- Saturasi (S): Merepresentasikan kemurnian atau kekuatan warna (seberapa sedikit warna putih yang tercampur).

Transformasi ke ruang warna IHS sering digunakan dalam teknik fusi citra seperti *pan-sharpening*. Dengan memisahkan komponen intensitas (yang berkaitan dengan detail spasial) dari komponen warna (hue dan saturasi), dimungkinkan untuk memanipulasi atau mengganti komponen intensitas tanpa mengubah secara signifikan karakteristik warna asli citra. Transformasi ruang warna juga dapat digunakan untuk peningkatan visual tertentu, misalnya dengan memodifikasi saturasi untuk membuat warna tampak lebih hidup.

Pemilihan jenis transformasi citra yang akan digunakan sangat bergantung pada tujuan spesifik analisis dan karakteristik data citra yang tersedia. Tidak ada satu transformasi yang superior untuk semua situasi. Misalnya, jika tujuannya adalah untuk memetakan sebaran dan kesehatan vegetasi, maka indeks vegetasi seperti NDVI atau EVI akan menjadi pilihan yang logis. Jika tujuannya adalah untuk mereduksi dimensionalitas data multispektral yang kompleks untuk visualisasi atau sebagai input klasifikasi, maka PCA mungkin lebih sesuai. Transformasi Tasseled Cap akan sangat berguna jika analisis difokuskan pada parameter biofisik seperti kehijauan atau kebasahan.

Penting juga bagi mahasiswa untuk memahami bagaimana menginterpretasikan citra hasil transformasi. Nilai piksel dalam citra yang telah ditransformasi memiliki makna yang berbeda dari nilai digital asli atau nilai reflektansi. Sebagai contoh, dalam citra NDVI, nilai piksel yang tinggi (mendekati +1) secara konsisten menunjukkan keberadaan vegetasi yang lebat dan sehat, sementara nilai negatif biasanya berasosiasi dengan badan air. Dalam hasil PCA, komponen utama pertama (PC1) seringkali merepresentasikan variasi kecerahan keseluruhan dalam adegan, sementara komponen-komponen berikutnya menangkap variasi spektral yang lebih subtil. Pemahaman terhadap makna baru dari nilai piksel ini adalah kunci untuk melakukan analisis dan interpretasi yang benar terhadap citra hasil transformasi.

6.6. Fusi Citra (*Image Fusion*)

Fusi citra, atau *image fusion*, adalah proses menggabungkan informasi dari dua atau lebih citra penginderaan jauh untuk menghasilkan satu citra komposit baru. Tujuan utama dari fusi citra adalah untuk menghasilkan citra output yang memiliki kualitas informasi yang lebih baik atau lebih lengkap dibandingkan dengan citra-citra input individual. "Kualitas informasi yang lebih baik" ini dapat berarti peningkatan resolusi spasial, peningkatan resolusi spektral, atau kombinasi keduanya, sehingga citra hasil fusi lebih berguna untuk interpretasi visual maupun analisis digital (Wald, Ranchin, dan Mangolini 1997). Citra-citra yang difusikan dapat berasal dari sensor yang sama namun dengan karakteristik resolusi yang berbeda (misalnya, band pankromatik dan multispektral dari satelit yang sama), atau dari sensor yang berbeda sama sekali (misalnya, data optik dan data Radar).

Beberapa teknik fusi citra yang umum digunakan adalah:

6.6.1. Pan-sharpening

Pan-sharpening adalah salah satu teknik fusi citra yang paling umum diterapkan. Tujuannya adalah untuk meningkatkan resolusi spasial dari citra multispektral (yang memiliki informasi warna atau spektral yang kaya namun resolusi spasialnya relatif lebih rendah) dengan menggunakan informasi detail spasial dari citra pankromatik (yang memiliki resolusi spasial tinggi namun hanya terdiri dari satu band spektral lebar, biasanya mencakup sebagian besar spektrum tampak). Hasil dari proses *pan-sharpening* adalah citra multispektral baru yang memiliki resolusi spasial setajam citra pankromatik input, sambil tetap mempertahankan informasi warna atau spektral dari citra multispektral asli.

Beberapa metode *pan-sharpening* yang populer meliputi:

- Metode berbasis PCA (*Principal Component Analysis*): Komponen utama pertama (PC1) dari citra multispektral (yang seringkali merepresentasikan informasi intensitas atau kecerahan) digantikan dengan citra pankromatik yang telah disesuaikan histogramnya, kemudian dilakukan transformasi PCA invers untuk menghasilkan citra multispektral yang telah dipertajam.
- Metode berbasis IHS (*Intensity-Hue-Saturation*): Citra multispektral (biasanya tiga band, misal R,G,B) ditransformasikan ke ruang warna IHS. Komponen Intensitas (I) kemudian digantikan dengan citra pankromatik (yang juga telah disesuaikan), dan transformasi IHS invers dilakukan untuk mendapatkan kembali citra RGB yang telah dipertajam.
- Transformasi Brovey: Metode sederhana yang mengalikan setiap band multispektral dengan rasio antara citra pankromatik dan jumlah dari band-band multispektral (atau komponen intensitas).
- Metode berbasis Wavelet: Menggunakan dekomposisi wavelet untuk memisahkan informasi spasial dan spektral, kemudian menggabungkannya kembali.

Pan-sharpening sangat berguna untuk aplikasi yang memerlukan identifikasi objek detail sekaligus analisis spektral, seperti pemetaan perkotaan detail, analisis vegetasi skala lokal, atau interpretasi visual yang lebih baik.

6.6.2. Fusi Data SAR dan Optik

Fusi data dari sensor Radar (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) dan sensor optik merupakan area penting lainnya dalam fusi citra. Sensor optik, seperti Landsat atau Sentinel-2, menyediakan informasi spektral yang kaya mengenai karakteristik permukaan berdasarkan pantulan cahaya Matahari. Namun, sensor optik memiliki keterbatasan karena tidak dapat menembus awan dan sensitif terhadap kondisi pencahayaan. Di sisi lain, sensor SAR aktif menggunakan gelombang mikro yang dapat menembus awan, kabut, dan asap, serta dapat beroperasi siang dan malam. Data SAR sangat sensitif terhadap struktur geometris permukaan, kekasaran, dan kandungan air (kelembaban).

Dengan menggabungkan keunggulan dari kedua jenis data ini, fusi data SAR dan optik dapat menghasilkan informasi yang lebih komprehensif dan akurat. Sebagai contoh:

- Pemetaan Tutupan Lahan yang Lebih Akurat: Terutama di daerah tropis yang sering tertutup awan, data SAR dapat mengisi kekosongan informasi yang disebabkan oleh tutupan awan pada citra optik. Informasi tekstur dari SAR juga dapat membantu membedakan kelas tutupan lahan yang mungkin memiliki respons spektral serupa pada data optik.
- Pemantauan Banjir: Data SAR sangat efektif untuk memetakan area tergenang banjir karena permukaan air yang tenang akan memantulkan sinyal Radar menjauhi sensor (tampak gelap pada citra SAR). Informasi ini dapat difusikan dengan data optik pra-banjir

untuk analisis dampak.

- Analisis Biomassa Hutan: Data SAR, terutama yang menggunakan panjang gelombang lebih panjang (misalnya, L-band atau P-band), dapat memberikan informasi mengenai struktur dan biomassa hutan, yang dapat melengkapi informasi spektral dari sensor optik.

Salah satu tantangan utama dalam fusi citra, terlepas dari metode yang digunakan, adalah memastikan ko-registrasi geometrik yang sangat presisi antara citra-citra yang akan difusikan. Jika terdapat pergeseran spasial (mis-registrasi) bahkan hanya beberapa piksel antar citra input, maka proses fusi akan menggabungkan informasi dari lokasi geografis yang berbeda, yang dapat menghasilkan artefak visual, distorsi warna, dan informasi yang salah atau menyesatkan pada citra hasil fusi. Oleh karena itu, akurasi geometrik dari citra-citra input dan proses ko-registrasi adalah langkah krusial. Selain itu, perbedaan waktu akuisisi antara citra-citra yang akan difusikan juga bisa menjadi masalah jika terdapat perubahan signifikan di permukaan Bumi antara dua waktu akuisisi tersebut (misalnya, perubahan akibat pertumbuhan vegetasi, pembangunan, atau kejadian bencana). Perubahan temporal ini dapat mempersulit interpretasi citra hasil fusi jika tidak dipertimbangkan dengan baik.

Setelah proses fusi dilakukan, penting juga untuk mengevaluasi kualitas citra hasil fusi. Evaluasi ini dapat dilakukan secara kualitatif melalui inspeksi visual oleh analis untuk menilai peningkatan detail spasial, pelestarian warna atau informasi spektral, dan minimnya artefak. Selain itu, terdapat berbagai metrik kuantitatif yang dapat digunakan untuk menilai sejauh mana citra hasil fusi mempertahankan informasi spektral dari citra multispektral asli (misalnya, dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE) spektral atau *Spectral Angle Mapper* (SAM) antara citra fusi dan citra multispektral asli yang di-*resample*) dan sejauh mana detail spasial telah ditingkatkan. Pemilihan metode fusi dan parameter yang tepat

seringkali melibatkan upaya untuk mencapai keseimbangan optimal antara peningkatan detail spasial dan pelestarian fidelitas spektral.

6.7. Klasifikasi Citra dalam Penginderaan Jauh

Klasifikasi citra merupakan salah satu teknik fundamental dan paling sering digunakan dalam analisis data penginderaan jauh. Tujuan utama dari klasifikasi citra adalah untuk mengelompokkan piksel-piksel dalam sebuah citra digital (seperti citra satelit) ke dalam sejumlah kelas-kelas tematik atau kategori informasi yang telah ditentukan sebelumnya, berdasarkan karakteristik spektral, spasial, dan/atau temporalnya. Proses ini secara efektif mengubah data citra mentah yang berupa matriks nilai digital menjadi representasi visual yang terstruktur dan dapat diinterpretasi, seperti peta tutupan lahan, peta jenis vegetasi, peta sebaran permukiman, atau peta zona risiko bencana. Informasi tematik yang dihasilkan dari klasifikasi citra menjadi dasar penting untuk berbagai aplikasi, mulai dari inventarisasi sumber daya alam, pemantauan perubahan lingkungan, hingga perencanaan pembangunan.

Dua paradigma utama mendominasi bidang klasifikasi citra dalam penginderaan jauh: analisis berbasis piksel (*pixel-based analysis*) dan analisis berbasis objek (*object-based image analysis* - OBIA)(Burnett dan Blaschke 2003).

6.7.1. Klasifikasi Berbasis Piksel

Analisis berbasis piksel, yang beroperasi pada tingkat granularitas piksel individual, mengklasifikasikan setiap piksel dalam citra secara independen, terutama berdasarkan nilai-nilai spektralnya (yaitu, nilai intensitas atau reflektansi pada setiap band spektral). Pendekatan ini tidak secara eksplisit mempertimbangkan informasi spasial seperti bentuk, ukuran, tekstur, atau hubungan kontekstual dengan piksel tetangga dalam proses klasifikasi itu sendiri (meskipun informasi spasial dapat digunakan dalam tahap pasca-

klasifikasi, seperti penghalusan).

Klasifikasi berbasis piksel dapat dikategorikan lebih lanjut menjadi dua jenis utama: klasifikasi tak terbimbing (*unsupervised classification*) dan klasifikasi terbimbing (*supervised classification*).

a. Klasifikasi Tak Terbimbing (*Unsupervised Classification*)

Klasifikasi tak terbimbing, juga sering disebut sebagai pengelompokan (*clustering*), adalah proses mengelompokkan piksel-piksel dalam citra berdasarkan kesamaan karakteristik spektralnya tanpa menggunakan data pelatihan berlabel yang disediakan oleh analis. Dalam pendekatan ini, algoritma secara otomatis mencari pola atau struktur alami dalam data dan membagi piksel-piksel ke dalam sejumlah kelompok atau "klaster" spektral. Setiap klaster terdiri dari piksel-piksel yang memiliki kemiripan respons spektral satu sama lain. Setelah proses pengelompokan selesai, analis kemudian perlu menginterpretasi dan memberikan label (nama kelas informasi) pada setiap klaster spektral yang terbentuk, biasanya dengan bantuan data referensi tambahan atau pengetahuan mengenai area studi.

Terdapat beragam algoritma klasifikasi tak terbimbing, di antaranya:

- **K-Means:** Algoritma ini merupakan salah satu yang paling populer karena efisien dan relatif sederhana. K-Means bertujuan untuk mempartisi data menjadi K jumlah klaster yang telah ditentukan sebelumnya oleh analis. Algoritma bekerja secara iteratif dengan menetapkan setiap piksel ke klaster yang pusatnya (mean) paling dekat, kemudian menghitung ulang pusat klaster berdasarkan piksel-piksel anggotanya, hingga tidak ada lagi perubahan signifikan dalam keanggotaan klaster atau posisi pusat klaster (MacQueen 1967).
- **ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*):** Algoritma ini merupakan pengembangan dari K-Means yang lebih canggih karena dapat secara iteratif menyesuaikan jumlah klaster selama proses berjalan (Ball dan Hall 1967). ISODATA

memungkinkan penggabungan kluster yang terlalu mirip atau pemecahan kluster yang terlalu heterogen, berdasarkan parameter yang ditentukan oleh pengguna, sehingga berpotensi menghasilkan jumlah kluster yang lebih optimal sesuai dengan distribusi data.

- Hierarchical Clustering: Pendekatan ini membangun representasi hierarkis dari data dengan secara iteratif menggabungkan kluster-kluster kecil menjadi kluster yang lebih besar (agglomerative) atau membagi kluster besar menjadi kluster-kluster yang lebih kecil (divisive), berdasarkan suatu metrik kemiripan atau jarak (Ward 1963). Hasilnya sering divisualisasikan sebagai dendrogram, yang dapat membantu dalam menentukan jumlah kluster yang sesuai. Metode ini berguna ketika struktur kluster yang tepat tidak diketahui sebelumnya. Meskipun metode ini sangat kuat secara teori, metode ini jarang digunakan untuk mengklasifikasikan seluruh piksel citra satelit (yang jumlahnya jutaan) karena beban komputasinya sangat berat.
- Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN): Algoritma ini mengidentifikasi kluster sebagai area padat piksel yang dipisahkan oleh area renggang piksel (Ester dkk. 1996). Keunggulan DBSCAN adalah kemampuannya untuk mendeteksi kluster dengan bentuk yang acak (tidak harus bulat seperti pada K-Means) dan ketahanannya terhadap *outlier* atau derau.
- Mean Shift Clustering: Metode ini mengidentifikasi kluster dengan mencari titik-titik kepadatan maksimum (mode) dalam ruang fitur (Comaniciu dan Meer 2002). Sifat adaptifnya, yang tidak memerlukan spesifikasi jumlah kluster sebelumnya, memberikan fleksibilitas dalam menganalisis data dengan karakteristik yang beragam.
- Self-Organizing Maps (SOM): Merupakan jenis jaringan saraf tiruan yang memproyeksikan data berdimensi tinggi (misalnya, vektor

spektral piksel) ke dalam peta berdimensi rendah (biasanya 2D) sambil berusaha mempertahankan hubungan topologis atau spasial antar data. SOM berguna untuk reduksi dimensi dan visualisasi pola dalam data (Kohonen 1982).

- Gaussian Mixture Models (GMM): Pendekatan ini mengasumsikan bahwa data berasal dari campuran beberapa distribusi Gaussian, di mana setiap distribusi merepresentasikan satu kluster (Dempster, Laird, dan Rubin 1977). Dengan memperkirakan parameter (mean dan kovarians) dari setiap distribusi Gaussian, GMM mampu memodelkan data yang kompleks dan mengidentifikasi kluster yang mungkin tumpang tindih.

Klasifikasi tak terbimbing memainkan peran krusial dalam eksplorasi data awal, terutama ketika pengetahuan mengenai kelas-kelas yang ada di area studi terbatas atau ketika ingin mengungkap pola-pola spektral tersembunyi dalam data citra.

Kelebihan Klasifikasi Tak Terbimbing:

- Tidak memerlukan data latih (*training data*) yang detail, sehingga prosesnya bisa lebih cepat dan tidak terlalu bergantung pada ketersediaan data referensi lapangan.
- Dapat menemukan kelas-kelas spektral yang mungkin tidak terduga atau tidak diketahui sebelumnya oleh analisis.
- Potensi bias dari analisis dalam pemilihan sampel latih dapat diminimalkan.
- Kelas-kelas yang unik secara spektral dapat diidentifikasi sebagai unit yang berbeda.

Kekurangan Klasifikasi Tak Terbimbing:

- Kelas-kelas spektral yang dihasilkan oleh algoritma mungkin tidak selalu secara langsung sesuai dengan kelas-kelas informasi yang diinginkan oleh pengguna (misalnya, satu kelas vegetasi mungkin

terpecah menjadi beberapa kluster spektral, atau beberapa jenis tutupan lahan yang berbeda mungkin tergabung dalam satu kluster).

- Proses interpretasi dan pelabelan kluster-kluster spektral menjadi kelas informasi yang bermakna dapat bersifat subjektif, memakan waktu, dan memerlukan pengetahuan ahli mengenai area studi.
- Analisis memiliki kontrol yang lebih sedikit terhadap identitas kelas akhir yang dihasilkan.
- Hubungan antara respons spektral dan kelas informasi dapat berubah seiring waktu atau antar lokasi, sehingga hasil klasifikasi mungkin kurang konsisten jika diterapkan pada citra yang berbeda tanpa penyesuaian.

Tabel 6.2 Ringkasan Beberapa Algoritma Klasifikasi Tak Terbimbing Umum

Nama Algoritma	Deskripsi Singkat Prinsip Kerja	Kelebihan Utama	Kekurangan Utama	Contoh Aplikasi
K-Means	Mempartisi data menjadi K kluster berdasarkan jarak terdekat ke pusat kluster (mean) secara iteratif.	Sederhana, cepat, efisien secara komputasi untuk dataset besar.	Memerlukan penentuan jumlah kluster (K) di awal, sensitif terhadap pemilihan pusat kluster awal, cenderung menghasilkan kluster berbentuk bulat dengan ukuran serupa.	Segmentasi pasar, pengelompokan dokumen, eksplorasi awal kelas tutupan lahan.
ISODATA	Pengembangan K-Means yang dapat menyesuaikan jumlah kluster	Lebih fleksibel dalam menentukan jumlah kluster optimal, dapat	Lebih kompleks secara komputasi dibandingkan K-Means, memerlukan	Pemetaan tutupan lahan awal, identifikasi variasi spektral

	secara iteratif (menggabungkan atau memecah klaster) berdasarkan parameter pengguna.	menangani klaster dengan varians berbeda.	pengaturan beberapa parameter tambahan.	dalam citra.
Hierar-chical Clustering	Membangun hierarki klaster dengan menggabungkan (agglomerative) atau memecah (divisive) klaster berdasarkan metrik kemiripan.	Tidak memerlukan penentuan jumlah klaster di awal, menghasilkan dendrogram yang membantu visualisasi struktur klaster.	Kurang efisien secara komputasi untuk dataset yang sangat besar, hasil bisa sensitif terhadap pilihan metrik jarak dan metode linkage.	Analisis taksonomi, pengelompokan, identifikasi struktur dalam data spektral.

b. Klasifikasi Terbimbing (Supervised Classification)

Berbeda dengan klasifikasi tak terbimbing, klasifikasi terbimbing memerlukan input berupa data referensi yang telah diidentifikasi kelasnya secara pasti oleh analis. Data referensi ini dikenal sebagai sampel latihan (*training samples*), area latihan (*training sites*), atau tanda tangan spektral (*spectral signatures*) untuk setiap kelas informasi yang diinginkan. Prosesnya melibatkan dua tahap utama: tahap pelatihan (*training phase*) dan tahap klasifikasi (*classification phase*).

Pada tahap pelatihan, analis memilih area-area sampel yang representatif pada citra untuk setiap kelas tematik yang ingin dipetakan (misalnya, hutan, air, permukiman, pertanian). Karakteristik spektral (nilai piksel pada setiap band) dari piksel-piksel dalam area latihan ini kemudian diekstraksi dan digunakan oleh algoritma klasifikasi untuk "mempelajari" sifat-sifat statistik atau pola spektral dari masing-masing kelas. Semakin representatif sampel latihan yang dipilih, semakin baik algoritma dapat membedakan antar kelas.

Pada tahap klasifikasi, algoritma yang telah "dilatih" tersebut kemudian diterapkan pada seluruh piksel dalam citra. Setiap piksel akan dialokasikan ke kelas yang paling sesuai berdasarkan kemiripan karakteristik spektralnya dengan tanda tangan spektral yang telah dipelajari dari sampel latih.

Kualitas dan representativitas data latih adalah faktor paling krusial yang menentukan keberhasilan klasifikasi terbimbing. Data latih harus:

- Representatif: Mencakup variasi spektral yang ada dalam setiap kelas di seluruh area studi.
- Akurat: Identifikasi kelas untuk sampel latih harus benar-benar sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan (*ground truth*). *Ground truth* dapat diperoleh melalui survei lapangan langsung, interpretasi citra dengan resolusi sangat tinggi, atau penggunaan peta tematik yang sudah ada dan terverifikasi akurasi.
- Cukup Jumlahnya: Jumlah piksel atau poligon sampel latih harus memadai untuk setiap kelas, terutama untuk kelas-kelas yang memiliki variabilitas spektral internal yang tinggi.
- Terdistribusi dengan Baik: Sampel latih sebaiknya tersebar di seluruh area citra untuk menangkap variasi spasial.

Selain data latih, penting juga untuk memiliki set data independen yang disebut data uji atau data validasi. Data ini juga berupa sampel area yang kelasnya diketahui secara pasti (berasal dari *ground truth*) tetapi *tidak* digunakan selama tahap pelatihan model. Data uji digunakan untuk mengevaluasi akurasi hasil klasifikasi secara objektif setelah model selesai dibangun. Penggunaan data uji yang independen memberikan penilaian yang lebih tidak bias terhadap kemampuan generalisasi model pada data baru yang belum pernah dilihat sebelumnya.

Beberapa metode klasifikasi terbimbing yang umum digunakan meliputi:

- Maximum Likelihood Classifier (MLC): Salah satu algoritma klasik

yang paling banyak digunakan. MLC mengasumsikan bahwa data untuk setiap kelas dalam setiap band memiliki distribusi probabilitas normal (Gaussian)(Richards 2013; Swain dan Davis 1978). Algoritma ini menghitung probabilitas bahwa suatu piksel tertentu dimiliki oleh masing-masing kelas yang telah didefinisikan dalam sampel latih, dan kemudian mengalokasikan piksel tersebut ke kelas yang memiliki probabilitas tertinggi. MLC mempertimbangkan varians dan kovarians dalam tanda tangan spektral kelas.

- Minimum-Distance-to-Means Classifier: Algoritma yang lebih sederhana. Pertama, rata-rata vektor spektral (pusat kelas) dihitung untuk setiap kelas dari sampel latih. Kemudian, setiap piksel yang tidak diketahui kelasnya dialokasikan ke kelas yang pusatnya memiliki jarak Euklidian (atau jarak statistik lainnya) terpendek dari vektor spektral piksel tersebut di ruang fitur(Nilsson 1965).
- Principal Component Analysis (PCA) (sebagai input): Meskipun PCA sendiri adalah teknik transformasi, komponen utama yang dihasilkan dari PCA dapat digunakan sebagai input band baru untuk algoritma klasifikasi lainnya(Richards 2013). Hal ini dapat membantu mengurangi dimensionalitas data dan menghilangkan korelasi antar band, yang terkadang dapat meningkatkan kinerja klasifikasi.
- Support Vector Machine (SVM): Algoritma pembelajaran mesin yang sangat efektif, terutama untuk data yang kompleks, non-linear, dan berdimensi tinggi, serta ketika jumlah sampel latih terbatas. SVM bekerja dengan mencari *hyperplane* optimal yang dapat memisahkan antar kelas dalam ruang fitur dengan margin maksimum (Huang, Davis, dan Townshend 2002). SVM tidak mengasumsikan distribusi data tertentu dan seringkali menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan MLC dalam banyak skenario penginderaan jauh. Studi perbandingan antara SVM dan MLC pada data Sentinel-2

menunjukkan bahwa SVM cenderung menghasilkan akurasi keseluruhan dan koefisien kappa yang sedikit lebih tinggi.

- Iso Cluster & Mahalanobis Distance: Iso Cluster adalah algoritma pengelompokan (mirip dengan ISODATA) yang dapat digunakan untuk menghasilkan tanda tangan spektral awal yang kemudian dapat disempurnakan dan digunakan dalam klasifikasi terbimbing (Ball dan Hall 1965). Jarak Mahalanobis adalah ukuran jarak statistik yang mempertimbangkan varians dan kovarians data, sering digunakan dalam algoritma klasifikasi yang berbasis jarak statistik (seperti varian dari Minimum Distance atau dalam MLC).
- Spectral Angle Mapper (SAM): Algoritma ini mengukur kesamaan spektral antara vektor spektral piksel yang tidak diketahui dan vektor spektral referensi (misalnya, dari sampel latih atau pustaka spektral) dengan menghitung "sudut" di antara keduanya dalam ruang n-dimensi (di mana n adalah jumlah band). Semakin kecil sudutnya, semakin mirip kedua spektrum tersebut. SAM relatif tidak sensitif terhadap variasi iluminasi (Yuhas, Goetz, dan Boardman 1992).

Kelebihan Klasifikasi Terbimbing:

- Analisis memiliki kontrol penuh atas definisi kelas-kelas informasi yang akan dipetakan, sesuai dengan tujuan aplikasi.
- Jika sampel latih berkualitas tinggi dan representatif, potensi untuk mencapai akurasi klasifikasi yang tinggi lebih besar dibandingkan klasifikasi tak terbimbing.
- Memungkinkan evaluasi akurasi yang lebih terstruktur menggunakan data uji.

Kekurangan Klasifikasi Terbimbing:

- Prosesnya sangat bergantung pada ketersediaan, kualitas, dan representativitas sampel latih. Pengumpulan data latih yang baik (terutama yang melibatkan survei lapangan) bisa memakan waktu,

biaya, dan tenaga.

- Jika sampel latihan tidak representatif atau mengandung kesalahan, hasil klasifikasi akan bias dan tidak akurat ("garbage in, garbage out").
- Algoritma hanya akan mengklasifikasikan piksel ke dalam kelas-kelas yang telah didefinisikan dalam sampel latihan; kelas-kelas lain yang mungkin ada di citra namun tidak terwakili dalam sampel latihan tidak akan teridentifikasi.
- Interpretasi data dapat "dipaksakan" agar sesuai dengan kelas yang telah ditentukan oleh analis.

Tabel 6.3 Ringkasan Beberapa Algoritma Klasifikasi Terbimbing Umum

Nama Algoritma	Deskripsi Singkat Prinsip Kerja	Kelebihan Utama	Kekurangan Utama	Asumsi Data	Contoh Aplikasi
Maximum Likelihood (MLC)	Mengalokasikan piksel ke kelas dengan probabilitas keanggotaan tertinggi, berdasarkan asumsi distribusi normal untuk setiap kelas.	Mempertimbangkan varians-kovarians kelas, sering memberikan hasil yang baik jika asumsi terpenuhi.	Sensitif terhadap kualitas data latihan, memerlukan sampel latihan yang cukup untuk estimasi parameter statistik yang akurat, mengasumsikan distribusi normal.	Distribusi normal (Gaussian) untuk data setiap kelas.	Pemetaan tutupan lahan, klasifikasi jenis tanaman.
Minimum Distance to Means	Mengalokasikan piksel ke kelas yang rata-rata spektralnya (pusat kelas) paling dekat.	Sederhana secara konseptual dan komputasi, cepat.	Tidak mempertimbangkan variabilitas dalam kelas (varians), sensitif terhadap <i>outlier</i> , batas kelas	Tidak ada asumsi distribusi spesifik, tetapi bekerja baik jika kelas-kelas terpisah dengan	Klasifikasi cepat untuk eksplorasi awal, pemetaan dengan kelas yang spektralnya sangat berbeda.

			cenderung linear.	baik.	
Support Vector Machine (SVM)	Mencari <i>hyperplane</i> optimal yang memisahkan kelas dengan margin maksimum di ruang fitur.	Efektif untuk data berdimensi tinggi dan non-linear, robust terhadap <i>overfitting</i> dengan sampel latihan kecil, tidak mengasumsikan distribusi data.	Lebih kompleks secara komputasi untuk pelatihan dibandingkan metode sederhana, pemilihan parameter kernel dan regularisasi bisa menjadi tantangan.	Tidak ada asumsi distribusi data.	Klasifikasi tutupan lahan kompleks, identifikasi objek spesifik, analisis data hiperspektral.
Spectral Angle Mapper (SAM)	Mengukur kesamaan spektral berdasarkan sudut antara vektor spektral piksel dan vektor spektral referensi.	Relatif tidak sensitif terhadap variasi iluminasi dan albedo, baik untuk membandingkan bentuk spektrum.	Tidak mempertimbangkan magnitudo atau kecerahan spektrum secara keseluruhan, hanya bentuknya.	Tidak ada asumsi distribusi data.	Pemetaan mineralogi, identifikasi material berdasarkan pustaka spektral.

6.7.2. Klasifikasi Berbasis Objek (*Object-Based Image Analysis - OBIA*)

Selain klasifikasi berbasis piksel yang telah lama dominan, dalam beberapa dekade terakhir berkembang pendekatan alternatif yang disebut Klasifikasi Berbasis Objek atau *Object-Based Image Analysis (OBIA)* (Blaschke 2010). Pendekatan ini menawarkan beberapa keunggulan signifikan dibandingkan metode berbasis piksel tradisional, terutama dalam hal kemampuan untuk menghasilkan representasi objek dunia nyata yang lebih bermakna dan dalam mengatasi beberapa keterbatasan klasifikasi berbasis piksel, khususnya ketika bekerja dengan citra resolusi spasial tinggi.

Proses fundamental dalam OBIA berbeda dari klasifikasi berbasis piksel.

Alih-alih mengklasifikasikan setiap piksel secara individual, OBIA bekerja dalam dua tahap utama:

1. Segmentasi Citra: Tahap awal dan paling krusial dalam OBIA adalah segmentasi citra. Proses ini bertujuan untuk mengelompokkan piksel-piksel yang berdekatan dan memiliki karakteristik serupa menjadi unit-unit yang lebih besar yang disebut objek citra atau segmen. Kriteria homogenitas yang digunakan untuk pengelompokan ini dapat meliputi kesamaan nilai spektral (warna), tekstur, bentuk, ukuran, dan kedekatan spasial. Salah satu teknik segmentasi yang populer adalah segmentasi multi-resolusi, yang memungkinkan pembentukan objek pada berbagai skala spasial, dari objek kecil hingga objek besar, tergantung pada parameter yang ditetapkan pengguna. Hasil dari tahap segmentasi adalah partisi citra menjadi sejumlah poligon objek yang tidak tumpang tindih.
2. Klasifikasi Objek: Setelah objek-objek citra terbentuk melalui segmentasi, tahap selanjutnya adalah mengklasifikasikan objek-objek tersebut ke dalam kelas-kelas tematik yang diinginkan. Berbeda dengan klasifikasi berbasis piksel yang hanya menggunakan informasi spektral per piksel, klasifikasi objek dalam OBIA dapat memanfaatkan beragam atribut atau fitur yang dihitung untuk setiap objek. Fitur-fitur ini dapat mencakup:
 - Fitur Spektral: Nilai rata-rata band, standar deviasi band, nilai minimum/maksimum band dalam objek.
 - Fitur Bentuk: Luas, keliling, kekompakan, elongasi (panjang/lebar), rektangularitas.
 - Fitur Tekstur: Ukuran statistik yang menggambarkan variasi spasial nilai piksel dalam objek (misalnya, homogenitas, kontras, entropi).
 - Fitur Kontekstual/Topologis: Hubungan spasial dengan objek

tetangga (misalnya, berbatasan dengan objek kelas apa, jarak ke objek terdekat dari kelas tertentu). Klasifikasi objek dapat dilakukan menggunakan berbagai algoritma, termasuk algoritma klasifikasi terbimbing (dengan menggunakan sampel objek yang telah diketahui kelasnya) atau pendekatan berbasis aturan (*rule-based classification*) di mana analis mendefinisikan serangkaian aturan logika berdasarkan kombinasi fitur-fitur objek untuk mengalokasikan objek ke kelas tertentu.

Proses Klasifikasi Berbasis Objek (Object-Based Image Analysis - OBIA) merupakan pendekatan yang berbeda dari klasifikasi berbasis piksel. OBIA bekerja dalam dua tahap utama: segmentasi dan klasifikasi objek.

Alur Kerja Umum Klasifikasi Berbasis Objek (OBIA): Input Citra Penginderaan Jauh → Segmentasi Citra → Objek Citra (Hasil Segmentasi) → Ekstraksi Fitur Objek (Fitur Spektral, Bentuk, Tekstur, Kontekstual) → Klasifikasi Objek → Output Peta Tematik

Terdapat beberapa keunggulan signifikan dari pendekatan klasifikasi berbasis objek:

- Representasi yang Lebih Bermakna dan Realistis: Karena unit analisisnya adalah objek atau segmen yang memiliki batas dan bentuk, hasil klasifikasi OBIA cenderung menghasilkan peta tematik yang lebih halus, lebih kartografis, dan lebih mencerminkan entitas dunia nyata (misalnya, satu bidang pertanian, satu bangunan, satu petak hutan) dibandingkan dengan tampilan "bintik-bintik" (*salt-and-pepper effect*) yang sering dihasilkan oleh klasifikasi berbasis piksel.
- Integrasi Multi-Sumber Data dan Fitur: OBIA secara inheren memungkinkan integrasi dan pemanfaatan berbagai jenis informasi dalam proses klasifikasi. Selain informasi spektral, OBIA dapat dengan mudah mengakomodasi fitur-fitur spasial (bentuk, ukuran), tekstural, dan kontekstual dari objek. Lebih lanjut, data dari sumber

lain seperti data elevasi (DEM), data LiDAR, atau data vektor (misalnya, batas administrasi, jaringan jalan dari shapefile) dapat diintegrasikan ke dalam analisis untuk meningkatkan akurasi dan relevansi klasifikasi.

- Ketahanan terhadap Variabilitas Internal Kelas dan Derau: Dengan menganalisis objek secara keseluruhan, OBIA cenderung lebih tahan terhadap variasi spektral internal dalam satu kelas objek (misalnya, variasi warna atap dalam kelas "permukiman") dan terhadap derau acak pada tingkat piksel. Efek *salt-and-pepper* yang umum pada klasifikasi berbasis piksel dapat sangat dikurangi karena klasifikasi dilakukan pada unit objek yang lebih stabil.

Beberapa metode dan perangkat lunak yang dikenal untuk OBIA meliputi:

- Segmentasi Multi-resolusi di eCognition: Perangkat lunak eCognition (sekarang bagian dari Trimble) adalah salah satu platform yang paling dikenal dan komprehensif untuk OBIA, dengan algoritma segmentasi multi-resolusi yang kuat dan fleksibel serta beragam alat untuk ekstraksi fitur dan klasifikasi berbasis aturan atau sampel.
- Segment Mean Shift di ArcGIS: Perangkat lunak ArcGIS dari Esri juga menyediakan alat untuk segmentasi citra (seperti algoritma *Segment Mean Shift*) dan klasifikasi berbasis objek dalam *toolbox* analisis citranya.

Klasifikasi berbasis objek telah menunjukkan keberhasilan dalam berbagai aplikasi penginderaan jauh, termasuk pemetaan tutupan lahan detail, pemantauan hutan (misalnya, deteksi tebangan liar atau degradasi), identifikasi objek buatan manusia (bangunan, jalan), analisis area perkotaan, dan pemetaan habitat.

Salah satu alasan mengapa klasifikasi berbasis piksel sering menghasilkan tampilan "bintik-bintik" atau *salt-and-pepper* adalah karena setiap piksel dinilai secara terisolasi, tanpa mempertimbangkan identitas piksel-piksel

tetangganya. Sebuah piksel bisa saja diklasifikasikan sebagai "air" meskipun dikelilingi oleh piksel-piksel yang diklasifikasikan sebagai "hutan", hanya karena nilai spektralnya secara kebetulan lebih mirip dengan sampel latih air. OBIA mengatasi ini dengan pertama-tama membentuk objek-objek yang secara spasial koheren melalui segmentasi. Piksel-piksel dalam satu objek cenderung memiliki karakteristik yang serupa dan merupakan bagian dari entitas geografis yang sama. Klasifikasi kemudian dilakukan pada unit objek ini, sehingga hasilnya lebih halus dan lebih sesuai dengan persepsi visual manusia terhadap lanskap.

Pendekatan OBIA menjadi sangat relevan dan efektif ketika bekerja dengan citra satelit resolusi spasial tinggi (misalnya, citra dari WorldView, GeoEye, Pleiades, atau bahkan drone). Pada citra resolusi tinggi, objek-objek individual seperti bangunan, pohon, atau kendaraan dapat terlihat dengan jelas. Namun, pada saat yang sama, variabilitas spektral *di dalam* satu objek juga meningkat. Misalnya, atap sebuah bangunan bisa memiliki warna yang berbeda dari dindingnya, atau bahkan satu jenis atap bisa memiliki variasi kecerahan akibat bayangan atau material yang berbeda. Klasifikasi berbasis piksel akan kesulitan mengelompokkan semua piksel yang merupakan bagian dari satu bangunan ke dalam kelas "bangunan" yang sama karena variasi spektral internal ini. Sebaliknya, OBIA dapat lebih berhasil dengan pertama-tama mengidentifikasi "bangunan" sebagai satu objek berdasarkan homogenitas spasial, bentuk, dan ukurannya, baru kemudian mengklasifikasikannya berdasarkan kombinasi fitur-fitur tersebut. Ini lebih mendekati cara manusia menginterpretasi citra, di mana kita tidak hanya melihat warna piksel, tetapi juga bentuk, ukuran, tekstur, dan konteks objek (Jensen 2016; Richards dan Jia 2006).

Tabel 6.4 Perbandingan Klasifikasi Berbasis Piksel vs. Berbasis Objek

Aspek Perbandingan	Klasifikasi Berbasis Piksel	Klasifikasi Berbasis Objek (OBIA)
Unit Analisis Dasar	Piksel individual.	Objek atau segmen citra (kumpulan piksel homogen).
Penggunaan Informasi Spasial/ Kontekstual	Terbatas atau tidak digunakan secara langsung dalam proses klasifikasi inti (lebih sering pada pasca-klasifikasi).	Informasi spasial (bentuk, ukuran), tekstur, dan kontekstual (hubungan antar objek) merupakan bagian integral dari proses klasifikasi.
Penanganan Variabilitas Internal Kelas (efek <i>salt-and-pepper</i>)	Cenderung menghasilkan tampilan <i>salt-and-pepper</i> karena setiap piksel dinilai independen.	Lebih tahan terhadap variabilitas internal dan menghasilkan klasifikasi yang lebih halus karena bekerja pada unit objek.
Kemampuan Mengintegrasikan Data Tambahan	Lebih sulit untuk mengintegrasikan data non-spektral secara langsung ke dalam algoritma klasifikasi piksel.	Mudah mengintegrasikan berbagai sumber data (DEM, LiDAR, data vektor) sebagai fitur tambahan untuk objek.
Kesesuaian untuk Citra Resolusi Tinggi	Kurang optimal karena tingginya variabilitas spektral dalam objek dan kurangnya pemanfaatan informasi spasial.	Sangat sesuai dan seringkali lebih unggul karena dapat memanfaatkan informasi bentuk, ukuran, dan tekstur objek yang terlihat jelas.
Kompleksitas Proses	Algoritma klasifikasi relatif lebih sederhana, namun pemilihan sampel latih (untuk terbimbing) bisa kompleks.	Proses segmentasi menambahkan kompleksitas di awal, namun dapat menghasilkan fitur yang lebih kaya untuk klasifikasi. Definisi aturan (untuk <i>rule-based</i>) bisa kompleks.

6.7.3 Evaluasi Hasil Klasifikasi dengan Confusion Matrix

Alat standar yang paling umum digunakan untuk menilai akurasi klasifikasi adalah Matriks Kesalahan (Confusion Matrix), yang juga dikenal sebagai tabel kontingensi atau matriks eror. Matriks kesalahan adalah sebuah tabel dua dimensi yang menyajikan perbandingan antara kelas-kelas hasil

klasifikasi citra dengan data referensi (*reference data*, istilah yang kini lebih disukai daripada *ground truth* karena data lapangan pun memiliki potensi galat) untuk sejumlah sampel atau titik uji yang dipilih secara representatif. Baris dalam matriks kesalahan biasanya merepresentasikan data referensi (kelas sebenarnya di lapangan), sedangkan kolom merepresentasikan kelas hasil klasifikasi pada peta (atau sebaliknya, tergantung konvensi yang digunakan). Setiap sel dalam matriks menunjukkan jumlah sampel yang termasuk dalam kombinasi kelas referensi dan kelas hasil klasifikasi tertentu (Russell G. Congalton and Kass Green 2019).

Dari matriks kesalahan, beberapa ukuran atau metrik akurasi dapat dihitung untuk memberikan penilaian kuantitatif terhadap kinerja klasifikasi:

1. Akurasi Keseluruhan (Overall Accuracy):

Ini adalah metrik akurasi yang paling sederhana dan paling sering dilaporkan. Akurasi keseluruhan dihitung sebagai persentase dari total jumlah sampel atau piksel yang diklasifikasikan dengan benar (yaitu, jumlah sampel pada diagonal utama matriks kesalahan) dibagi dengan total jumlah sampel yang digunakan dalam uji akurasi. Rumus:

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii}}{N} \times 100\%$$

di mana k adalah jumlah kelas tutupan lahan (misalnya ada 4 dengan rincian: Hutan, Air, Pemukiman, Sawah), x_{ii} adalah jumlah sampel pada baris ke- i dan kolom ke- i (diagonal utama), dan N adalah total jumlah sampel.

2. Akurasi Produsen (Producer's Accuracy - PA): Akurasi produsen untuk suatu kelas tertentu mengukur seberapa baik area referensi dari kelas tersebut di lapangan berhasil diklasifikasikan dengan benar pada peta. Metrik ini dihitung dengan membagi jumlah sampel yang

diklasifikasikan dengan benar untuk suatu kelas (pada diagonal utama) dengan total jumlah sampel referensi untuk kelas tersebut (jumlah total pada baris kelas tersebut dalam matriks kesalahan). Akurasi produsen mengukur seberapa baik suatu area referensi (fakta lapangan) dari kelas tertentu berhasil diklasifikasikan dengan benar pada peta. Metrik ini dihitung dengan membagi jumlah sampel yang diklasifikasikan benar (diagonal utama) dengan total jumlah sampel referensi untuk kelas tersebut (total kolom ke- i). Rumus PA adalah:

$$\text{Producer's Accuracy}_i = \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100\%$$

dimana x_{ii} adalah nilai diagonal utama (prediksi benar), dan x_{+i} adalah total jumlah sampel referensi untuk kelas i (Total Kolom).

3. Akurasi Pengguna (User's Accuracy - UA): Akurasi pengguna untuk suatu kelas tertentu mengukur seberapa sering piksel yang diklasifikasikan sebagai kelas tersebut pada peta benar-benar mewakili kelas tersebut di lapangan. Metrik ini dihitung dengan membagi jumlah sampel yang diklasifikasikan dengan benar untuk suatu kelas (pada diagonal utama) dengan total jumlah sampel yang diklasifikasikan sebagai kelas tersebut pada peta (jumlah total pada kolom kelas tersebut dalam matriks kesalahan). Akurasi pengguna berkaitan dengan kesalahan komisi (errors of commission), yaitu seberapa sering piksel yang diklasifikasikan sebagai kelas tersebut pada peta benar-benar mewakili kelas tersebut di lapangan (reliabilitas peta). Metrik ini dihitung dengan membagi jumlah sampel yang diklasifikasikan dengan benar (diagonal utama) dengan total jumlah sampel yang diklasifikasikan sebagai kelas tersebut pada peta (jumlah total pada baris kelas tersebut dalam matriks kesalahan)

$$\text{User's Accuracy}_i = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \times 100\%$$

di mana x_{ii} adalah nilai diagonal utama (prediksi benar), dan x_{i+} adalah total jumlah sampel yang diklasifikasikan sebagai kelas i pada peta (total baris ke- i).

4. Koefisien Kappa (KHAT atau κ): Koefisien Kappa adalah ukuran akurasi statistik yang lebih robust dibandingkan akurasi keseluruhan karena Kappa memperhitungkan kesepakatan (agreement) antara hasil klasifikasi dan data referensi yang mungkin terjadi secara kebetulan (by chance). Nilai Kappa berkisar antara -1 hingga +1. Nilai Kappa = 1 menunjukkan kesepakatan sempurna, Kappa = 0 menunjukkan kesepakatan yang terjadi hanya karena kebetulan, dan nilai Kappa negatif menunjukkan kesepakatan yang lebih buruk daripada kebetulan (jarang terjadi). Terdapat berbagai skema interpretasi untuk nilai Kappa; misalnya, menurut Landis dan Koch (1977) (Landis dan Koch 1977), nilai Kappa dapat dikategorikan menjadi beberapa tingkat kesesuaian, seperti: <0 (Tidak ada kesesuaian), 0-0,20 (Sangat Rendah), 0,21-0,40 (Rendah), 0,41-0,60 (Sedang), 0,61-0,80 (Baik/Substansial), dan 0,81-1,00 (Sangat Baik/Hampir Sempurna). Beberapa standar juga menetapkan ambang batas akurasi, misalnya akurasi total di atas 70% (Purwadhi 2001) atau di atas 85% (ANDERSON dkk. 1976).

Penting untuk dipahami bahwa akurasi keseluruhan saja bisa memberikan gambaran yang menyesatkan mengenai kualitas klasifikasi, terutama jika terdapat ketidakseimbangan yang signifikan dalam ukuran atau proporsi antar kelas. Sebagai contoh, jika satu kelas (misalnya, hutan) mendominasi sebagian besar area studi (misalnya, 90% dari total area) dan algoritma klasifikasi sangat baik dalam mengklasifikasikan kelas dominan tersebut tetapi buruk dalam mengklasifikasikan kelas-kelas minoritas lainnya (misalnya, lahan basah atau permukiman), maka nilai akurasi keseluruhan

masih bisa terlihat sangat tinggi. Hal ini dapat menyembunyikan kinerja klasifikasi yang buruk pada kelas-kelas minoritas yang mungkin memiliki arti penting secara ekologis atau sosial-ekonomi.

Oleh karena itu, analisis yang lebih komprehensif terhadap kinerja klasifikasi memerlukan pertimbangan terhadap semua metrik akurasi, termasuk Koefisien Kappa serta Akurasi Produsen dan Akurasi Pengguna untuk setiap kelas secara individual. Akurasi Produsen membantu mengidentifikasi seberapa banyak dari setiap kelas sebenarnya di lapangan yang terlewatkan atau tidak terdeteksi oleh klasifikasi (kesalahan omisi). Sebaliknya, Akurasi Pengguna menunjukkan seberapa dapat diandalkannya peta untuk setiap kelas; yaitu, jika pengguna mengambil satu piksel yang diklasifikasikan sebagai kelas X pada peta, seberapa besar kemungkinannya piksel tersebut benar-benar merupakan kelas X di lapangan (terkait dengan kesalahan komisi). Koefisien Kappa memberikan ukuran kesepakatan yang lebih konservatif dan seringkali lebih realistis karena telah memperhitungkan faktor kebetulan. Pemahaman yang mendalam terhadap berbagai metrik akurasi ini memungkinkan pengguna untuk mengetahui di mana klasifikasi berhasil dengan baik dan di mana ia mengalami kegagalan atau ketidakakuratan. Informasi ini krusial untuk melakukan perbaikan terhadap proses klasifikasi (misalnya, dengan memperbaiki area pelatihan atau mencoba algoritma lain) atau untuk menggunakan hasil klasifikasi dengan tingkat kehati-hatian yang sesuai, terutama jika akan digunakan untuk aplikasi kritis seperti manajemen bencana atau perencanaan tata ruang.

Untuk memberikan ilustrasi yang lebih konkret mengenai bagaimana matriks kesalahan disusun dan bagaimana metrik-metrik akurasi dihitung, berikut disajikan sebuah contoh hipotetis:

Tabel 7.1 Contoh Ilustrasi Matriks Kesalahan dan Perhitungan Metrik

Akurasi

Hasil Klasifikasi (Peta)	Data Referensi (Lapangan)			Total Baris (Peta)	User's Accuracy (UA)
	Hutan (H)	Pertanian (P)	Air (A)		(Reliabilitas)
Hutan (H)	40	8	2	50	40/50=80,0%
Pertanian (P)	5	50	3	58	50/58=86,2%
Air (A)	0	2	40	42	40/42=95,2%
Total Kolom (Referensi)	45	60	45	N = 150	
Producer's Accuracy (PA)	40/45	50/60	40/45		Overall Accuracy:
(Akurasi)	0,889	0,833	0,889		130/150=86,7%

Misalkan kita melakukan klasifikasi tutupan lahan untuk 3 kelas: Hutan (H), Pertanian (P), dan Air (A). Setelah mengambil 150 titik sampel acuan, diperoleh matriks kesalahan sebagai berikut:

1. Overall Accuracy (OA)

Menghitung persentase total kebenaran dari seluruh sampel.

$$OA = \frac{40 + 50 + 40}{150} \times 100\% = \frac{130}{150} \times 100\% = 86,7$$

2. Producer's Accuracy (PA)

Mengukur seberapa baik data referensi (lapangan) terpetakan (terkait Omisi).

- PA Hutan = $\frac{40}{45} \times 100\% = 88,9\%$ artinya, 88,9% dari area hutan yang sebenarnya di lapangan berhasil diklasifikasikan sebagai hutan.
- PA Pertanian = $\frac{50}{60} \times 100\% = 83,3\%$
- PA Air = $\frac{40}{45} \times 100\% = 88,9\%$

3. User's Accuracy (UA)

Mengukur reliabilitas peta saat digunakan (terkait Komisi).

- $UA \text{ Hutan} = \frac{40}{50} \times 100\% = 80,0\%$ artinya, jika sebuah piksel diklasifikasikan sebagai hutan pada peta, probabilitas kebenarannya di lapangan adalah 80%).
- $UA \text{ Pertanian} = \frac{50}{58} \times 100\% = 86,2\%$
- $UA \text{ Air} = \frac{40}{42} \times 100\% = 95,2\%$

4. Koefisien Kappa (\hat{k})

Perhitungan Kappa memerlukan jumlah total piksel yang benar (D) dan jumlah produk dari total baris dan total kolom (Q).

Diketahui:

- $N = 150$
- $D = \sum x_{ii} = 130$

Menghitung produk marginal (Q):

$$\text{Hutan: } 45 \times 50 = 2250$$

$$\text{Pertanian: } 60 \times 58 = 3480$$

$$\text{Air: } 45 \times 42 = 1890$$

$$Q = 2250 + 3480 + 1890 = 7620$$

Maka nilai Kappa:

$$\hat{k} = \frac{N(D) - Q}{N^2 - Q}$$

$$\hat{k} = \frac{150(130) - 7620}{150^2 - 7620}$$

$$\hat{k} = \frac{19500 - 7620}{22500 - 7620} = \frac{11880}{14880} \approx 0,798$$

Interpretasi: Nilai Kappa 0,798 menunjukkan tingkat kesesuaian klasifikasi yang "Baik" atau "Substansial" (Substantial Agreement).

Contoh numerik ini diharapkan dapat membantu mahasiswa dalam memahami bagaimana matriks kesalahan dibangun dan bagaimana berbagai metrik akurasi dihitung dan diinterpretasikan. Ini mengubah

konsep yang mungkin tampak abstrak menjadi sesuatu yang lebih konkret dan dapat dipraktikkan.

6.8. Perangkat Lunak Pengolahan Citra Digital

Untuk melakukan berbagai tugas pengolahan citra digital yang telah dibahas dalam bab ini, mulai dari pra-pemrosesan, peningkatan kualitas, transformasi, hingga klasifikasi dan evaluasi, para praktisi dan peneliti penginderaan jauh memerlukan perangkat lunak (*software*) yang sesuai. Saat ini, tersedia beragam pilihan perangkat lunak, mulai dari solusi komersial yang mapan, perangkat lunak sumber terbuka (*open source*) yang semakin populer, hingga platform berbasis komputasi awan yang inovatif. Pemilihan perangkat lunak seringkali bergantung pada kebutuhan spesifik proyek, ketersediaan anggaran, tingkat keahlian pengguna, dan skala data yang akan diolah.

6.8.1. Perangkat Lunak Komersial

Perangkat lunak komersial biasanya menawarkan antarmuka pengguna grafis (GUI) yang komprehensif dan ramah pengguna, berbagai alat analisis canggih yang terintegrasi, dokumentasi yang ekstensif, serta dukungan teknis dari vendor. Namun, penggunaan perangkat lunak ini umumnya memerlukan pembelian lisensi yang bisa jadi mahal. Beberapa contoh perangkat lunak komersial yang populer dalam bidang penginderaan jauh dan pengolahan citra meliputi:

- ENVI (Environment for Visualizing Images, <https://www.nv5geospatialsoftware.com>): Dikembangkan oleh NV5 Geospatial Solutions (sebelumnya Exelis Visual Information Solutions dan Harris Geospatial Solutions). ENVI dikenal luas karena kemampuannya yang canggih dalam analisis citra, terutama untuk data hiperspektral, dan menyediakan berbagai alat untuk koreksi atmosfer, klasifikasi, deteksi target, dan visualisasi.

- ERDAS IMAGINE (<https://hexagon.com>): Produk dari Hexagon Geospatial. ERDAS IMAGINE adalah platform penginderaan jauh dan fotogrametri yang komprehensif, menawarkan alur kerja untuk pra-pemrosesan, orthorektifikasi, mozaik citra, analisis spasial dan spektral, serta klasifikasi citra.
- ArcGIS (dengan ekstensi Image Analyst/Spatial Analyst, <https://www.esri.com>): Dikembangkan oleh Esri. Meskipun ArcGIS lebih dikenal sebagai platform Sistem Informasi Geografis (SIG), ia juga memiliki kemampuan yang kuat untuk pengolahan dan analisis citra melalui ekstensi seperti *Image Analyst* dan *Spatial Analyst*. ArcGIS menyediakan alat untuk manajemen data raster, koreksi geometrik, klasifikasi citra (termasuk OBIA), dan integrasi yang erat antara analisis citra dan data GIS lainnya.

6.8.2. Perangkat Lunak Sumber Terbuka (*Open Source*)

Perangkat lunak sumber terbuka menawarkan alternatif yang menarik karena gratis untuk digunakan, dimodifikasi, dan didistribusikan. Perangkat lunak ini biasanya didukung oleh komunitas pengguna dan pengembang yang aktif, yang berkontribusi pada pengembangan fitur baru, perbaikan bug, dan penyediaan dukungan melalui forum dan milis. Beberapa perangkat lunak *open source* yang banyak digunakan untuk pengolahan citra digital penginderaan jauh adalah:

- QGIS (Quantum GIS, <https://qgis.org>): Sistem Informasi Geografis *desktop open source* yang sangat populer dan serbaguna. QGIS memiliki kemampuan dasar untuk menangani data raster dan dapat diperluas fungsionalitasnya untuk pengolahan citra melalui berbagai plugin. Salah satu plugin yang sangat berguna adalah *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP), yang menyediakan alat untuk pra-pemrosesan (seperti koreksi atmosfer DOS1), pengunduhan citra gratis (Landsat, Sentinel), klasifikasi terbimbing dan tak terbimbing,

serta pasca-pemrosesan.

- SNAP (*Sentinel Application Platform*, <https://step.esa.int>): Dikembangkan oleh European Space Agency (ESA) khusus untuk pemrosesan dan analisis data dari misi satelit Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3). SNAP menyediakan *toolbox* yang komprehensif untuk berbagai tugas, termasuk pembacaan format data Sentinel, koreksi radiometrik dan atmosferik, analisis data SAR (untuk Sentinel-1), dan visualisasi. SNAP bersifat *open source* dan dapat diunduh secara gratis.
- GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*, <https://grass.osgeo.org>): Perangkat lunak SIG *open source* yang kuat dengan sejarah panjang, memiliki modul-modul canggih untuk analisis data raster dan vektor, termasuk pengolahan citra.
- Orfeo Toolbox (OTB, <https://www.orfeo-toolbox.org>): Pustaka C++ *open source* untuk pengolahan citra penginderaan jauh resolusi tinggi. OTB menyediakan berbagai algoritma untuk segmentasi, ekstraksi fitur, klasifikasi (termasuk SVM dan Random Forest), dan deteksi perubahan. OTB juga dapat diakses melalui QGIS atau sebagai aplikasi mandiri.

Meskipun menawarkan banyak keuntungan, perangkat lunak *open source* terkadang memiliki kurva belajar yang lebih curam untuk beberapa fungsi dibandingkan perangkat lunak komersial, dan dukungan teknisnya lebih bersifat komunal daripada terpusat.

6.8.3. Platform Berbasis Web/Komputasi Awan

Seperti yang telah disinggung pada bagian tren terkini, platform berbasis komputasi awan telah merevolusi cara data penginderaan jauh diakses dan dianalisis. Platform ini umumnya tidak memerlukan instalasi perangkat lunak di komputer lokal pengguna (diakses melalui peramban web) dan menyediakan akses ke katalog data citra yang luas serta kemampuan

pemrosesan yang masif di server penyedia layanan.

- Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com>): Merupakan platform berbasis awan yang paling menonjol saat ini untuk analisis data geospasial skala planet. GEE menyediakan akses ke arsip data multi-petabyte dari berbagai satelit (Landsat, Sentinel, MODIS, dll.), lingkungan pemrograman berbasis JavaScript dan Python untuk analisis, serta kemampuan komputasi paralel yang sangat besar (Gorelick dkk. 2017). GEE gratis untuk tujuan penelitian, pendidikan, dan nirlaba.

Tabel 6.5: Perbandingan Beberapa Perangkat Lunak Pengolahan Citra Digital Populer

Nama Perangkat Lunak	Jenis	Fitur Utama/Kelebihan	Keterbatasan/Pertimbangan	Contoh Penggunaan Umum
ENVI	Komersial	Analisis hiperspektral canggih, GUI komprehensif, alur kerja terstruktur, dukungan teknis baik.	Lisensi berbayar (mahal), mungkin <i>overkill</i> untuk tugas sederhana.	Analisis spektral detail, pemetaan mineralogi, deteksi target.
ERDAS IMAGINE	Komersial	Platform lengkap untuk penginderaan jauh dan fotogrametri, alat orthorektifikasi dan mozaik kuat.	Lisensi berbayar, antarmuka bisa terasa kompleks bagi pemula.	Produksi peta dasar dari citra, analisis perubahan tutupan lahan skala besar.
ArcGIS (dengan ekstensi)	Komersial	Integrasi kuat dengan SIG, alat analisis spasial dan citra yang beragam, dukungan komunitas pengguna besar.	Lisensi dasar dan ekstensi berbayar, beberapa fungsi pengolahan citra mungkin tidak selengkap <i>software</i> khusus PJ.	Pemetaan tematik, analisis kesesuaian lahan, integrasi data citra dengan data vektor.

QGIS (dengan plugin SCP)	<i>Open Source</i>	Gratis, antarmuka ramah pengguna, komunitas aktif, plugin SCP sangat berguna untuk alur kerja klasifikasi standar.	Kinerja mungkin tidak secepat <i>software</i> komersial untuk dataset sangat besar, fungsionalitas canggih mungkin memerlukan plugin tambahan atau skrip.	Pemetaan tutupan lahan, analisis NDVI, pra-pemrosesan dasar.
SNAP	<i>Open Source</i>	Gratis, dioptimalkan untuk data Sentinel, <i>toolbox</i> lengkap untuk data optik dan SAR Sentinel, dukungan dari ESA.	Fokus utama pada data Sentinel, antarmuka mungkin kurang intuitif bagi pengguna baru.	Pemrosesan data Sentinel-1 (SAR) dan Sentinel-2 (optik), pemantauan lingkungan.
Google Earth Engine (GEE)	Cloud/ Web	Akses ke katalog data global, pemrosesan paralel skala besar, tidak perlu unduh data, gratis untuk riset/edukasi, kolaboratif.	Memerlukan koneksi internet, antarmuka utama berbasis kode (JavaScript/Python), kurva belajar untuk pemrograman.	Analisis perubahan global/regional jangka panjang, pemantauan deforestasi, pemetaan banjir skala luas.

Dalam beberapa tahun terakhir, terlihat adanya pergeseran yang signifikan dalam komunitas penginderaan jauh menuju penggunaan perangkat lunak *open source* dan platform komputasi awan. Faktor biaya lisensi perangkat lunak komersial yang tinggi menjadi salah satu pendorong utama, terutama bagi institusi akademik, lembaga penelitian dengan anggaran terbatas, dan pengguna di negara berkembang. Perangkat lunak *open source* kini menawarkan fungsionalitas yang semakin kompetitif dan didukung oleh komunitas global yang dinamis. Di sisi lain, ledakan volume data

penginderaan jauh yang dihasilkan oleh sensor-sensor modern membuat solusi komputasi awan menjadi sangat menarik karena kemampuannya untuk menyimpan dan memproses data dalam skala besar secara efisien dan skalabel. Kombinasi antara *open source* dan komputasi awan, seperti yang ditawarkan oleh Google Earth Engine (yang gratis untuk penggunaan penelitian dan pendidikan), telah sangat memberdayakan para peneliti dan praktisi di seluruh dunia.

Seiring dengan tren ini, pentingnya penguasaan keterampilan pemrograman dasar, terutama dalam bahasa seperti Python atau JavaScript, menjadi semakin meningkat bagi para profesional penginderaan jauh. Banyak platform komputasi awan (seperti GEE) diakses dan dikontrol melalui antarmuka pemrograman. Selain itu, kemampuan untuk menulis skrip dapat sangat membantu dalam mengotomatisasi alur kerja yang kompleks dan berulang di perangkat lunak *desktop* (baik komersial maupun *open source*), melakukan kustomisasi analisis, atau bahkan mengembangkan metode-metode baru. Keterampilan pemrograman memberikan fleksibilitas dan efisiensi yang lebih besar kepada analis penginderaan jauh dalam menghadapi tantangan analisis data yang semakin kompleks.

6.9. Rangkuman Bab

Bab ini telah membahas secara mendalam berbagai aspek fundamental dan lanjutan dalam pengolahan citra digital untuk aplikasi penginderaan jauh. Dimulai dengan pemahaman konsep dasar citra digital, termasuk definisi pixel dan pentingnya empat jenis resolusi utama: spasial, spektral, radiometrik, dan temporal, serta bagaimana *trade-off* antar resolusi dan fenomena *mixel* mempengaruhi analisis.

Selanjutnya, dibahas tahapan krusial pra-pemrosesan citra, yang bertujuan untuk mengoreksi berbagai distorsi dan kesalahan pada data mentah. Ini

mencakup koreksi radiometrik (meliputi koreksi kesalahan sensor, koreksi atmosfer yang vital, dan koreksi topografi) serta koreksi geometrik (seperti *georeferencing* dan orthorektifikasi). Pentingnya urutan pra-pemrosesan dan peran metadata juga ditekankan.

Setelah pra-pemrosesan, teknik-teknik peningkatan kualitas citra dijelaskan, seperti pengurangan derau, peningkatan kontras dan ketajaman, serta penghapusan awan dan bayangan. Perlu diingat bahwa peningkatan kualitas bertujuan untuk memperbaiki interpretasi visual atau kinerja analisis digital, bukan menambah informasi baru.

Bab ini juga menguraikan berbagai metode transformasi citra, termasuk perhitungan indeks spektral (misalnya NDVI, EVI), Analisis Komponen Utama (PCA), transformasi Tasseled Cap, dan transformasi ruang warna. Transformasi ini bertujuan untuk menonjolkan fitur tertentu atau mereduksi dimensionalitas data.

Fusi citra kemudian diperkenalkan sebagai teknik untuk menggabungkan informasi dari beberapa citra, dengan fokus pada *pan-sharpening* untuk meningkatkan resolusi spasial citra multispektral, dan fusi data SAR-optik untuk analisis yang lebih komprehensif.

Bagian inti dari bab ini adalah pembahasan mengenai klasifikasi citra, yang mencakup dua paradigma utama: klasifikasi berbasis piksel dan klasifikasi berbasis objek (OBIA). Untuk klasifikasi berbasis piksel, dijelaskan pendekatan tak terbimbing (dengan algoritma seperti K-Means dan ISODATA) dan terbimbing (dengan algoritma seperti Maximum Likelihood dan Support Vector Machine), serta pentingnya data latih dan data uji. OBIA diperkenalkan sebagai pendekatan alternatif yang melibatkan segmentasi citra diikuti oleh klasifikasi objek berdasarkan beragam fitur.

Evaluasi hasil klasifikasi ditekankan sebagai langkah penting, dengan penjelasan mengenai matriks konfusi dan berbagai metrik evaluasi seperti

akurasi keseluruhan, akurasi pengguna, akurasi produsen, dan Koefisien Kappa.

Terakhir, diberikan pengenalan mengenai berbagai perangkat lunak pengolahan citra digital yang tersedia, baik komersial (ENVI, ERDAS IMAGINE, ArcGIS), sumber terbuka (QGIS, SNAP), maupun platform berbasis awan (GEE), serta tren menuju penggunaan *open source* dan komputasi awan, dan meningkatnya pentingnya keterampilan pemrograman.

Secara keseluruhan, pengolahan citra digital adalah serangkaian proses yang kompleks namun esensial untuk mengubah data mentah penginderaan jauh menjadi informasi geospasial yang berharga dan dapat ditindaklanjuti.

BAB VII INTERPRETASI CITRA PENGINDERAAN JAUH

Interpretasi citra merupakan salah satu aspek fundamental dalam disiplin ilmu penginderaan jauh. Bab ini akan membahas secara komprehensif mengenai konsep dasar, tahapan, unsur-unsur kunci, serta teknik-teknik yang digunakan dalam menginterpretasi citra penginderaan jauh, baik secara visual maupun digital. Pemahaman terhadap materi ini akan membekali mahasiswa dengan kemampuan untuk mengekstrak informasi yang bermakna dari data citra satelit untuk berbagai aplikasi.

7.1 Pendahuluan Interpretasi Citra

Sub-bab ini akan memperkenalkan definisi, tujuan, dan pentingnya interpretasi citra dalam konteks penginderaan jauh, serta membedakan antara pendekatan interpretasi visual dan digital.

7.1.1 Definisi dan Tujuan Interpretasi Citra

Interpretasi citra, dalam konteks penginderaan jauh, didefinisikan sebagai kegiatan mengkaji foto udara atau citra dengan tujuan untuk mengidentifikasi objek dan menilai arti pentingnya objek tersebut. Lillesand, Kiefer, dan Chipman (2015) secara lebih spesifik mendefinisikannya sebagai "seni menganalisis citra untuk tujuan mengidentifikasi objek dan menilai signifikansinya". Proses ini tidak hanya berhenti pada pengenalan objek semata, tetapi juga melibatkan serangkaian aktivitas kognitif dan analitis yang kompleks, termasuk deteksi, identifikasi, kategorisasi, pengukuran, dan evaluasi pentingnya objek-objek fisik dan budaya, pola spasialnya, serta hubungan antar objek tersebut.

Tujuan utama dari interpretasi citra adalah untuk memastikan bahwa penafsir (interpreter) tidak salah dalam mengambil kesimpulan terkait informasi yang terkandung dalam gambar objek pada citra. Dengan

interpretasi yang akurat, berbagai bentuk data yang dihasilkan dari perekaman penginderaan jauh dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk berbagai keperluan, terutama dalam perencanaan dan pembangunan suatu wilayah.

Lebih jauh dari sekadar "melihat" gambar, interpretasi citra merupakan sebuah proses yang menuntut keahlian analitis. Definisi dasar yang menyatakan "mengkaji" dan "mengidentifikasi" diperluas oleh Lillesand dkk. dengan frasa "menilai signifikansinya", yang secara implisit menunjukkan adanya kebutuhan analisis yang lebih mendalam. Tujuan untuk "tidak salah mengambil kesimpulan" dan "memanfaatkan secara maksimal untuk perencanaan" menggarisbawahi bahwa hasil interpretasi memiliki konsekuensi praktis yang signifikan. Oleh karena itu, interpretasi citra bukanlah pengamatan pasif, melainkan sebuah proses aktif yang membutuhkan keahlian, pengetahuan, dan penalaran untuk menjembatani antara data mentah penginderaan jauh dengan informasi yang berguna dan dapat ditindaklanjuti.

7.1.2 Pentingnya Interpretasi Citra dalam Penginderaan Jauh

Interpretasi citra memegang peranan krusial sebagai kunci untuk mengekstrak informasi yang berarti dari data satelit dan foto udara. Tanpa melalui proses interpretasi yang tepat, data penginderaan jauh hanyalah sekumpulan nilai piksel yang tidak memiliki makna informasional. Melalui interpretasi, data tersebut dapat diubah menjadi informasi yang berguna untuk berbagai aplikasi, seperti perencanaan tata ruang dan pembangunan wilayah, pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan, pemantauan kondisi lingkungan dan perubahannya, hingga analisis fenomena perubahan global.

Kualitas keputusan yang didasarkan pada data penginderaan jauh sangat bergantung pada kualitas interpretasi citra yang dilakukan. Data penginderaan jauh digunakan secara luas untuk perencanaan,

pembangunan, pengelolaan sumber daya, dan pemantauan lingkungan. Mengingat interpretasi adalah proses esensial untuk mengekstrak informasi dari data ini, maka setiap kesalahan yang terjadi dalam proses interpretasi, misalnya kesalahan dalam mengidentifikasi jenis tutupan lahan atau menilai kondisi suatu objek, dapat merambat dan menyebabkan kesalahan fatal dalam perencanaan atau strategi pengelolaan yang didasarkan pada informasi tersebut. Dengan demikian, akurasi dan keandalan interpretasi citra menjadi fundamental untuk efektivitas dan keberhasilan berbagai aplikasi penginderaan jauh. Penguasaan keterampilan interpretasi citra menjadi sangat penting bagi mahasiswa agar dapat memanfaatkan teknologi penginderaan jauh secara optimal.

7.1.3 Jenis-jenis Interpretasi Citra: Visual dan Digital/Otomatis

Secara umum, terdapat dua pendekatan utama dalam melakukan interpretasi citra penginderaan jauh, yaitu interpretasi visual dan interpretasi digital (otomatis). Interpretasi visual dilakukan oleh seorang analis manusia (interpreter) yang mengandalkan kemampuan kognitif dan pengalamannya untuk mengenali objek berdasarkan karakteristik visual yang tampak pada citra, seperti rona, bentuk, ukuran, dan tekstur.

Di sisi lain, interpretasi digital, yang sering juga disebut sebagai analisis citra digital atau klasifikasi citra otomatis, menggunakan algoritma komputer untuk mengelompokkan piksel-piksel citra ke dalam kelas-kelas informasi tertentu berdasarkan nilai spektralnya. Pendekatan ini memungkinkan pemrosesan data dalam volume besar secara lebih cepat dan objektif.

Meskipun interpretasi digital semakin dominan seiring dengan kemajuan teknologi komputasi dan ketersediaan data citra resolusi tinggi dalam volume besar, peran interpretasi visual tetaplah krusial. Interpretasi visual tidak hanya penting untuk area studi yang sempit atau untuk fitur-fitur yang sangat kompleks yang sulit diidentifikasi secara otomatis oleh algoritma,

tetapi juga sangat vital dalam proses validasi hasil klasifikasi digital. Seringkali, data referensi untuk menguji akurasi hasil klasifikasi digital diperoleh melalui interpretasi visual citra resolusi lebih tinggi atau melalui survei lapangan. Bahkan, beberapa penelitian menunjukkan bahwa teknik klasifikasi per-piksel (pendekatan digital) terkadang kurang memuaskan untuk interpretasi citra resolusi sangat tinggi, di mana konteks spasial dan fitur objek yang lebih mudah dikenali secara visual oleh manusia menjadi sangat penting.

Dengan demikian, kedua pendekatan ini seringkali bersifat komplementer. Interpretasi visual dapat memberikan masukan berharga dalam pemilihan area pelatihan (training area) untuk klasifikasi digital terbimbing, serta memvalidasi dan menyempurnakan hasil akhir dari interpretasi digital. Sebaliknya, interpretasi digital mampu menangani analisis pada skala spasial dan temporal yang luas, yang mungkin tidak praktis jika hanya mengandalkan interpretasi visual murni. Pemahaman terhadap kedua jenis interpretasi ini akan memberikan landasan yang kuat bagi mahasiswa untuk memilih metode yang paling sesuai dengan tujuan analisis dan karakteristik data yang dihadapi.

7.2 Tahapan dalam Proses Interpretasi Citra

Proses interpretasi citra, meskipun melibatkan kemampuan kognitif yang kompleks, umumnya mengikuti serangkaian tahapan logis. Pemahaman terhadap tahapan-tahapan ini membantu interpreter dalam melakukan analisis secara sistematis dan komprehensif. Berbagai sumber secara konsisten menyebutkan beberapa tahapan inti dalam proses interpretasi citra (Estes, Hajic, dan Tinney 1983; Sutanto 1987), yaitu:

1. Deteksi (*Detection*): Tahap awal ini merupakan kegiatan pengamatan untuk menentukan ada atau tidaknya suatu objek atau fenomena pada citra. Pada tahap deteksi, interpreter berupaya untuk menemukan fitur

atau objek yang menarik perhatian atau berpotensi menjadi target analisis. Misalnya, dalam sebuah citra lanskap, interpreter mungkin mendeteksi adanya area dengan rona yang berbeda dari sekitarnya, yang menandakan keberadaan suatu objek.

2. Identifikasi dan Rekognisi (*Identification and Recognition*): Setelah suatu objek terdeteksi, tahap selanjutnya adalah melakukan identifikasi atau rekognisi. Tahap ini bertujuan untuk mengenali objek tersebut berdasarkan ciri-ciri atau karakteristik yang terekam oleh sensor dan tampak pada citra. Identifikasi merupakan upaya untuk memisahkan atau membedakan suatu objek dari objek lainnya berdasarkan fitur atau pola khas yang dapat dikenali dari citra. Sebagai contoh, objek bukan air yang terdeteksi di dalam sungai (tahap deteksi) kemudian diidentifikasi sebagai gosong sungai berdasarkan bentuk, ukuran, dan letaknya. Dalam beberapa literatur, tahap ini juga dikenal sebagai "pembacaan foto".
3. Analisis (*Analysis*): Tahap analisis melibatkan proses pengumpulan keterangan lebih lanjut mengenai objek yang telah diidentifikasi. Ini mencakup pengamatan kenampakan objek secara lebih detail dan seringkali melibatkan pengelompokan objek-objek yang memiliki karakteristik serupa atau berada dalam konteks yang sama pada citra. Analisis bertujuan untuk memahami sifat, fungsi, atau kondisi objek tersebut. Sebagai contoh, setelah gosong sungai (tumpukan pasir atau kerikil yang terbentuk di dalam atau di sepanjang aliran sungai akibat pengendapan sedimen oleh air sungai) diidentifikasi, analisis lebih lanjut mungkin mengungkapkan bahwa gosong sungai tersebut dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian, seperti menanam padi. Juga memasukkan aktivitas klasifikasi, yaitu mengelompokkan fitur-fitur yang berulang ke dalam kelas atau kategori yang sama, sebagai bagian dari proses analisis.

4. Deduksi/Inferensi (*Deduction/Inference*): Tahap akhir dalam proses interpretasi adalah deduksi atau inferensi. Pada tahap ini, interpreter membuat kesimpulan, prediksi, atau penilaian signifikansi mengenai objek atau fenomena yang telah dideteksi, diidentifikasi, dan dianalisis, berdasarkan bukti-bukti yang terkumpul dari citra dan pengetahuan pendukung lainnya. Deduksi menghubungkan informasi yang diekstrak dari citra dengan pengetahuan yang lebih luas untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif.

Selain tahapan inti tersebut, dalam praktik interpretasi citra, terutama yang bertujuan untuk menghasilkan peta tematik, seringkali melibatkan kegiatan klasifikasi secara lebih formal, di mana objek-objek dikelompokkan ke dalam kategori-kategori yang telah ditentukan sebelumnya. Lebih lanjut, untuk memastikan keandalan hasil interpretasi, verifikasi lapangan (reference data) seringkali dilakukan untuk memvalidasi kesimpulan yang ditarik dari citra dengan kondisi sebenarnya di lapangan.

Penting untuk dipahami bahwa proses interpretasi citra tidak selalu bersifat linear secara kaku. Meskipun tahapan-tahapan tersebut disajikan secara berurutan (Deteksi → Identifikasi → Analisis → Deduksi), seorang interpreter yang berpengalaman mungkin akan melakukan iterasi atau kembali ke tahapan sebelumnya jika ditemukan informasi baru atau keraguan. Sebagai contoh, saat melakukan analisis detail terhadap suatu area yang awalnya diidentifikasi sebagai "vegetasi", interpreter mungkin menemukan variasi tekstur dan pola yang mengindikasikan adanya sub-tipe vegetasi yang berbeda (misalnya, hutan lebat versus semak belukar) atau bahkan mendeteksi objek non-vegetasi yang sebelumnya terlewatkan. Hal ini dapat mendorong interpreter untuk kembali ke tahap deteksi atau identifikasi untuk objek baru tersebut. Kesimpulan akhir atau deduksi mengenai fungsi ekologis area tersebut mungkin memerlukan revisi berdasarkan analisis yang lebih mendalam ini. Dengan demikian,

fleksibilitas dan kemampuan untuk melakukan iterasi adalah bagian penting dari proses interpretasi yang efektif.

Selain itu, tingkat kedalaman dan penekanan pada setiap tahapan dapat bervariasi tergantung pada tujuan spesifik interpretasi dan jenis citra yang digunakan. Tujuan interpretasi adalah untuk "menilai arti pentingnya suatu objek", dan arti penting ini akan berbeda untuk setiap aplikasi, seperti perencanaan kota, pengelolaan sumber daya hutan, pemetaan geologi, atau pemantauan bencana alam. Sebagai contoh, interpretasi untuk pemetaan geologi detail akan lebih menekankan pada analisis struktur, tekstur batuan, dan pola aliran sungai, sementara interpretasi untuk pemantauan banjir akan memprioritaskan deteksi cepat dan akurat terhadap area yang tergenang air. Demikian pula, citra dengan resolusi spasial tinggi memungkinkan analisis objek yang jauh lebih detail dibandingkan dengan citra resolusi rendah. Sebagai contoh, bayangan objek pada citra resolusi tinggi dapat sangat membantu dalam menegaskan bentuk dan tinggi objek, namun pada citra resolusi menengah dan rendah, bayangan justru dapat mengganggu proses interpretasi. Oleh karena itu, tidak ada pendekatan "satu ukuran untuk semua" dalam interpretasi citra; tahapan dan fokus analisis perlu disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dan karakteristik data yang tersedia.

7.3 Unsur-Unsur Kunci Interpretasi Citra Visual

Interpretasi citra secara visual sangat bergantung pada kemampuan interpreter untuk mengenali dan membedakan berbagai objek atau fenomena berdasarkan karakteristik visual yang tampak pada citra. Karakteristik ini dikenal sebagai unsur-unsur interpretasi citra. Lillesand, Kiefer, dan Chipman (T. M. Lillesand dkk. 2015) mengidentifikasi delapan elemen dasar yang menjadi landasan dalam interpretasi visual. Sumber-sumber lain seperti (Campbell dan Wynne 2011) juga menyebutkan banyak

dari elemen-elemen ini, terkadang dengan sedikit variasi dalam penamaan atau penekanan. Pemahaman yang mendalam terhadap unsur-unsur ini adalah fondasi bagi pengembangan keterampilan interpretasi visual yang baik.

Berikut adalah unsur-unsur kunci interpretasi citra visual:

7.3.1 Rona dan Warna (*Tone and Color*)

Rona merujuk pada tingkat kegelapan atau kecerahan suatu objek pada citra monokromatik (hitam putih), sedangkan warna adalah wujud yang tampak oleh mata manusia pada citra berwarna, yang dihasilkan dari kombinasi respons spektral pada panjang gelombang tertentu. Rona atau warna merupakan elemen kunci dan seringkali menjadi petunjuk pertama dalam mengidentifikasi berbagai target atau fitur pada citra. Rona pada dasarnya adalah representasi dari kekuatan atau intensitas radiasi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek di permukaan Bumi dan terekam oleh sensor. Objek yang memantulkan atau memancarkan energi lebih tinggi akan tampak lebih cerah (rona terang), sedangkan objek dengan pantulan atau emisi lebih rendah akan tampak lebih gelap (rona gelap).

7.3.2 Ukuran (*Size*)

Ukuran mengacu pada dimensi fisik suatu objek, seperti panjang, lebar, luas, tinggi, kemiringan, atau volume, sebagaimana tampak pada citra. Saat menilai ukuran objek, sangat penting untuk selalu mempertimbangkan skala citra dan resolusi spasialnya. Ukuran dapat bersifat absolut (misalnya, panjang landasan pacu bandara) maupun relatif (misalnya, ukuran satu bangunan rumah dibandingkan dengan bangunan lain di sekitarnya). Pengukuran kriteria seperti panjang, lebar, perimeter, area, dan terkadang volume, seringkali menjadi dasar dalam analisis ukuran.

7.3.3 Bentuk (*Shape*)

Bentuk berkaitan dengan ciri keruangan, konfigurasi umum, atau batas luar (outline) dari suatu objek yang terekam pada citra. Bentuk merupakan

petunjuk yang sangat definitif dalam interpretasi. Objek-objek alami, seperti batas hutan atau pola aliran sungai, umumnya memiliki bentuk yang lebih tidak teratur atau asimetris, kecuali pada area di mana manusia telah melakukan intervensi seperti pembukaan jalan atau penebangan hutan. Sebaliknya, objek-objek buatan manusia seringkali memiliki bentuk geometris yang teratur, seperti persegi, persegi panjang, lingkaran, dengan garis lurus dan sudut yang tajam. Sebagai contoh, gedung sekolah biasanya berbentuk huruf I, L, atau U, sedangkan sungai berbentuk kecil, memanjang, dan berkelok, berbeda dengan jalan yang umumnya memanjang dan lurus.

7.3.4 Tekstur (*Texture*)

Tekstur didefinisikan sebagai frekuensi perubahan rona atau warna pada sekelompok objek atau suatu area pada citra. Tekstur memberikan kesan visual mengenai kehalusan atau kekasaran permukaan suatu objek atau area. Umumnya, tekstur dikelompokkan menjadi kasar, sedang, dan halus. Tekstur mengacu pada karakteristik visual dari agregasi atau kelompok objek yang mungkin terlalu kecil atau terlalu berdekatan untuk dapat dibedakan sebagai individu-individu terpisah pada skala citra tersebut. Sebagai contoh, area perkebunan kelapa sawit dengan tajuk pohon yang seragam dan besar mungkin menunjukkan tekstur kasar, sedangkan area persawahan dengan tanaman padi yang lebih kecil dan rapat mungkin menunjukkan tekstur yang lebih halus.

7.3.5 Pola (*Pattern*)

Pola merujuk pada susunan keruangan atau pengaturan spasial yang khas dari objek-objek, baik yang bersifat alami maupun buatan manusia. Pola dapat menggambarkan tingkat keteraturan atau pengulangan suatu objek atau fitur dalam suatu area. Contoh pola alami adalah pola aliran sungai dendritik atau radial. Contoh pola buatan manusia adalah pola teratur pada area perumahan di mana bangunan memiliki ukuran, bentuk, dan tata letak

yang seragam, atau pola jaringan jalan yang teratur.

7.3.6 Bayangan (*Shadow*)

Bayangan pada citra umumnya timbul akibat sudut datang sinar Matahari yang rendah atau karena adanya perbedaan topografi dan lereng yang signifikan. Meskipun terkadang dapat menutupi informasi objek di area bayangan, bayangan juga dapat menjadi unsur yang sangat berguna dalam interpretasi. Pada citra resolusi tinggi, bayangan dapat membantu menegaskan bentuk tiga dimensi objek, seperti bangunan atau pohon, dan membantu dalam persepsi kedalaman. Namun, pada citra resolusi menengah dan rendah, bayangan yang luas justru dapat mengganggu proses interpretasi karena menutupi detail objek.

7.3.7 Situs (*Site*)

Situs mengacu pada letak atau lokasi suatu objek terhadap objek lain di sekitarnya atau dalam kaitannya dengan fitur geografis atau topografis tertentu. Situs memberikan informasi kontekstual yang penting. Sebagai contoh, hutan bakau umumnya ditandai dengan rona gelap dan berlokasi di kawasan tepi pantai atau muara sungai. Kenampakan pemukiman seringkali berada di sepanjang jalan atau sungai.

7.3.8 Asosiasi (*Association*)

Asosiasi adalah keterkaitan atau hubungan yang lazim terjadi antara suatu objek dengan objek atau fitur lainnya. Karena adanya keterkaitan ini, pengenalan suatu objek pada citra seringkali dapat dijadikan petunjuk untuk mengenali objek-objek lain yang berasosiasi dengannya. Sebagai contoh, keberadaan stasiun kereta api (objek) biasanya berasosiasi dengan adanya rel kereta api (objek lain). Lapangan sepak bola sering berasosiasi dengan adanya gedung sekolah atau fasilitas olahraga.

7.3.9 Tinggi/Kedalaman (*Height/Depth*)

Unsur tinggi atau kedalaman objek juga merupakan salah satu elemen penting dalam interpretasi citra, sebagaimana disebutkan oleh Lillesand

dkk. Meskipun citra tunggal pada dasarnya merepresentasikan pandangan dua dimensi, informasi ketinggian atau kedalaman dapat disimpulkan secara kualitatif dari panjang bayangan objek (jika sudut datang Matahari dan skala citra diketahui) atau melalui analisis citra stereo menggunakan pasangan citra yang tumpang tindih (stereopair) dan alat stereoskop.

Penting untuk ditekankan bahwa unsur-unsur interpretasi ini tidak digunakan secara terisolasi satu sama lain. Seorang interpreter yang terampil akan secara simultan mempertimbangkan dan mengintegrasikan informasi dari beberapa unsur untuk sampai pada kesimpulan identifikasi objek yang akurat dan andal. Sebagai contoh, untuk mengidentifikasi sebuah sungai, interpreter tidak hanya melihat bentuknya yang memanjang dan berkelok, tetapi juga memperhatikan rona yang mungkin lebih gelap dibandingkan daratan di sekitarnya, tekstur permukaannya yang halus, polanya yang mengikuti kontur topografi, serta asosiasinya dengan vegetasi riparian di tepiannya. Tabel interpretasi dalam berbagai studi kasus juga menunjukkan bagaimana kombinasi beberapa unsur seperti rona, bentuk, tekstur, pola, situs, dan asosiasi digunakan secara bersamaan untuk mengidentifikasi objek-objek kompleks seperti "Kampus" atau "Rel Kereta Api". Proses interpretasi visual melibatkan sintesis informasi dari berbagai unsur ini, bukan hanya analisis terhadap satu unsur tunggal.

Lebih lanjut, terdapat semacam hierarki implisit dalam penggunaan unsur-unsur interpretasi ini. Rona dan warna seringkali menjadi unsur pertama yang diperhatikan oleh interpreter dan merupakan dasar untuk membedakan objek dari latar belakangnya. Perbedaan rona atau warna inilah yang kemudian memungkinkan interpreter untuk melihat batas objek (bentuk), variasi internal di dalam objek (tekstur), dan susunan spasial antar objek (pola). Setelah bentuk dan pola objek dikenali, informasi kontekstual yang lebih tinggi seperti situs (lokasi objek relatif terhadap lingkungannya), asosiasi (keterkaitan objek dengan objek lain), dan

bayangan (yang memberikan informasi tentang tinggi atau bentuk tiga dimensi) menjadi lebih bermakna dan membantu dalam mengkonfirmasi identifikasi atau memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang objek tersebut. Pemahaman terhadap hierarki ini dapat membantu dalam proses pembelajaran interpretasi, dimulai dari pengenalan unsur-unsur yang paling fundamental hingga unsur-unsur yang lebih kompleks dan kontekstual.

Untuk mempermudah pemahaman dan sebagai referensi cepat, berikut disajikan tabel yang merangkum unsur-unsur kunci interpretasi citra visual:

Tabel 7.1: Unsur-Unsur Kunci Interpretasi Citra Visual

Unsur Interpretasi	Deskripsi Singkat	Contoh Kenampakan Visual pada Citra (Deskriptif)
Rona/ Warna	Tingkat kegelapan/kecerahan (rona) atau spektrum tampak (warna) objek.	Air jernih dalam biasanya berona gelap atau berwarna biru tua; vegetasi sehat berwarna hijau terang pada citra warna asli atau merah terang pada citra inframerah warna.
Ukuran	Dimensi fisik objek (panjang, luas, tinggi, volume) relatif terhadap skala citra.	Bangunan pabrik umumnya berukuran lebih besar dari rumah tinggal; lebar jalan raya lebih besar dari jalan setapak.
Bentuk	Kerangka, konfigurasi, atau batas luar objek.	Gedung sekolah sering berbentuk U atau L; jaringan jalan di perkotaan modern sering berpola grid; sungai memiliki bentuk berkelok-kelok.
Tekstur	Frekuensi perubahan rona/warna pada suatu area, memberikan kesan kasar/halus.	Hutan homogen dengan pohon besar bertekstur kasar; padang rumput bertekstur halus; permukaan air tenang bertekstur sangat halus.
Pola	Susunan keruangan objek yang teratur atau khas.	Pola perumahan teratur; pola perkebunan dengan barisan tanaman yang rapi; pola aliran sungai dendritik.
Bayangan	Area gelap yang terbentuk akibat objek menghalangi sinar Matahari.	Bayangan gedung dapat menunjukkan tinggi relatifnya; bayangan pegunungan menunjukkan relief.
Situs	Letak objek terhadap objek lain atau fitur geografis di sekitarnya.	Pemukiman sering berlokasi di sepanjang jalan atau sungai; hutan mangrove berada di pesisir pantai atau muara sungai.
Asosiasi	Keterkaitan antara satu objek dengan objek lainnya yang lazim ditemukan bersama.	Lapangan terbang berasosiasi dengan landasan pacu, terminal, dan hanggar; stadion olahraga berasosiasi dengan lapangan parkir luas.

Tinggi/ Kedalaman	Dimensi vertikal objek yang dapat disimpulkan dari bayangan atau citra stereo.	Pohon yang tinggi akan menghasilkan bayangan yang panjang; perbedaan elevasi pada citra stereo menunjukkan relief.
----------------------	--	--

Tabel ini diharapkan dapat menjadi panduan yang bermanfaat bagi mahasiswa dalam mempelajari dan menerapkan unsur-unsur interpretasi citra visual dalam berbagai studi kasus.

7.4 Kegiatan Dasar dalam Interpretasi Citra

Setelah mengenali berbagai objek atau fenomena pada citra dengan memanfaatkan unsur-unsur interpretasi, seorang interpreter biasanya melakukan beberapa kegiatan dasar untuk menganalisis lebih lanjut dan mengkuantifikasi informasi yang terkandung dalam citra. Kegiatan-kegiatan ini merupakan langkah praktis yang menjembatani antara identifikasi kualitatif objek dengan analisis kuantitatif yang lebih mendalam. Tiga kegiatan dasar yang umum dilakukan adalah delineasi, enumerasi, dan mensurasi (T. Lillesand dkk. 2015; Sutanto 1987).

1. Delineasi (*Delineation*):

Delineasi adalah kegiatan menarik atau membuat garis batas, baik bersifat sementara maupun permanen, yang membatasi suatu objek atau wilayah tertentu pada citra. Tujuan dari delineasi adalah untuk memisahkan satu jenis objek atau area dari objek atau area lainnya yang berbeda. Sebagai contoh, seorang interpreter bisa melakukan delineasi terhadap batas wilayah hutan, area pertanian, atau zona permukiman. Garis batas atau delineasi ditarik di sisi luar dari objek-objek yang memiliki rona dan warna yang sama atau seragam, untuk memisahkannya dari objek dengan rona dan warna yang berbeda. Hasil delineasi ini seringkali menjadi dasar untuk pembuatan peta tematik.

2. Enumerasi (*Enumeration*):

Enumerasi adalah kegiatan membuat daftar atau melakukan penghitungan (*counting*) terhadap objek-objek atau hal-hal yang

terlihat berbeda atau spesifik pada peta atau citra. Meskipun pada awalnya definisi enumerasi berasal dari istilah dari bidang mikrobiologi yang digunakan sebagai teknik untuk mengetahui jumlah mikroorganisme, konsep dasarnya, yaitu penghitungan jumlah unit diskrit, juga berlaku dalam interpretasi citra. Sebagai contoh, interpreter dapat melakukan enumerasi jumlah bangunan dalam suatu kompleks perumahan, jumlah danau di suatu wilayah, atau jumlah kendaraan di area parkir. Hasil enumerasi memberikan informasi kuantitatif mengenai frekuensi atau kelimpahan suatu objek.

3. Mensurasi/Pengukuran (*Mensuration/Measurement*):

Mensurasi, atau pengukuran, mengacu pada kegiatan kuantifikasi variabel-variabel fisik tertentu dari objek atau fenomena yang teridentifikasi pada citra. Pengukuran ini dapat meliputi jarak antar objek, panjang suatu fitur (misalnya, panjang sungai atau jalan), luas suatu area (misalnya, luas hutan terbakar atau luas lahan pertanian), ketinggian objek (misalnya, tinggi gedung atau pohon yang diestimasi dari bayangan atau data stereo), atau bahkan volume (misalnya, volume material galian tambang). Untuk melakukan pengukuran yang akurat, skala citra dan resolusi spasialnya harus diketahui dan diperhitungkan.

Kegiatan delineasi, enumerasi, dan mensurasi ini merupakan keterampilan dasar yang sangat penting dalam penginderaan jauh. Mereka adalah jembatan antara interpretasi kualitatif, di mana objek dikenali dan dideskripsikan berdasarkan unsur-unsur interpretasi, dengan analisis kuantitatif yang lebih lanjut. Informasi hasil dari ketiga kegiatan ini – seperti batas spasial objek (dari delineasi), jumlah objek (dari enumerasi), serta ukuran dan dimensi objek (dari mensurasi) – seringkali menjadi input fundamental untuk analisis spasial yang lebih canggih, misalnya menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Beberapa sumber telah

menyoroti pentingnya integrasi antara data penginderaan jauh dengan SIG untuk analisis yang lebih komprehensif dan pengambilan keputusan yang lebih baik. Dengan demikian, penguasaan kegiatan dasar ini akan membekali mahasiswa dengan kemampuan untuk tidak hanya mengidentifikasi "apa" yang ada di citra, tetapi juga "di mana", "berapa banyak", dan "seberapa besar" objek atau fenomena tersebut.

7.5 Pengantar Interpretasi Citra Digital

Selain interpretasi visual yang mengandalkan kemampuan kognitif manusia, interpretasi citra juga dapat dilakukan secara digital menggunakan bantuan komputer. Pendekatan ini, yang sering disebut sebagai analisis citra digital atau pengolahan citra digital, melibatkan penggunaan algoritma untuk memanipulasi, meningkatkan, dan mengklasifikasikan data citra secara otomatis. Sub-bab ini akan memberikan pengantar mengenai peran pra-pemrosesan, teknik peningkatan kualitas citra, dan dasar-dasar klasifikasi citra digital yang penting untuk mendukung proses interpretasi.

7.5.1 Peran Pra-pemrosesan Citra dalam Interpretasi

Sebelum data citra satelit dapat diinterpretasi secara efektif, baik secara visual maupun digital, data tersebut seringkali perlu melalui serangkaian tahapan pra-pemrosesan (*preprocessing*). Tujuan utama dari pra-pemrosesan adalah untuk menghilangkan atau meminimalkan berbagai distorsi dan kesalahan yang mungkin terjadi selama proses akuisisi data, serta untuk meningkatkan kualitas citra agar lebih sesuai untuk analisis lebih lanjut. Kualitas interpretasi, baik visual maupun digital, sangat bergantung pada kualitas data input.

Dua jenis koreksi utama yang sering dilakukan dalam pra-pemrosesan adalah koreksi radiometrik dan koreksi geometrik

- Koreksi Radiometrik: Bertujuan untuk memperbaiki nilai piksel pada citra yang mungkin terdistorsi akibat ketidaksempurnaan sensor

(misalnya, *striping* atau *line drop-out*) dan pengaruh atmosfer (misalnya, hamburan atau serapan oleh partikel atmosfer). Koreksi ini penting untuk memastikan bahwa nilai piksel secara akurat merepresentasikan energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek di permukaan Bumi.

- Koreksi Geometrik: Bertujuan untuk memperbaiki distorsi geometrik pada citra sehingga posisi setiap piksel pada citra sesuai dengan koordinat geografis sebenarnya di permukaan Bumi. Koreksi ini krusial untuk aplikasi yang memerlukan akurasi spasial tinggi, seperti pemetaan dan integrasi dengan data SIG.

Selain koreksi radiometrik dan geometrik, tahap pra-pemrosesan juga dapat melibatkan operasi dasar lainnya seperti penguatan kontras (*contrast enhancement*) untuk meningkatkan perbedaan visual antar fitur, reduksi derau (*noise reduction*) untuk menghilangkan gangguan acak pada citra, dan penajaman citra (*image sharpening*) untuk memperjelas batas-batas objek. Semua langkah ini bertujuan untuk mempersiapkan citra agar lebih siap dan optimal untuk tahap analisis dan interpretasi selanjutnya.

Kegagalan dalam melakukan pra-pemrosesan yang memadai dapat menyebabkan kesalahan interpretasi yang signifikan, yang pada gilirannya dapat merambat ke analisis dan pengambilan keputusan yang keliru. Sebagai contoh, koreksi radiometrik, khususnya Koreksi Atmosfer, sangat penting untuk analisis multitemporal, yaitu perbandingan citra dari waktu yang berbeda untuk mendeteksi perubahan. Jika citra dari waktu akuisisi yang berbeda tidak dikoreksi secara konsisten terhadap efek atmosfer yang bervariasi, maka perbedaan nilai piksel yang teramati mungkin lebih disebabkan oleh variasi kondisi atmosfer pada saat perekaman daripada perubahan nyata pada tutupan lahan atau objek di permukaan Bumi. Hal ini tentu akan mengarah pada interpretasi yang salah mengenai dinamika perubahan yang terjadi. Oleh karena itu, pra-pemrosesan bukan hanya

sekadar langkah teknis, melainkan merupakan prasyarat fundamental untuk memastikan interpretasi yang andal dan akurat, terutama dalam konteks analisis kuantitatif dan pemantauan perubahan dari waktu ke waktu.

7.5.2 Teknik Peningkatan Kualitas Citra untuk Membantu Interpretasi

Setelah pra-pemrosesan dasar, seringkali diperlukan teknik peningkatan kualitas citra (*image enhancement*) untuk menonjolkan fitur-fitur tertentu atau memperbaiki tampilan visual citra sehingga lebih mudah diinterpretasi, baik secara manual oleh interpreter maupun sebagai input untuk algoritma klasifikasi digital. Beberapa teknik peningkatan kualitas citra yang umum digunakan meliputi:

- **Peregangan Kontras (*Contrast Stretching*):**

Teknik ini bertujuan untuk meningkatkan kontras visual pada citra dengan cara melebarkan rentang nilai keabuan (grayscale) atau nilai digital piksel pada citra. Citra mentah seringkali memiliki kontras yang rendah, di mana nilai-nilai piksel terkonsentrasi pada rentang yang sempit. Peregangan kontras akan mendistribusikan ulang nilai-nilai piksel ini ke seluruh rentang dinamis yang tersedia, sehingga perbedaan antara area gelap dan terang menjadi lebih jelas. Hasilnya adalah citra baru dengan kontras yang lebih baik, yang memudahkan interpreter dalam membedakan berbagai objek dan fitur.

- **Filter Spasial (*Spatial Filtering*):**

Filter spasial bekerja dengan memodifikasi nilai suatu piksel berdasarkan nilai piksel-piksel tetangganya dalam suatu jendela (kernel) tertentu. Terdapat berbagai jenis filter spasial, namun dua yang paling mendasar adalah filter lolos rendah dan filter lolos tinggi:

- **Filter Lolos Rendah (Low-Pass Filter):** Filter ini dirancang untuk melewatkan data atau informasi berfrekuensi rendah (yaitu, area-area pada citra di mana nilai piksel berubah secara gradual atau

homogen) dan meredam atau menghilangkan data berfrekuensi tinggi (yaitu, area-area di mana nilai piksel berubah secara drastis dari satu piksel ke piksel tetangganya). Efek visual dari filter lolos rendah adalah citra tampak lebih halus atau sedikit buram. Filter ini sangat berguna untuk menghilangkan derau (noise) acak pada citra, meredam detail-detail kecil yang tidak diinginkan, dan menonjolkan fitur-fitur regional atau objek-objek berukuran besar.

- Filter Lolos Tinggi (High-Pass Filter): Sebaliknya, filter lolos tinggi dirancang untuk melewatkan data berfrekuensi tinggi dan menekan atau menghilangkan data berfrekuensi rendah. Karena data berfrekuensi tinggi seringkali berasosiasi dengan tepi (edge) atau batas antar objek yang berbeda, filter ini efektif untuk melakukan penajaman tepi (edge enhancement), menonjolkan fitur-fitur linear seperti jalan atau sungai, atau secara umum mempertajam detail struktural pada citra.

Pemilihan teknik peningkatan citra dan parameter yang digunakan (misalnya, jenis peregangan kontras, ukuran dan bentuk kernel filter spasial) seringkali bersifat subjektif dan sangat bergantung pada tujuan spesifik interpretasi serta karakteristik citra yang sedang dianalisis. Tidak ada satu teknik "terbaik" yang berlaku untuk semua situasi. Sebagai contoh, filter lolos rendah akan sangat membantu jika tujuan interpretasi adalah untuk melihat pola tutupan lahan regional yang luas atau untuk mengurangi efek derau pada citra. Sebaliknya, jika tujuannya adalah untuk mengidentifikasi batas-batas persil lahan pertanian secara detail atau mendeteksi jaringan jalan yang halus, maka filter lolos tinggi mungkin lebih sesuai. Ukuran kernel filter juga akan sangat mempengaruhi hasil; kernel yang lebih besar pada filter lolos rendah akan menghasilkan efek penghalusan yang lebih kuat. Oleh karena itu, seorang analis harus

memahami prinsip kerja dan efek dari setiap teknik peningkatan citra agar dapat memilih dan menerapkannya secara tepat guna untuk mempermudah proses interpretasi sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai.

Setelah citra melalui tahap pra-pemrosesan dan peningkatan kualitas, langkah selanjutnya dalam interpretasi digital adalah Klasifikasi Citra. Proses ini mengelompokkan piksel-piksel berdasarkan respons spektralnya ke dalam kelas-kelas tematik (seperti air, hutan, atau permukiman). Dalam penginderaan jauh, terdapat dua pendekatan utama: klasifikasi terbimbing (*supervised*) dan tak terbimbing (*unsupervised*).

Untuk pembahasan mendalam mengenai metodologi, algoritma yang digunakan (seperti Maximum Likelihood dan K-Means), serta perbandingan kelebihan dan kekurangannya, pembaca dapat merujuk kembali pada **Bab 6.7 (Klasifikasi Citra dalam Pengolahan Citra Digital)**.

7.6 Uji Akurasi Hasil Interpretasi dan Klasifikasi

Setelah proses interpretasi citra, terutama klasifikasi citra digital, selesai dilakukan dan menghasilkan peta tematik (misalnya, peta tutupan lahan), langkah krusial berikutnya adalah melakukan uji akurasi (*accuracy assessment*). Uji akurasi bertujuan untuk menilai seberapa baik hasil klasifikasi tersebut merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan (*ground truth*). Tanpa melalui uji akurasi, keandalan dan kualitas peta tematik yang dihasilkan tidak diketahui, sehingga penggunaannya untuk pengambilan keputusan atau analisis lebih lanjut menjadi diragukan. Uji akurasi merupakan bentuk pertanggungjawaban ilmiah dan praktis terhadap produk informasi yang dihasilkan dari data penginderaan jauh. Untuk memahami alat standar pengujian akurasi, seperti **Matriks Konfusi** (*Confusion Matrix*), Akurasi Keseluruhan (*Overall Accuracy*), Akurasi Pengguna (*User's Accuracy*), Akurasi Produsen (*Producer's Accuracy*),

dan **Koefisien Kappa**, pembaca dapat merujuk kembali ke **Bab 6.8.3 (Evaluasi Hasil Klasifikasi dengan Confusion Matrix)**.

7.7 Contoh Aplikasi Interpretasi Citra dalam Studi Kasus

Interpretasi citra penginderaan jauh memiliki aplikasi yang sangat luas dalam berbagai bidang. Sub-bab ini akan menyajikan dua contoh aplikasi konkret untuk memberikan gambaran bagaimana teknik interpretasi, baik visual maupun digital, digunakan untuk menghasilkan informasi tematik yang berharga dari data citra satelit. Salah satu aplikasi yang sangat populer dari interpretasi citra digital adalah pemantauan kondisi vegetasi menggunakan indeks vegetasi. Indeks vegetasi adalah transformasi matematis dari nilai-nilai pantulan spektral pada beberapa band (saluran) citra yang dirancang untuk menonjolkan karakteristik tertentu dari vegetasi, seperti kehijauan, kerapatan, atau kandungan air.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) adalah salah satu indeks vegetasi yang paling banyak digunakan untuk mengukur dan memantau kesehatan serta kerapatan vegetasi (penjelasan tentang NDVI dapat ditemukan di sub-bab 6.5.1 tentang indeks spektral). Aplikasi NDVI sangat beragam, antara lain untuk :

- Pemetaan kesehatan tanaman: Memantau pertumbuhan dan kondisi tanaman di lahan pertanian secara spasial.
- Identifikasi area stres: Mengidentifikasi area tanaman yang mengalami stres akibat kekurangan air, kekurangan nutrisi, atau serangan hama/penyakit.
- Pemantauan perubahan musiman: Menganalisis perubahan kondisi vegetasi berdasarkan data NDVI dari berbagai musim atau tahun, membantu dalam memahami fenologi tanaman atau dampak perubahan iklim.
- Optimalisasi input pertanian: Membantu petani dalam menentukan

waktu tanam dan panen yang optimal, serta mengoptimalkan penggunaan pupuk dan irigasi berdasarkan variasi kondisi vegetasi yang ditunjukkan oleh NDVI.

Meskipun NDVI adalah alat yang sangat ampuh dan banyak digunakan, penting untuk diingat bahwa NDVI juga memiliki beberapa batasan. Salah satu batasan adalah fenomena saturasi, di mana pada kondisi biomassa vegetasi yang sangat tinggi dan rapat, nilai NDVI cenderung mencapai batas atasnya dan menjadi kurang sensitif terhadap peningkatan biomassa lebih lanjut. Selain itu, pengaruh atmosfer (seperti awan tipis atau aerosol) yang tidak terkoreksi dengan baik dapat mempengaruhi nilai reflektansi yang diukur sensor, sehingga mengganggu akurasi nilai NDVI. Variabilitas warna dan kelembaban tanah di bawah kanopi vegetasi yang tidak terlalu rapat juga dapat mempengaruhi sinyal campuran yang diterima sensor, yang pada gilirannya mempengaruhi nilai NDVI. Oleh karena itu, interpretasi hasil NDVI harus selalu dilakukan dengan hati-hati, mempertimbangkan konteks lokal dari area studi, dan idealnya divalidasi dengan data pengamatan lapangan (ground truth) untuk memastikan kesimpulan yang ditarik akurat.

Informasi mengenai tutupan lahan (land cover) dan penggunaannya (land use) yang terkini dan akurat merupakan input yang sangat penting dalam berbagai aspek perencanaan pembangunan regional, pengelolaan sumber daya alam, dan pemantauan kondisi lingkungan. Citra satelit penginderaan jauh, seperti Landsat-8 OLI (Operational Land Imager), seringkali menjadi sumber data utama untuk melakukan klasifikasi tutupan lahan karena kemampuannya menyediakan cakupan area yang luas, resolusi spasial multispektral yang cukup baik (misalnya, 30 meter untuk band multispektral Landsat-8), dan resolusi temporal yang memungkinkan pemantauan secara berkala (misalnya, 16 hari untuk Landsat-8).

Proses klasifikasi tutupan lahan dari citra satelit melibatkan penggunaan

teknik interpretasi digital, seperti klasifikasi terbimbing atau tak terbimbing, untuk mengelompokkan piksel-piksel citra ke dalam beberapa kelas tutupan lahan yang telah ditentukan (misalnya, hutan, pertanian, permukiman, badan air, tanah terbuka, dll.).

Sebagai contoh, sebuah penelitian melakukan klasifikasi tutupan lahan di sebagian besar wilayah Kabupaten Pidie, Aceh, menggunakan data citra Landsat-8 OLI dan metode klasifikasi terbimbing Random Forest. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi 17 kelas tutupan lahan yang berbeda, termasuk berbagai jenis vegetasi dengan kepadatan yang berbeda, lahan terbangun, tubuh air, dan tanah terbuka. Hasil klasifikasi menunjukkan akurasi keseluruhan sebesar 89,53% dan nilai koefisien Kappa sebesar 0,91 yang mengindikasikan bahwa hasil klasifikasi tersebut memiliki tingkat kelayakan yang baik untuk digunakan (Zulfajri, Danoedoro, dan Murti 2022).

Keberhasilan dan akurasi klasifikasi tutupan lahan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Kualitas citra satelit yang digunakan (misalnya, bebas dari tutupan awan, telah melalui koreksi radiometrik dan geometrik yang baik) adalah prasyarat dasar. Pemilihan metode klasifikasi yang tepat untuk karakteristik data dan tujuan studi juga krusial. Untuk metode klasifikasi terbimbing, kualitas dan representativitas area pelatihan sangat menentukan hasil akhir. Selain itu, skema klasifikasi yang digunakan, yaitu jumlah dan definisi dari setiap kelas tutupan lahan, juga memainkan peran penting. Semakin detail dan banyak jumlah kelas dalam skema klasifikasi, umumnya akan semakin menantang untuk mencapai tingkat akurasi yang tinggi, terutama jika beberapa kelas memiliki karakteristik spektral yang mirip (sulit dibedakan oleh algoritma). Integrasi hasil klasifikasi dengan data dari Sistem Informasi Geografis (SIG), seperti peta batas administrasi, peta jaringan jalan, atau peta topografi, serta pemanfaatan pengetahuan lokal mengenai area studi, seringkali dapat membantu dalam meningkatkan

kualitas dan validitas hasil interpretasi tutupan lahan. Dengan demikian, klasifikasi tutupan lahan yang sukses adalah sebuah proses multi-faktor yang memerlukan pertimbangan cermat terhadap aspek data, metode, dan konteks aplikasi.

Kedua contoh aplikasi ini menunjukkan bagaimana interpretasi citra, baik melalui transformasi indeks vegetasi maupun melalui klasifikasi tutupan lahan, dapat menghasilkan informasi spasial yang sangat berharga untuk pemahaman dan pengelolaan lingkungan.

7.8 Rangkuman Bab

Bab ini telah membahas berbagai aspek fundamental dalam interpretasi citra penginderaan jauh. Dimulai dari pemahaman definisi dan tujuan interpretasi citra, ditekankan bahwa interpretasi bukan hanya sekadar melihat gambar, melainkan sebuah proses analitis untuk mengidentifikasi objek dan menilai signifikansinya, dengan tujuan utama untuk pemanfaatan data secara maksimal dan pengambilan keputusan yang tepat. Pentingnya interpretasi sebagai jembatan antara data mentah dan informasi yang berguna juga telah diuraikan, beserta pengenalan dua jenis utama interpretasi: visual dan digital.

Selanjutnya, dibahas mengenai tahapan-tahapan dalam proses interpretasi citra, yang meliputi deteksi, identifikasi/rekognisi, analisis, dan deduksi/inferensi. Meskipun bersifat logis, proses ini seringkali iteratif dan fleksibel tergantung pada tujuan dan kompleksitas objek yang diinterpretasi.

Inti dari interpretasi visual terletak pada pemahaman dan penerapan unsur-unsur kunci interpretasi, yaitu rona/warna, ukuran, bentuk, tekstur, pola, bayangan, situs, asosiasi, dan tinggi/kedalaman. Penggunaan unsur-unsur ini secara terintegrasi dan pemahaman terhadap hierarki kepentingannya menjadi kunci keberhasilan identifikasi objek. Kegiatan dasar seperti

delineasi, enumerasi, dan mensurasi kemudian dilakukan untuk mengkuantifikasi hasil interpretasi kualitatif.

Bab ini juga memberikan pengantar komprehensif mengenai interpretasi citra digital. Dimulai dari pentingnya pra-pemrosesan citra (koreksi radiometrik dan geometrik) untuk memastikan kualitas data input, dilanjutkan dengan pembahasan teknik peningkatan kualitas citra seperti peregangkan kontras dan filter spasial (lolos rendah dan lolos tinggi) yang bertujuan untuk mempertajam atau memperhalus fitur citra guna membantu analisis. Dasar-dasar klasifikasi citra digital juga diperkenalkan, mencakup dua pendekatan utama: klasifikasi terbimbing (dengan contoh algoritma Maximum Likelihood Classification) dan klasifikasi tak terbimbing (dengan contoh algoritma K-Means dan ISODATA), beserta perbandingan karakteristik, kelebihan, dan kekurangannya.

Validasi hasil interpretasi, khususnya klasifikasi digital, merupakan langkah krusial. Oleh karena itu, konsep uji akurasi menggunakan matriks kesalahan dan berbagai metrik turunan seperti *overall accuracy*, *producer's accuracy*, *user's accuracy*, dan koefisien Kappa telah dijelaskan secara rinci, lengkap dengan contoh perhitungannya.

Terakhir, untuk memberikan konteks praktis, disajikan contoh aplikasi interpretasi citra dalam studi kasus pemantauan kesehatan vegetasi menggunakan NDVI dan klasifikasi tutupan lahan untuk perencanaan wilayah menggunakan citra Landsat-8. Secara keseluruhan, bab ini bertujuan untuk membekali mahasiswa dengan landasan teoritis dan konseptual yang kuat mengenai interpretasi citra penginderaan jauh, mempersiapkan mereka untuk menerapkan pengetahuan ini dalam analisis data citra untuk berbagai aplikasi ilmiah dan praktis.

BAB VIII APLIKASI PENGINDERAAN JAUH

8.1 Pendahuluan

Teknologi penginderaan jauh merupakan salah satu alat yang sangat penting dalam mengumpulkan informasi tentang kondisi lingkungan, sumber daya alam, dan bencana alam. Dengan menggunakan sensor yang dipasang pada wahana seperti satelit atau pesawat terbang, teknologi ini memungkinkan kita untuk memantau kondisi lingkungan dari jarak jauh dan mendapatkan data yang akurat dan cepat. Lebih dari sekadar alat pengumpul informasi, penginderaan jauh telah menjadi tulang punggung dalam pemahaman dan pengelolaan berbagai aspek di permukaan Bumi. Kemampuannya untuk menyediakan data secara sinoptik, yaitu memberikan pandangan luas dalam satu waktu, repetitif atau berulang, dan dengan berbagai resolusi spektral serta spasial, menjadikannya instrumen yang tak ternilai. Bab ini akan mengupas secara mendalam spektrum aplikasi penginderaan jauh, mulai dari manajemen sumber daya alam hingga mitigasi bencana, dengan penekanan pada contoh-contoh aplikatif dan teknologi yang mendasarinya.

Kemampuan penginderaan jauh untuk menyediakan data yang konsisten dan terukur secara berkala, menggunakan sensor yang terkalibrasi, sangat krusial untuk mendeteksi perubahan dari waktu ke waktu. Hal ini bukan hanya tentang memetakan kondisi saat ini, tetapi juga memahami dinamika perubahan lingkungan, yang esensial untuk perencanaan berkelanjutan dan pengambilan keputusan berbasis bukti. Data yang diperoleh secara berulang memungkinkan para ilmuwan dan praktisi untuk melacak tren, seperti laju deforestasi, perluasan perkotaan, atau dampak perubahan iklim terhadap gletser dan permukaan laut. Pemahaman akan tren ini menjadi

dasar fundamental untuk merancang intervensi yang tepat waktu dan kebijakan yang efektif.

Kecepatan dan akurasi data penginderaan jauh secara langsung memengaruhi efektivitas respons dalam berbagai situasi kritis. Dalam konteks manajemen bencana, misalnya, ketersediaan data yang cepat dan akurat dapat menjadi faktor penentu dalam menyelamatkan nyawa dan mengurangi kerugian material. Informasi mengenai luas dan dampak banjir, sebaran abu vulkanik, atau area terdampak gempa Bumi yang diterima secara *near real-time* memungkinkan tim SAR dan lembaga kemanusiaan untuk mengarahkan upaya evakuasi, distribusi bantuan, dan perencanaan tanggap darurat dengan lebih efisien. Sebaliknya, keterlambatan atau ketidakakuratan data dapat menghambat upaya pertolongan dan memperburuk konsekuensi dari suatu bencana. Oleh karena itu, pengembangan berkelanjutan dalam teknologi sensor, platform, dan metode analisis data penginderaan jauh terus didorong untuk meningkatkan kemampuannya dalam menyediakan informasi yang vital bagi berbagai aspek kehidupan.

8.2 Spektrum Aplikasi Penginderaan Jauh

Penginderaan jauh memiliki berbagai aplikasi yang sangat luas, memberikan kontribusi signifikan dalam berbagai bidang. Kemampuannya untuk mencakup area yang luas secara periodik menjadikannya alat yang efisien untuk pemantauan dan analisis. Tabel 8.1 berikut menyajikan ringkasan contoh aplikasi penginderaan jauh di berbagai bidang, jenis data atau sensor yang umum digunakan, serta output informasi utama yang dihasilkan. Detail lebih lanjut akan dibahas dalam sub-bab berikutnya.

Tabel 8.1 Contoh Aplikasi Penginderaan Jauh di Berbagai Bidang

Bidang Aplikasi	Contoh Spesifik Aplikasi	Jenis Data/Sensor Umum Digunakan	Output/Informasi Utama yang Dihasilkan
Kehutanan	Pemantauan deforestasi, inventarisasi hutan, deteksi kebakaran	Landsat, Sentinel-2, MODIS, LiDAR	Peta perubahan tutupan hutan, estimasi biomassa, peta sebaran titik panas
Pertanian	Pemantauan kesehatan tanaman, estimasi hasil panen, pemetaan fase tumbuh	Landsat, Sentinel-2, Sentinel-1 SAR, Drone (UAV) dengan sensor multispektral/termal	Peta NDVI, peta kebutuhan irigasi, peta fase tumbuh padi
Geologi & Eksplorasi Mineral	Identifikasi jenis batuan, pemetaan alterasi hidrotermal	Landsat, ASTER, Citra Hiperspektral	Peta geologi, peta zona alterasi mineral
Sumber Daya Air	Pemetaan badan air, pemantauan kualitas air, analisis DAS	Landsat, Sentinel-2, MODIS	Peta sebaran badan air, peta kekeruhan air, analisis perubahan DAS
Pemantauan Lingkungan	Monitoring perubahan iklim, degradasi lahan, polusi	Landsat, Sentinel (semua seri), MODIS, sensor atmosferik khusus	Peta suhu permukaan, peta degradasi lahan, peta sebaran polutan
Manajemen Bencana	Pemetaan area terdampak banjir, gempa, letusan gunung api	Sentinel-1 SAR, Landsat, MODIS, InSAR, sensor termal	Peta genangan banjir, peta deformasi permukaan, peta sebaran abu vulkanik
Perencanaan Kota	Analisis <i>urban sprawl</i> , pemetaan infrastruktur	Citra satelit resolusi tinggi (Pleiades, WorldView), Landsat, Sentinel-2	Peta penggunaan lahan perkotaan, model 3D kota, peta jaringan jalan
Arkeologi	Identifikasi situs terpendam	Citra optik resolusi tinggi, LiDAR, citra termal	Peta anomali permukaan, model elevasi digital detail situs
Oseanografi & Kelautan	Pemetaan suhu permukaan laut, batimetri perairan dangkal	MODIS, Sentinel-3, Landsat, Sentinel-2	Peta sebaran klorofil-a, peta kedalaman laut dangkal

8.2.1 Pemetaan dan Manajemen Sumber Daya Alam

Penginderaan jauh menyediakan alat yang esensial untuk inventarisasi, pemantauan, dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Kemampuannya untuk melihat area yang luas secara konsisten membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik terkait pemanfaatan sumber daya.

- Kehutanan: Aplikasi penginderaan jauh dalam bidang kehutanan

sangat beragam, meliputi inventarisasi hutan, pemetaan tutupan dan tipe hutan, pemantauan deforestasi dan degradasi hutan, estimasi biomassa, serta deteksi kebakaran hutan. Data dari penginderaan jauh membantu dalam perencanaan konservasi, pengelolaan hutan berkelanjutan, dan penegakan hukum terkait penebangan liar. Salah satu isu krusial yang dapat dipantau secara efektif menggunakan penginderaan jauh adalah deforestasi, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia. Kalimantan, sebagai salah satu paru-paru dunia, mengalami tekanan deforestasi yang signifikan akibat berbagai faktor seperti konversi lahan untuk perkebunan, pertambangan, dan pembangunan infrastruktur. Penelitian menggunakan citra satelit seri Landsat (misalnya, Landsat 7 perekaman tahun 2000) dan Sentinel-2A (perekaman tahun 2021) dengan algoritma *machine learning* seperti *Random Forest* (RF), *Classification and Regression Trees* (CART), dan *Support Vector Machine* (SVM) telah berhasil memetakan penurunan tutupan hutan alam dan laju deforestasi. Sebagai contoh, sebuah studi di Kabupaten Kotawaringin Barat, Kalimantan Tengah, menunjukkan adanya penurunan tutupan hutan alam seluas 180.073 hektar dengan laju deforestasi mencapai 24.975 hektar per tahun (setara dengan 1.9% per tahun) dalam periode antara tahun 2000 dan 2021 (Beni Iskandar; Nanang Hanafi 2022). Penggunaan data *time-series*, sangat penting untuk memahami dinamika perubahan hutan dalam jangka panjang dan mengevaluasi dampak dari kebijakan pengelolaan hutan. Penggunaan algoritma *machine learning* dan analisis data *time-series* dalam pemantauan deforestasi menandakan sebuah pergeseran menuju sistem pemantauan yang lebih otomatis, akurat, dan mampu mengidentifikasi pola-pola perubahan yang kompleks. Data satelit menyediakan rekaman historis tutupan lahan yang konsisten, sementara algoritma

machine learning memiliki kemampuan untuk memproses volume data besar ini secara efisien guna melakukan klasifikasi dan deteksi perubahan. Kombinasi keduanya menghasilkan sistem pemantauan deforestasi yang tidak hanya lebih akurat tetapi juga berpotensi memberikan informasi mendekati *real-time*. Informasi semacam ini sangat krusial bagi pemerintah dan organisasi lingkungan hidup untuk merancang strategi intervensi dan kebijakan mitigasi deforestasi yang lebih responsif dan berbasis data. Lebih jauh, deforestasi yang terdeteksi bukan hanya berarti hilangnya tutupan pohon semata. Dampaknya merambat lebih luas, mencakup hilangnya keanekaragaman hayati, peningkatan emisi karbon ke atmosfer yang berkontribusi pada perubahan iklim, gangguan pada siklus hidrologi regional, hingga potensi munculnya konflik sosial terkait perebutan lahan. Data penginderaan jauh menyediakan bukti ilmiah yang kuat untuk menyoroti urgensi permasalahan ini dan mendorong pencarian solusi pengelolaan hutan yang berkelanjutan, yang pada akhirnya akan memengaruhi kesejahteraan ekosistem dan manusia dalam jangka panjang. Selain citra satelit optik, teknologi LiDAR (*Light Detection and Ranging*) telah merevolusi cara pemetaan hutan. LiDAR mampu menyediakan citra tiga dimensi (3D) dari struktur hutan, informasi topografi, ketinggian pohon secara individu, kerapatan tegakan, hingga kondisi lantai hutan. Informasi yang dihasilkan LiDAR jauh lebih detail dibandingkan citra satelit dua dimensi (2D) konvensional. Sensor LiDAR bekerja dengan memancarkan pulsa laser dan mengukur waktu kembalinya pantulan, sehingga dapat "menembus" kanopi hutan dan memberikan gambaran akurat mengenai permukaan tanah di bawahnya. Hal ini memungkinkan perencanaan penjualan hasil kayu yang lebih akurat, penilaian pertumbuhan tegakan hutan secara presisi, dan identifikasi fitur-fitur hidrologis penting seperti

alur sungai dan daerah tangkapan air.

- Pertanian Presisi (Precision Agriculture): Penginderaan jauh memberikan dukungan vital bagi konsep pertanian presisi, yaitu pendekatan pengelolaan pertanian yang memperhitungkan variabilitas spasial dan temporal di dalam lahan untuk mengoptimalkan input dan meningkatkan hasil. Aplikasi penginderaan jauh dalam pertanian mencakup pemantauan kesehatan tanaman, estimasi hasil panen, identifikasi dini area yang terserang hama atau penyakit, manajemen irigasi yang lebih efisien, dan panduan untuk pemupukan yang tepat sasaran dan tepat dosis. Sebuah tinjauan menunjukkan bahwa penginderaan jauh dapat mencapai tingkat deteksi kondisi tanaman dan lingkungan hingga 92%, sementara Sistem Informasi Geografis (SIG) meningkatkan pengambilan keputusan dengan akurasi penanganan data geografis sebesar 85% (Padhiary dkk. 2025). Salah satu alat analisis yang paling populer dalam aplikasi pertanian adalah Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (lihat Sub-bab tentang 6.5.1. tentang Indeks Spektral). Sebagai contoh aplikasi, pemantauan kondisi kebun kelapa sawit menggunakan data NDVI yang diturunkan dari citra Sentinel-2 di Provinsi Riau menunjukkan rentang nilai antara 0,51 hingga 0,84 (Yuniasih dan Adjie 2022). Nilai-nilai ini kemudian dapat diklasifikasikan lebih lanjut untuk menentukan tingkat kesehatan tanaman pada setiap blok kebun. Studi lain di Kabupaten Asahan, Sumatera Utara, juga memanfaatkan NDVI dari citra Sentinel-2 untuk mengidentifikasi sebaran umur tanaman kelapa sawit (Darmawan, Carolita, dan Ananta 2020). Untuk wilayah tropis seperti Indonesia yang sering tertutup awan, data *Synthetic Aperture Radar* (SAR) menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan data optik. Sensor SAR, seperti yang terdapat pada satelit Sentinel-1, mampu menembus tutupan awan, kabut, dan bahkan

hujan ringan, sehingga dapat menyediakan data secara konsisten tanpa terganggu kondisi cuaca. Data SAR telah terbukti efektif untuk mengidentifikasi dan memantau fase pertumbuhan tanaman padi, mulai dari fase vegetatif, reproduktif, hingga pematangan. Identifikasi ini didasarkan pada analisis perubahan nilai *backscatter* (hamburan balik) sinyal Radar seiring dengan perubahan struktur fisik dan kandungan air tanaman padi selama siklus pertumbuhannya. Sebuah penelitian yang menggunakan algoritma klasifikasi *random forest* pada data citra Sentinel-1 untuk memetakan fase tumbuh padi berhasil mencapai akurasi sebesar 75% (Suspidayanti dan Rokhmana 2021). Selain satelit, *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau yang lebih dikenal sebagai drone, kini semakin populer digunakan dalam aplikasi pertanian. Drone yang dilengkapi dengan sensor multispektral atau termal mampu menghasilkan data citra dengan resolusi spasial yang sangat tinggi (hingga level sentimeter). Ini memungkinkan pemetaan lahan pertanian secara sangat detail, termasuk identifikasi individu tanaman (misalnya, penghitungan jumlah tanaman jagung per hektar), deteksi dini area yang mengalami stres air atau kekurangan nutrisi, pemantauan pertumbuhan tanaman secara presisi, deteksi serangan hama atau penyakit pada skala lokal, serta pengawasan dan perencanaan waktu panen yang optimal. Aplikasi penginderaan jauh dalam pertanian secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi penggunaan input pertanian seperti pupuk, air, dan pestisida. Dengan data yang detail mengenai variabilitas kondisi lahan dan tanaman, petani dapat menerapkan input hanya pada area yang benar-benar membutuhkan dan dengan dosis yang sesuai (*variable rate application*). Hal ini tidak hanya mengurangi biaya produksi tetapi juga meminimalkan potensi dampak negatif terhadap lingkungan akibat penggunaan input yang berlebihan, seperti pencemaran air

tanah oleh residu pupuk atau pestisida. Dengan demikian, penginderaan jauh mendorong praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Lebih lanjut, optimalisasi pengelolaan lahan dan peningkatan produktivitas melalui pertanian presisi yang didukung oleh penginderaan jauh secara tidak langsung turut mendukung upaya peningkatan ketahanan pangan nasional. Bagi petani, penerapan teknologi ini berpotensi meningkatkan hasil panen dan pendapatan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kesejahteraan mereka. Meskipun demikian, tantangan terkait aksesibilitas teknologi, biaya investasi awal, dan kebutuhan akan pelatihan teknis bagi petani perlu menjadi perhatian agar manfaat dari kemajuan teknologi ini dapat dirasakan secara lebih merata.

- Geologi dan Eksplorasi Mineral: Dalam bidang geologi dan eksplorasi mineral, penginderaan jauh digunakan untuk identifikasi jenis batuan, pemetaan struktur geologi seperti patahan dan lipatan, serta deteksi zona alterasi hidrotermal yang sering berasosiasi dengan endapan mineral berharga. Kemampuan untuk memetakan area yang luas dengan cepat menjadikan penginderaan jauh sebagai alat yang efektif dalam tahap survei pendahuluan, membantu mempersempit area target untuk penyelidikan lapangan yang lebih detail dan mahal. Citra hiperspektral memainkan peran yang sangat penting dalam aplikasi ini. Sensor hiperspektral merekam data dalam ratusan saluran spektral yang sempit dan berdekatan secara kontinu, menghasilkan "sidik jari" spektral yang unik untuk setiap material di permukaan Bumi. Kemampuan ini memungkinkan identifikasi mineral secara spesifik, membedakan antara mineral bijih (ekonomis) dan mineral pengotor (non-ekonomis), atau memetakan zona-zona alterasi mineral tertentu yang menjadi indikator keberadaan deposit mineral. Pemanfaatan penginderaan jauh, khususnya data hiperspektral, dalam tahap awal

eksplorasi mineral dapat secara signifikan mengurangi biaya operasional dan risiko kegagalan yang sering terkait dengan survei lapangan konvensional yang memakan waktu dan sumber daya besar. Dengan kemampuan untuk menyaring dan mempersempit area pencarian dari skala regional ke skala lokal, perusahaan pertambangan dapat memfokuskan upaya survei detail dan pengeboran pada lokasi-lokasi yang paling prospektif, sehingga meningkatkan efisiensi proses penemuan. Meskipun penginderaan jauh sangat membantu dalam efisiensi eksplorasi, penting untuk diingat bahwa pengembangan industri pertambangan harus selalu memperhatikan aspek keberlanjutan dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Menariknya, teknologi penginderaan jauh juga dapat dimanfaatkan untuk memantau dampak lingkungan dari aktivitas pertambangan itu sendiri, seperti perubahan tutupan lahan di sekitar area tambang, kualitas air sungai yang menerima aliran dari lokasi tambang, atau stabilitas lereng pada area penimbunan batuan sisa. Ini menunjukkan peran ganda penginderaan jauh, yaitu sebagai alat untuk mendukung eksploitasi sumber daya sekaligus sebagai instrumen pemantauan untuk pengelolaan lingkungan yang lebih bertanggung jawab, sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan.

- **Sumber Daya Air:** Penginderaan jauh memiliki aplikasi yang luas dalam pengelolaan sumber daya air, mulai dari pemetaan badan air seperti sungai, danau, dan waduk, hingga pemantauan perubahan luas genangan air dari waktu ke waktu. Jika dikombinasikan dengan data batimetri (kedalaman), volume air dalam suatu badan air dapat diestimasi. Selain kuantitas, kualitas air juga dapat dipantau, misalnya untuk mendeteksi kandungan sedimen tersuspensi, memantau suhu permukaan air, atau mengidentifikasi kejadian algal blooms (ledakan populasi alga) yang dapat berbahaya. Data penginderaan jauh

mengenai sumber daya air, ketika diintegrasikan dengan data lain seperti tutupan lahan, topografi, jenis tanah, dan data sosial-ekonomi dalam platform SIG, menjadi sangat penting untuk pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) secara terpadu. DAS merupakan satu unit hidrologis di mana semua aliran air permukaan mengalir ke satu outlet. Analisis terpadu ini membantu para perencana dan pengelola sumber daya air untuk memahami interaksi kompleks antara berbagai komponen di dalam DAS, seperti bagaimana perubahan tutupan lahan di bagian hulu dapat memengaruhi debit air dan sedimentasi di bagian hilir. Pemahaman ini mendukung perencanaan penggunaan lahan yang lebih baik, upaya mitigasi bencana banjir dan kekeringan, serta strategi perlindungan kualitas air agar tetap terjaga. Seiring dengan meningkatnya tekanan terhadap sumber daya air akibat pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan dampak perubahan iklim, ketersediaan data penginderaan jauh yang akurat dan terkini menjadi semakin krusial. Data ini dapat digunakan untuk memantau perubahan ketersediaan air, seperti penyusutan luas danau atau penurunan debit sungai selama musim kemarau. Informasi ini sangat penting untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah yang rentan terhadap krisis air dan dapat menjadi dasar ilmiah untuk negosiasi alokasi air yang adil antar berbagai pengguna (misalnya, untuk kebutuhan domestik, pertanian, dan industri). Lebih lanjut, data ini juga mendukung perencanaan strategi adaptasi terhadap perubahan ketersediaan air di masa depan, seperti pembangunan infrastruktur penyimpanan air (waduk, embung) atau implementasi teknologi irigasi yang lebih efisien.

8.2.2 Pemantauan Lingkungan

Penginderaan jauh adalah alat yang sangat kuat untuk memantau kondisi lingkungan global dan lokal, serta dampak aktivitas manusia terhadapnya. Kemampuannya memberikan pandangan sinoptik dan data historis sangat

berharga untuk memahami perubahan lingkungan dalam skala luas dan jangka panjang.

- Perubahan Iklim: Penginderaan jauh memainkan peran kunci dalam memantau berbagai indikator perubahan iklim. Ini termasuk pemantauan pencairan tutupan es dan gletser di kutub dan pegunungan tinggi, pengukuran kenaikan muka air laut global, pemetaan perubahan suhu permukaan laut dan darat, serta analisis perubahan pola vegetasi global sebagai respons terhadap perubahan kondisi iklim. Data satelit menyediakan rekaman jangka panjang yang konsisten dan terukur, yang sangat penting untuk analisis tren iklim dan memahami laju perubahannya. Sebagai contoh, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Indonesia secara aktif memanfaatkan teknologi penginderaan jauh untuk melakukan pemantauan terhadap perubahan tutupan lahan dan dampaknya terhadap perubahan iklim di Indonesia. Data observasi dari penginderaan jauh berfungsi sebagai input penting sekaligus alat validasi yang krusial untuk model-model iklim global. Akurasi dari model-model iklim ini, yang digunakan untuk memproyeksikan kondisi iklim di masa depan, sangat bergantung pada kualitas dan kuantitas data observasi yang digunakan untuk mengkalibrasinya. Selain itu, data penginderaan jauh menyediakan bukti empiris yang kuat untuk mendukung perumusan kebijakan mitigasi (pengurangan emisi gas rumah kaca) dan adaptasi (penyesuaian terhadap dampak perubahan iklim) di tingkat nasional maupun internasional. Dengan kata lain, penginderaan jauh membantu mengubah pemahaman ilmiah tentang perubahan iklim menjadi tindakan nyata. Perubahan iklim diketahui memiliki dampak yang tidak merata, baik secara geografis maupun sosial-ekonomi. Penginderaan jauh dapat membantu mengidentifikasi wilayah dan komunitas yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim,

seperti daerah pesisir dataran rendah yang terancam kenaikan muka air laut atau wilayah pertanian yang rentan terhadap kekeringan. Informasi spasial ini dapat mendukung argumen untuk keadilan iklim, yaitu prinsip bahwa negara-negara dan komunitas yang paling sedikit berkontribusi terhadap perubahan iklim namun paling merasakan dampaknya harus mendapatkan dukungan yang memadai. Lebih lanjut, dampak perubahan iklim bersifat lintas sektor, memengaruhi pertanian, ketersediaan sumber daya air, kesehatan manusia, dan infrastruktur. Penginderaan jauh, dengan kemampuannya mengobservasi berbagai parameter biofisik, dapat membantu memantau dampak-dampak ini secara terintegrasi, memberikan gambaran yang lebih holistik mengenai kompleksitas tantangan perubahan iklim.

- Degradasi Lahan: Penginderaan jauh efektif digunakan untuk memantau berbagai proses degradasi lahan, seperti erosi tanah, desertifikasi (proses pengurangan di mana lahan subur menjadi gersang), salinisasi (peningkatan kadar garam dalam tanah), dan penurunan kualitas lahan akibat praktik pertanian yang tidak berkelanjutan atau alih fungsi lahan yang tidak terkendali. Analisis data penginderaan jauh multitemporal (data dari beberapa waktu yang berbeda) dapat membantu mengidentifikasi faktor-faktor pemicu degradasi lahan. Misalnya, dengan membandingkan citra dari tahun ke tahun, dapat terlihat bagaimana deforestasi di daerah lereng curam berkorelasi dengan peningkatan kejadian erosi dan tanah longsor, atau bagaimana praktik irigasi yang buruk di daerah kering menyebabkan akumulasi garam di permukaan tanah. Selain mengidentifikasi penyebab, penginderaan jauh juga memungkinkan pemantauan konsekuensi dari degradasi lahan terhadap produktivitas pertanian dan kemampuan lahan untuk menyediakan jasa ekosistem penting lainnya,

seperti penyimpanan karbon atau regulasi tata air. Degradasi lahan seringkali memiliki kaitan erat dengan isu kemiskinan, terutama di wilayah pedesaan di negara berkembang. Masyarakat yang hidup dalam kemiskinan mungkin terpaksa mengeksploitasi sumber daya lahan secara berlebihan untuk memenuhi kebutuhan hidup jangka pendek, misalnya dengan melakukan penebangan hutan untuk kayu bakar atau pertanian di lahan marginal tanpa praktik konservasi yang memadai. Hal ini dapat menciptakan lingkaran setan: degradasi lahan menurunkan produktivitas, yang memperburuk kemiskinan, yang kemudian mendorong eksploitasi lebih lanjut. Dalam skala yang lebih luas, degradasi lahan yang parah dapat mengancam keamanan lingkungan regional dan bahkan memicu konflik atas sumber daya alam (lahan subur, air) yang semakin menipis.

- Polusi: Penginderaan jauh dapat digunakan untuk deteksi dan pemantauan berbagai jenis polusi. Dalam konteks polusi udara, sensor satelit dapat mendeteksi aerosol (partikel halus di atmosfer) (Kusuma dkk. 2019; Widya dkk. 2020) dan gas-gas jejak seperti nitrogen dioksida (NO_2) dan sulfur dioksida (SO_2) yang berasal dari emisi industri, transportasi, atau kebakaran hutan (Faisal dan Jaelani 2023; Pratama dan Jaelani 2025). Untuk polusi air, penginderaan jauh dapat mengidentifikasi tumpahan minyak di laut, memetakan sebaran sedimen akibat erosi atau limbah industri dan pertanian yang masuk ke badan air, serta mendeteksi harmful algal blooms (HABs) yang dapat meracuni ekosistem perairan. Sebagai contoh, teknologi penginderaan jauh berbasis Radar Doppler ganda telah diimplementasikan untuk mendukung upaya mitigasi dampak asap akibat kebakaran hutan dan lahan (karhutla) dengan cara mendeteksi dan memantau pergerakan partikel asap di atmosfer. Kemampuan penginderaan jauh tidak hanya terbatas pada pendeteksian keberadaan

polusi, tetapi juga dapat membantu dalam melacak sumber polusi tersebut dan memodelkan pola penyebarannya. Dengan menganalisis data citra dari beberapa waktu atau mengintegrasikannya dengan model atmosfer atau hidrologi, serta data pendukung lainnya seperti arah angin atau pola aliran sungai, sumber-sumber utama polusi dapat diidentifikasi. Informasi ini sangat penting bagi lembaga pemerintah terkait untuk melakukan penegakan regulasi lingkungan terhadap pihak-pihak pencemar dan untuk merencanakan tindakan pengendalian polusi yang lebih efektif dan tepat sasaran. Paparan terhadap polusi, baik udara maupun air, diketahui memiliki dampak serius terhadap kesehatan masyarakat. Data penginderaan jauh mengenai tingkat polusi spasial dan temporal dapat digunakan dalam studi epidemiologi untuk menyelidiki hubungan antara tingkat paparan polusi dengan insiden penyakit tertentu, seperti penyakit pernapasan, kardiovaskular, atau penyakit yang ditularkan melalui air. Seringkali, studi semacam ini mengungkapkan bahwa komunitas berpenghasilan rendah atau kelompok minoritas tinggal di area dengan tingkat polusi yang lebih tinggi, sehingga menanggung beban kesehatan yang tidak proporsional. Dengan demikian, data penginderaan jauh menjadi relevan tidak hanya untuk isu kesehatan masyarakat secara umum, tetapi juga untuk advokasi terkait isu keadilan lingkungan.

- Keanekaragaman Hayati: Penginderaan jauh berkontribusi pada upaya konservasi keanekaragaman hayati melalui berbagai aplikasi, seperti pemetaan tipe-tipe habitat (misalnya, hutan hujan tropis, hutan bakau, padang rumput), identifikasi koridor satwa liar yang penting untuk pergerakan spesies antar fragmen habitat, analisis fragmentasi habitat akibat pembangunan atau alih fungsi lahan, pemantauan perubahan kondisi vegetasi yang menjadi habitat kunci bagi spesies tertentu, dan

identifikasi ancaman terhadap kawasan-kawasan lindung seperti perambahan atau aktivitas ilegal lainnya. Salah satu keunggulan penginderaan jauh adalah kemampuannya untuk melakukan analisis keanekaragaman hayati pada skala lanskap. Ini sangat penting untuk memahami bagaimana perubahan penggunaan lahan dalam skala luas memengaruhi konektivitas antar habitat dan, pada akhirnya, kelangsungan hidup populasi berbagai spesies. Habitat yang terfragmentasi atau terisolasi dapat menghambat pergerakan hewan untuk mencari makan, berkembang biak, atau menghindari predator, yang dapat menyebabkan penurunan populasi dan bahkan kepunahan lokal. Analisis konektivitas habitat berdasarkan peta tutupan lahan dari penginderaan jauh dapat membantu mengidentifikasi area-area kritis yang perlu dilindungi atau direstorasi untuk menjaga jalur pergerakan satwa liar dan menjaga integritas ekosistem. Keanekaragaman hayati menyediakan berbagai jasa ekosistem yang vital bagi kesejahteraan manusia, seperti penyerbukan tanaman pangan oleh serangga, pengendalian hama alami oleh predator, penyediaan air bersih oleh hutan, dan sumber bahan baku untuk obat-obatan. Pemantauan kondisi ekosistem menggunakan penginderaan jauh membantu dalam menilai sejauh mana ekosistem tersebut mampu menyediakan jasa-jasa penting ini. Selain nilai fungsionalnya, terdapat pula argumen etis yang kuat untuk melindungi keanekaragaman hayati karena nilai intrinsiknya, yaitu hak setiap spesies untuk tetap ada di muka Bumi terlepas dari manfaat langsungnya bagi manusia. Data dan informasi dari penginderaan jauh dapat mendukung argumen ini dengan menunjukkan keunikan dan kerentanan berbagai ekosistem dan spesies.

8.2.3 Manajemen Bencana Alam

Penginderaan jauh memainkan peran vital di semua tahapan siklus manajemen bencana, yang meliputi mitigasi (upaya mengurangi risiko), kesiapsiagaan (persiapan menghadapi bencana), respons (tindakan saat bencana terjadi), dan pemulihan (upaya membangun kembali pasca-bencana).

- **Peringatan Dini dan Pemantauan Bencana:**

- Banjir: Penginderaan jauh digunakan untuk pemetaan daerah rawan banjir dengan menganalisis berbagai parameter seperti data curah hujan historis, peta penggunaan lahan, jenis tanah, dan kemiringan lereng. Data *Synthetic Aperture Radar* (SAR), misalnya dari satelit Sentinel-1, sangat efektif untuk memetakan luas genangan banjir secara cepat dan akurat, bahkan dalam kondisi cuaca berawan atau malam hari, karena kemampuannya menembus awan. Berbagai studi kasus di Indonesia, seperti di wilayah Jakarta dan Bandung, telah menunjukkan keberhasilan pemanfaatan data satelit untuk analisis dan pemetaan banjir. Bahkan, aplikasi berbasis masyarakat seperti "Siaga Banjir" di Jakarta telah mencoba mengintegrasikan laporan dari warga dengan data spasial untuk memberikan informasi banjir yang lebih komprehensif.
- Gempa Bumi dan Tsunami: Salah satu teknik penginderaan jauh yang sangat berguna untuk pemantauan gempa Bumi adalah *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR). Teknik ini mampu menganalisis deformasi atau pergeseran kerak Bumi sebelum, selama, dan setelah kejadian gempa dengan tingkat ketelitian hingga skala sentimeter bahkan milimeter. Informasi ini penting untuk memahami mekanisme gempa dan mengidentifikasi area yang mengalami kerusakan. Untuk

ancaman tsunami, data batimetri (kedalaman laut) sangat krusial dalam pemodelan perambatan gelombang tsunami. Data batimetri di perairan dangkal dapat diturunkan dari citra satelit optik, dan BRIN juga menyebutkan bahwa peta batimetri membantu dalam pengumpulan data untuk prediksi tsunami.

- Letusan Gunung Berapi: Aktivitas gunung berapi dapat dipantau dari luar angkasa melalui beberapa cara. Deteksi anomali termal pada area kawah, yang mengindikasikan peningkatan suhu akibat aktivitas magma, dapat dilakukan menggunakan sensor inframerah termal yang ada pada satelit seperti MODIS atau Landsat. Selain itu, deformasi pada tubuh gunung api, seperti pengembangan (inflasi) akibat naiknya magma ke permukaan atau pengempisan (deflasi) setelah erupsi, dapat dipantau secara presisi menggunakan teknik InSAR dengan data dari satelit SAR seperti Sentinel-1. Studi kasus pemantauan aktivitas gunung berapi menggunakan penginderaan jauh telah banyak dilakukan di Indonesia, misalnya di Gunung Gede, Gunung Agung di Bali, dan Gunung Merapi di Jawa Tengah.
- Kebakaran Hutan dan Lahan (Karhutla): Deteksi titik panas (*hotspot*) merupakan aplikasi penting penginderaan jauh untuk pemantauan karhutla. Sensor termal pada satelit seperti MODIS (yang dibawa oleh satelit Terra dan Aqua) mampu mengidentifikasi lokasi-lokasi kebakaran secara mendekati *real-time*. Informasi ini sangat berguna bagi tim pemadam kebakaran untuk merespons dengan cepat. BMKG juga dilaporkan menggunakan teknologi Radar untuk mendukung upaya mitigasi dampak asap akibat karhutla.
- Siklon Tropis: Perkembangan siklon tropis, termasuk intensitas dan jalur pergerakannya, serta dampaknya terhadap distribusi

curah hujan di wilayah yang dilaluinya, dapat dipantau secara efektif menggunakan data dari satelit cuaca geostasioner seperti Himawari-8. Data ini sering dikombinasikan dengan data estimasi curah hujan global berbasis satelit seperti GSMaP (*Global Satellite Mapping of Precipitation*) untuk analisis yang lebih komprehensif.

- Peran Institusi Nasional: Beberapa institusi nasional di Indonesia memainkan peran kunci dalam pengembangan dan pemanfaatan teknologi penginderaan jauh untuk berbagai aplikasi, termasuk manajemen bencana:
 - BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional): BRIN aktif dalam penelitian dan pengembangan teknologi penginderaan jauh. Salah satu inisiatif penting adalah rencana untuk mengembangkan konstelasi satelit nasional yang didedikasikan untuk sistem peringatan dini bencana. BRIN juga mengoperasikan stasiun Bumi penerima data satelit dan menyediakan layanan data penginderaan jauh bagi berbagai pengguna.
 - BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika): BMKG secara rutin memanfaatkan data penginderaan jauh untuk pemantauan cuaca, iklim, dan berbagai bencana hidrometeorologi seperti siklon tropis, banjir, dan karhutla. BMKG juga menekankan pentingnya peningkatan jumlah satelit observasi Bumi untuk meningkatkan akurasi dan kecepatan deteksi dini bencana di wilayah Indonesia yang luas dan rawan bencana.
 - BIG (Badan Informasi Geospasial): BIG bertanggung jawab dalam penyediaan data dan peta dasar geospasial nasional. Banyak dari data ini, seperti peta rupaBumi dan model elevasi digital, dihasilkan atau divalidasi menggunakan teknologi penginderaan jauh dan sangat krusial sebagai input untuk berbagai

analisis aplikasi, termasuk dalam konteks manajemen bencana.

Efektivitas sistem manajemen bencana sangat bergantung pada kemampuan untuk mengintegrasikan data dari berbagai sumber – mulai dari data satelit, sensor pemantauan di darat (misalnya, seismograf, stasiun cuaca otomatis), hingga laporan dari masyarakat – ke dalam sebuah sistem peringatan dini yang komprehensif dan andal. Dalam arsitektur sistem seperti ini, penginderaan jauh menyediakan komponen data spasial yang sangat krusial, memberikan gambaran mengenai sebaran ancaman dan potensi dampak bencana. Data spasial ini, ketika digabungkan dengan data non-spasial lainnya dalam platform analisis seperti SIG, memungkinkan dihasilkannya informasi peringatan dini yang lebih akurat, tepat waktu, dan mudah dipahami oleh pihak berwenang serta masyarakat luas, sehingga respons yang dilakukan menjadi lebih terkoordinasi dan efektif. Lebih dari sekadar aspek teknologi, pemanfaatan penginderaan jauh dalam manajemen bencana juga bertujuan untuk membangun resiliensi atau ketahanan komunitas terhadap bencana. Data dan informasi mengenai risiko bencana yang dihasilkan harus dapat diakses dan dipahami oleh masyarakat agar mereka dapat mengambil tindakan pencegahan dan kesiapsiagaan yang diperlukan. Aplikasi yang ramah pengguna, seperti yang dicontohkan oleh "Siaga Banjir", dapat menjadi jembatan penting dalam penyebarluasan informasi ini. Lebih lanjut, analisis data bencana historis yang terekam oleh penginderaan jauh dapat memberikan masukan berharga bagi penyusunan atau revisi kebijakan tata ruang, standar keamanan bangunan, dan rencana investasi infrastruktur publik agar lebih adaptif dan tahan terhadap risiko bencana di masa depan. Ini merupakan bentuk adaptasi jangka panjang yang esensial untuk mengurangi kerentanan suatu wilayah.

8.2.4 Perencanaan Kota dan Infrastruktur

Penginderaan jauh memberikan data penting untuk perencanaan, pemantauan, dan pengelolaan wilayah perkotaan serta infrastruktur pendukungnya. Dengan pertumbuhan populasi perkotaan yang pesat, pemantauan yang efektif menjadi kunci untuk pembangunan yang berkelanjutan.

- Pemantauan Perkembangan Wilayah Urban (Urban Sprawl): Analisis citra satelit multitemporal (dari waktu ke waktu) memungkinkan pemetaan perluasan area terbangun, identifikasi perubahan penggunaan lahan dari area non-urban (seperti pertanian atau hutan) menjadi area urban, dan pengukuran laju urbanisasi. Informasi ini sangat krusial bagi pemerintah kota untuk melakukan perencanaan tata ruang yang berkelanjutan, memastikan penyediaan layanan publik (seperti air bersih, sanitasi, transportasi, dan fasilitas pendidikan serta kesehatan) yang memadai seiring dengan pertumbuhan penduduk, dan mengelola dampak lingkungan yang timbul akibat urbanisasi, seperti peningkatan suhu perkotaan (urban heat island effect), hilangnya lahan hijau, dan peningkatan risiko banjir (Voogt dan Oke 2003).
- Pemetaan Jaringan Transportasi dan Infrastruktur: Penginderaan jauh, terutama citra satelit dengan resolusi spasial tinggi, sangat berguna untuk pemetaan detail jaringan transportasi seperti jalan raya, jalan tol, rel kereta api, pelabuhan, dan bandara. Selain itu, kondisi infrastruktur kritis seperti jembatan, bendungan, dan jaringan pipa juga dapat dipantau dari waktu ke waktu untuk mendeteksi potensi kerusakan atau kebutuhan pemeliharaan. Data penginderaan jauh mengenai perkembangan kota tidak hanya memberikan informasi fisik mengenai tutupan lahan, tetapi juga dapat dianalisis lebih lanjut untuk menilai aspek-aspek kualitas hidup perkotaan. Misalnya, dengan menganalisis sebaran dan luas ruang terbuka hijau, dapat dihitung rasio ruang

terbuka hijau per kapita. Aksesibilitas penduduk terhadap layanan publik seperti sekolah, rumah sakit, atau pasar dapat dianalisis dengan menggabungkan peta jaringan jalan dan lokasi fasilitas. Bahkan, paparan penduduk terhadap polusi udara atau kebisingan dapat diperkirakan dengan mengintegrasikan data penginderaan jauh dengan data lain. Analisis semacam ini juga dapat mengungkap adanya kesenjangan spasial dalam pembangunan perkotaan, di mana beberapa area mungkin memiliki kualitas lingkungan yang lebih baik dan akses layanan yang lebih lengkap dibandingkan area lainnya. Informasi ini penting untuk perencanaan kota yang lebih inklusif dan adil, yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas hidup seluruh warga kota. Integrasi data penginderaan jauh dengan teknologi-teknologi canggih lainnya seperti *Internet of Things* (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI) merupakan komponen kunci dalam pengembangan konsep Kota Cerdas (*Smart City*). Dalam konteks ini, data penginderaan jauh menyediakan lapisan informasi spasial dinamis mengenai kondisi perkotaan yang dapat diumpungkan ke platform *smart city* untuk analisis *real-time* dan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan otomatis, misalnya dalam manajemen lalu lintas, optimalisasi rute transportasi publik, atau respons darurat terhadap insiden. Selain itu, dalam konteks peningkatan resiliensi perkotaan, penginderaan jauh membantu kota untuk lebih siap menghadapi berbagai tantangan, terutama yang berkaitan dengan perubahan iklim seperti peningkatan frekuensi dan intensitas banjir perkotaan atau gelombang panas. Pemetaan area-area rawan bencana memungkinkan perencanaan infrastruktur hijau (seperti taman kota atau hutan kota penyerap air), perbaikan sistem drainase, atau perancangan bangunan yang lebih tahan terhadap guncangan lingkungan. Kota yang lebih cerdas dan lebih resilien akan lebih mampu beradaptasi terhadap

perubahan dan berkembang secara berkelanjutan di masa depan.

8.2.5 Aplikasi Lainnya

Selain bidang-bidang utama yang telah dibahas, penginderaan jauh juga memiliki aplikasi penting dalam berbagai disiplin ilmu lain.

- **Arkeologi:** Dalam bidang arkeologi, penginderaan jauh digunakan untuk mengidentifikasi situs-situs purbakala yang mungkin tersembunyi di bawah permukaan tanah, tertutup oleh vegetasi yang lebat, atau berada di area yang sulit dijangkau secara fisik. Berbagai teknik analisis citra, seperti deteksi anomali pada pola pertumbuhan vegetasi (yang dapat mengindikasikan adanya struktur terkubur di bawahnya), identifikasi fitur mikro-topografi (perbedaan elevasi permukaan tanah yang sangat kecil namun berpola), atau analisis sifat termal tanah (di mana material bangunan kuno mungkin memiliki retensi panas yang berbeda dari tanah di sekitarnya), dapat membantu mengungkapkan keberadaan struktur-struktur peninggalan masa lalu. Penginderaan jauh menawarkan metode survei arkeologi awal yang bersifat non-invasif, artinya tidak merusak situs yang diteliti. Ini merupakan keunggulan signifikan dibandingkan metode ekskavasi tradisional yang destruktif dan mahal. Dengan menggunakan penginderaan jauh, arkeolog dapat memetakan potensi situs secara luas terlebih dahulu, kemudian memfokuskan upaya ekskavasi pada area-area yang paling menjanjikan. Selain itu, citra satelit atau foto udara juga membantu para arkeolog untuk memahami konteks lanskap yang lebih luas dari sebuah situs, yaitu bagaimana situs tersebut berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya pada masa lalu. Dengan kemampuannya menemukan dan memetakan situs-situs arkeologi, penginderaan jauh memberikan kontribusi nyata pada upaya pelestarian warisan budaya. Setiap penemuan baru yang difasilitasi oleh teknologi ini berpotensi untuk memperkaya narasi sejarah dan

memperdalam pemahaman kita mengenai peradaban-peradaban masa lampau.

- Oseanografi dan Kelautan: Aplikasi penginderaan jauh dalam oseanografi dan kelautan sangat beragam, mencakup pemantauan suhu permukaan laut (SST), analisis warna laut untuk mendeteksi konsentrasi klorofil-a (indikator produktivitas primer dan keberadaan fitoplankton) dan sedimen tersuspensi, pengukuran tinggi muka laut menggunakan altimetri satelit, serta pemetaan ekosistem pesisir penting seperti terumbu karang, hutan bakau (mangrove), dan padang lamun (Matsushita dkk. 2016; Syariz dkk. 2022). Teknologi ini juga efektif untuk mendeteksi dan memantau tumpahan minyak di laut, serta melacak fenomena oseanografi dinamis seperti algal blooms atau ledakan populasi alga, contohnya adalah pemantauan *Ulva* prolifera green tides yang terjadi secara masif di Laut Kuning, Cina. Salah satu aplikasi yang berkembang pesat adalah pemetaan batimetri perairan dangkal menggunakan data citra satelit, yang dikenal dengan istilah *Satellite Derived Bathymetry* (SDB). Citra satelit multispektral, seperti dari sensor Landsat 8 dan Sentinel-2, dapat digunakan untuk mengestimasi kedalaman perairan dangkal berdasarkan prinsip atenuasi (pelemahan) intensitas cahaya pada berbagai panjang gelombang saat menembus kolom air. Sebuah studi yang dilakukan di perairan dangkal Sumenep, Madura, menganalisis kemampuan Citra Satelit Pleiades-1B dalam mengestimasi kedalaman Perairan Gili Iyang dengan menerapkan Geographically Weighted Regression (Gwr) (Jaelani dan Putri 2019). Studi ini berhasil menerapkan teknologi pemetaan batimetri berbasis satelit menggunakan citra Pleiades-1B untuk mengatasi kendala biaya dan aksesibilitas survei konvensional. Melalui penerapan koreksi atmosfer 6SV dan algoritma hibrida (VHS dan GWR), penelitian mencapai tingkat kesalahan

(RMSE) sebesar 2,46 meter. Hasil validasi mengonfirmasi bahwa metode ini sangat andal untuk penyediaan informasi kedalaman pada zona 6–16 meter. SDB menawarkan alternatif yang lebih cepat dan hemat biaya dibandingkan metode survei batimetri konvensional yang menggunakan kapal dan *echosounder*, terutama untuk pemetaan area perairan yang luas atau sulit dijangkau oleh kapal survei. Informasi batimetri yang dihasilkan, ketika dikombinasikan dengan pemantauan perubahan garis pantai dari citra satelit multitemporal, memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika wilayah pesisir, termasuk proses erosi dan akresi, serta dampak potensial dari kenaikan muka air laut. Informasi ini sangat penting untuk perencanaan pembangunan infrastruktur pesisir (seperti pelabuhan atau bangunan pelindung pantai) dan upaya konservasi ekosistem pesisir. Lebih jauh, data kelautan yang diperoleh dari penginderaan jauh memberikan dukungan penting bagi pengembangan konsep ekonomi biru yang berkelanjutan, yang mencakup sektor perikanan, pariwisata bahari, dan pemanfaatan energi terbarukan dari laut. Misalnya, peta suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil dapat membantu nelayan mengidentifikasi zona potensial penangkapan ikan. Data penginderaan jauh juga berkontribusi pada aspek keamanan maritim melalui pemantauan aktivitas ilegal di laut atau identifikasi bahaya navigasi.

8.3 Teknologi dan Sensor Utama dalam Aplikasi

Penginderaan Jauh

Keberhasilan berbagai aplikasi penginderaan jauh sangat bergantung pada ketersediaan data dari berbagai platform satelit dan sensor, serta kemampuan untuk menganalisis data tersebut menggunakan teknik yang tepat. Pemilihan satelit dan sensor yang sesuai merupakan langkah awal

yang krusial, di mana karakteristik seperti resolusi spasial, spektral, radiometrik, dan temporal harus dipertimbangkan secara cermat agar sesuai dengan tujuan aplikasi yang diinginkan.

Tabel 8.2 Perbandingan Karakteristik Satelit Observasi Bumi Utama

Nama Satelit	Sensor Utama	Resolusi Spasial	Resolusi Spektral	Resolusi Temporal	Contoh Aplikasi Utama
Landsat 8/9	OLI & TIRS	30m (OLI multispektral), 15m (OLI pankromatik), 100m diresample ke 30m (TIRS)	11 band (Visible, NIR, SWIR, Thermal)	16 hari (per satelit)	Pemetaan penggunaan/tutupan lahan, monitoring perubahan, pertanian, kehutanan, geologi, suhu permukaan
Sentinel -1 (A/B)	C-SAR	5m x 5m hingga 20m x 40m (tergantung mode)	1 band (C-band SAR, berbagai polarisasi)	6-12 hari (dengan 1 satelit, lebih cepat dengan 2 satelit di beberapa area)	Pemantauan banjir, deformasi tanah (InSAR), tumpahan minyak, es laut, pertanian (fase tumbuh)
Sentinel -2 (A/B)	MSI	10m (4 band Visible-NIR), 20m (6 band Red-Edge, NIR, SWIR), 60m (3 band atmosferik)	13 band (Visible, Red-Edge, NIR, SWIR)	5 hari di ekuator (dengan 2 satelit)	Pemetaan tutupan lahan, monitoring vegetasi (NDVI, kesehatan), kualitas air, pertanian, kehutanan
MODIS (Terra/ Aqua)	MODIS	250m (2 band), 500m (5 band), 1km (29 band)	36 band (Visible, NIR, SWIR, Thermal)	1-2 hari	Deteksi <i>hotspot</i> kebakaran, monitoring suhu permukaan laut global, tutupan salju, aerosol, vegetasi skala luas

8.3.1 Satelit Observasi Bumi Populer dan Karakteristiknya

- Landsat: Program Landsat, yang dioperasikan oleh Amerika Serikat melalui NASA dan USGS, merupakan program observasi Bumi sipil tertua di dunia (USGS 2025). Dimulai pada tahun 1972 dengan peluncuran satelit ERTS-1 (yang kemudian berganti nama menjadi Landsat 1), program ini telah menyediakan data permukaan Bumi secara kontinu selama lebih dari lima dekade.⁵⁷ Seri satelit Landsat telah mengalami evolusi signifikan dalam hal teknologi sensor yang dibawanya. Generasi awal (Landsat 1-3) membawa sensor Return Beam Vidicon (RBV) dan Multi Spectral Scanner (MSS). Kemudian, Landsat 4 dan 5 dilengkapi dengan sensor Thematic Mapper (TM) yang memiliki kemampuan spektral dan spasial lebih baik. Landsat 7 membawa sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), sementara generasi terbaru, Landsat 8 (diluncurkan tahun 2013) dan Landsat 9 (diluncurkan tahun 2021), dilengkapi dengan sensor Operational Land Imager (OLI) untuk pencitraan optik dan Thermal Infrared Sensor (TIRS) untuk pencitraan termal. Satelit Landsat umumnya memiliki resolusi spasial moderat. Sebagai contoh, sensor OLI pada Landsat 8/9 memiliki resolusi spasial 30 meter untuk band-band multispektralnya dan 15 meter untuk band pankromatiknya. Sensor TIRS menghasilkan data termal dengan resolusi asli 100 meter yang kemudian di-*resample* menjadi 30 meter agar sesuai dengan data OLI. Waktu kunjungan ulang (resolusi temporal) global untuk satu satelit Landsat adalah 16 hari. Karena kemampuannya yang serbaguna dan ketersediaan arsip data historis yang sangat panjang, data Landsat sangat luas digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk pemetaan penggunaan lahan dan tutupan lahan, pemantauan sumber daya alam (pertanian, kehutanan, sumber daya air), aplikasi geologi, pemetaan suhu permukaan (karena keberadaan band termal), dan analisis

perubahan lingkungan jangka panjang. Nilai paling signifikan dari program Landsat adalah ketersediaan arsip datanya yang mencakup lebih dari 50 tahun. Ini merupakan aset yang tak ternilai bagi komunitas ilmiah global untuk melakukan studi perubahan lingkungan dalam skala waktu yang panjang. Dengan arsip data ini, para peneliti dapat menganalisis tren deforestasi selama beberapa dekade, melacak laju urbanisasi, memantau dampak jangka panjang dari perubahan iklim terhadap ekosistem, atau mengevaluasi efektivitas kebijakan pengelolaan lingkungan yang telah diterapkan di masa lalu. Analisis historis semacam ini seringkali tidak dapat dilakukan dengan menggunakan data dari sensor-sensor yang lebih baru yang belum memiliki rekaman data sepanjang Landsat.

- Sentinel (Fokus pada Sentinel-1 dan Sentinel-2): Satelit-satelit Sentinel merupakan bagian dari program observasi Bumi ambisius milik Uni Eropa yang disebut Copernicus (European Space Agency 2025). Program ini dikoordinasikan oleh European Space Agency (ESA) dan bertujuan untuk menyediakan data observasi Bumi yang akurat, tepat waktu, dan mudah diakses untuk berbagai layanan informasi lingkungan dan keamanan.⁵⁸ Dua seri satelit Sentinel yang sangat relevan untuk berbagai aplikasi adalah Sentinel-1 (membawa sensor Radar) dan Sentinel-2 (membawa sensor optik multispektral).
 - **Sentinel-1 (SAR):** Sentinel-1 adalah konstelasi yang terdiri dari dua satelit (Sentinel-1A diluncurkan tahun 2014, dan Sentinel-1B diluncurkan tahun 2016, meskipun Sentinel-1B kemudian mengalami anomali dan tidak beroperasi penuh) yang masing-masing membawa sensor C-band *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Keunggulan utama data SAR adalah kemampuannya untuk mengakuisisi data citra baik siang maupun malam hari, serta kemampuannya untuk menembus tutupan awan, kabut tebal,

dan bahkan hujan ringan. Ini menjadikannya sangat ideal untuk pemantauan di wilayah tropis seperti Indonesia yang sering memiliki tutupan awan tinggi. Sentinel-1 menyediakan data dengan berbagai mode polarisasi (misalnya, VV - vertikal transmit/vertikal receive, dan VH - vertikal transmit/horizontal receive), yang memberikan informasi tambahan mengenai karakteristik target di permukaan. Aplikasi utama data Sentinel-1 meliputi pemantauan banjir, analisis deformasi permukaan tanah menggunakan teknik InSAR (untuk gempa Bumi, aktivitas vulkanik, dan penurunan muka tanah), pemantauan tumpahan minyak di laut, pemetaan tutupan es laut, dan pemantauan pertanian seperti identifikasi fase tumbuh padi.

- **Sentinel-2 (Optik Multispektral):** Sentinel-2 juga merupakan konstelasi dua satelit (Sentinel-2A diluncurkan tahun 2015, dan Sentinel-2B diluncurkan tahun 2017) yang masing-masing membawa sensor optik multispektral yang disebut *MultiSpectral Instrument* (MSI). Sensor MSI pada Sentinel-2 memiliki 13 band spektral, yang mencakup rentang cahaya tampak (*visible*), inframerah dekat (NIR), dan inframerah gelombang pendek (SWIR). Salah satu keunikan Sentinel-2 adalah keberadaan beberapa band spektral pada posisi *red-edge* (tepi merah), yaitu area transisi antara penyerapan kuat oleh klorofil di bagian merah spektrum dan pantulan kuat oleh struktur sel daun di bagian inframerah dekat. Band *red-edge* ini sangat sensitif terhadap kandungan klorofil dan kondisi kesehatan vegetasi. Resolusi spasial data Sentinel-2 bervariasi tergantung pada band spektralnya: band-band visible dan satu band NIR memiliki resolusi 10 meter; band-band *red-edge*, NIR lainnya, dan SWIR memiliki resolusi 20 meter; sementara band-band yang ditujukan

untuk Koreksi Atmosfer memiliki resolusi 60 meter. Dengan dua satelit yang beroperasi, waktu kunjungan ulang global Sentinel-2 bisa mencapai 5 hari di wilayah ekuator, dan bahkan lebih cepat di wilayah lintang menengah. Aplikasi utama data Sentinel-2 meliputi pemetaan tutupan lahan, pemantauan vegetasi dan pertanian (misalnya, perhitungan NDVI, analisis kesehatan tanaman kelapa sawit), pemantauan kualitas air, pemetaan area terbakar pasca kebakaran hutan, dan estimasi batimetri perairan dangkal.

Jika dibandingkan dengan Landsat, Sentinel-2 menawarkan beberapa keunggulan, seperti resolusi spasial yang lebih tinggi pada beberapa band spektral yang sebanding (misalnya, 10 meter pada Sentinel-2 vs 30 meter pada Landsat untuk band-band visible dan NIR utama), keberadaan band-band *red-edge* yang tidak dimiliki oleh Landsat, dan resolusi temporal (waktu kunjungan ulang) yang lebih tinggi. Namun, program Landsat memiliki keunggulan dalam hal ketersediaan arsip data historis yang jauh lebih panjang, dan sensor TIRS pada Landsat 8/9 menyediakan kemampuan pencitraan termal yang tidak dimiliki oleh Sentinel-2. Dalam banyak kasus, data dari Landsat dan Sentinel-2 sering digunakan secara komplementer untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing. Ketersediaan data dari program Sentinel (dan juga Landsat) secara gratis dan terbuka (*free and open data policy*) telah secara signifikan mendemokratisasi akses terhadap data penginderaan jauh. Kebijakan ini telah mendorong inovasi dan perluasan aplikasi penginderaan jauh di berbagai bidang dan oleh berbagai kalangan pengguna, mulai dari institusi pemerintah, lembaga penelitian, universitas, hingga sektor swasta dan individu. Lebih lanjut, sinergi antara data dari sensor optik (seperti Sentinel-2 dan Landsat) dengan data dari sensor SAR (seperti Sentinel-1)

memberikan kemampuan pemantauan lingkungan yang lebih komprehensif. Misalnya, dalam pemantauan pertanian, data optik dapat digunakan untuk analisis kesehatan vegetasi, sementara data SAR dapat digunakan untuk memantau fase tumbuh padi atau kondisi kelembaban tanah, terutama pada saat musim hujan ketika tutupan awan menjadi kendala bagi sensor optik.

- MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): MODIS adalah sensor kunci yang dibawa oleh dua satelit milik NASA, yaitu Terra (diluncurkan tahun 1999, melintasi ekuator pada pagi hari) dan Aqua (diluncurkan tahun 2002, melintasi ekuator pada siang hari)(NASA 2025). Sensor MODIS memiliki resolusi spasial yang tergolong moderat hingga kasar, yaitu 250 meter untuk 2 band, 500 meter untuk 5 band, dan 1 kilometer untuk 29 band sisanya. Meskipun resolusi spasialnya tidak setinggi Landsat atau Sentinel-2, keunggulan utama MODIS terletak pada resolusi temporalnya yang sangat tinggi. Dengan dua satelit yang beroperasi, MODIS mampu meliput seluruh permukaan Bumi hampir setiap hari (1-2 hari). MODIS juga memiliki kemampuan spektral yang baik dengan 36 band spektral yang mencakup rentang dari cahaya tampak hingga inframerah termal. Karena cakupan global hariannya, data MODIS sangat ideal untuk pemantauan fenomena skala global dan regional yang mengalami perubahan cepat. Beberapa aplikasi utama data MODIS meliputi deteksi titik panas (*hotspot*) untuk pemantauan kebakaran hutan dan lahan secara *near real-time*, pemantauan suhu permukaan laut global, pemetaan tutupan salju dan es, pemantauan aerosol di atmosfer, dan analisis produktivitas vegetasi dalam skala luas (misalnya, indeks vegetasi global). Resolusi temporal tinggi yang dimiliki MODIS menjadikannya instrumen yang sangat efektif untuk sistem peringatan dini dan pemantauan fenomena dinamis di mana kecepatan perolehan

informasi seringkali lebih krusial daripada detail spasial yang sangat tinggi. Banyak fenomena lingkungan seperti kebakaran hutan, banjir skala besar, atau sebaran asap vulkanik berubah dengan sangat cepat. Sensor dengan resolusi spasial tinggi biasanya memiliki waktu kunjungan ulang yang lebih lama, sehingga berpotensi melewatkan kejadian-kejadian yang berlangsung singkat. MODIS, dengan kemampuan cakupan hariannya, dapat menangkap dinamika ini, meskipun dengan tingkat detail spasial yang lebih rendah. Ini menjadikannya alat yang sangat berharga untuk sistem peringatan dini operasional (seperti sistem FIRMS - *Fire Information for Resource Management System* - yang menggunakan data *hotspot* MODIS) dan untuk memantau tren lingkungan pada skala regional hingga global.

- **Satelit Resolusi Tinggi Lainnya:** Selain program satelit yang telah disebutkan, terdapat berbagai satelit lain, baik yang dioperasikan oleh pemerintah maupun perusahaan swasta, yang menawarkan data citra dengan resolusi spasial sangat tinggi, yaitu mulai dari sub-meter hingga beberapa meter per piksel. Beberapa contoh satelit komersial yang populer dengan kemampuan ini antara lain seri Pleiades, WorldView, GeoEye, dan Quickbird. Data dari satelit-satelit ini umumnya bersifat komersial (berbayar), namun mampu memberikan tingkat detail objek di permukaan Bumi yang sangat baik. Aplikasi utama dari data satelit resolusi sangat tinggi meliputi pemetaan detail perkotaan (misalnya, untuk perencanaan tata ruang, inventarisasi bangunan), perencanaan dan pemantauan infrastruktur (jalan, jembatan, jaringan pipa), pemantauan objek atau aktivitas spesifik (misalnya, untuk keperluan intelijen atau penegakan hukum), aplikasi pertanian presisi pada skala kebun atau lahan yang lebih kecil, serta sebagai data referensi untuk validasi hasil analisis dari citra satelit dengan resolusi yang lebih rendah.

Penting untuk dipahami bahwa dalam penginderaan jauh, selalu ada *trade-off* atau pertukaran antara berbagai jenis resolusi (spasial, spektral, temporal, radiometrik), cakupan area per citra, dan biaya akuisisi data. Satelit dengan resolusi spasial sangat tinggi biasanya memiliki lebar sapuan (*swath width*) yang lebih sempit, artinya area yang dicakup oleh satu adegan citra lebih kecil. Akibatnya, dibutuhkan lebih banyak adegan citra (dan seringkali dengan biaya akuisisi yang lebih mahal per unit area) untuk mencakup wilayah yang luas dibandingkan dengan satelit resolusi menengah seperti Landsat atau Sentinel. Oleh karena itu, pengguna data penginderaan jauh harus selalu mempertimbangkan secara cermat kebutuhan spesifik aplikasi mereka terhadap berbagai *trade-off* ini untuk dapat memilih sumber data yang paling optimal.

8.3.2 Teknik Analisis Khusus dan Indeks Vegetasi

Data mentah yang diterima dari satelit umumnya perlu diolah lebih lanjut menggunakan berbagai teknik analisis untuk dapat mengekstrak informasi yang bermakna dan berguna sesuai dengan tujuan aplikasi. Beberapa teknik analisis dan indeks yang umum digunakan akan dibahas di bawah ini.

- **Klasifikasi Tutupan Lahan:** Klasifikasi tutupan lahan adalah proses penting dalam penginderaan jauh yang bertujuan untuk mengelompokkan piksel-piksel dalam suatu citra satelit ke dalam kelas-kelas tutupan lahan atau penggunaan lahan tertentu, seperti hutan, pertanian, pemukiman, badan air, tanah terbuka, dan lain-lain.⁶⁵ Pengelompokan ini umumnya didasarkan pada karakteristik respons spektral dari setiap piksel, yaitu bagaimana piksel tersebut memantulkan atau memancarkan energi elektromagnetik pada berbagai panjang gelombang yang direkam oleh sensor. Dengan kemajuan teknologi sensor, seperti sensor hiperspektral yang mampu merekam data dalam ratusan band spektral, informasi spektral yang

tersedia menjadi sangat kaya dan detail. Namun, hal ini juga membawa tantangan baru dalam pengolahan dan analisis data karena volume data yang besar dan kompleksitasnya (dikenal sebagai *curse of dimensionality*). Metode-metode *machine learning*, seperti *Neural Network*, telah banyak dikembangkan dan digunakan untuk menangani klasifikasi data hiperspektral secara efektif. Selain itu, platform komputasi awan (*cloud computing*) seperti Google Earth Engine (GEE) telah memfasilitasi proses klasifikasi tutupan lahan menggunakan algoritma *machine learning* (misalnya, RF dan SVM) pada data citra satelit dalam volume yang sangat besar tanpa memerlukan infrastruktur komputasi lokal yang masif. Akurasi dari hasil klasifikasi tutupan lahan merupakan aspek yang sangat penting dan perlu diuji secara kuantitatif. Pengujian akurasi biasanya dilakukan dengan membandingkan peta hasil klasifikasi dengan data referensi independen yang dianggap benar, seperti data hasil survei lapangan (*ground truth*), interpretasi citra dengan resolusi yang jauh lebih tinggi, atau peta tutupan lahan lain yang telah terverifikasi. Teknik analisis seperti penyusunan matriks konfusi (*confusion matrix*) digunakan untuk menilai akurasi klasifikasi secara keseluruhan maupun akurasi untuk setiap kelas tutupan lahan secara individual. Beberapa metrik akurasi yang umum digunakan antara lain *overall accuracy*, *producer's accuracy*, *user's accuracy*, dan *Kappa coefficient*. Pemilihan algoritma klasifikasi yang tepat, kualitas data input (termasuk Koreksi Atmosfer dan geometrik yang baik), definisi kelas tutupan lahan yang jelas dan representatif, serta kualitas *training areas* (untuk metode terbimbing) sangat memengaruhi akurasi akhir yang dapat dicapai.

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) adalah salah satu indeks vegetasi

yang paling dikenal dan paling luas digunakan dalam aplikasi penginderaan jauh untuk mengukur kehijauan, kepadatan, atau kesehatan vegetasi. NDVI dihitung berdasarkan perbedaan antara nilai reflektansi (pantulan) energi Matahari pada saluran inframerah dekat (NIR) dan saluran merah (Red) yang direkam oleh sensor satelit. Ambang batas nilai NDVI untuk setiap kelas dapat sedikit bervariasi tergantung pada jenis sensor yang digunakan, kondisi atmosfer saat akuisisi data, dan tipe ekosistem yang diamati. Validasi lapangan seringkali diperlukan untuk penyesuaian ambang batas yang lebih akurat untuk area studi tertentu. Aplikasi NDVI sangat luas, meliputi pemantauan kesehatan tanaman dan deteksi stres pada vegetasi (misalnya akibat kekeringan, serangan hama, atau kekurangan nutrisi), estimasi biomassa vegetasi, pemetaan tutupan vegetasi dan perubahannya dari waktu ke waktu, pemantauan dampak kekeringan, serta analisis perubahan vegetasi musiman. Sebagai contoh, NDVI yang diturunkan dari citra Sentinel-2 telah digunakan untuk mengevaluasi kondisi kesehatan dan tingkat kerapatan tanaman pada perkebunan kelapa sawit. NDVI sering digunakan sebagai indikator proksi (pendekatan) untuk kesehatan dan produktivitas vegetasi karena adanya korelasi yang kuat antara nilai NDVI dengan kandungan klorofil dalam daun dan laju aktivitas fotosintesis. Perubahan nilai NDVI dari waktu ke waktu pada suatu area dapat mengindikasikan adanya perubahan dalam kondisi lingkungan (misalnya, ketersediaan air) atau dampak dari praktik pengelolaan lahan. Pemantauan NDVI secara serial (misalnya, setiap beberapa minggu atau bulan) dapat membantu mendeteksi penurunan kesehatan vegetasi lebih awal dibandingkan dengan observasi visual biasa di lapangan, sehingga memungkinkan dilakukannya tindakan intervensi yang lebih cepat dan tepat.

- Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) adalah teknik penginderaan jauh yang canggih yang menggunakan dua atau lebih citra Synthetic Aperture Radar (SAR) dari area yang sama untuk mengukur deformasi atau pergerakan permukaan tanah dengan tingkat presisi yang sangat tinggi, yaitu hingga skala sub-sentimeter (Hanssen 2001). Citra-citra SAR ini dapat diakuisisi pada waktu yang berbeda (pendekatan repeat-pass interferometry) atau secara simultan dari dua antena yang sedikit terpisah pada platform yang sama (pendekatan single-pass interferometry, meskipun ini lebih jarang untuk pemantauan deformasi). Prinsip dasar InSAR adalah memanfaatkan informasi fase dari gelombang Radar yang dipancarkan oleh sensor, dipantulkan oleh permukaan Bumi, dan diterima kembali oleh sensor. Fase gelombang Radar sangat sensitif terhadap jarak tempuh antara sensor dan target di permukaan. Jika terjadi pergerakan permukaan tanah antara dua waktu akuisisi citra SAR, maka jarak tempuh gelombang Radar akan berubah, yang mengakibatkan adanya perbedaan fase antara kedua citra tersebut. Perbedaan fase inilah yang diukur dan dianalisis untuk menghasilkan peta deformasi yang disebut interferogram. Interferogram biasanya ditampilkan sebagai pola pita berwarna-warni yang menyerupai pelangi, yang disebut *fringes*. Setiap siklus perubahan warna dalam pola *fringe* (misalnya, dari biru ke kuning ke merah, lalu kembali ke biru) merepresentasikan perpindahan permukaan tanah sebesar setengah panjang gelombang sensor Radar ($\lambda/2$) searah garis pandang satelit (*Line of Sight* - LOS). Kerapatan *fringes* (jarak antar pita warna) menunjukkan gradien atau laju perubahan deformasi; *fringes* yang rapat mengindikasikan deformasi yang besar dalam jarak yang pendek, sementara *fringes* yang renggang menunjukkan deformasi yang lebih landai. Tabel 8.4 menyajikan

contoh interpretasi umum dari pola interferogram.

Tabel 8.4 Contoh Pola Interferogram InSAR dan Interpretasi Umum Deformasi Permukaan

Deskripsi Pola Fringe (dapat disertai sketsa sederhana)	Interpretasi Umum Deformasi (Searah Garis Pandang Satelit/LOS)
Pola <i>fringe</i> konsentris (melingkar atau elips) yang menutup	Mengindikasikan adanya pengangkatan (<i>uplift</i>) atau penurunan (<i>subsidence</i>) permukaan tanah yang terpusat pada satu area. Arah deformasi (mendekat atau menjauh dari satelit) ditentukan dari urutan perubahan warna <i>fringe</i> relatif terhadap area yang diasumsikan stabil atau dari pengetahuan awal mengenai fenomena yang diamati.
Pola <i>fringe</i> paralel atau subparalel dengan suatu garis (misalnya, jejak patahan)	Mengindikasikan adanya pergerakan lateral (geser) atau vertikal (naik/turun) di sepanjang struktur geologi tersebut.
Tidak ada pola <i>fringe</i> yang jelas (area terlihat koheren dengan warna relatif seragam)	Mengindikasikan tidak ada deformasi relatif yang signifikan antara dua waktu akuisisi citra, atau area tersebut dianggap stabil.
Area terlihat acak atau <i>noisy</i> (dekoheren)	Mengindikasikan perubahan kondisi permukaan yang terlalu besar atau terlalu cepat antara dua akuisisi (misalnya, akibat aktivitas pertanian, perubahan vegetasi yang drastis), atau area tertutup vegetasi yang sangat lebat, atau area perairan. Pada area ini, informasi fase tidak dapat diinterpretasikan dengan baik.

Setiap siklus penuh warna fringe (misalnya, dari biru kembali ke biru setelah melalui spektrum warna pelangi) merepresentasikan pergerakan permukaan sebesar $\lambda/2$ (setengah panjang gelombang Radar) searah garis pandang satelit (LOS). Untuk satelit Sentinel-1 yang menggunakan C-band (panjang gelombang $\lambda \approx 5,6$ cm), satu siklus *fringe* setara dengan deformasi LOS sekitar 2,8 cm.

Aplikasi utama InSAR meliputi pemantauan penurunan muka tanah (land subsidence), yang seringkali disebabkan oleh pengambilan air tanah secara berlebihan (misalnya, studi kasus di kawasan industri Kendal dan wilayah Jakarta, pemantauan deformasi yang terkait dengan aktivitas vulkanik (seperti inflasi atau pengembangan tubuh gunung api sebelum erupsi, atau deflasi setelah erupsi, contohnya pada

pemantauan Gunung Merapi dan Gunung Agung, analisis pergerakan patahan akibat gempa Bumi, pemantauan stabilitas lereng untuk mitigasi risiko tanah longsor, dan pemantauan stabilitas infrastruktur besar seperti bendungan atau jembatan. Teknik-teknik turunan dari InSAR, seperti *Permanent Scatterer* InSAR (PS-InSAR) dan *Small Baseline Subset* (SBAS), telah dikembangkan untuk mengatasi beberapa keterbatasan InSAR konvensional, terutama untuk analisis deformasi jangka panjang dan di area dengan tutupan vegetasi. Kemampuan InSAR untuk mendeteksi pergerakan permukaan tanah yang sangat kecil dan halus, yang mungkin tidak terdeteksi oleh metode pemantauan konvensional lainnya, sangat berharga untuk memahami proses-proses geodinamika yang kompleks dan untuk menilai potensi bahaya geologi. Perubahan pola deformasi yang terukur dari waktu ke waktu dapat menjadi indikasi awal dari peningkatan aktivitas geologi, misalnya peningkatan tekanan magma di bawah gunung api sebelum terjadi letusan, atau peningkatan laju pergerakan pada suatu lereng yang berpotensi longsor. Ini menunjukkan potensi besar InSAR sebagai alat pendukung dalam sistem peringatan dini bencana, meskipun interpretasi data InSAR memerlukan keahlian khusus dan pemahaman mengenai konteks geologi area studi. Meskipun merupakan teknik yang sangat kuat, InSAR juga memiliki beberapa keterbatasan. Salah satunya adalah sensitivitas terhadap perubahan kondisi permukaan antara dua waktu akuisisi citra, yang dapat menyebabkan hilangnya koherensi sinyal Radar dan menyulitkan interpretasi (disebut dekoherensi). Ambiguitas fase juga dapat terjadi jika deformasi yang terjadi terlalu besar relatif terhadap panjang gelombang Radar. Selain itu, InSAR hanya mampu mengukur komponen deformasi yang searah dengan garis pandang satelit (LOS). Artinya, untuk mendapatkan gambaran deformasi tiga

dimensi yang lengkap (vertikal, timur-barat, utara-selatan), diperlukan data InSAR dari orbit satelit yang berbeda (misalnya, orbit naik/ascending dan orbit turun/descending) atau integrasi dengan data geodetik lainnya seperti pengukuran GPS. Tutupan vegetasi yang lebat juga dapat menjadi tantangan signifikan bagi aplikasi InSAR karena menyebabkan dekoherensi sinyal Radar, sehingga aplikasinya di wilayah tropis yang kaya vegetasi seringkali lebih sulit. Oleh karena itu, hasil analisis InSAR seringkali perlu diintegrasikan dengan data dari sumber lain dan divalidasi dengan pengamatan lapangan untuk menghasilkan interpretasi yang lebih komprehensif dan andal.

- Teknologi LiDAR (Light Detection and Ranging) adalah teknologi penginderaan aktif yang bekerja dengan cara memancarkan pulsa sinar laser ke arah permukaan Bumi dan mengukur waktu yang dibutuhkan bagi pulsa tersebut untuk kembali ke sensor setelah dipantulkan oleh target (Shan dan Toth 2017). Dengan mengetahui waktu tempuh pulsa laser dan kecepatan cahaya, jarak antara sensor dan target dapat dihitung dengan sangat akurat. Dengan melakukan pemindaian laser secara sistematis di atas suatu area, LiDAR dapat menghasilkan kumpulan data titik tiga dimensi (3D) yang sangat rapat dan akurat, yang dikenal sebagai point cloud atau awan titik, yang merepresentasikan bentuk permukaan Bumi dan objek-objek di atasnya. Aplikasi LiDAR sangat luas dan beragam, meliputi pembuatan *Digital Elevation Model* (DEM) atau model elevasi digital (representasi permukaan tanah gundul) dan *Digital Surface Model* (DSM) atau model permukaan digital (representasi permukaan paling atas, termasuk vegetasi dan bangunan) dengan resolusi spasial dan akurasi vertikal yang sangat tinggi. LiDAR juga digunakan untuk pemetaan topografi detail, inventarisasi hutan (misalnya, pengukuran tinggi pohon individu, estimasi volume kayu, analisis struktur kanopi

hutan, dan perhitungan biomassa), pemetaan perkotaan (misalnya, pembuatan model bangunan 3D untuk perencanaan kota atau analisis bayangan Matahari), pemantauan kondisi infrastruktur (seperti jaringan listrik atau jalur pipa), aplikasi arkeologi (misalnya, deteksi fitur-fitur mikro-relief di permukaan tanah yang mungkin mengindikasikan adanya situs purbakala terkubur), dan analisis bahaya alam (misalnya, untuk pemodelan aliran banjir atau analisis potensi longsor berdasarkan data topografi yang sangat detail). Teknologi LiDAR telah membawa revolusi dalam cara kita memetakan dan memahami dunia dalam tiga dimensi. Salah satu keunggulan signifikan LiDAR, terutama jenis LiDAR yang mampu merekam beberapa pantulan (*multiple returns*) dari satu pulsa laser, adalah kemampuannya untuk "melihat" menembus kanopi vegetasi. Sebagian pulsa laser dapat menembus celah-celah di antara dedaunan dan mencapai permukaan tanah di bawahnya. Kemampuan ini memungkinkan pembuatan DEM yang sangat akurat bahkan di area hutan yang lebat, di mana teknik fotogrametri pasif (yang mengandalkan citra optik) seringkali kesulitan untuk mendapatkan informasi elevasi tanah yang sebenarnya. Ketersediaan DEM yang akurat dari LiDAR ini sangat krusial untuk berbagai aplikasi, mulai dari analisis hidrologi (misalnya, delineasi batas DAS, pemodelan aliran air permukaan), perencanaan kehutanan, hingga desain infrastruktur.

- Penginderaan Jauh Hiperspektral: Penginderaan jauh hiperspektral menggunakan sensor yang mampu mengakuisisi data citra dalam ratusan band spektral yang sempit dan bersebelahan (kontinu) secara simultan. Band-band spektral ini mencakup rentang panjang gelombang yang luas, biasanya dari cahaya tampak (visible) hingga inframerah gelombang pendek (SWIR)(Goetz dkk. 1985). Hasilnya

adalah untuk setiap piksel dalam citra, diperoleh kurva respons spektral yang sangat detail, yang sering disebut sebagai "sidik jari" spektral (spectral signature). Sidik jari spektral yang unik ini memungkinkan identifikasi material atau objek di permukaan Bumi dengan tingkat presisi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sensor multispektral konvensional yang hanya memiliki beberapa band spektral yang lebar. Aplikasi utama penginderaan jauh hiperspektral meliputi identifikasi jenis-jenis mineral secara spesifik dalam kegiatan eksplorasi geologi dan pertambangan, pemetaan jenis-jenis vegetasi hingga tingkat spesies tertentu, deteksi dini stres pada tanaman (misalnya akibat kekurangan air, serangan penyakit, atau kontaminasi tanah), pemantauan kualitas air (misalnya, identifikasi jenis alga tertentu atau jenis polutan terlarut), dan karakterisasi berbagai material permukaan lainnya. Kekuatan utama dari teknologi hiperspektral terletak pada kemampuannya untuk membedakan antara material-material yang mungkin terlihat serupa atau memiliki respons spektral yang tumpang tindih jika diamati menggunakan data multispektral. Detail informasi spektral yang kaya memungkinkan analisis yang lebih mendalam mengenai komposisi kimia dan fisika dari target. Namun, keunggulan ini juga datang dengan tantangan. Data hiperspektral memiliki volume yang sangat besar karena banyaknya jumlah band. Selain itu, analisis data hiperspektral lebih kompleks, seringkali menghadapi masalah seperti *curse of dimensionality* (di mana jumlah fitur atau band sangat banyak relatif terhadap jumlah sampel), dan memerlukan teknik pemrosesan data khusus serta daya komputasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan analisis data multispektral.

8.3.3 Platform Pengolahan Data (Contoh: Google Earth Engine)

Perkembangan signifikan dalam beberapa tahun terakhir adalah munculnya platform komputasi awan (*cloud computing*) yang didedikasikan untuk analisis data geospasial, termasuk data penginderaan jauh. Salah satu platform yang paling populer dan banyak digunakan adalah Google Earth Engine (GEE).

GEE adalah platform berbasis awan yang menyediakan akses ke katalog data observasi Bumi yang sangat besar dan terus berkembang, termasuk arsip data dari satelit-satelit populer seperti Landsat (semua seri), Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3), dan MODIS, serta berbagai dataset lainnya seperti data iklim dan topografi. Selain menyediakan akses ke data, GEE juga menawarkan kemampuan komputasi skala besar yang memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis geospasial yang kompleks secara efisien tanpa perlu mengunduh data dalam volume besar ke komputer lokal. Pengguna dapat menulis dan menjalankan algoritma analisis menggunakan antarmuka pemrograman aplikasi (API) dalam bahasa JavaScript atau Python.

Pemanfaatan GEE untuk berbagai aplikasi penginderaan jauh di Indonesia telah banyak dilaporkan dalam berbagai studi. Beberapa contohnya meliputi:

- Deteksi dan Pemetaan Banjir: GEE telah digunakan bersama dengan data citra Sentinel-1 SAR untuk melakukan deteksi, pemetaan, dan analisis historis genangan banjir di berbagai tempat di Indonesia.
- Analisis Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) Studi ini menganalisis dampak kepadatan populasi dan permukaan kedap air terhadap fenomena Urban Heat Island (UHI) di Medan dan Makassar menggunakan data penginderaan jauh Landsat 8. Hasil penelitian mencatat rata-rata Suhu Permukaan Daratan (LST) sebesar 30,46°C di Medan dan 30,76°C di Makassar. Melalui analisis indeks spektral,

terbukti bahwa peningkatan kerapatan bangunan (VrNIR-BI) berkontribusi langsung pada kenaikan suhu, sementara keberadaan vegetasi (NDVI) memiliki efek pendinginan yang signifikan. Metode berbasis satelit ini terbukti menjadi solusi efektif dan efisien untuk pemantauan termal perkotaan skala luas dibandingkan metode konvensional (Muzaky dan Jaelani 2019)

- Klasifikasi Tutupan Lahan: GEE juga digunakan secara luas untuk melakukan klasifikasi tutupan lahan. Contohnya adalah klasifikasi tutupan lahan di kawasan Ibu Kota Nusantara (IKN) menggunakan citra Sentinel-2 dengan algoritma *Random Forest* (RF) dan *Support Vector Machine* (SVM)(Al Fathoni, Junaidi, dan Prima Aditiawan 2025). Studi lain melakukan klasifikasi tutupan lahan di wilayah Jakarta Utara menggunakan algoritma RF pada platform GEE(Suryono, Marsuhandi, dan Pramana 2022).

Kemunculan platform seperti GEE telah secara signifikan menurunkan hambatan bagi banyak pengguna untuk dapat melakukan analisis data penginderaan jauh dalam skala besar. Sebelumnya, analisis semacam ini seringkali memerlukan investasi besar dalam infrastruktur komputasi lokal (server, penyimpanan data) dan memakan waktu lama untuk proses pengunduhan data. Dengan GEE, pengguna dapat mengakses dan memproses data langsung di awan, sehingga menghilangkan kebutuhan untuk mengelola infrastruktur tersebut secara mandiri. Hal ini telah mendemokratisasi akses terhadap analisis data penginderaan jauh yang canggih, memungkinkan lebih banyak peneliti, mahasiswa, praktisi, dan bahkan institusi dengan sumber daya terbatas untuk terlibat dalam pemanfaatan data observasi Bumi. Lebih lanjut, sifat GEE yang berbasis skrip (kode program) dan berjalan di lingkungan awan juga sangat memfasilitasi aspek kolaborasi dan reproduktifitas dalam penelitian penginderaan jauh. Skrip analisis yang telah dikembangkan dapat dengan

mudah dibagikan antar peneliti atau antar institusi. Peneliti lain dapat menjalankan kembali skrip yang sama pada dataset yang sama untuk mereplikasi hasil penelitian, atau memodifikasi skrip tersebut untuk studi baru atau area yang berbeda. Ini mendorong praktik sains terbuka (*open science*), meningkatkan transparansi metodologi, dan pada akhirnya dapat mempercepat kemajuan ilmu pengetahuan dan aplikasi di bidang penginderaan jauh.

8.4 Keterbatasan dan Tantangan dalam Aplikasi

Penginderaan Jauh

Meskipun teknologi penginderaan jauh menawarkan berbagai keunggulan dan aplikasi yang luas, penting untuk dipahami bahwa teknologi ini juga memiliki sejumlah keterbatasan dan menghadapi berbagai tantangan dalam implementasinya. Pemahaman yang baik mengenai aspek-aspek ini sangat krusial bagi para pengguna agar dapat memanfaatkan data penginderaan jauh secara optimal dan realistis.

- Ketergantungan pada Kondisi Cuaca (untuk Sensor Optik): Sensor optik, yang bekerja dengan cara merekam pantulan atau emisi cahaya tampak dan inframerah dari permukaan Bumi, tidak dapat menembus tutupan awan tebal, kabut, atau asap tebal. Hal ini menjadi tantangan signifikan, terutama untuk akuisisi data di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki tingkat tutupan awan yang tinggi sepanjang tahun. Akibatnya, ketersediaan citra optik yang bebas awan dan berkualitas baik untuk analisis seringkali terbatas, yang dapat memengaruhi konsistensi pemantauan temporal.
- Resolusi (Spasial, Spektral, Temporal, Radiometrik): Setiap sistem sensor penginderaan jauh memiliki karakteristik resolusi tertentu yang memengaruhi kemampuannya dalam merekam informasi:
 - Resolusi Spasial: Merujuk pada ukuran objek terkecil di

permukaan Bumi yang masih dapat dibedakan sebagai entitas terpisah dalam citra. Resolusi spasial yang tidak cukup tinggi dapat menyebabkan objek-objek penting tidak terdeteksi, atau beberapa objek yang berdekatan terlihat menyatu (fenomena piksel campuran). Terdapat *trade-off* antara resolusi spasial dan cakupan area; sensor dengan resolusi spasial sangat tinggi biasanya memiliki lebar sapuan yang lebih sempit.

- Resolusi Spektral: Merujuk pada kemampuan sensor untuk membedakan interval panjang gelombang elektromagnetik yang sempit. Jumlah dan lebar band spektral yang dimiliki sensor menentukan kemampuannya untuk membedakan berbagai jenis material atau fitur di permukaan Bumi berdasarkan respons spektral uniknya.
- Resolusi Temporal: Merujuk pada frekuensi atau interval waktu di mana satelit kembali mengakuisisi data di lokasi geografis yang sama. Resolusi temporal yang rendah (waktu kunjungan ulang yang lama) mungkin tidak cukup untuk memantau fenomena yang berubah dengan cepat, seperti pertumbuhan tanaman harian atau perkembangan banjir.
- Resolusi Radiometrik: Merujuk pada sensitivitas sensor terhadap perbedaan kecil dalam intensitas energi elektromagnetik yang diterima. Resolusi radiometrik yang lebih tinggi (misalnya, direpresentasikan dalam jumlah bit yang lebih banyak, seperti 12-bit atau 16-bit per piksel) memungkinkan deteksi variasi yang lebih halus dalam nilai reflektansi atau emisi dari objek.
- Biaya dan Aksesibilitas Data: Meskipun banyak data dari program satelit resolusi menengah seperti Landsat dan Sentinel kini tersedia secara gratis dan terbuka untuk publik, data dari satelit komersial dengan resolusi spasial sangat tinggi atau data dari sensor khusus

(misalnya, data hiperspektral dari platform udara atau beberapa misi satelit tertentu, data LiDAR komersial) seringkali masih memiliki biaya akuisisi yang sangat mahal. Hal ini dapat membatasi aksesibilitas data tersebut bagi sebagian pengguna, terutama peneliti atau institusi di negara berkembang atau mereka yang memiliki anggaran terbatas.

- Keterbatasan dalam Mengidentifikasi Objek Tersembunyi: Penginderaan jauh pada umumnya hanya mampu merekam informasi dari permukaan paling atas yang terlihat oleh sensor. Objek atau fitur yang tersembunyi di bawah kanopi vegetasi yang sangat lebat (meskipun teknologi LiDAR dengan kemampuan *multiple returns* dapat menembus hingga ke permukaan tanah pada tingkat tertentu), di bawah permukaan air yang keruh, atau terkubur di bawah permukaan tanah biasanya tidak dapat dideteksi secara langsung oleh sebagian besar sensor penginderaan jauh.
- Ketersediaan Citra SLAR/SAR yang Terbatas (Persepsi): Dalam naskah awal yang diberikan, disebutkan adanya keterbatasan dalam ketersediaan citra SLAR (*Side-Looking Airborne Radar*) atau SAR. Perlu diklarifikasi bahwa persepsi ini mungkin kurang tepat untuk kondisi saat ini. Dengan adanya konstelasi satelit SAR modern seperti Sentinel-1 yang menyediakan data secara gratis dan rutin, serta berbagai misi SAR komersial lainnya, ketersediaan data SAR justru semakin meningkat dan menjadi andalan dalam banyak aplikasi, terutama karena kemampuannya yang tidak terpengaruh oleh kondisi cuaca. Keterbatasan yang mungkin masih ada adalah terkait dengan jenis data SAR yang sangat spesifik (misalnya, dari frekuensi atau mode akuisisi tertentu) atau data dari platform satelit SAR yang lebih tua yang arsipnya mungkin tidak selengkap data optik.
- Kompleksitas Pengolahan dan Analisis Data: Data penginderaan jauh,

terutama data dalam volume besar yang dihasilkan oleh sensor-sensor modern (misalnya, data *time-series* dari Sentinel) atau data yang secara intrinsik kompleks seperti data hiperspektral dan data InSAR, memerlukan perangkat keras komputer dengan spesifikasi tinggi, perangkat lunak analisis khusus, dan terutama keahlian serta pengetahuan yang memadai dari analis untuk dapat melakukan pengolahan dan interpretasi data secara benar dan bermakna.

- **Kebutuhan akan Validasi Lapangan (*Ground Truthing*):** Hasil interpretasi atau klasifikasi yang diturunkan dari citra penginderaan jauh seringkali memerlukan proses validasi dengan menggunakan data yang diperoleh langsung dari lapangan (*ground truth data*) atau data referensi lain yang lebih akurat. Proses validasi ini sangat penting untuk menilai dan memastikan tingkat akurasi dari informasi yang dihasilkan. Namun, kegiatan survei lapangan untuk pengumpulan data *ground truth* bisa memakan waktu, biaya, dan sumber daya manusia yang tidak sedikit, terutama untuk area studi yang luas atau sulit dijangkau.
- **Koreksi Atmosfer dan Geometrik:** Data mentah satelit yang diterima di stasiun Bumi umumnya masih mengandung berbagai distorsi, baik yang disebabkan oleh interaksi energi elektromagnetik dengan atmosfer (seperti hamburan dan serapan atmosfer) maupun distorsi geometrik yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti pergerakan platform satelit, kelengkungan Bumi, dan variasi topografi. Oleh karena itu, data mentah ini perlu melalui serangkaian proses pra-pengolahan, termasuk Koreksi Atmosfer (untuk mendapatkan nilai reflektansi permukaan yang sebenarnya) dan koreksi geometrik (untuk memastikan setiap piksel dalam citra memiliki posisi geografis yang akurat di permukaan Bumi), sebelum dapat digunakan untuk analisis kuantitatif yang andal. Proses-proses koreksi ini bisa cukup kompleks

dan memerlukan pemahaman teknis yang baik.

Memahami berbagai keterbatasan ini sangat penting bagi pengguna data penginderaan jauh agar dapat memiliki ekspektasi yang realistis terhadap apa yang bisa dan tidak bisa dicapai dengan teknologi ini. Pemahaman ini juga akan mengarahkan pengguna untuk memilih jenis sensor, platform, dan metode analisis yang paling sesuai dengan pertanyaan penelitian atau masalah aplikasi yang dihadapi, serta dengan mempertimbangkan kendala-kendala yang mungkin ada, seperti anggaran, waktu, dan ketersediaan data. Menariknya, keterbatasan-keterbatasan yang ada dalam teknologi penginderaan jauh justru seringkali menjadi pemicu atau pendorong bagi munculnya inovasi dan dilakukannya penelitian lebih lanjut untuk mencoba mengatasi atau meminimalkan dampak dari keterbatasan tersebut. Sebagai contoh, masalah tutupan awan pada sensor optik telah mendorong pengembangan sensor SAR yang tahan cuaca dan juga pengembangan algoritma-algoritma untuk mengisi celah data (*gap filling*) pada citra optik yang tertutup awan. Keterbatasan dalam resolusi spasial atau spektral mendorong para insinyur untuk merancang dan meluncurkan generasi sensor baru dengan kemampuan yang lebih tinggi. Kompleksitas dalam analisis data volume besar mendorong pengembangan platform komputasi awan seperti GEE dan algoritma berbasis kecerdasan buatan yang lebih canggih. Dengan demikian, bidang penginderaan jauh terus mengalami evolusi dinamis sebagai respons terhadap tantangan yang dihadapinya.

8.5 Rangkuman Bab

Teknologi penginderaan jauh telah membuktikan perannya sebagai alat yang sangat berharga dan serbaguna dalam berbagai bidang aplikasi. Mulai dari upaya pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan, pemantauan kondisi lingkungan dan dampak perubahan iklim, manajemen

berbagai jenis bencana alam secara lebih efektif, hingga dukungan terhadap perencanaan pembangunan perkotaan dan infrastruktur yang lebih baik, kontribusi penginderaan jauh tidak dapat dipungkiri. Kemampuannya untuk menyediakan data spasial dan temporal mengenai permukaan Bumi secara konsisten, akurat, dan dalam berbagai skala telah merevolusi cara kita memahami dan berinteraksi dengan planet ini.

Bagi mahasiswa yang mempelajari ilmu keBumian, geografi, lingkungan, perencanaan, atau bidang terkait lainnya, pemahaman yang baik mengenai prinsip-prinsip dasar penginderaan jauh, karakteristik berbagai jenis sensor dan platform, penguasaan teknik-teknik analisis data, serta kesadaran akan potensi dan keterbatasan teknologi ini menjadi sangat penting. Sebagai calon pengguna, pengembang, atau bahkan inovator aplikasi penginderaan jauh di masa depan, bekal pengetahuan dan keterampilan ini akan memungkinkan mereka untuk berkontribusi secara signifikan dalam memecahkan berbagai tantangan kompleks yang dihadapi masyarakat dan lingkungan.

Dengan terus berlangsungnya perkembangan pesat dalam teknologi sensor, platform wahana, metode analisis data (terutama dengan integrasi AI dan *machine learning*), serta peningkatan aksesibilitas data melalui kebijakan data terbuka dan platform komputasi awan, potensi aplikasi penginderaan jauh di masa depan akan semakin besar dan beragam. Kontribusi penginderaan jauh dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data yang lebih baik dan upaya mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) di berbagai tingkatan, mulai dari lokal, nasional, hingga global, diperkirakan akan terus meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, penguasaan ilmu dan teknologi penginderaan jauh menjadi semakin relevan dan strategis dalam menghadapi tantangan dan memanfaatkan peluang di masa kini dan masa yang akan datang.

BAB IX TREN TERKINI DAN MASA DEPAN PENGINDERAAN JAUH

9.1 Dinamika Inovasi dan Pergeseran Paradigma

Penginderaan Jauh (Penginderaan Jauh) adalah teknologi yang memungkinkan pengumpulan informasi terkait objek atau area tanpa bersentuhan secara fisik dengannya, biasanya menggunakan platform/wahana berupa satelit. Dalam beberapa dekade terakhir, khususnya beberapa tahun belakangan ini, teknologi ini telah mengalami perkembangan yang sangat pesat dan transformatif, tidak hanya dalam hal sensor dan platform pengumpulan data, tetapi juga dalam teknik pengolahan dan analisis data. Kemajuan ini secara fundamental telah meningkatkan akurasi, efisiensi, dan frekuensi pengumpulan data, sekaligus memperluas spektrum aplikasi penginderaan jauh ke berbagai bidang krusial, seperti pemantauan lingkungan global dan lokal, manajemen bencana yang lebih responsif, perencanaan kota yang berkelanjutan, hingga eksplorasi sumber daya alam dan keamanan maritim. Perkembangan teknologi ini seringkali bersifat disruptif, bukan sekadar inkremental. Artinya, kemajuan tersebut bersifat mendasar dalam mengubah cara ilmuwan, praktisi, dan pengambil kebijakan dalam memahami serta berinteraksi dengan objek yang berada di permukaan Bumi. Sebuah contoh nyata dari pergeseran paradigma ini adalah kemampuan untuk melakukan pemantauan mendekati waktu nyata (*near real-time*) dalam skala global, yang didukung oleh Kecerdasan Buatan (AI). Kemampuan ini mengubah pendekatan manajemen bencana dari yang semula lebih banyak bersifat reaktif menjadi semakin proaktif. Perubahan ini membuka berbagai peluang baru untuk aplikasi inovatif, namun sekaligus menghadirkan tantangan yang tidak mudah.

Tantangan yang muncul sejak awal adalah kesulitan dalam analisis, interpretasi, dan pengelolaan data dalam jumlah/volume yang sangat besar, isu yang kemudian hari dikenal sebagai tantangan *Big Data*, serta kebutuhan mendesak akan Sumber Daya Manusia (SDM) yang terampil untuk dapat memanfaatkan teknologi ini secara efektif. Kesenjangan ini menggarisbawahi fakta bahwa akses terhadap data yang berlimpah, meskipun telah permudah oleh kebijakan data terbuka, tidak secara otomatis diikuti dengan kemampuan untuk memanfaatkan data tersebut secara optimal. Oleh karena itu, kebijakan harus berfokus pada peningkatan infrastruktur komputasi dan kapasitas SDM untuk memaksimalkan potensi penuh dari inovasi dalam bidang ini. Motor penggerak utama dalam evolusi Penginderaan Jauh adalah inovasi sinergis pada sensor dan platform akuisisi data. Sensor, sebagai "mata" sistem, menentukan kualitas dan jenis informasi, sedangkan platform adalah wadah bagi sensor untuk bisa memantau Bumi dari jarak jauh.

9.2 Tren Teknologi Sensor dan Platform

9.2.1 Sensor Resolusi Tinggi Multidimensional

Kemajuan dalam teknologi sensor berfokus pada peningkatan resolusi dalam empat dimensi utama: spasial, spektral, temporal, dan radiometrik.

A. Optik Resolusi Sangat Tinggi dan Konstelasi Temporal Tinggi

Sensor optik merekam energi elektromagnetik pada spektrum cahaya tampak dan inframerah dekat hingga inframerah termal. Salah satu tren utama dalam pengembangan sensor optik adalah peningkatan resolusi spasial, yang mengacu pada ukuran objek terkecil yang dapat dibedakan pada citra. Sensor modern seperti yang digunakan pada satelit WorldView-3 milik Maxar Technologies (Oktober 2025 berubah menjadi Vantor <https://vantor.com/>) atau seri satelit generasi terbaru Pléiades Neo milik

Airbus Defence and Space (<https://space-solutions.airbus.com/>) mampu menghasilkan citra dengan resolusi spasial hingga 30 cm per piksel. Resolusi setinggi ini memungkinkan identifikasi objek detail seperti marka jalan, jenis kendaraan, hingga kerumunan manusia

Selain itu, India juga telah menunjukkan kemampuannya dalam teknologi sensor resolusi tinggi melalui satelit Cartosat-3 (https://www.isro.gov.in/Cartosat_3.html), yang diluncurkan pada November 2019. Satelit ini memiliki kamera pankromatik dengan resolusi spasial mencapai 0,25 meter, menjadikannya salah satu satelit dengan resolusi tertinggi di dunia pada saat peluncurannya. Kemampuan ini sangat berguna untuk aplikasi pemetaan detail, perencanaan kota, dan intelijen.

Namun, penting untuk dicatat bahwa misi luar angkasa memiliki risiko dan tantangan tersendiri. Sebagai contoh, satelit WorldView-4, yang juga diluncurkan dengan kemampuan resolusi spasial sangat tinggi (31 cm), mengalami kegagalan pada salah satu giroskop pengontrol momentumnya pada Januari 2019, hanya sekitar dua tahun setelah mulai beroperasi, dan dinyatakan tidak lagi dapat digunakan. Insiden seperti ini menggarisbawahi kompleksitas dan biaya tinggi yang terkait dengan teknologi luar angkasa, serta mendorong pengembangan solusi yang lebih tangguh atau sistem konstelasi yang lebih terdistribusi untuk mitigasi risiko. Kegagalan satu satelit dalam konstelasi besar tidak akan melumpuhkan seluruh kemampuan observasi, berbeda dengan kegagalan satelit tunggal berperforma tinggi.

Di sisi lain, perlombaan untuk mencapai resolusi spasial yang semakin tinggi mulai diimbangi oleh kebutuhan akan resolusi temporal yang tinggi, yaitu kemampuan untuk mengamati area yang sama secara berulang dalam frekuensi yang semakin sering. Konstelasi satelit menjadi jawaban atas kebutuhan ini. Contoh yang menonjol adalah konstelasi PlanetScope yang dioperasikan oleh Planet Labs (<https://www.planet.com/>). Konstelasi ini

terdiri dari lebih dari 130 satelit kecil (sering disebut "Doves") yang bekerja bersama untuk menyediakan cakupan citra optik harian untuk hampir seluruh permukaan daratan Bumi dengan resolusi spasial sekitar 3 hingga 3,7 meter. Meskipun resolusi spasialnya tidak setinggi WorldView atau Cartosat-3, frekuensi revisit harian global yang ditawarkan oleh PlanetScope sangat berharga untuk aplikasi pemantauan perubahan yang dinamis, seperti deforestasi, aktivitas pertanian, atau respons bencana.

B. Synthetic Aperture Radar (SAR) dan Observasi Segala Cuaca

Sensor Radar, khususnya Synthetic Aperture Radar (SAR), merupakan jenis sensor aktif yang memancarkan gelombang mikro sendiri dan kemudian merekam sinyal yang dipantulkan kembali dari target. Keunggulan utama SAR adalah kemampuannya untuk menembus tutupan awan, kabut, asap, dan kegelapan, sehingga dapat beroperasi dalam segala kondisi cuaca, baik siang maupun malam. Hal ini menjadikan SAR sangat penting untuk pemantauan di wilayah tropis yang sering tertutup awan (seperti Indonesia) atau wilayah kutub yang mengalami malam panjang. Beberapa misi SAR terkini yang menonjol antara lain:

1. Sentinel-1C: Merupakan bagian dari program Copernicus Uni Eropa, satelit ini diluncurkan pada 5 Desember 2024 (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus). Sentinel-1C membawa instrumen C-band SAR yang canggih, dirancang untuk melanjutkan misi Sentinel-1A dan -1B dalam menyediakan data Radar secara kontinu untuk berbagai aplikasi, termasuk pemantauan maritim, pemetaan daratan, manajemen darurat, dan studi perubahan iklim. Resolusi spasialnya bervariasi tergantung mode operasi, misalnya mode *Interferometric Wide Swath* (IW) memiliki resolusi 5 x 20 meter.
2. NISAR (NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar): Sebuah proyek kolaborasi ambisius antara NASA (Amerika Serikat) dan ISRO

(India), yang direncanakan untuk diluncurkan pada tahun 2025 (https://www.isro.gov.in/Mission_GSLVF16_NISAR_Home.html). NISAR akan menjadi satelit Radar pencitraan pertama yang menggunakan dua frekuensi Radar berbeda secara simultan, yaitu L-band (panjang gelombang sekitar 24 cm, disediakan oleh NASA) dan S-band (panjang gelombang sekitar 9-12 cm, disediakan oleh ISRO). Kombinasi frekuensi ganda ini akan memungkinkan pemantauan perubahan permukaan Bumi yang sangat detail dan akurat, termasuk pergeseran tanah akibat gempa atau aktivitas vulkanik, penurunan muka tanah (subsiden), pencairan lapisan es dan gletser, serta perubahan biomassa hutan. Kolaborasi internasional seperti NISAR menjadi semakin penting dalam pengembangan misi SAR yang kompleks dan mahal, memungkinkan pembagian sumber daya, teknologi, dan keahlian untuk mencapai tujuan ilmiah bersama.

3. RADARSAT Constellation Mission (RCM): Dioperasikan oleh Badan Antariksa Kanada (CSA), RCM diluncurkan pada Juni 2019 dan terdiri dari tiga satelit identik yang dilengkapi dengan sensor C-band SAR (<https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/>). Konstelasi ini secara signifikan meningkatkan kemampuan pemantauan dinamis, terutama untuk wilayah maritim dan kutub Kanada. RCM mampu menyediakan cakupan harian atas wilayah Arktik Kanada dan seluruh wilayah Kanada setidaknya sekali sehari, dengan kemampuan revisit setiap empat hari untuk lokasi yang sama di seluruh dunia, jauh lebih cepat dibandingkan pendahulunya, RADARSAT-2 (24 hari). Resolusi spasial RCM bervariasi dari 1 x 3 meter hingga 100 meter, tergantung mode operasinya. Peningkatan frekuensi revisit ini krusial untuk aplikasi seperti pemantauan es laut, deteksi kapal, dan identifikasi tumpahan minyak yang memerlukan informasi tepat waktu.

4. Gaofen-3 (GF-3): Merupakan bagian dari program observasi Bumi resolusi tinggi Tiongkok (CHEOS), satelit Gaofen-3 diluncurkan pada Agustus 2016 (<https://www.cnsa.gov.cn/>). Satelit ini membawa sensor C-band SAR yang mampu beroperasi dalam 12 mode pencitraan berbeda, dengan resolusi spasial yang bervariasi dari 1 meter (mode *spotlight*) hingga 500 meter (mode *global observation*) dan lebar sapuan (swath) hingga 650 km. Kemampuan ini menunjukkan komitmen Tiongkok dalam mengembangkan teknologi SAR canggih untuk berbagai aplikasi.

Perkembangan konstelasi SAR seperti RCM dan misi kolaboratif seperti NISAR menunjukkan pergeseran menuju sistem observasi yang lebih komprehensif, mampu menyediakan data SAR yang lebih sering dan lebih kaya informasi untuk komunitas global.

C. Sensor Hiperspektral dan Superspektral

Selain sensor optik multispektral yang merekam data dalam beberapa pita spektral lebar (misalnya, biru, hijau, merah, inframerah dekat), teknologi sensor hiperspektral telah muncul sebagai kemajuan signifikan. Sensor hiperspektral merekam data dalam ratusan pita spektral yang sempit dan bersebelahan secara kontinu. Hasilnya adalah "sidik jari" spektral yang sangat detail untuk setiap piksel citra, yang memungkinkan identifikasi material dan fenomena di permukaan Bumi dengan presisi yang jauh lebih tinggi dibandingkan sensor multispektral. Sebagai contoh, data hiperspektral dapat digunakan untuk membedakan jenis mineral secara spesifik, mengidentifikasi spesies vegetasi tertentu, menilai tingkat stres pada tanaman, atau mendeteksi polutan dalam air dengan lebih akurat.

Beberapa misi satelit hiperspektral yang penting meliputi:

1. EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program, <https://www.enmap.org/>): misi satelit hiperspektral milik pemerintah Jerman yang dikelola oleh DLR (German Aerospace Center) dengan

GFZ (German Research Centre for Geosciences) sebagai pemimpin ilmiahnya, diluncurkan pada April 2022. EnMAP dirancang untuk menyediakan data hiperspektral berkualitas tinggi yang dapat diakses secara gratis oleh komunitas ilmiah di seluruh dunia. Sensor memiliki 242 band spektral yang kontinu, mencakup rentang spektral dari cahaya tampak hingga inframerah gelombang pendek (VNIR-SWIR) dengan resolusi spasial 30 meter dan lebar sapuan 30 km. Kemampuan manuver satelit memungkinkan waktu revisit hingga empat hari untuk area target tertentu.

2. PRISMA (PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa, <https://prisma.asi.it/>): Misi dari Badan Antariksa Italia (ASI) yang diluncurkan pada Maret 2019. PRISMA membawa sensor hiperspektral yang mencakup rentang panjang gelombang 0,4 hingga 2,5 μm dengan resolusi spektral (FWHM) kurang dari atau sama dengan 12 nm, serta sebuah kamera pankromatik resolusi menengah. Sensor ini memiliki 240 band (66 band VNIR + 174 band SWIR). Data PRISMA juga mendukung berbagai aplikasi lingkungan dan sumber daya alam.
3. DESIS (DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer): Sebuah instrumen hiperspektral yang dikembangkan oleh Pusat Antariksa Jerman (DLR) dan dioperasikan dari Stasiun Luar Angkasa Internasional (ISS) sejak tahun 2018 (<https://www.dlr.de/en/eoc/research-transfer/projects-missions/desis/>). DESIS merekam data dalam 235 pita spektral pada rentang 400 nm hingga 1000 nm (cahaya tampak hingga inframerah dekat) dengan resolusi spasial 30 meter. Perbedaan Utama dengan EnMAP/PRISMA adalah DESIS hanya merekam spektrum VNIR (Visible - Near Infrared). Tidak memiliki kemampuan merekam SWIR (Shortwave

Infrared) seperti EnMAP atau PRISMA. Namun, keunggulannya adalah resolusi spektral yang sangat tinggi (sempit) di rentang VNIR. Munculnya misi-misi hiperspektral operasional ini menandai kematangan teknologi dari yang sebelumnya bersifat eksperimental menjadi alat yang praktis untuk aplikasi ilmiah dan operasional. Ketersediaan data hiperspektral yang semakin meningkat membuka peluang baru untuk penelitian yang lebih mendalam dalam berbagai bidang seperti pertanian presisi, pemantauan kesehatan ekosistem, eksplorasi geologi, dan pemantauan kualitas air. Namun, hal ini juga membawa tantangan dalam hal volume data yang besar dan kebutuhan akan algoritma analisis yang lebih canggih serta pelatihan bagi para pengguna untuk dapat memanfaatkan potensi penuh dari data hiperspektral.

D. Teknologi LiDAR (Light Detection and Ranging)

LiDAR berbasis ruang angkasa dan udara telah merevolusi observasi Bumi dengan menambahkan dimensi struktural tiga dimensi (3D) yang presisi. Teknologi ini bekerja dengan memancarkan pulsa laser dan mengukur waktu pantulannya, menghasilkan Model Elevasi Digital (DEM) dan Model Permukaan Digital (DSM) dengan akurasi tinggi. Penambahan dimensi vertikal ini membuka aplikasi baru seperti pemetaan topografi detail, pengukuran struktur vegetasi (tinggi kanopi untuk estimasi biomassa hutan), dan analisis infrastruktur perkotaan. Integrasi data LiDAR (informasi struktural 3D) dengan citra hiperspektral atau multispektral (informasi komposisi material) memberikan pemahaman yang komprehensif tentang proses lingkungan dan geologi.

9.2.2 Diversifikasi Platform Akuisisi Data

Selain kemajuan pada sisi teknologi sensor sensor, platform yang membawa sensor juga mengalami diversifikasi signifikan, yang mengarah pada ekosistem observasi berjenjang yang optimal.

A. Satelit (besar)

Satelit ukuran besar tetap menjadi platform utama untuk penginderaan jauh skala global dan regional. Satelit penginderaan jauh modern, seperti Landsat 9, seri Sentinel dari program Copernicus, dan MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), menyediakan data global dengan cakupan yang luas dan frekuensi pengambilan gambar yang relatif tinggi. Program jangka panjang seperti Landsat, yang telah menyediakan data secara kontinu sejak tahun 1972 dan kini dikelola bersama oleh NASA dan USGS, telah membangun arsip data historis yang tak ternilai harganya. Data Landsat, yang tersedia secara gratis dan terbuka untuk umum, menjadi fondasi bagi banyak studi perubahan lingkungan jangka panjang. Demikian pula, program Copernicus Uni Eropa, melalui seri satelit Sentinel (misalnya, Sentinel-1 untuk Radar, Sentinel-2 untuk optik, Sentinel-3 untuk pemantauan laut dan daratan), menyediakan aliran data observasi Bumi yang masif, gratis, dan terbuka melalui portal seperti Copernicus Open Access Hub (kini menjadi bagian dari Copernicus Data Space Ecosystem).

B. Konstelasi Satelit Kecil

Satelit kecil yang dikenal dengan istilah SmallSats, CubeSats, atau Nanosatellites, memiliki biaya pengembangan dan peluncuran yang jauh lebih rendah, serta siklus pengembangan yang lebih cepat dibandingkan satelit besar konvensional. Salah satu perkembangan signifikan dalam platform satelit adalah munculnya konstelasi satelit. Konsep ini melibatkan sejumlah besar satelit yang lebih kecil dan seringkali lebih murah, yang bekerja bersama-sama sebagai satu sistem terkoordinasi untuk meningkatkan frekuensi revisit (seberapa sering suatu area dapat diamati) dan cakupan global. Contoh yang terkenal adalah konstelasi PlanetScope yang dioperasikan oleh Planet Labs. Konstelasi ini terdiri dari lebih dari 130 satelit optik kecil (disebut "Doves" dan "SuperDoves") yang mampu mencitrakan hampir seluruh permukaan daratan Bumi setiap hari dengan

resolusi spasial sekitar 3 hingga 3.7 meter. Kemampuan pemantauan harian ini sangat revolusioner untuk aplikasi yang memerlukan deteksi perubahan cepat.

C. Pesawat Tanpa Awak

Pesawat Tanpa Awak (UAV), atau yang lebih populer dikenal sebagai drone, telah menjadi platform yang semakin populer untuk akuisisi data penginderaan jauh resolusi sangat tinggi pada area yang relatif lebih kecil. Drone dapat dilengkapi dengan berbagai jenis sensor, mulai dari kamera optik standar, sensor multispektral, sensor termal, hingga sensor LiDAR yang ringan. Keunggulan utama drone meliputi fleksibilitas operasional yang tinggi (dapat diterbangkan kapan saja sesuai kebutuhan, tunduk pada regulasi penerbangan), biaya operasional yang relatif rendah untuk survei area terbatas, dan kemampuan untuk terbang pada ketinggian rendah sehingga menghasilkan data dengan detail spasial yang sangat tinggi (hingga beberapa sentimeter). Aplikasi drone dalam penginderaan jauh sangat beragam, mencakup pemetaan presisi skala lokal, inspeksi infrastruktur (jembatan, jaringan listrik), pertanian presisi (pemantauan kesehatan tanaman, penyemprotan pupuk/pestisida yang ditargetkan), pemantauan bencana skala lokal (misalnya, pemetaan kerusakan pasca banjir atau tanah longsor), dan survei arkeologi.

D. Pesawat Berawak

Meskipun drone semakin populer, pesawat berawak tradisional masih memegang peranan penting dalam aplikasi penginderaan jauh tertentu. Pesawat berawak umumnya dapat membawa muatan sensor yang lebih besar, lebih berat, dan lebih kompleks dibandingkan drone. Durasi terbang pesawat berawak juga biasanya lebih lama, memungkinkan akuisisi data untuk area yang lebih luas dalam satu misi. Aplikasi yang masih sering menggunakan pesawat berawak antara lain pemetaan topografi skala besar dengan akurasi tinggi menggunakan sensor LiDAR atau kamera

fotogrametri format besar, survei geofisika udara (misalnya, survei magnetik atau gravimetri), dan akuisisi citra hiperspektral untuk area yang luas. Namun, biaya operasional pesawat berawak umumnya lebih tinggi dibandingkan drone.

E. Platform Altitudo Tinggi Semu-Satelit (HAPS)

Salah satu inovasi platform yang relatif baru dan menjanjikan adalah *High-Altitude Pseudo-Satellites* (HAPS), yang juga dikenal sebagai *High-Altitude Platform Systems* (D'Oliveira, De Melo, dan Devezas 2016). HAPS adalah wahana nirawak, yang dapat berupa pesawat sayap tetap (mirip pesawat terbang), *airships* (balon udara yang dapat dikemudikan), atau balon ketinggian tinggi, yang dirancang untuk beroperasi di stratosfer pada ketinggian sekitar 20 hingga 50 kilometer di atas permukaan laut. Ketinggian operasi ini berada di atas lalu lintas udara komersial dan sebagian besar fenomena cuaca, namun masih di bawah orbit satelit pada umumnya. Karakteristik utama HAPS adalah kemampuannya untuk bertahan di posisi geografis yang relatif tetap (disebut sebagai operasi persisten atau *geostationary-like*) untuk periode waktu yang lama, mulai dari berhari-hari, berminggu-minggu, hingga berbulan-bulan, tergantung pada desain dan sistem catu dayanya (biasanya menggunakan panel surya dan baterai atau *fuel cells*). Potensi aplikasi HAPS dalam penginderaan jauh sangat besar. HAPS dapat berfungsi sebagai platform untuk pemantauan persisten area lokal atau regional, menyediakan observasi Bumi resolusi tinggi secara kontinu. Mereka dapat melengkapi kemampuan satelit (yang memiliki cakupan global namun waktu revisit tertentu untuk satu titik) dan drone (yang memiliki persistensi lokal namun cakupan dan durasi terbang terbatas). Aplikasi potensial meliputi pemantauan lingkungan secara *real-time* (misalnya, deteksi dini dan pemantauan perkembangan kebakaran hutan atau banjir), pengawasan maritim, pemantauan perbatasan, penyediaan layanan komunikasi darurat saat

infrastruktur darat lumpuh, dan mendukung pertanian presisi. Meskipun beberapa proyek HAPS, seperti Google Loon (yang menggunakan balon ketinggian tinggi untuk menyediakan konektivitas internet), telah dihentikan, pengembangan HAPS jenis pesawat sayap tetap terus berlanjut oleh berbagai perusahaan dan lembaga riset. HAPS berpotensi mengisi celah penting dalam kemampuan observasi Bumi, menawarkan solusi "pseudo-satelit" yang lebih fleksibel, responsif, dan hemat biaya untuk aplikasi regional yang memerlukan persistensi.

Rangkuman misi-misi satelit penginderaan jauh utama disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 9.1 Rangkuman Satelit Penginderaan Jauh Terbaru (Diluncurkan atau Direncanakan)

Nama Satelit/ Misi	Negara/ Badan	Jenis Sensor Utama	Resolusi Kunci/ Fitur Utama	Implikasi Teknologi
Sentinel-1C	Eropa (ESA)	C-band SAR	Resolusi 5x20 m (IW mode), segala cuaca	Kontinuitas data Radar, pemantauan maritim/bencana
NISAR	AS (NASA) & India (ISRO)	L-band SAR & S-band SAR	Dual-frekuensi, pemantauan deformasi permukaan detail	Studi perubahan iklim, geodinamika
Cartosat-3	India (ISRO)	Pankromatik, Multispektoral	Resolusi pankromatik 0.25 m	Pemetaan detail, intelijen geospasial
PlanetScope (Konstelasi)	Planet Labs	Optik Multispektoral	Resolusi 3-3.7 m, <i>Revisit</i> Harian Global	Pemantauan dinamis, resolusi temporal tinggi

Landsat Next (Rencana)	AS (NASA/USGS)	Super-spektral (26 band)	Resolusi spasial 10-20 m (VNIR/SWIR)	Peningkatan karakterisasi material dan lingkungan
EnMAP	Jerman (DLR)	Hiperspektral	242 band spektral, resolusi 30m	Identifikasi material, pertanian presisi

9.3 Revolusi Analisis Data (AI, Cloud, Big Data)

Akuisisi data penginderaan jauh hanyalah langkah awal. Untuk mengubah data mentah menjadi informasi yang bermakna dan dapat ditindaklanjuti, diperlukan teknik pengolahan dan analisis data yang canggih. Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan dalam algoritma, perangkat lunak, dan infrastruktur komputasi telah merevolusi cara data penginderaan jauh diolah, dianalisis, dan diinterpretasikan.

9.3.1 Peran Sentral GeoAI dan Pembelajaran Mesin (ML)

Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin (ML), atau secara spesifik GeoAI, adalah motor penggerak utama yang mengotomatisasi proses-proses kompleks, meningkatkan akurasi dan mengekstrak pola-pola tersembunyi dari volume data Penginderaan Jauh yang besar. Beberapa contoh algoritma dan aplikasinya meliputi:

- Deep Learning (CNNs): *Convolutional Neural Networks* (CNNs) sangat efektif untuk tugas-tugas yang melibatkan data citra, seperti klasifikasi citra, pengenalan objek, dan segmentasi semantik (misalnya, model U-Net). Keunggulan CNN terletak pada kemampuannya untuk secara otomatis mempelajari dan mengekstrak fitur-fitur spasial dari citra secara hierarkis, mulai dari fitur sederhana seperti tepi dan tekstur hingga fitur yang lebih kompleks seperti bentuk objek. Dalam penginderaan jauh, CNNs digunakan secara luas untuk pemetaan tutupan lahan, deteksi bangunan, identifikasi jenis tanaman, dan

segmentasi citra. Model-model varian CNN, seperti U-Net, juga sangat populer untuk tugas segmentasi semantik, yaitu mengklasifikasikan setiap piksel dalam citra ke dalam kelas tertentu (misalnya, memisahkan area hutan, air, dan perkotaan).

- Algoritma Tradisional yang Kuat: Algoritma seperti *Random Forest* (RF) dan *Support Vector Machines* (SVMs) tetap populer dan terbukti handal untuk klasifikasi tutupan lahan dan mampu menangani data berdimensi tinggi (banyak fitur spektral) dengan akurasi tinggi. *Random Forest* adalah metode *ensemble learning* yang bekerja dengan membangun sejumlah besar pohon keputusan (decision trees) secara acak selama proses pelatihan dan menghasilkan prediksi kelas berdasarkan mayoritas suara (voting) dari semua pohon. SVM bekerja dengan mencari *hyperplane* (bidang pemisah) optimal yang dapat memisahkan data ke dalam kelas-kelas yang berbeda dengan margin terbesar. Kedua algoritma ini seringkali menunjukkan akurasi klasifikasi yang tinggi, bahkan dengan dataset pelatihan yang relatif kecil, dan mampu menangani data dengan dimensi tinggi (banyak fitur).

9.3.2 Analisis Citra Berbasis Objek (OBIA)

Analisis Citra Berbasis Objek (OBIA), atau terkadang disebut GEOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*), adalah pendekatan analisis citra yang berbeda secara fundamental dari metode berbasis piksel tradisional. Dalam OBIA, langkah pertama adalah melakukan segmentasi citra, yaitu proses mempartisi atau mengelompokkan piksel-piksel yang berdekatan dan memiliki karakteristik spektral atau spasial yang serupa menjadi unit-unit yang disebut objek atau segmen. Objek-objek ini idealnya merepresentasikan entitas geografis yang bermakna di dunia nyata, seperti bangunan, petak lahan pertanian, atau fragmen hutan, terutama pada citra resolusi tinggi. Setelah segmentasi, berbagai fitur (karakteristik) diekstrak dari setiap objek, tidak hanya fitur spektral rata-

rata, tetapi juga fitur tekstural, bentuk, ukuran, dan hubungan spasial dengan objek tetangga. Barulah kemudian objek-objek ini diklasifikasikan berdasarkan fitur-fiturnya.

Alur kerja umum OBIA meliputi: (1) Segmentasi citra untuk menghasilkan objek-objek citra; (2) Ekstraksi fitur dari setiap objek (misalnya, nilai rata-rata band, standar deviasi, indeks bentuk, luas, dll.); (3) Klasifikasi objek menggunakan algoritma klasifikasi (misalnya, *Nearest Neighbor*, RF, SVM) berdasarkan fitur-fitur yang telah diekstrak.

Keunggulan utama OBIA adalah kemampuannya untuk mengatasi masalah "salt-and-pepper" (piksel-piksel terisolasi yang salah diklasifikasikan) yang sering muncul dalam analisis berbasis piksel pada citra resolusi sangat tinggi. OBIA juga memungkinkan pemanfaatan informasi kontekstual dan bentuk objek dalam proses klasifikasi, sehingga dapat menghasilkan peta tematik yang lebih halus, lebih akurat secara spasial, dan lebih sesuai dengan persepsi visual manusia terhadap lanskap. Sebagai contoh, paket perangkat lunak *sits* dalam bahasa pemrograman R menyediakan fungsi `sits_segment()` yang mengimplementasikan algoritma SLIC (*Simple Linear Iterative Clustering*) untuk melakukan segmentasi pada data citra deret waktu (*time series*).

9.3.3 Pemrosesan Cerdas dan Edge Computing

Salah satu perkembangan paling mutakhir dalam indejara adalah kemampuan untuk melakukan pengolahan data menggunakan AI/ML langsung di atas platform satelit itu sendiri, sebuah konsep yang dikenal sebagai *on-board AI processing* atau *edge computing* di luar angkasa. Daripada mengirimkan seluruh volume data mentah yang besar ke stasiun Bumi untuk diproses, algoritma AI yang tertanam pada chip khusus di satelit dapat menganalisis data saat data tersebut dikumpulkan.

Manfaat utama dari pemrosesan AI *on-board* meliputi:

1. Pengurangan Volume Data Transmisi: Hanya informasi yang relevan

atau hasil analisis awal (misalnya, deteksi adanya perubahan signifikan, lokasi kebakaran) yang perlu dikirim ke Bumi, sehingga secara drastis mengurangi kebutuhan bandwidth dan waktu transmisi data.

2. Deteksi Kejadian *Real-time* atau *Near Real-time*: Kemampuan untuk menganalisis data secara langsung di satelit memungkinkan deteksi kejadian penting (seperti kebakaran hutan, tumpahan minyak, banjir, atau aktivitas ilegal) hampir seketika setelah data diakuisisi .
3. Peringatan Dini dan Respons Cepat: Informasi hasil deteksi *on-board* dapat segera dikirimkan sebagai peringatan dini kepada pihak terkait di Bumi, memungkinkan pengambilan keputusan dan tindakan respons yang jauh lebih cepat.
4. Operasi Satelit yang Lebih Otonom: AI dapat membantu satelit untuk membuat keputusan secara mandiri, misalnya, untuk memprioritaskan area mana yang perlu dicitrakan berdasarkan deteksi awal.

Sebagai contoh, perusahaan Satellogic (<https://satellogic.com/>) sedang mengembangkan satelit yang mereka sebut "AI-First", yang dirancang dari awal dengan kemampuan pemrosesan AI *on-board* menggunakan GPU (Graphics Processing Units) untuk analisis citra secara *real-time*. Penerapan AI/ML dalam penginderaan jauh, mulai dari klasifikasi citra yang lebih akurat hingga pemrosesan cerdas di atas satelit, tidak hanya meningkatkan efisiensi pengolahan data yang sudah ada, tetapi juga membuka pintu bagi jenis analisis baru dan produk informasi yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan. Kemampuan AI untuk "belajar" dari volume data yang sangat besar memungkinkan identifikasi pola-pola halus dan kompleks yang mungkin sulit atau bahkan tidak mungkin dideteksi oleh manusia atau metode statistik tradisional. Lebih jauh lagi, pemrosesan *on-board* merupakan lompatan besar yang mengubah satelit dari sekadar alat pengumpul data pasif menjadi sistem observasi cerdas yang dapat

bertindak secara lebih otonom dan responsif. Implikasinya adalah pergeseran signifikan dari analisis data yang bersifat retrospektif (melihat ke belakang) menjadi pemantauan yang lebih proaktif dan mampu menghasilkan tindakan nyata dengan cepat.

9.3.4 Ekosistem Big Data Geospasial dan Komputasi Awan

Seiring dengan meningkatnya jumlah satelit, resolusi sensor, dan frekuensi akuisisi data, volume data penginderaan jauh yang dihasilkan telah mencapai skala *Big Data*. Istilah *Big Data* dalam konteks ini merujuk pada karakteristik data yang tidak hanya besar volumenya (*volume*), tetapi juga beragam jenisnya (*variety*), dan dihasilkan dengan kecepatan tinggi (*velocity*). Mengelola, menyimpan, memproses, dan menganalisis *Big Data* geospasial ini secara efisien menjadi tantangan besar yang memerlukan pendekatan dan teknologi baru. Untuk itu, salah satu solusi paling efisien untuk mengatasi tantangan Big Data geospasial adalah dengan memanfaatkan platform *cloud computing* (komputasi awan). Platform ini menyediakan infrastruktur penyimpanan data skala besar, kemampuan komputasi performa tinggi, dan berbagai alat analisis geospasial yang dapat diakses melalui internet. Beberapa platform cloud computing yang sangat populer untuk analisis data penginderaan jauh antara lain:

- Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com/>): GEE adalah platform berbasis *cloud* yang dikembangkan oleh Google. Platform ini menyediakan akses ke katalog data penginderaan jauh publik yang sangat besar (mencapai multi-petabyte), termasuk arsip lengkap dari misi Landsat, data dari seri Sentinel Copernicus, MODIS, dan banyak dataset lainnya. Yang lebih penting, GEE juga menyediakan kemampuan komputasi paralel skala planet yang memungkinkan pengguna untuk memproses dan menganalisis volume data yang masif ini langsung di *cloud* tanpa perlu mengunduh data ke komputer lokal. Pengguna dapat menulis skrip analisis menggunakan

JavaScript atau Python API. GEE telah digunakan secara luas oleh komunitas ilmiah, lembaga pemerintah, dan organisasi non-pemerintah untuk berbagai aplikasi, seperti pemantauan deforestasi, pemetaan tutupan lahan, analisis perubahan iklim, manajemen bencana, dan pemantauan sumber daya air.

- Microsoft Planetary Computer (<https://planetarycomputer.microsoft.com/>) : Mirip dengan GEE, Microsoft Planetary Computer adalah inisiatif yang menggabungkan katalog data lingkungan global multi-petabyte dengan Antarmuka Pemrograman Aplikasi (API) yang intuitif dan lingkungan ilmiah yang fleksibel untuk melakukan analisis data skala planet. Platform ini dibangun di atas infrastruktur *cloud* Microsoft Azure dan menyediakan akses ke berbagai dataset lingkungan serta alat komputasi untuk mendukung aplikasi keberlanjutan dan ilmu Bumi.

Manfaat utama dari penggunaan platform *cloud computing* untuk analisis data penginderaan jauh meliputi:

1. Mengatasi Keterbatasan Komputasi Lokal: Pengguna tidak lagi memerlukan superkomputer atau kapasitas penyimpanan data yang besar di institusi masing-masing.
2. Efisiensi Waktu dan Biaya: Proses analisis data skala besar dapat dilakukan jauh lebih cepat dan seringkali dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan pendekatan tradisional.
3. Memfasilitasi Kolaborasi: Platform *cloud* memudahkan berbagi data, kode analisis, dan hasil penelitian antar pengguna di lokasi yang berbeda.
4. Demokratisasi Akses: Platform ini menurunkan hambatan teknis dan finansial, sehingga memungkinkan lebih banyak peneliti, institusi (termasuk di negara berkembang), dan bahkan individu untuk mengakses dan memanfaatkan data penginderaan jauh serta alat

analisis canggih.

Ketersediaan platform *cloud computing* yang canggih ini berjalan seiring dengan semakin meluasnya kebijakan data terbuka (*open data policies*) dari berbagai program satelit observasi Bumi. Program-program fundamental seperti Landsat (yang data arsipnya dikelola dan didistribusikan secara gratis oleh USGS EROS Center melalui berbagai portal seperti EarthExplorer dan GloVis dan program Copernicus Uni Eropa (yang menyediakan data dari seri satelit Sentinel secara gratis dan terbuka melalui Copernicus Open Access Hub, yang kini telah berevolusi menjadi Copernicus Data Space Ecosystem telah memainkan peran krusial. Kebijakan data terbuka ini telah menjadi katalisator utama bagi inovasi, penelitian, dan pengembangan aplikasi penginderaan jauh di seluruh dunia, karena memungkinkan akses yang luas dan tanpa hambatan ke sumber daya data yang sangat berharga.

Kombinasi dari ketersediaan *Big Data* geospasial dan platform *cloud computing* yang kuat telah secara fundamental mendemokratisasi akses ke kemampuan analisis geospasial tingkat lanjut. Ini memberdayakan lebih banyak pihak untuk terlibat dalam pemantauan Bumi dan mencari solusi untuk berbagai tantangan global. Implikasinya adalah percepatan laju penelitian ilmiah, munculnya aplikasi-aplikasi baru yang inovatif, dan potensi yang lebih besar untuk menghasilkan solusi berbasis data untuk masalah-masalah lingkungan dan sosial yang kompleks.

9.3.5 Fusi Data dan Integrasi Sistem (IoT)

1. Fusi Data

Fusi data adalah proses menggabungkan data dari berbagai sensor atau sumber data yang berbeda untuk menghasilkan satu set informasi baru yang lebih berkualitas, lebih akurat, lebih lengkap, dan lebih komprehensif daripada jika setiap sumber data tersebut digunakan

secara terpisah. Tujuan utama fusi data adalah untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing sumber data sambil mengatasi keterbatasannya. Fusi data dalam penginderaan jauh dapat dilakukan pada beberapa tingkatan: Level Piksel (*Pixel-level Fusion*) atau Level Observasi (*Observation-level Fusion*): Pada tingkatan ini, nilai piksel mentah dari citra-citra yang berbeda digabungkan secara langsung untuk menghasilkan citra baru. Contoh klasik dari fusi level piksel adalah *pansharpening*, yaitu proses menggabungkan citra pankromatik (biasanya satu band dengan rentang spektral lebar) yang memiliki resolusi spasial tinggi dengan citra multispektral yang memiliki resolusi spasial lebih rendah tetapi informasi spektral lebih kaya. Hasilnya adalah citra multispektral dengan resolusi spasial yang telah ditingkatkan. Level Fitur (*Feature-level Fusion*): Pada tingkatan ini, fitur-fitur (misalnya, tepi, tekstur, bentuk objek, atau hasil klasifikasi awal) diekstrak terlebih dahulu dari masing-masing dataset sumber. Kemudian, fitur-fitur inilah yang digabungkan atau diintegrasikan untuk analisis lebih lanjut atau pengambilan keputusan. Level Keputusan (*Decision-level Fusion*): Pada tingkatan ini, setiap dataset sumber diproses secara independen hingga menghasilkan keputusan atau hasil klasifikasi awal. Kemudian, keputusan-keputusan dari masing-masing sumber ini digabungkan (misalnya, melalui mekanisme voting atau aturan logika) untuk mencapai keputusan akhir yang lebih robust dan akurat. Sebuah analisis terhadap lebih dari 950 publikasi ilmiah menemukan bahwa fusi data pada level fitur merupakan pendekatan yang paling umum digunakan dalam aplikasi penginderaan jauh, diikuti oleh fusi level piksel dan level keputusan (Samadzadegan, Toosi, dan Dadrass Javan 2025). Manfaat fusi data sangat beragam, termasuk peningkatan resolusi spasial, peningkatan akurasi interpretasi dan klasifikasi, kemampuan untuk

mengisi kesenjangan data (misalnya, akibat tutupan awan pada citra optik dapat diatasi dengan fusi data Radar), dan peningkatan kemampuan deteksi objek atau fenomena.

2. Integrasi dengan Internet of Things (IoT)

Perkembangan menarik lainnya adalah integrasi data penginderaan jauh dengan data dari jaringan sensor *Internet of Things* (IoT) yang terpasang di darat (sensor *in-situ*). IoT merujuk pada jaringan perangkat fisik, kendaraan, peralatan rumah tangga, dan item lain yang disematkan dengan elektronik, perangkat lunak, sensor, aktuator, dan konektivitas yang memungkinkan objek-objek ini untuk terhubung dan bertukar data. Dalam konteks observasi Bumi, integrasi data satelit atau drone dengan data dari sensor IoT di lapangan dapat menyediakan sistem pemantauan lingkungan atau aset yang jauh lebih komprehensif, detail, dan mendekati *real-time*. Contoh aplikasi meliputi: Pertanian Presisi: Data satelit yang memberikan gambaran luas tentang kesehatan tanaman dan variabilitas spasial di lahan pertanian dapat dikombinasikan dengan data dari sensor IoT di lapangan yang mengukur parameter mikro seperti kelembaban tanah, suhu udara, tingkat nutrisi tanah, atau serangan hama secara spesifik di lokasi tertentu. Pemantauan Kualitas Air: Data satelit yang dapat mendeteksi parameter seperti kekeruhan air atau suhu permukaan air dapat divalidasi dan dilengkapi dengan data dari sensor IoT yang terpasang di badan air untuk mengukur parameter kualitas air lainnya secara kontinu, seperti pH, kadar oksigen terlarut, atau konsentrasi polutan spesifik. Manajemen Bencana: Peringatan dini potensi bencana (misalnya, banjir atau tanah longsor) yang dihasilkan dari analisis data satelit dapat diverifikasi dan diperkuat dengan data dari sensor IoT di lapangan (misalnya, sensor curah hujan, sensor pergerakan tanah, atau sensor ketinggian muka air sungai).

Manfaat utama dari integrasi penginderaan jauh dengan IoT adalah kemampuan untuk melakukan validasi data satelit, meningkatkan resolusi temporal dan spasial informasi untuk area-area kunci tertentu, serta mendapatkan pemahaman yang lebih holistik mengenai fenomena yang diamati. Fusi data dan integrasi dengan IoT mencerminkan tren yang lebih luas menuju pendekatan sistem-dari-sistem (*system-of-systems*) dalam observasi Bumi. Pendekatan ini mengakui bahwa tidak ada satu jenis sensor atau platform tunggal yang dapat menjawab semua pertanyaan atau memenuhi semua kebutuhan informasi. Kekuatan sesungguhnya terletak pada sinergi dan komplementaritas berbagai sumber data yang berbeda. Meskipun demikian, pendekatan ini juga meningkatkan kompleksitas dalam hal pengolahan, analisis, dan integrasi data dari sumber yang heterogen.

Tabel 9.3 Konvergensi Teknologi dalam Analisis Big Data Geospasial

Teknologi Utama	Peran dalam Revolusi Analisis Data	Manfaat Utama	Tantangan yang Diatasi
Kecerdasan Buatan (AI) / ML	Otomatisasi klasifikasi, pengenalan pola kompleks (<i>Deep Learning</i>), analisis prediktif.	Kecepatan analisis skala besar, akurasi, ekstraksi fitur otomatis.	Memproses <i>Volume</i> data yang masif, kompleksitas <i>Variety</i> data.
<i>Cloud Computing</i> (GEE, Azure)	Infrastruktur komputasi paralel dan penyimpanan data multi-petabyte secara daring.	Demokratisasi akses, mengurangi biaya infrastruktur lokal, memfasilitasi kolaborasi global.	Keterbatasan <i>Volume</i> dan <i>Velocity</i> data pada komputasi lokal.
<i>Edge Computing</i> (On-board AI)	Pemrosesan data cerdas langsung di atas satelit.	Deteksi <i>real-time</i> (latensi rendah), reduksi drastis volume transmisi data.	Tantangan <i>Velocity</i> dan bandwidth transmisi data.

Fusi Data	Menggabungkan informasi dari sensor yang heterogen (Optik, SAR, LiDAR, IoT).	Peningkatan akurasi, kelengkapan informasi, mengatasi kendala awan.	Kompleksitas <i>Variety</i> (heterogenitas sensor) dan ketersediaan data.
Integrasi IoT	Menggabungkan data udara/satelit dengan sensor <i>in-situ</i> di lapangan.	Validasi data, resolusi temporal lokal yang tinggi, pemahaman kontekstual yang holistik.	Kesenjangan resolusi spasial/temporal pada skala mikro.

9.4 Program Unggulan Global dan Nasional

9.4.1 Program Observasi Bumi Global Pionir

Industri satelit penginderaan jauh terus berkembang dengan pesat, ditandai dengan peluncuran misi-misi baru yang membawa teknologi sensor yang lebih canggih dan menawarkan kemampuan observasi yang lebih baik. Berikut adalah rangkuman beberapa program satelit penginderaan jauh penting yang baru diluncurkan atau direncanakan untuk segera diluncurkan, dengan pembaruan berdasarkan informasi terkini:

1. Sentinel Series (Program Copernicus): Program Copernicus adalah inisiatif observasi Bumi terbesar di dunia yang dipimpin oleh Uni Eropa bekerja sama dengan Badan Antariksa Eropa (ESA). Inti dari Copernicus adalah keluarga satelit Sentinel, yang dirancang untuk menyediakan data observasi Bumi yang komprehensif, gratis, dan terbuka untuk berbagai layanan lingkungan dan keamanan. Seri Sentinel mencakup: Sentinel-1: Konstelasi satelit SAR (saat ini Sentinel-1A, -1B, dan -1C) yang menyediakan data Radar C-band dalam segala kondisi cuaca, siang dan malam, untuk pemantauan daratan dan lautan. Sentinel-2: Konstelasi satelit optik multispektral resolusi tinggi yang menyediakan citra untuk pemantauan tutupan

lahan, pertanian, dan kehutanan. Sentinel-3: Misi yang fokus pada pemantauan parameter laut (suhu permukaan laut, warna laut, ketinggian permukaan laut) dan daratan (suhu permukaan daratan, indeks vegetasi). Sentinel-5P (Precursor): Misi yang didedikasikan untuk memantau komposisi atmosfer, termasuk gas-gas jejak seperti ozon, nitrogen dioksida, dan metana. Data dari semua misi Sentinel tersedia secara gratis melalui Copernicus Data Space Ecosystem, mendorong penggunaan yang luas di kalangan ilmuwan, pemerintah, dan sektor swasta.

2. NISAR (NASA-ISRO): Merupakan misi kolaborasi antara NASA (Amerika Serikat) dan ISRO (India), NISAR dijadwalkan untuk diluncurkan pada tahun 2025. Satelit ini akan menjadi yang pertama menggunakan dua frekuensi Radar, L-band dan S-band, untuk memetakan perubahan permukaan Bumi dengan detail yang belum pernah ada sebelumnya, termasuk deformasi kerak Bumi, dinamika es, dan perubahan ekosistem. NISAR diharapkan dapat memberikan data yang sangat berharga untuk memahami dampak perubahan iklim, manajemen bencana, dan pengelolaan sumber daya alam. Kolaborasi ini juga menyoroti pentingnya kemitraan internasional dalam menjalankan misi observasi Bumi yang kompleks dan mahal.
3. Gaofen Series (Tiongkok): Gaofen (yang berarti "resolusi tinggi" dalam bahasa Mandarin) adalah bagian penting dari *China High-resolution Earth Observation System* (CHEOS). Terdapat berbagai satelit dalam seri ini dengan sensor yang berbeda. Sebagai contoh, Gaofen-3 adalah satelit SAR C-band yang diluncurkan pada tahun 2016, menawarkan berbagai mode pencitraan dengan resolusi hingga 1 meter. Sementara itu, seri Jilin-1 Gaofen 03D adalah konstelasi satelit optik resolusi tinggi, dengan beberapa satelit diluncurkan pada November 2022. Penting untuk membedakan antara seri Gaofen yang

beragam ini.

4. Cartosat-3 (India): Diluncurkan oleh ISRO pada November 2019, Cartosat-3 adalah satelit observasi Bumi canggih yang menyediakan citra pankromatik dengan resolusi spasial sangat tinggi, yaitu 0.25 meter, serta citra multispektral dengan resolusi 1 meter.
 5. WorldView-4 (Maxar, AS): Meskipun diluncurkan pada November 2016 dengan kemampuan resolusi spasial 31 cm yang impresif, satelit ini mengalami kegagalan teknis pada giroskopnya pada Januari 2019 dan tidak lagi operasional. Kasus ini menyoroti risiko yang ada dalam misi luar angkasa.
 6. RADARSAT Constellation Mission (RCM) (Kanada): Diluncurkan pada Juni 2019, RCM terdiri dari tiga satelit identik yang dilengkapi sensor C-band SAR. Konstelasi ini dirancang untuk menyediakan data SAR yang sering dan andal untuk pemantauan maritim, manajemen bencana, dan pemantauan ekosistem, terutama di wilayah Kanada dan Arktik. Resolusinya bervariasi antara 3 hingga 100 meter.
- Program Landsat (AS - NASA/USGS): Program Landsat adalah program observasi Bumi sipil yang paling lama berjalan dalam sejarah, dimulai dengan peluncuran Landsat 1 pada tahun 1972. Selama lebih dari lima dekade, program Landsat telah secara konsisten menyediakan arsip data citra multispektral global yang tak ternilai harganya. Data ini sangat krusial untuk studi perubahan lingkungan jangka panjang, pemantauan sumber daya alam, dan berbagai aplikasi ilmiah lainnya. Salah satu tonggak penting adalah kebijakan data gratis dan terbuka yang diterapkan sejak tahun 2008, yang memungkinkan akses tanpa batas ke seluruh arsip data Landsat melalui portal USGS seperti EarthExplorer. Satelit terbaru dalam seri ini, Landsat 9, diluncurkan pada September 2021, melanjutkan warisan program Landsat yang telah berjalan selama lebih dari lima

dekade. Satelit ini membawa sensor *Operational Land Imager 2* (OLI-2) dan *Thermal Infrared Sensor 2* (TIRS-2), yang sebagian besar identik dengan sensor pada Landsat 8. Program jangka panjang seperti Landsat, bersama dengan kebijakan data terbukanya, telah menjadi fondasi bagi banyak kemajuan dalam ilmu penginderaan jauh dan aplikasi praktisnya. Ketersediaan arsip data historis yang konsisten sangat penting, misalnya, untuk melatih model AI/ML yang canggih dan untuk mendeteksi serta memahami tren perubahan lingkungan global dalam skala waktu dekadal.

7. EnMAP (Jerman): Diluncurkan pada April 2022, EnMAP adalah misi satelit hiperspektral yang menyediakan data dengan 200+ band spektral untuk analisis detail material permukaan Bumi.
8. PRISMA (Italia): Diluncurkan pada Maret 2019, PRISMA juga merupakan misi satelit hiperspektral yang dilengkapi dengan kamera pankromatik, menyediakan data spektral yang kaya untuk berbagai aplikasi.

Tabel berikut merangkum beberapa satelit penginderaan jauh terbaru yang signifikan:

Tabel 9.1 Rangkuman Satelit Penginderaan Jauh Terbaru (Diluncurkan atau Direncanakan Luncur dalam Beberapa Tahun Terakhir)

Nama Satelit	Negara / Badan	Tanggal Luncur (Aktual/ Rencana)	Jenis Sensor Utama	Resolusi Kunci/Fitur Utama	Status Operasional (per 1 oktober 2025)
Sentinel-1C	Eropa (ESA)	5 Desember 2024	C-band SAR	Resolusi 5x20 m (mode IW), segala cuaca	Operasional
NISAR	AS (NASA) & India (ISRO)	2025 (Rencana)	L-band SAR & S-band SAR	Dual-frekuensi, pemantauan perubahan permukaan Bumi detail	Belum Diluncurkan
Gaofen-3	Tiongkok (CNSA)	10 Agustus 2016	C-band SAR	Resolusi 1-500 m, 12 mode pencitraan	Operasional

)				
Jilin-1 Gaofen 03D (konstelasi)	Tiongkok	November 2022 (beberapa)	Optik	Resolusi tinggi (sub-meter untuk beberapa)	Operasional
Cartosat-3	India (ISRO)	27 November 2019	Pankromatik, Multispektral	Resolusi pankromatik 0.25 m, multispektral 1 m	Operasional
RADARSAT Constellation Mission	Kanada (CSA)	12 Juni 2019	C-band SAR (3 satelit)	Resolusi 3-100 m, revisit cepat	Operasional
Landsat 9	AS (NASA/USGS)	27 September 2021	Optik (OLI-2), Inframerah Termal (TIRS-2)	Resolusi 15m (Pan), 30m (MS), 100m (TIR), kontinuitas data Landsat	Operasional
EnMAP	Jerman (DLR)	1 April 2022	Hiperspektral	242 band, resolusi 30m, lebar sapuan 30km	Operasional
PRISMA	Italia (ASI)	22 Maret 2019	Hiperspektral, Pankromatik	237 band hiperspektral (0.4-2.5 μ m, res. spektral \leq 12 nm), Pan res. 5m	Operasional

9.4.2 Visi dan Inisiatif Nasional (Indonesia)

Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan tantangan lingkungan dan pengelolaan sumber daya yang kompleks, juga memiliki visi dan inisiatif penting dalam pengembangan dan pemanfaatan teknologi penginderaan jauh. Peran Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Sejak integrasi berbagai lembaga penelitian nasional, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) kini memegang peran sentral dalam pengembangan ekosistem keantariksaan dan penginderaan jauh di Indonesia. BRIN berupaya membangun kemampuan nasional yang mandiri dalam bidang ini untuk memudahkan pemantauan lingkungan, pengelolaan sumber daya alam, dan interpretasi data untuk berbagai kebutuhan pembangunan. Salah satu visi ambisius BRIN adalah pengembangan konstelasi yang terdiri dari enam satelit penginderaan jauh nasional. Inisiatif BRIN untuk

mengembangkan konstelasi satelit penginderaan jauh sendiri mencerminkan dorongan strategis menuju kemandirian data dan penyesuaian kemampuan penginderaan jauh dengan kebutuhan spesifik Indonesia. Ketergantungan pada data satelit asing dapat memiliki keterbatasan dalam hal biaya, akses prioritas, atau spesifikasi sensor yang mungkin tidak optimal untuk kondisi lokal (misalnya, tutupan awan yang tinggi). Satelit-satelit ini direncanakan akan berbasis teknologi Radar (SAR) untuk mengatasi kendala utama di wilayah tropis seperti Indonesia, yaitu tingginya tutupan awan yang sering menghalangi observasi oleh sensor optik. BRIN telah aktif memanfaatkan data satelit yang ada untuk berbagai aplikasi, termasuk pemantauan lahan pertanian seperti perkebunan kelapa sawit dan sawah padi, mendukung program asuransi pertanian, serta pemetaan lahan rawa dan identifikasi lahan cadangan pangan nasional.

Sejarah dan Kontribusi LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional)

Sebelum terintegrasi ke dalam BRIN, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) memiliki sejarah panjang dan kontribusi signifikan selama lebih dari dua dekade dalam penelitian dan pengembangan di bidang roket, penginderaan jauh, satelit, dan ilmu antariksa di Indonesia. Program satelit mikro LAPAN menunjukkan strategi pembangunan kapasitas teknologi antariksa secara bertahap, dimulai dari kerjasama internasional hingga pengembangan mandiri yang semakin kompleks. Pengembangan satelit adalah upaya yang kompleks dan mahal. LAPAN memulai dengan LAPAN-A1 melalui kerjasama dengan Jerman, yang memungkinkan transfer pengetahuan dan pengalaman. LAPAN berhasil mengembangkan serangkaian satelit mikro eksperimental yang dikenal sebagai seri LAPAN-A, seperti: LAPAN-A1 (LAPAN-TUBsat), diluncurkan pada tahun 2007, merupakan hasil kerjasama dengan

Technische Universität Berlin, Jerman (R H Triharjanto dkk. 2004; R. H. Triharjanto dkk. 2004). Misi utamanya adalah untuk eksperimen teknologi, observasi Bumi dengan kamera video resolusi rendah hingga menengah, dan pengembangan kapasitas SDM dalam teknologi satelit mikro. LAPAN-A2 (LAPAN-ORARI), diluncurkan pada tahun 2015, membawa misi observasi Bumi dengan kamera RGB, pemantauan lalu lintas maritim global melalui sensor *Automatic Identification System* (AIS), serta fasilitas komunikasi untuk komunitas radio amatir (ORARI) (Hasbi dan Kamirul 2020). LAPAN-A3 (LAPAN-IPB), diluncurkan pada tahun 2016, merupakan hasil kerjasama dengan Institut Pertanian Bogor (IPB). Satelit ini membawa muatan kamera multispektral empat kanal untuk penginderaan jauh eksperimental sumber daya alam, selain melanjutkan misi pemantauan AIS global dan komunikasi radio amatir (Harsono dan Hasbi 2018). Misi-misi ini menunjukkan peningkatan kemampuan dalam desain, perakitan, integrasi, dan pengujian satelit secara mandiri, dengan muatan yang semakin canggih dan relevan dengan kebutuhan nasional. Pendekatan bertahap ini penting untuk membangun fondasi SDM dan teknologi yang kuat sebelum beralih ke proyek satelit yang lebih besar dan lebih ambisius, seperti yang kini direncanakan oleh BRIN.

Selain inisiatif pemerintah melalui LAPAN (kini BRIN), sektor swasta di Indonesia juga telah menunjukkan perannya dalam pengembangan infrastruktur satelit, meskipun fokus utamanya saat ini lebih pada sektor telekomunikasi (bukan penginderaan jauh). Meskipun satelit-satelit ini adalah satelit komunikasi, teknologi dan keahlian yang mereka kembangkan dalam perancangan, peluncuran, dan operasi satelit dapat berpotensi merambah ke layanan observasi Bumi atau layanan nilai tambah berbasis data penginderaan jauh di masa depan, terutama jika ada insentif atau model bisnis yang mendukung.

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh di Indonesia telah terbukti memberikan kontribusi nyata dalam berbagai bidang. Studi kasus di Indonesia menunjukkan upaya aktif untuk tidak hanya mengadopsi teknologi penginderaan jauh global tetapi juga mengadaptasinya dan mengembangkan metodologi yang sesuai dengan tantangan dan kebutuhan spesifik lokal. Indonesia memiliki kondisi geografis dan lingkungan yang unik (misalnya, tutupan awan tinggi, keanekaragaman hayati yang kaya, risiko bencana spesifik seperti karhutla). Pemanfaatan penginderaan jauh yang efektif memerlukan lebih dari sekadar penggunaan perangkat lunak atau data standar. Berikut beberapa contohnya:

- 1 Pemantauan Pembangunan Ibu Kota Negara (IKN) Nusantara. Pembangunan IKN Nusantara di Kalimantan Timur merupakan proyek strategis nasional yang memerlukan pemantauan komprehensif. Teknologi penginderaan jauh digunakan secara intensif untuk memetakan kondisi tutupan lahan awal, memantau kemajuan pembangunan fisik, serta memastikan bahwa konsep kota pintar dan hijau (smart and green city) yang diusung dapat terwujud dengan tetap menjaga kelestarian lingkungan. Mengingat wilayah Kalimantan Timur sering tertutup awan, para peneliti di BRIN telah mengembangkan metode dan aplikasi khusus, termasuk penggunaan algoritma machine learning dan model Cloud-Free Mosaic, untuk menghasilkan citra bebas awan yang akurat untuk keperluan pemantauan IKN.
- 2 Aplikasi untuk Mitigasi Kebakaran Hutan dan Lahan (Karhutla). Kebakaran hutan dan lahan (karhutla) merupakan bencana rutin yang menimbulkan kerugian ekologi dan ekonomi besar di Indonesia. Penginderaan jauh memainkan peran krusial dalam mitigasi karhutla. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk memanfaatkan data satelit

dalam sistem peringatan dini, pemantauan titik panas (hotspot), estimasi luas area terbakar, dan analisis dampak..

- 3 Monitoring Perkebunan dan Pertanian. Sektor pertanian dan perkebunan, yang merupakan tulang punggung ekonomi Indonesia, juga sangat diuntungkan oleh aplikasi penginderaan jauh. Data satelit digunakan untuk memantau perkebunan skala besar seperti kelapa sawit, mencakup aspek pengelolaan sumber daya, prediksi hasil panen, pemantauan kesehatan tanaman, dan memastikan praktik perkebunan yang berkelanjutan. Untuk komoditas pangan utama seperti padi, Kementerian Pertanian melalui BRIN telah mengembangkan Sistem Informasi Tanaman Pangan (SICrop) yang menggunakan data satelit Sentinel-1 (SAR) untuk memantau fase pertumbuhan padi secara spasial dan temporal mendekati near real-time dengan resolusi 10 meter. Sistem ini mampu mengidentifikasi enam fase pertumbuhan padi, mulai dari kondisi tergenang hingga panen, dan menyediakan informasi produksi padi hingga tingkat kecamatan, yang sangat mendukung perumusan kebijakan ketahanan pangan nasional. Selain itu, metode klasifikasi unsupervised menggunakan data Sentinel-1 SAR juga telah dikembangkan dan diuji untuk pemetaan area sawah dan pola genangannya di Indonesia, salah satunya di Bali, yang menunjukkan akurasi yang baik.

Contoh-contoh ini menunjukkan adanya inovasi dan penyesuaian teknologi penginderaan jauh untuk menjawab tantangan spesifik Indonesia. Kemampuan untuk mengembangkan pendekatan yang disesuaikan dengan konteks lokal akan menentukan keberhasilan penerapan teknologi penginderaan jauh di Indonesia di masa depan. Berikut adalah tabel yang merangkum program dan satelit penginderaan jauh utama di Indonesia:

Tabel 9.4 Program dan Satelit Penginderaan Jauh Utama di Indonesia

Nama Program/ Satelit	Lembaga/ Operator	Tahun Peluncuran/ Status	Misi Utama/ Sensor Kunci	Kontribusi/ Manfaat bagi Indonesia
LAPAN-A1 (LAPAN-TUBsat)	LAPAN (kini BRIN)	Diluncurkan 2007 (Non- aktif)	Eksperimen teknologi satelit mikro, Observasi Bumi (kamera video).	Pembangunan kapasitas awal SDM dan teknologi satelit.
LAPAN-A2 (LAPAN-ORARI)	LAPAN (kini BRIN)	Diluncurkan 2015 (Operasional)	Observasi Bumi (kamera RGB), Pemantauan Maritim (AIS).	Peningkatan pengawasan maritim, dukungan komunikasi darurat.
LAPAN-A3 (LAPAN-IPB)	LAPAN (kini BRIN) / IPB	Diluncurkan 2016 (Operasional)	Penginderaan Jauh Eksperimental (kamera multispektral), Pemantauan Maritim (AIS).	Data multispektral untuk sumber daya alam, platform riset.
Proyeksi Konstelasi Satelit BRIN	BRIN	Perencanaan (target peluncuran bertahap di masa depan)	Penginderaan Jauh Radar (SAR) untuk pemantauan lingkungan, sumber daya alam, dan bencana.	Kemandirian data nasional, pemantauan wilayah tertutup awan (tropis), kedaulatan data.

9.5 Tantangan Utama di Era Modern (Big Data, Etika, SDM)

Meskipun kemajuan teknologi sangat cepat, tantangan di era modern telah bergeser dari sekadar akuisisi data menjadi masalah tata kelola, pemrosesan, dan pemanfaatan yang bertanggung jawab.

9.5.1 Tantangan Big Data Geospasial dan Infrastruktur

Volume data penginderaan jauh terus meningkat secara eksponensial, mencapai petabyte atau bahkan eksabyte. Mengelola, menyimpan, mentransmisikan, dan memproses data yang memiliki Volume, Velocity, dan Variety yang tinggi ini memerlukan infrastruktur komputasi performa tinggi (HPC). Tantangan teknis utama adalah interoperabilitas. Data yang dikumpulkan dari berbagai sensor (optik, SAR, LiDAR) memiliki resolusi, format, dan kalibrasi yang sangat heterogen, yang menghambat upaya fusi data dan analisis skala besar yang mulus. Upaya standarisasi, seperti pengembangan konsep *Analysis Ready Data* (ARD), menjadi sangat mendesak untuk memungkinkan analisis GeoAI skala planet yang efisien. Selain itu, biaya tinggi data resolusi sangat tinggi (komersial) tetap menjadi penghalang signifikan bagi negara-negara berkembang, mempertahankan kesenjangan digital meskipun ada ketersediaan data terbuka.

9.5.2 Isu Etika, Privasi, dan Keamanan Data

Peningkatan resolusi spasial hingga mampu mengidentifikasi objek seukuran manusia atau kendaraan menimbulkan kekhawatiran serius terkait privasi dan keamanan data. Risiko pengawasan massal dan penyalahgunaan data untuk tujuan tidak etis, seperti spionase, memerlukan kerangka regulasi dan etika yang ketat.

Isu etika meluas hingga ke pertanyaan mendasar mengenai kepemilikan data—siapa yang memiliki hak atas data citra satelit yang diambil di atas wilayah kedaulatan suatu negara oleh entitas asing. Selain itu, ketergantungan pada model *deep learning* yang kompleks (*black box*) menimbulkan risiko bias algoritmik jika data pelatihan yang digunakan tidak representatif, yang berpotensi melanggengkan atau memperburuk ketidaksetaraan sosial. Pengembangan kerangka kerja hukum dan etika harus berpacu dengan laju inovasi teknologi untuk memastikan penggunaan teknologi yang bertanggung jawab.

9.5.3 Kebutuhan Sumber Daya Manusia (SDM) dan Kapasitas

Teknis

Meskipun AI dan ML bertujuan untuk mengotomatisasi tugas-tugas rutin, otomatisasi ini justru mengubah tuntutan keterampilan dan meningkatkan kebutuhan akan SDM yang sangat terampil. Ada permintaan tinggi untuk ahli GeoAI, ilmu data, dan pengembang perangkat lunak, serta pakar domain yang mampu melakukan interpretasi kritis dan validasi hasil model AI yang kompleks. Kekurangan tenaga ahli ini, terutama di negara berkembang, menghambat pemanfaatan teknologi secara optimal. Oleh karena itu, investasi yang berkelanjutan dalam pendidikan, pelatihan, dan transfer pengetahuan internasional sangat krusial untuk membangun fondasi kapasitas SDM yang kuat.

Tabel 9.5 Tantangan Utama Masa Depan Penginderaan Jauh dan Potensi Solusinya

Tantangan Utama	Deskripsi Rinci Tantangan	Potensi Solusi/Strategi Mitigasi
<i>Big Data</i> Geospasial & Infrastruktur	Volume data masif, kecepatan tinggi, heterogenitas format, kebutuhan komputasi besar, isu interoperabilitas.	<i>Cloud computing, edge processing</i> , standarisasi format data (ARD), fusi data cerdas.
Isu Etika, Privasi, & Keamanan	Potensi penyalahgunaan untuk pengawasan massal, pelanggaran privasi, isu kepemilikan data, bias algoritmik.	Pengembangan kerangka hukum & regulasi yang kuat, pedoman etika penggunaan AI, teknik anonimisasi data, audit algoritma.
Kebutuhan Peningkatan Kapasitas SDM	Kekurangan tenaga ahli dalam analisis data, ilmu data, dan interpretasi kritis hasil model AI yang kompleks.	Investasi dalam pendidikan & pelatihan GeoAI, transfer pengetahuan melalui kerjasama internasional, pengembangan kurikulum yang relevan.
Aksesibilitas Data Komersial	Biaya tinggi data resolusi sangat tinggi menjadi penghalang bagi negara berkembang.	Kebijakan data terbuka (Landsat, Copernicus), skema lisensi data yang terjangkau, investasi infrastruktur TIK.

9.6 Rangkuman Bab

Penginderaan jauh telah bertransformasi menjadi alat yang fundamental dan tak tergantikan dalam memantau dan mengelola planet Bumi. Fokus masa depan telah bergerak melampaui sekadar akuisisi. Tantangan utama kini adalah bagaimana mengubah *Big Data* yang masif menjadi *Smart Data*—data yang telah diolah, dianalisis, dan diinterpretasikan—dan selanjutnya menjadi *Actionable Knowledge*—pengetahuan yang dapat ditindaklanjuti untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dan lebih cepat. Visi masa depan diwujudkan melalui inisiatif ambisius seperti *Digital Twin Earth* (DestinE) yang menjanjikan simulasi strategis sistem Bumi, serta adopsi pemrosesan AI *on-board* yang mendefinisikan sistem observasi otonom dan prediktif. Prospek Penginderaan Jauh akan semakin cerah, dengan kontribusi yang semakin mendalam pada isu-isu global krusial, termasuk mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG), ketahanan pangan, dan mitigasi perubahan iklim. Keberhasilan aplikasi ini sangat bergantung pada integrasi yang baik antara Penginderaan Jauh dengan GIS, IoT, AI, dan pemodelan numerik.

Masa depan Penginderaan Jauh menuntut pendekatan yang holistik. Keberhasilan dalam menghasilkan *Actionable Knowledge* yang relevan dan dapat dipercaya akan bergantung pada kolaborasi erat antara ilmuwan data, pakar domain di berbagai bidang (lingkungan, pertanian), pembuat kebijakan, dan sektor industri. Kolaborasi ini merupakan keharusan struktural, bukan sekadar pilihan, untuk mengatasi tantangan yang semakin kompleks. Meskipun inovasi teknologi terus berlanjut, fondasi kemajuan ilmiah, yaitu ketersediaan arsip data historis yang konsisten (seperti yang disediakan oleh program Landsat), harus terus didukung pendanaan jangka panjang. Arsip ini penting untuk melatih model AI agar mampu mendeteksi dan memahami perubahan lingkungan jangka panjang. Selain aspek teknis,

tata kelola yang bertanggung jawab adalah kunci. Sebagaimana ditekankan oleh pimpinan BRIN, Indonesia perlu fokus pada fundamental dan membangun kemampuan untuk memproduksi data besar sendiri (kedaulatan data), alih-alih hanya terpesona pada teknologi yang bersifat *gimmick* seperti AI. Komitmen terhadap penggunaan yang etis, pengembangan kerangka hukum yang memadai, dan peningkatan kapasitas SDM yang berkelanjutan adalah prasyarat untuk memastikan bahwa Penginderaan Jauh dimanfaatkan secara maksimal dan bertanggung jawab bagi kemajuan bangsa Indonesia dan kesejahteraan masyarakat global.

Daftar Istilah Kunci (Glosarium)

Berikut adalah daftar beberapa istilah kunci yang telah diperkenalkan dan dibahas dalam bab ini, beserta definisi singkatnya. Pemahaman istilah-istilah ini akan sangat membantu dalam mempelajari materi penginderaan jauh lebih lanjut.

- **Absorpsi (Serapan):** Proses di mana energi elektromagnetik diserap oleh suatu medium (misalnya, atmosfer atau objek di permukaan) dan diubah menjadi bentuk energi lain, biasanya panas.
- **Albedo:** Proporsi radiasi Matahari yang dipantulkan oleh suatu permukaan, biasanya dinyatakan sebagai rasio atau persentase.
- **Amplitudo:** Simpangan maksimum gelombang dari posisi kesetimbangannya; berkaitan dengan intensitas energi gelombang.
- **Atmosferik Window (Jendela Atmosfer):** Rentang panjang gelombang dalam spektrum elektromagnetik di mana atmosfer relatif transparan (serapan dan hamburan minimal), memungkinkan energi merambat melaluinya.
- **Backscatter (Hamburan Balik):** Energi elektromagnetik yang dipantulkan atau dihamburkan kembali ke arah sumber atau sensor, terutama relevan dalam sistem penginderaan jauh aktif seperti Radar.
- **Band Spektral (Saluran Spektral):** Segmen atau rentang panjang gelombang tertentu dalam spektrum elektromagnetik yang dideteksi oleh sensor.
- **DEM (Digital Elevation Model / Model Elevasi Digital):** Representasi digital dari topografi permukaan Bumi "telanjang" (tanpa vegetasi atau bangunan).
- **DSM (Digital Surface Model / Model Permukaan Digital):** Representasi digital dari ketinggian permukaan Bumi termasuk objek

di atasnya seperti bangunan dan vegetasi.

- **Elektromagnetik Spektrum (Spektrum Elektromagnetik):** Seluruh rentang panjang gelombang dan frekuensi dari radiasi elektromagnetik.
- **Emisi:** Proses pelepasan energi elektromagnetik oleh suatu objek, misalnya emisi termal.
- **Foton:** Partikel diskrit atau kuantum energi elektromagnetik.
- **Frekuensi (f):** Jumlah siklus gelombang yang melewati suatu titik per satuan waktu, diukur dalam Hertz (Hz).
- **Gelombang Elektromagnetik (GEM):** Bentuk energi yang merambat sebagai medan listrik dan magnet yang berosilasi.
- **GIS (Geographic Information System / Sistem Informasi Geografis):** Sistem komputer untuk menangkap, menyimpan, memeriksa, mengintegrasikan, memanipulasi, menganalisis, dan menampilkan data yang secara spasial mereferensikan ke Bumi.
- **Hamburan (Scattering):** Proses di mana arah rambat gelombang elektromagnetik diubah akibat interaksi dengan partikel atau molekul dalam medium.
- **Hamburan Mie:** Hamburan yang terjadi ketika ukuran partikel atmosfer sebanding dengan panjang gelombang radiasi; disebabkan oleh debu, asap, uap air.
- **Hamburan Non-selektif:** Hamburan yang terjadi ketika ukuran partikel atmosfer jauh lebih besar dari panjang gelombang radiasi; disebabkan oleh tetesan air di awan.
- **Hamburan Rayleigh:** Hamburan yang terjadi ketika ukuran partikel atmosfer jauh lebih kecil dari panjang gelombang radiasi; menyebabkan langit biru.
- **Hiperspektral:** Sensor atau data penginderaan jauh yang memiliki banyak band spektral yang sempit dan bersebelahan, mampu merekam

kurva spektral secara detail.

- **Inframerah (Infrared/IR):** Bagian dari spektrum elektromagnetik dengan panjang gelombang lebih panjang dari cahaya tampak dan lebih pendek dari gelombang mikro.
- **Inframerah Dekat (Near Infrared/NIR):** Bagian dari spektrum inframerah yang paling dekat dengan cahaya tampak (sekitar 0.7 hingga 3 μm).
- **Inframerah Termal (Thermal Infrared/TIR):** Bagian dari spektrum inframerah yang terkait dengan energi panas yang dipancarkan oleh objek (sekitar 8 hingga 15 μm).
- **Kecepatan Cahaya (c):** Kecepatan rambat gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa, sekitar 3×10^8 m/s.
- **LiDAR (Light Detection and Ranging):** Sistem penginderaan jauh aktif yang menggunakan pulsa laser untuk mengukur jarak dan membuat peta 3D permukaan.
- **Multispektral:** Sensor atau data penginderaan jauh yang memiliki beberapa band spektral (biasanya 3 hingga 15 band) yang relatif lebar.
- **Nadir:** Titik di permukaan Bumi yang berada tepat di bawah sensor atau platform penginderaan jauh.
- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):** Indeks numerik yang dihitung dari band merah dan inframerah dekat untuk mengukur kehijauan atau kesehatan vegetasi.
- **OLI (Operational Land Imager):** Sensor optik multispektral pada satelit Landsat 8 dan 9.
- **Pankromatik:** Band spektral tunggal yang sensitif terhadap rentang panjang gelombang yang lebar (biasanya mencakup sebagian besar spektrum cahaya tampak), menghasilkan citra hitam-putih dengan resolusi spasial lebih tinggi.
- **Panjang Gelombang (λ):** Jarak antara dua puncak atau dua lembah

gelombang yang berurutan.

- **Pantulan (Refleksi):** Proses di mana energi elektromagnetik dipantulkan kembali oleh permukaan suatu objek.
- **Penginderaan Jauh Aktif:** Sistem penginderaan jauh di mana sensor memancarkan energinya sendiri dan merekam energi yang dipantulkan kembali dari target.
- **Penginderaan Jauh Pasif:** Sistem penginderaan jauh di mana sensor merekam energi alami yang dipantulkan atau dipancarkan oleh target.
- **Radar (Radio Detection and Ranging):** Sistem penginderaan jauh aktif yang menggunakan gelombang radio atau mikro untuk mendeteksi objek dan mengukur jaraknya.
- **Radiasi:** Energi yang merambat dalam bentuk gelombang atau partikel.
- **Resolusi Spasial:** Ukuran area terkecil di permukaan tanah yang dapat dibedakan sebagai satu unit (piksel) dalam citra.
- **Resolusi Spektral:** Kemampuan sensor untuk membedakan interval panjang gelombang yang halus; ditentukan oleh jumlah dan lebar band spektral.
- **Resolusi Temporal:** Frekuensi waktu di mana sensor mengakuisisi citra dari area yang sama.
- **SAR (Synthetic Aperture Radar):** Jenis Radar yang menggunakan gerakan platform untuk mensimulasikan antena yang sangat panjang, menghasilkan citra beresolusi tinggi.
- **Sensor:** Alat yang digunakan untuk mendeteksi dan merekam energi elektromagnetik.
- **Spectral Signature (Tanda Spektral/Profil Spektral):** Pola unik pantulan atau emisi energi elektromagnetik oleh suatu material sebagai fungsi dari panjang gelombang.
- **SWIR (Shortwave Infrared / Inframerah Gelombang Pendek):**

Bagian dari spektrum inframerah, biasanya merujuk pada rentang sekitar 1.3 hingga 3 μm .

- **TIRS (Thermal Infrared Sensor):** Sensor inframerah termal pada satelit Landsat 8 dan 9.
- **Transmisi (Penerusan):** Proses di mana energi elektromagnetik melewati suatu medium atau objek.
- **Ultraviolet (UV):** Bagian dari spektrum elektromagnetik dengan panjang gelombang lebih pendek dari cahaya tampak dan lebih panjang dari sinar-X.
- **Visible (Cahaya Tampak):** Bagian dari spektrum elektromagnetik yang dapat dideteksi oleh mata manusia (sekitar 400 hingga 700 nm).

Daftar Pustaka

- ANDERSON, JAMES R., ERNEST E. HARDY, JOHN T. ROACH, dan RICHARD E. WITMER. 1976. *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data (Vol. 964)*. US Government Printing Office. Vol. 2001.
- Arthur Batut. 1995. *La photographie aérienne par cerf-volant (Fotografi Udara dengan Layang-layang)*. Paris: Gauthier-Villars.
- Ball, G. H., dan D. J. Hall. 1965. "ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification." *Analysis* (AD699616).
- Ball, G. H., dan D. J. Hall. 1967. "A clustering technique for summarizing multivariate data." *Behavioral science* 12(2). doi:10.1002/bs.3830120210.
- Beni Iskandar; Nanang Hanafi. 2022. "Algoritma Machine Learning Deteksi Deforestasi Hutan Hujan Tropis di Kabupaten Kotawaringin Barat." *JTIKA (Jurnal Teknologi Informasi, Komputer, dan Aplikasinya)* 4(2):194–201.
- Blaschke, T. 2010. "Object based image analysis for remote sensing." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(1):2–16. doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.
- Burnett, C., dan Thomas Blaschke. 2003. "A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis." dalam *Ecological Modelling*. Vol. 168.
- Campbell, J. B., dan R. H. Wynne. 2011. *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. 5th ed. Guilford Publications.
- Chavez, Pat S. 1988. "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data." *Remote Sensing of Environment* 24(3):459–79. doi:10.1016/0034-4257(88)90019-3.
- Comaniciu, Dorin, dan Peter Meer. 2002. "Mean shift: A robust approach toward feature space analysis." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24(5). doi:10.1109/34.1000236.
- Cracknell, Arthur P. 2018. "The development of remote sensing in the last 40 years." *International Journal of Remote Sensing* 39(23):8387–8427. doi:10.1080/01431161.2018.1550919.
- Darmawan, S., I. Carolita, dan E. Ananta. 2020. "Identification of Oil Palm Plantation on Multiscatter and Resolution of SAR Data Using Variety of Classifications Algorithm (Case Study: Asahan District, North Sumatera Province)." *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science 500(1):012075. doi:10.1088/1755-1315/500/1/012075.

- Dempster, A. P., N. M. Laird, dan D. B. Rubin. 1977. “Maximum Likelihood from Incomplete Data Via the EM Algorithm.” *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology* 39(1). doi:10.1111/j.2517-6161.1977.tb01600.x.
- D’Oliveira, Flavio Araripe, Francisco Cristovão Lourenço De Melo, dan Tessaleno Campos Devezas. 2016. “High-altitude platforms — Present situation and technology trends.” *Journal of Aerospace Technology and Management* 8(3).
- Edgar S. Gorrell. 1919. *History of the American Expeditionary Forces Air Service, 1917–1919*. Vol. Volume 1. Series A. Washington, D.C.: National Archives and Records Administration (NARA).
- Elachi, Charles, dan Jakob Van Zyl. 2021. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing, Third Edition*.
- Ernst von Hoeppner. 1921. *Deutschlands Krieg in der Luft: Ein Rückblick auf die Entwicklung und die Leistungen unserer Heeres-Luftstreitkräfte im Weltkriege (Perang Jerman di Udara: Tinjauan Perkembangan dan Prestasi Angkatan Udara Angkatan Darat Kita dalam Perang Dunia)*. Leipzig .
- Ester, Martin, Hans Peter Kriegel, Jorg Sander, dan Xiaowei Xu. 1996. “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise.” dalam *Proceedings - 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD 1996*.
- Estes, J. E., E. J. Hajic, dan L. R. Tinney. 1983. “Fundamentals of image analysis: analysis of visible and thermal infrared data.” *Manual of remote sensing, 2nd edition. Vol. I*.
- European Space Agency. 2025. “ESA - The Sentinel missions.” https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions.
- Evans, Charles M. .. 2002. *The war of the aeronauts: a history of ballooning during the Civil War*. Stackpole Books.
- Faisal, Moh, dan Lalu Muhamad Jaelani. 2023. “Spatio-temporal analysis of nitrogen dioxide (NO₂) from Sentinel-5P imageries using Google Earth Engine changes during the COVID-19 social restriction policy in jakarta.” *Natural Hazards Research* 3(2):344–52. doi:10.1016/j.nhres.2023.02.006.

- Al Fathoni, Hanif, Achmad Junaidi, dan Firza Prima Aditiawan. 2025. "KLASIFIKASI TUTUPAN LAHAN PADA CITRA SENTINEL-2 DI KAWASAN IKN MENGGUNAKAN GOOGLE EARTH ENGINE." *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)* 9(3). doi:10.36040/jati.v9i3.13652.
- Goetz, Alexander F. H., Gregg Vane, Jerry E. Solomon, dan Barrett N. Rock. 1985. "Imaging spectrometry for earth remote sensing." *Science* 228(4704). doi:10.1126/science.228.4704.1147.
- Gonzalez, Rafael C., dan Richard E. Woods. 2018. *Digital Image Processing (4th ed)*.
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, dan Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone." *Remote Sensing of Environment* 202:18–27. doi:10.1016/J.RSE.2017.06.031.
- Hanssen, R. F. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis (Remote Sensing and Digital Image Processing)*.
- Harsono, Sonny Dwi, dan Wahyudi Hasbi. 2018. "Experimental test for receiving X-Band data LAPAN-A3 Satellite with 5.4m antenna diameter." dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 149.
- Hasbi, Wahyudi, dan Kamirul. 2020. "Tracking capability and detection probability assessment of space-based automatic identification system (AIS) from equatorial and polar orbiting satellites constellation." *IEEE Access* 8. doi:10.1109/ACCESS.2020.3029093.
- Huang, C., L. S. Davis, dan J. R. G. Townshend. 2002. "An assessment of support vector machines for land cover classification." *International Journal of Remote Sensing*. doi:10.1080/01431160110040323.
- Jaelani, Lalu Muhamad, dan Kristina Putri. 2019. "Analisis Kemampuan Citra Satelit Pleiades-1B Dalam Mengestimasi Kedalaman Perairan Gili Iyang Dengan Menerapkan Geographically Weighted Regression (Gwr)." *Geoid* 14(2):28–34. doi:10.12962%2Fj24423998.v14i2.3877.
- Jensen, John R. 2016. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 4 ed. Pearson Education.
- Jonathan W. Lillesand Thomas; Kiefer, Ralph W.; Chipman. 1999. *Remote Sensing and Image Interpretation, 4th Edition*. John Willey & Sons.
- Julius Neubronner. 1908. "Method of and Means for Taking Photographs of Landscapes from Above."

- Kaufman, Y. J. 1989. "The Atmospheric Effect on Remote Sensing and its Correction." dalam *NEEDED*.
- Kauth, R. J., dan G. S. Thomas. 1976. "The tasseled cap- A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat." dalam *Proc. the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*.
- Kevin C. Ruffner, ed. 1995. *CIA War Records Series Editor in Chief McDonald*. Washington, D.C.: Center for the Study of Intelligence Central Intelligence Agency.
- Kohonen, Teuvo. 1982. "Self-organized formation of topologically correct feature maps." *Biological Cybernetics* 43(1). doi:10.1007/BF00337288.
- Kotchenova, Svetlana Y., Eric F. Vermote, Raffaella Matarrese, dan Frank J. Klemm. 2006. "Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: path radiance." *Applied optics* 45(26):6762–74. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16926910>.
- Kruse, F. A. 2004. "Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO." dalam *Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Lab, Pasadena, CA*.
- Kusuma, Widya Liadira, Wu Chih-Da, Zeng Yu-Ting, Hepi Hapsari Handayani, dan Lalu Muhamad Jaelani. 2019. "PM2.5 Pollutant in Asia—A Comparison of Metropolis Cities in Indonesia and Taiwan." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(24):4924. doi:10.3390/ijerph16244924.
- Landis, J. Richard, dan Gary G. Koch. 1977. "The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data Published by : International Biometric Society Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/2529310>." *Biometrics* 33(1).
- Li, Xintao, Shuhan Li, Minxiao Zhao, Xin Guo, dan Tingjun Zhang. 2023. "Mapping the Shifting Focus in Remote Sensing Literature: Technology, Methodology, and Applications." *Processes* 11(2):571. doi:10.3390/pr11020571.
- Lillesand, T., R. W. Kiefer, dan J. Chipman. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley.
- Lillesand, Thomas M., Ralph W. Kiefer, dan Jonathan W. Chipman. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7 ed. John Wiley & Sons.

- Liu, Hui Qing, dan Alfredo Huete. 1995. "Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2). doi:10.1109/36.377946.
- MacQueen, J. 1967. "Some methods for classification and analysis of multivariate observations." dalam *Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Vol. 1.
- Matsushita, Bunkei, Lalu Muhamad Jaelani, Wei YANG, Yoichi Oyama, dan Takehiko FUKUSHIMA. 2016. "Long-term Monitoring of Chlorophyll-a Concentration in Lake Kasumigaura Using MERIS Data." *Journal of The Remote Sensing Society of Japan* 35(3):129–39. doi:10.11440/rssj.35.129.
- McFeeters, S. K. 1996. "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features." *International Journal of Remote Sensing* 17(7). doi:10.1080/01431169608948714.
- Muzaky, H., dan L. M. Jaelani. 2019. "Analysis of the impact of land cover on Surface Temperature Distribution: urban heat island studies in Medan and Makassar." Hlm. 12047 dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 389. IOP Publishing.
- NASA. 2025. "Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)." <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- NASA Goddard Space Flight Center. 1972. *Data Users Handbook: NASA Earth Resources Technology Satellite*. Greenbelt, Maryland: NASA.
- Nilsson, Nils J. 1965. "Learning machines; foundations of trainable pattern-classifying systems." *McGraw-Hill series in systems science*.
- Oliver, John W., Wilbur Wright, Orville Wright, dan Marvin W. McFarland. 1954. "The Papers of Wilbur and Orville Wright: Including the Chanute-Wright Letters and other Papers of Octave Chanute. Volume I, 1899-1905. Volume II, 1906-1948." *The American Historical Review* 60(1). doi:10.2307/1842810.
- Padhiary, Mrutyunjay, Pranjali Saikia, Pankaj Roy, Nabiul Hussain, dan Kundan Kumar. 2025. "A Review on Advancing Agricultural Efficiency through Geographic Information Systems, Remote Sensing, and Automated Systems." *Cureus Journal of Engineering*. doi:10.7759/s44388-024-00559-7.
- Pearson, Karl. 1901. "On lines and planes of closest fit to systems of points in space." *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2(11). doi:10.1080/14786440109462720.

- Pratama, Febryanto, dan Lalu Muhamad Jaelani. 2025. "Analysis of SO2 Emissions and Thermal Anomalies from the Eruption of Mount Lewotobi Laki-laki in November 2024 Using Google Earth Engine." *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital* 19(1):32–45. doi:10.12962/inderaja.v19i1.5968.
- Purwadhi. 2001. "Interpretasi citra digital." *Jakarta*.
- Richards, John A. 2013. *Remote sensing digital image analysis: An introduction*. Vol. 9783642300622.
- Richards, John A., dan Xiuping Jia. 2006. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. 5 ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, dan D. W. Deering. 1973. "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite)." dalam *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. Vol. 1.
- Rouse, J. W., R. Haas, J. Schell, dan D. Deering. 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA Spec. Publ 351:309.
- Russell G. Congalton and Kass Green. 2019. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices, Third Edition*. Vol. 1.
- Samadzadegan, Farhad, Ahmad Toosi, dan Farzaneh Dadrass Javan. 2025. "A critical review on multi-sensor and multi-platform remote sensing data fusion approaches: current status and prospects." *International Journal of Remote Sensing* 46(3):1327–1402. doi:10.1080/01431161.2024.2429784.
- Schott, John R. 2007. *Remote Sensing: The Image Chain Approach*. 2 ed. Oxford University Press.
- Shan, Jie, dan Charles K. Toth. 2017. *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*.
- Suryono, Hady, Arif Handoyo Marsuhandi, dan Setia Pramana. 2022. "Klasifikasi Tutupan Lahan Berdasarkan Random Forest Algorithm Menggunakan Cloud Computing Platform." *Jurnal Aplikasi Statistika & Komputasi Statistik* 14(1). doi:10.34123/jurnalasks.v14i1.383.
- Suspidayanti, Leni, dan Catur Aries Rokhmana. 2021. "IDENTIFIKASI FASE PERTUMBUHAN PADI MENGGUNAKAN CITRA SAR (SYNTHETIC APERTURE RADAR) SENTINEL-1." *Elipsoida : Jurnal Geodesi dan Geomatika* 4(01):9–15. doi:10.14710/elipsoida.2021.10729.
- Sutanto. 1987. *Penginderaan Jauh Jilid 2*. Gadjah Mada University Press.

- Swain, P. H., dan S. M. Davis. 1978. "Remote sensing: the quantitative approach." *Remote sensing: the quantitative approach*. doi:10.1109/tpami.1981.4767177.
- Syariz, Muhammad Aldila, Chao-Hung C. H. Lin, Dewinta Heriza, Umboro Lasminto, Bangun Muljo Sukojo, Lalu Muhamad Jaelani, Muhammad Aldila Syariz, Chao-Hung C. H. Lin, Dewinta Heriza, Umboro Lasminto, Bangun Muljo Sukojo, Lalu Muhamad Jaelani, Muhammad Aldila Syariz, Chao-Hung C. H. Lin, Dewinta Heriza, Umboro Lasminto, Bangun Muljo Sukojo, dan Lalu Muhamad Jaelani. 2022. "A transfer learning technique for inland chlorophyll-a concentration estimation using sentinel-3 imagery." *Applied Sciences (Switzerland)* 12(1):203. doi:10.3390/app12010203.
- Tatem, Andrew, Scott Goetz, dan Simon Hay. 2008. "Fifty Years of Earth-observation Satellites." *American Scientist* 96(5):390. doi:10.1511/2008.74.390.
- Triharjanto, R. H., W. Hasbi, A. Widipaminto, M. Mukhayadi, dan U. Renner. 2004. "LAPAN-TUBSAT: Micro-satellite platform for surveillance & remote sensing." dalam *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*.
- Triharjanto, R H, W. Hasbi, A. Widipaminto, M. Mukhayadi, dan U. Renner. 2004. "Lapan-Tubsat: micro-satellite platform for surveillance & remote sensing robertus triharjanto LAPAN-TUBSAT: Micro-Satellite Platform for Surveillance & Remote Sensing." *Proceedings of the 4S symposium: small satellites, systems and services (ESA SP-571)* (9).
- USGS. 2025. "Landsat Missions | U.S. Geological Survey." <https://www.usgs.gov/landsat-missions>.
- Voogt, Jennifer A., dan Timothy R. Oke. 2003. "Thermal remote sensing of urban areas." *Remote Sensing of Environment* 86(3):370–84.
- Wald, Lucien, Thierry Ranchin, dan Marc Mangolini. 1997. "Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63(6).
- Ward, Joe H. 1963. "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function." *Journal of the American Statistical Association* 58(301). doi:10.1080/01621459.1963.10500845.
- Weiss, M., F. Jacob, dan G. Duveiller. 2020. "Remote sensing for agricultural applications: A meta-review." *Remote Sensing of Environment* 236:111402. doi:10.1016/j.rse.2019.111402.

- Widya, Liadira Kusuma, Chin-Yu Hsu, Hsiao-Yun Lee, Lalu Muhamad Jaelani, Shih-Chun Candice Lung, Huey-Jen Su, dan Chih-Da Wu. 2020. "Comparison of Spatial Modelling Approaches on PM10 and NO2 Concentration Variations: A Case Study in Surabaya City, Indonesia." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(23):8883. doi:10.3390/ijerph17238883.
- Yuhas, Roberta H., Alexander F. H. Goetz, dan Joseph W. Boardman. 1992. "Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm." dalam *Summaries of the 4th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 92-41*.
- Yuniasih, Betti, dan Alief Rizky Purnama Adjie. 2022. "Evaluasi Kondisi Kebun Kelapa Sawit Menggunakan Indeks NDVI dari Citra Satelit Sentinel 2." *Jurnal Teknotan* 16(2):127. doi:10.24198/jt.vol16n2.10.
- Zha, Y., J. Gao, dan S. Ni. 2003. "Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery." *International Journal of Remote Sensing* 24(3):583–94. doi:10.1080/01431160304987.

LALU MUHAMAD JAELANI lulus sebagai sarjana Teknik Geodesi dari ITS Surabaya pada tahun 2003, ia melanjutkan perjalanan akademiknya hingga ke mancanegara. Ia meraih gelar magister dari National Central University, Taiwan, dan menuntaskan pendidikan doktoralnya di University of Tsukuba, Jepang, pada 2014.

Dedikasinya sebagai pengajar di Departemen Teknik Geomatika ITS telah dimulai sejak tahun 2003. Selain aktif mengajar, ia juga terlibat dalam berbagai riset dan kolaborasi global terkait penginderaan jauh dan teknologi geospasial. Komitmennya dalam menyebarkan ilmu pengetahuan tertuang dalam buku ***Konsep Dasar Penginderaan Jauh***. Buku ini disusun dengan pendekatan yang komunikatif, dirancang khusus untuk membantu pembaca memahami dasar-dasar teknologi geospasial dengan cara yang lebih mudah dicerna.