

Peran Analisis Spasial dalam Mendukung Pengelolaan Hutan Berkelanjutan di Indonesia Tahun 2005-2025: Sebuah Tinjauan Literatur

Brasti Anjani Larasari^{1*}, Farhan Reza Pahlevi¹

¹Department of Forest Management, Faculty of Agriculture and Forestry, Universitas Satya Terra Bhinneka, Medan, Indonesia

Corresponding Author: brastianjani@satyaterrabhinneka.ac.id

ABSTRAK

Analisis spasial telah menjadi instrumen sentral dalam pengelolaan hutan berkelanjutan seiring berkembangnya teknologi penginderaan jauh, Sistem Informasi Geografis (SIG), dan komputasi awan selama dua dekade terakhir. Penelitian ini bertujuan menelaah perkembangan, aplikasi, dan tantangan penggunaan analisis spasial dalam pengelolaan hutan berkelanjutan pada rentang tahun 2005–2025. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur sistematis dengan pendekatan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) yang mencakup tahap identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi terhadap artikel ilmiah terindeks Scopus dan *Science and Technology Index* (SINTA). Hasil telaah menunjukkan empat arus utama pemanfaatan analisis spasial, yaitu pemantauan deforestasi dan degradasi hutan berbasis deret waktu citra satelit, klasifikasi tutupan lahan berbasis pembelajaran mesin dan platform komputasi awan *Google Earth Engine*, evaluasi kesesuaian fungsi kawasan hutan terhadap arahan tata ruang, serta pemodelan spasial risiko kebakaran hutan dan penilaian jasa ekosistem. Kajian menemukan pergeseran paradigma yang jelas dari interpretasi visual manual dan analisis berbasis citra tunggal menuju analisis deret waktu multitemporal, algoritma klasifikasi terselia seperti *Random Forest*, serta integrasi data multisumber. Meskipun demikian, sejumlah tantangan tetap mengemuka, meliputi keterbatasan validasi lapangan, tutupan awan pada wilayah tropis, keterbandingan antarsensor, dan lemahnya integrasi hasil analisis spasial ke dalam proses pengambilan keputusan kebijakan tata ruang. Tinjauan ini menyimpulkan bahwa analisis spasial berperan strategis sebagai basis bukti (*evidence base*) bagi pengelolaan hutan lestari, namun efektivitasnya sangat bergantung pada kualitas data, transparansi metodologi, dan keterpaduan kelembagaan.

INFORMASI ARTIKEL

Analisis Spasial, Pengelolaan Hutan Berkelanjutan, Penginderaan Jarak Jauh, Sistem Informasi Geografis

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan hutan tropis terluas di dunia yang menjadi penopang keanekaragaman hayati global, penyimpan cadangan karbon, dan penyangga kehidupan jutaan penduduk. Fungsi hutan yang bersifat ganda ekologis, ekonomis, sekaligus social menempatkannya pada posisi sentral dalam pembangunan berkelanjutan nasional. Namun, dalam dua dekade terakhir hutan Indonesia menghadapi tekanan konversi lahan yang masif akibat perluasan perkebunan, pertambangan, pembukaan lahan pertanian, serta kebakaran hutan dan lahan.

Besarnya laju kehilangan tutupan hutan telah didokumentasikan secara kuantitatif oleh berbagai kajian geospasial. Margono dan kolega melaporkan bahwa Indonesia kehilangan lebih dari 6,02 juta hektar hutan primer sepanjang 2000–2012, dengan laju rata-rata yang justru meningkat dari tahun ke tahun, sehingga menempatkan Indonesia sebagai salah satu negara dengan laju kehilangan hutan primer tropis tertinggi di dunia (Margono et al., 2014). Temuan tersebut dimungkinkan berkat pemetaan berbasis rangkaian waktu citra Landsat yang, pada tingkat global, dipelopori oleh pemetaan resolusi tinggi perubahan tutupan hutan abad ke-21 (Hansen et al., 2013). Kedua kajian ini menandai titik penting ketika analisis spasial bergeser dari sekadar deskripsi visual menuju kuantifikasi yang eksplisit secara ruang dan waktu.

Permasalahan mendasar dalam pengelolaan hutan di Indonesia bukan semata-mata besarnya laju deforestasi, melainkan juga keterbatasan informasi spasial yang mutakhir, akurat, dan dapat diperbandingkan antarwaktu untuk mendukung

pengambilan keputusan. Pemantauan kawasan hutan yang membentang di ribuan pulau dengan topografi kompleks dan tutupan awan yang tinggi menuntut pendekatan yang efisien, dapat direplikasi, dan berbiaya rendah. Di sinilah analisis spasial berbasis penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) memainkan peran yang tidak tergantikan.

Sepanjang periode 2005–2025, kemampuan analisis spasial berkembang secara dramatis. Pembukaan akses gratis arsip Landsat pada 2008, peluncuran misi Sentinel-2 pada 2015, serta kehadiran platform komputasi awan *Google Earth Engine* yang matang pada 2017 (Gorelick et al., 2017) telah menghapus banyak hambatan komputasi dan biaya yang sebelumnya membatasi analisis skala besar. Bersamaan dengan itu, algoritma pembelajaran mesin khususnya *Random Forest* (Breiman, 2001; Belgiu & Drăguț, 2016) semakin lazim digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan karena keandalannya menangani data berdimensi tinggi dan hubungan non-linear.

Meskipun jumlah publikasi yang memanfaatkan analisis spasial untuk kehutanan Indonesia meningkat pesat, sintesis yang menyeluruh mengenai bagaimana perkembangan teknologi ini benar-benar mendukung pengelolaan hutan berkelanjutan masih terbatas. Sebagian besar kajian bersifat studi kasus tunggal pada lokasi tertentu, sementara pemetaan menyeluruh terhadap evolusi metode, ragam aplikasi tematik, capaian akurasi, serta kesenjangan yang tersisa belum banyak dilakukan secara terintegrasi. Kesenjangan pengetahuan inilah yang menjadi celah yang hendak diisi oleh tinjauan ini.

Pendorong deforestasi di Indonesia bersifat multidimensi, melibatkan interaksi antara faktor ekonomi, demografi, dan kebijakan. Pertumbuhan penduduk dan permintaan komoditas global sebagaimana dijelaskan pada tingkat global oleh DeFries et al. (2010) mendorong ekspansi lahan pertanian dan perkebunan yang menekan kawasan hutan. Di Indonesia, ekspansi kelapa sawit merupakan salah satu penggerak utama konversi hutan tropis, dengan konsekuensi emisi gas rumah kaca yang signifikan (Ramdani & Hino, 2013). Kompleksitas pendorong ini menuntut instrumen pemantauan yang mampu menangkap dinamika ruang secara berkala dan objektif, dan analisis spasial menjawab kebutuhan tersebut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk: (1) memetakan evolusi teknologi dan metode analisis spasial yang diterapkan pada kehutanan Indonesia selama 2005–2025; (2) mengidentifikasi ragam aplikasi tematik analisis spasial dalam mendukung pengelolaan hutan berkelanjutan; dan (3) merangkum tantangan serta arah pengembangan ke depan. Tinjauan ini diharapkan menjadi rujukan konseptual bagi peneliti, perencana tata ruang, dan pengambil kebijakan kehutanan, sekaligus melengkapi kajian-kajian studi kasus tunggal yang selama ini mendominasi literatur dengan sebuah sintesis yang lebih integratif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengelolaan Hutan Berkelanjutan

Pengelolaan hutan berkelanjutan (*sustainable forest management*) dipahami sebagai pengelolaan sumber daya hutan yang mempertahankan produktivitas, keanekaragaman hayati, kapasitas regenerasi, serta vitalitas ekosistem secara berkeadilan bagi generasi

kini dan mendatang. Konsep ini bertumpu pada keseimbangan tiga pilar, yaitu kelestarian ekologi, kelayakan ekonomi, dan keadilan sosial. Dalam praktiknya, keberlanjutan menuntut ketersediaan informasi kondisi hutan yang akurat dan berkelanjutan sebagai dasar pemantauan capaian dan penentuan intervensi.

Dalam konteks Indonesia, prinsip keberlanjutan diterjemahkan ke dalam kerangka kebijakan kehutanan dan tata ruang, termasuk pembagian fungsi kawasan hutan menjadi hutan lindung, hutan produksi, dan hutan konservasi, serta pengaturannya dalam Rencana Tata Ruang Wilayah. Operasionalisasi prinsip-prinsip ini memerlukan pemantauan berkala terhadap perubahan tutupan lahan dan kesesuaian pemanfaatan ruang dengan arahan fungsi kawasannya. Ketika data tersebut tidak tersedia atau tidak konsisten, keputusan pengelolaan berisiko keliru; sebaliknya, ketika data spasial yang andal tersedia, keberlanjutan dapat dikelola secara adaptif berdasarkan bukti.

2.2. Analisis Spasial, Penginderaan Jarak Jauh, dan Sistem Informasi Geografis

Analisis spasial merupakan sekumpulan teknik untuk mengkaji fenomena geografis berdasarkan posisi, atribut, dan keterkaitan ruangnya. Dalam konteks kehutanan, analisis spasial banyak bertumpu pada penginderaan jauh sebagai sumber data dan SIG sebagai lingkungan pemrosesan serta analisis (Danoedoro, 2012). Penginderaan jauh memungkinkan perekaman kondisi permukaan bumi secara berkala tanpa kontak langsung, sedangkan SIG memfasilitasi operasi tumpang susun (*overlay*), pengukuran jarak, analisis kepadatan, hingga pemodelan kesesuaian lahan. Kombinasi

keduanya menghasilkan informasi tutupan lahan, laju perubahan, serta pola spasial yang menjadi bahan baku perencanaan.

Operasi analisis spasial yang relevan bagi kehutanan mencakup, antara lain: klasifikasi citra untuk memetakan tutupan lahan; deteksi perubahan (*change detection*) untuk mengukur konversi hutan antarwaktu; analisis tumpang susun berbobot untuk menilai kesesuaian atau kerawanan; analisis tetangga dan kepadatan untuk memetakan konsentrasi gangguan seperti titik panas; serta analisis fragmentasi untuk menilai keutuhan bentang hutan. Setiap operasi menghasilkan keluaran yang berbeda namun saling melengkapi, sehingga pemilihannya bergantung pada pertanyaan pengelolaan yang hendak dijawab. Karakteristik data resolusi spasial, resolusi temporal, dan resolusi spektral turut menentukan ketepatan hasil analisis.

2.3. Klasifikasi Citra dan Machine Learning

Klasifikasi citra adalah proses mengubah nilai piksel citra menjadi kelas tutupan lahan yang bermakna. Pendekatan terbimbing (*supervised*) yang memanfaatkan algoritma pembelajaran mesin kini mendominasi, menggantikan interpretasi visual manual yang bersifat subjektif dan padat karya. *Random Forest*, sebuah metode ensemble berbasis banyak pohon keputusan (Breiman, 2001), terbukti unggul dan stabil untuk klasifikasi penginderaan jauh karena tahan terhadap data pencilan serta mampu menangani banyak variabel prediktor sekaligus (Belgiu & Drăguț, 2016). Ketepatan hasil klasifikasi lazim dinilai melalui matriks konfusi dengan indikator akurasi keseluruhan (*overall accuracy*) dan koefisien Kappa (Congalton & Green, 2019).

2.4. Kesesuaian Tata Ruang dan Fungsi Kawasan Hutan

Untuk menautkan hasil analisis spasial dengan keputusan pengelolaan, dua kerangka teori kerap digunakan. Pertama, kerangka evaluasi lahan yang menilai kesesuaian penggunaan lahan terhadap karakteristik biofisiknya (FAO, 1976). Kedua, teori kesesuaian rencana (*plan conformance*) yang mengevaluasi sejauh mana kondisi aktual di lapangan selaras dengan arahan yang tertuang dalam rencana tata ruang. Kedua kerangka ini menjadikan analisis spasial bukan sekadar alat pemetaan, melainkan instrumen evaluasi kebijakan yang menghasilkan masukan bagi penyempurnaan rencana.

Pengelolaan hutan di Indonesia tidak dapat dilepaskan dari kerangka penataan ruang. Penetapan fungsi kawasan hutan lindung, produksi, atau konservasi idealnya didasarkan pada karakteristik biofisik seperti kemiringan lereng, jenis tanah, dan intensitas curah hujan, yang kemudian diselaraskan dengan arahan pemanfaatan ruang. Analisis spasial menyediakan sarana untuk menilai apakah fungsi kawasan yang ditetapkan secara administratif telah sesuai dengan kondisi biofisik dan tutupan lahan aktualnya. Ketidaksesuaian antara arahan fungsi, kondisi biofisik, dan tutupan lahan aktual menjadi indikasi penting yang dapat menjadi masukan bagi revisi rencana tata ruang. Dengan demikian, teori evaluasi lahan dan teori kesesuaian rencana bekerja secara komplementer: yang pertama menilai kelayakan biofisik, yang kedua menilai keselarasan implementasi terhadap rencana.

3. METODE, DATA, DAN ANALISIS

Penelitian ini merupakan tinjauan literatur sistematis (*systematic literature review*) yang mengikuti

protokol *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) sebagaimana dirumuskan oleh Moher et al. (2009). Metode PRISMA dipilih karena menyediakan kerangka pelaporan yang transparan, sistematis, dan dapat direplikasi, sehingga proses seleksi literatur dapat ditelusuri dan dinilai kualitasnya. Prosedur tinjauan dilaksanakan melalui empat tahap berurutan, yaitu identifikasi (*identification*), penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), dan inklusi (*inclusion*).

Pada tahap identifikasi, pencarian literatur dilakukan terhadap basis data ilmiah bereputasi, terutama Scopus untuk jurnal internasional dan *Science and Technology Index* (SINTA) untuk jurnal nasional terakreditasi. Kata kunci yang digunakan mencakup kombinasi istilah dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris, antara lain “analisis spasial”, “penginderaan jauh”, “Sistem Informasi Geografis”, “pengelolaan hutan berkelanjutan”, *spatial analysis*, *remote sensing*, GIS, *sustainable forest management*, *land cover classification*, dan *deforestation monitoring*. Operator Boolean (AND, OR) digunakan untuk memperluas dan mempersempit cakupan pencarian sesuai kebutuhan.

Tahap penyaringan dilakukan dengan menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel dipublikasikan pada rentang tahun 2005 hingga 2025; (2) artikel terbit pada jurnal terindeks Scopus atau terakreditasi SINTA; (3) artikel membahas penerapan analisis spasial, penginderaan jauh, atau SIG dalam konteks kehutanan atau tutupan lahan; dan (4) tersedia dalam teks lengkap. Kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak relevan dengan tema, duplikasi, serta publikasi yang tidak memenuhi standar indeksasi yang ditetapkan. Penyaringan dilakukan dengan

membaca judul dan abstrak untuk menilai relevansi awal.

Pada tahap penilaian kelayakan, teks lengkap artikel yang lolos penyaringan ditelaah secara mendalam untuk memastikan kesesuaian dengan pertanyaan penelitian. Aspek yang diperhatikan mencakup kejelasan metode analisis spasial, jenis data dan sensor yang digunakan, algoritma pengolahan, serta kontribusi terhadap pengelolaan hutan berkelanjutan. Artikel yang memenuhi seluruh kriteria kemudian dimasukkan ke dalam sintesis (tahap inklusi). Ekstraksi data dilakukan secara tabular dengan mencatat identitas penulis, tahun terbit, wilayah kajian, jenis data, metode analisis, serta temuan utama.

Analisis dilakukan secara kualitatif-tematik, yaitu dengan mengelompokkan temuan literatur ke dalam tema-tema utama yang muncul secara berulang, kemudian menyintesisnya menjadi narasi yang menggambarkan perkembangan, pola aplikasi, dan tantangan. Pendekatan tematik dipilih karena keragaman metode dan konteks studi pada literatur yang ditinjau tidak memungkinkan sintesis kuantitatif (meta-analisis) yang setara. Dengan demikian, tinjauan ini menekankan pemahaman menyeluruh terhadap arah dan dinamika keilmuan, bukan penggabungan statistik antarstudi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perkembangan Teknologi dan Metode Analisis Spasial Tahun 2005-2025

Perkembangan analisis spasial untuk kehutanan pada dua dekade terakhir dapat dibaca sebagai lintasan menuju kemampuan analisis yang semakin besar cakupannya, semakin sering pembaruannya, dan semakin tinggi akurasinya. Pada awal periode, Boyd dan Danson (2005) mencatat bahwa

penginderaan jauh sumber daya hutan telah melalui tiga dekade pengembangan riset, dengan penekanan pada pemetaan tutupan, estimasi parameter tegakan, dan deteksi perubahan menggunakan citra optik resolusi menengah. Pada masa itu, citra Landsat menjadi tulang punggung karena arsipnya yang panjang dan ketersediaannya yang luas.

Di Indonesia, kajian pada dekade pertama periode ini banyak memanfaatkan citra Landsat untuk pemetaan tutupan lahan dan pemantauan hutan. Sitanggang (2010) mengulas prospek pemanfaatan satelit generasi baru, termasuk misi *Landsat Data Continuity Mission* (kelak Landsat-8), yang menjanjikan kontinuitas data bagi aplikasi kehutanan dan lingkungan. Kontinuitas arsip inilah yang kemudian menjadi prasyarat penting bagi analisis deret waktu (*time-series*) yang mampu menangkap dinamika tutupan hutan secara historis.

Transformasi paling menonjol terjadi ketika metode analisis bergeser dari citra tunggal menuju deret waktu multitemporal, dan dari interpretasi visual menuju klasifikasi berbasis algoritma. Purwanto dan Lukiawan (2019) menyoroti perlunya standarisasi metode klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) agar hasil pengolahan penginderaan jauh memiliki kualitas yang terjaga. Klasifikasi terbimbing, yang memanfaatkan sampel pelatihan (*training samples*) untuk melatih algoritma mengenali kelas tutupan lahan, menjadi standar de facto karena menghasilkan luaran yang lebih objektif dan dapat direplikasi dibandingkan interpretasi visual yang bergantung pada keahlian penafsir.

Puncak transformasi ini ditandai oleh kehadiran platform komputasi awan, khususnya *Google Earth Engine* (GEE), yang memungkinkan pengguna

mengakses dan mengolah volume data satelit yang sangat besar tanpa harus mengunduhnya ke perangkat lokal. Phan et al. (2020) menegaskan bahwa GEE mampu mengatasi kendala terbesar dalam pemetaan tutupan lahan wilayah luas, yaitu keterbatasan penyimpanan dan kapasitas pemrosesan. Melalui GEE, seluruh citra yang tersedia dapat dianalisis dalam lingkungan pengembangan berbasis web, sehingga proses seleksi, komposit, dan klasifikasi menjadi jauh lebih efisien. Pergeseran ini secara efektif mendemokratisasi analisis spasial: peneliti dengan sumber daya komputasi terbatas kini dapat melakukan analisis skala regional hingga nasional.

4.2. Pemantauan Deforestasi dan Degradasi Hutan

Aplikasi analisis spasial yang paling matang dan berdampak luas adalah pemantauan deforestasi dan degradasi hutan. Kemampuan citra satelit untuk merekam kondisi permukaan bumi secara berkala menjadikannya instrumen ideal untuk mendeteksi kehilangan dan perubahan tutupan hutan lintas waktu. Margono et al. (2012) memetakan dan memantau deforestasi serta degradasi hutan di Sumatra menggunakan deret waktu citra Landsat pada periode 1990–2010, dan menunjukkan bahwa pendekatan multitemporal mampu membedakan hutan primer, hutan terdegradasi, dan lahan nonhutan secara lebih rinci daripada peta tutupan statis.

Kajian yang lebih komprehensif dilakukan Margono et al. (2014), yang mengukur kehilangan hutan primer Indonesia secara eksplisit secara spasial dan temporal untuk periode 2000–2012. Temuan mereka menunjukkan total kehilangan lebih dari enam juta hektare hutan primer dengan

laju yang meningkat rata-rata sekitar 47.600 hektare per tahun, dan proporsi kehilangan yang tinggi terjadi pada lanskap lahan basah serta di dalam kawasan yang secara resmi membatasi atau melarang pembukaan hutan. Temuan ini memiliki implikasi kebijakan yang mendalam karena menunjukkan bahwa moratorium dan status perlindungan formal belum sepenuhnya efektif tanpa pengawasan spasial yang ketat. Secara metodologis, kajian tersebut dimungkinkan oleh kemajuan pemetaan global yang dipelopori Hansen et al. (2013), yang menghasilkan peta perubahan tutupan hutan global resolusi tinggi untuk abad ke-21 dan menjadi rujukan dasar bagi banyak analisis turunan di berbagai negara.

Pada konteks nasional, pemanfaatan analisis spasial untuk pemantauan sumber daya hutan juga berkembang di lingkungan lembaga dan akademisi Indonesia. Margono (2016) mengulas kemajuan pemantauan sumber daya hutan Indonesia yang memadukan berbagai sumber citra untuk meningkatkan akurasi dan cakupan pemantauan. Studi-studi berskala lokal turut memperkaya khazanah ini, misalnya melalui analisis spasial deforestasi dan degradasi hutan pada kawasan konservasi yang mengombinasikan interpretasi citra dengan analisis tumpang susun untuk mengidentifikasi lokasi dan pemicu kehilangan hutan (Dariono, 2018). Pola yang konsisten di berbagai studi ini menegaskan bahwa analisis spasial multitemporal telah menjadi metode baku untuk kuantifikasi perubahan tutupan hutan.

4.3. Klasifikasi Tutupan Lahan Berbasis Machine Learning dan Komputasi Awan

Akurasi klasifikasi tutupan lahan merupakan fondasi bagi seluruh analisis turunan dalam

pengelolaan hutan, karena kesalahan pada tahap klasifikasi akan merambat ke seluruh analisis berikutnya. Oleh karena itu, sebagian besar riset mutakhir memusatkan perhatian pada peningkatan akurasi melalui pemilihan algoritma, penyusunan komposit citra, dan integrasi data multisumber. Di antara berbagai algoritma pembelajaran mesin, *Random Forest* (RF) muncul sebagai metode yang paling banyak digunakan karena kemampuannya menangani data berdimensi tinggi, ketahanannya terhadap pencilan, serta akurasi yang konsisten tinggi.

Phan et al. (2020) melakukan kajian sistematis mengenai peran komposisi citra dalam klasifikasi tutupan lahan berbasis GEE dan *Random Forest*. Temuan pentingnya adalah bahwa metode agregasi temporal, seperti penggunaan nilai median dari deret waktu citra, tidak hanya mengurangi volume data secara signifikan sehingga analisis menjadi lebih cepat dan mudah, tetapi juga menghasilkan akurasi yang setara dengan penggunaan seluruh deret waktu citra. Temuan ini berimplikasi praktis besar bagi wilayah tropis seperti Indonesia, di mana tutupan awan yang tinggi menjadi kendala utama; komposit median dari banyak citra memungkinkan penyusunan citra bebas awan yang representatif untuk klasifikasi.

Kombinasi GEE dan *Random Forest* kini menjadi kerangka kerja standar dalam banyak studi tutupan lahan multitalahun. Pendekatan ini memungkinkan klasifikasi konsisten pada sejumlah titik waktu, misalnya pada interval sepuluh tahunan, sehingga perubahan tutupan lahan dapat dianalisis secara sistematis. Keandalan hasil klasifikasi lazim dinilai melalui matriks konfusi (*confusion matrix*) yang menghasilkan indikator akurasi keseluruhan (*overall*

accuracy) dan koefisien Kappa. Nilai akurasi keseluruhan yang tinggi disertai dominasi nilai pada diagonal matriks menandakan bahwa algoritma mampu membedakan kelas tutupan lahan dengan baik. Praktik pelaporan matriks konfusi ini menjadi standar keandalan yang membedakan analisis spasial ilmiah dari sekadar pemetaan deskriptif.

Selain pemilihan algoritma, kualitas praproses (*preprocessing*) menjadi faktor penentu akurasi. Pada wilayah tropis, penapisan awan dan bayangan awan menggunakan pita penilaian kualitas (*quality assessment band*) merupakan langkah krusial untuk menghindari kesalahan klasifikasi yang menghasilkan transisi tutupan lahan yang tidak masuk akal, misalnya perubahan dari hutan menjadi permukiman lalu kembali menjadi hutan pada rentang waktu berurutan. Kesalahan semacam ini kerap disebabkan oleh artefak awan pada citra komposit tahun tunggal, dan dapat direduksi dengan memperluas jendela temporal komposit serta menerapkan penapisan awan yang ketat. Perhatian pada detail praproses inilah yang membedakan analisis spasial yang andal dari analisis yang menghasilkan kesimpulan menyesatkan.

4.4. Analisis Spasial untuk Evaluasi Fungsi Kawasan Hutan dan Perencanaan Tata Ruang

Salah satu peran analisis spasial yang semakin penting namun kerap kurang tersorot adalah dukungannya terhadap evaluasi kesesuaian fungsi kawasan hutan dan perencanaan tata ruang. Pengelolaan hutan berkelanjutan tidak hanya menuntut informasi mengenai kondisi tutupan lahan aktual, tetapi juga mengenai kesesuaian antara kondisi biofisik lahan, fungsi kawasan yang

ditetapkan, dan arahan pemanfaatan ruang dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW).

Analisis spasial memungkinkan penentuan fungsi kawasan hutan secara biofisik melalui metode skoring dan pembobotan terhadap parameter seperti kemiringan lereng, kepekaan tanah terhadap erosi, dan intensitas curah hujan. Parameter-parameter tersebut ditumpangsusunkan dalam SIG untuk menghasilkan arahan fungsi kawasan (misalnya hutan lindung, hutan produksi terbatas, atau areal penggunaan lain). Pendekatan skoring-pembobotan yang sama telah lama diterapkan dalam pemodelan spasial di bidang kehutanan dan kebencanaan. Widodo (2014), misalnya, menggunakan analisis spasial berbasis pembobotan untuk memodelkan risiko kebakaran hutan di Provinsi Jambi, yang menunjukkan bahwa metode overlay terbobot dapat mensintesis banyak variabel biofisik menjadi satu keluaran arahan atau zonasi yang informatif bagi pengambil keputusan.

Hasil penentuan fungsi kawasan secara biofisik dapat dibandingkan dengan penetapan fungsi kawasan resmi dan dengan arahan RTRW melalui analisis tumpang susun tiga lapis (tutupan lahan aktual, fungsi kawasan biofisik, dan arahan tata ruang). Analisis ini menghasilkan matriks kesesuaian yang mengklasifikasikan ruang ke dalam kategori sesuai, sesuai bersyarat, dan tidak sesuai. Kerangka evaluasi semacam ini memberikan basis bukti yang kuat untuk mengidentifikasi ketidaksesuaian antara kondisi lapangan, fungsi yang ditetapkan, dan rencana pemanfaatan ruang, sehingga dapat menjadi masukan bagi revisi kebijakan tata ruang. Dengan demikian, analisis spasial tidak berhenti pada deskripsi kondisi,

melainkan menjembatani antara data biofisik dan proses perencanaan kebijakan.

Peran ini menjadi semakin relevan mengingat kerap ditemukannya diskrepansi antarbasis regulasi tata ruang dan penetapan kawasan hutan. Ketidaksesuaian luas kawasan pada berbagai dokumen acuan, perbedaan antara hasil skoring biofisik dan penetapan fungsi kawasan resmi, serta dinamika perubahan tutupan lahan aktual merupakan persoalan yang hanya dapat diurai secara meyakinkan melalui pendekatan spasial yang eksplisit. Analisis spasial menyediakan bukti terukur mengenai lokasi, luas, dan besaran ketidaksesuaian tersebut, sehingga memperkuat objektivitas dalam proses evaluasi dan penyempurnaan rencana tata ruang.

4.5. Pemodelan Risiko Kebakaran Hutan dan Penilaian Jasa Ekosistem

Kebakaran hutan dan lahan merupakan salah satu ancaman terbesar bagi kelestarian hutan tropis Indonesia, dan analisis spasial telah terbukti sebagai instrumen efektif untuk memetakan kerawanan serta mendukung mitigasi. Pendekatan yang umum digunakan adalah analisis tumpang susun terbobot terhadap sejumlah parameter pemicu kebakaran, seperti tutupan lahan, jarak dari jalan, jarak dari sungai, kemiringan lereng, jenis tanah, suhu permukaan, dan curah hujan. Humam et al. (2020) mengidentifikasi daerah kerawanan kebakaran hutan dan lahan di kawasan Tanjung Jabung Barat, Provinsi Jambi, dengan mengombinasikan SIG dan penginderaan jauh melalui proses weighted overlay atas tujuh parameter, sehingga menghasilkan peta zonasi kerawanan yang dapat menjadi dasar prioritas pengawasan.

Widodo (2014) memperkuat pendekatan ini dengan pemodelan spasial risiko kebakaran yang mempertimbangkan komponen ancaman, kerentanan, dan kapasitas penanggulangan, sehingga keluaran analisis tidak hanya menunjukkan lokasi rawan tetapi juga tingkat risiko yang mempertimbangkan kesiapan wilayah. Selain pemodelan kerawanan berbasis parameter statis, pemantauan titik panas (*hotspot*) secara near real-time juga berkembang. Hidayat et al. (2019) mengembangkan penyajian informasi sebaran titik panas berbasis WebGIS untuk pemantauan kebakaran hutan dan lahan di Indonesia, yang memungkinkan diseminasi informasi spasial secara cepat kepada para pemangku kepentingan. Saharjo dan Nasution (2021) menunjukkan bahwa pola sebaran titik panas dapat digunakan sebagai indikator terjadinya kebakaran hutan dan lahan, sehingga analisis spasial atas data hotspot menjadi sistem peringatan dini yang berharga.

Di luar kebakaran, analisis spasial semakin banyak dimanfaatkan untuk menilai jasa ekosistem hutan. Penilaian keanekaragaman hayati, estimasi cadangan karbon, serta pemetaan fungsi hidrologis kini dapat didekati melalui integrasi data multispektral, data radar, dan data LiDAR. Integrasi data multisumber memungkinkan estimasi parameter tegakan dan struktur vegetasi secara lebih akurat, yang penting untuk mendukung skema pengurangan emisi dari deforestasi dan degradasi hutan (REDD+) serta perencanaan konservasi. Dengan demikian, analisis spasial berperan tidak hanya dalam mendeteksi kehilangan hutan, tetapi juga dalam mengukur nilai dan fungsi hutan yang perlu dipertahankan.

4.6. Tantangan, Keterbatasan, dan Arah Pengembangan

Kendati capaian yang telah diuraikan sangat signifikan, tinjauan ini mengidentifikasi sejumlah tantangan yang berulang dalam literatur. Pertama, keterbatasan validasi lapangan. Akurasi klasifikasi yang tinggi secara statistik tidak selalu mencerminkan kesesuaian dengan kondisi lapangan yang sesungguhnya, terutama pada kelas tutupan lahan yang secara spektral mirip. Validasi berbasis observasi lapangan dan titik kendali (*ground truth*) yang memadai tetap menjadi prasyarat, meskipun kerap terkendala biaya, aksesibilitas, dan keterbatasan waktu.

Kedua, kendala tutupan awan pada wilayah tropis. Tingginya frekuensi awan di Indonesia menyulitkan perolehan citra optik bebas awan, sehingga menuntut strategi komposit temporal dan penapisan awan yang cermat. Sebagaimana ditunjukkan Phan et al. (2020), pemilihan metode komposit berpengaruh nyata terhadap akurasi, sehingga keputusan metodologis pada tahap ini tidak boleh diabaikan. Ketiga, persoalan keterbandingan antarsensor. Analisis deret waktu panjang kerap memadukan citra dari sensor yang berbeda, misalnya Landsat generasi lama dan baru, yang memiliki karakteristik spektral dan resolusi berbeda, sehingga menuntut kalibrasi dan harmonisasi yang teliti agar perubahan yang terdeteksi mencerminkan perubahan nyata, bukan artefak perbedaan sensor.

Keempat, dan barangkali paling mendasar, adalah lemahnya integrasi hasil analisis spasial ke dalam proses pengambilan keputusan kebijakan. Banyak studi menghasilkan peta dan analisis berkualitas tinggi, tetapi keluaran tersebut belum

selalu diterjemahkan menjadi instrumen perencanaan yang mengikat, seperti revisi RTRW atau penetapan fungsi kawasan. Kesenjangan antara ketersediaan informasi spasial dan pemanfaatannya dalam tata kelola merupakan tantangan kelembagaan yang menuntut penguatan kapasitas, transparansi data, dan mekanisme koordinasi antarlembaga. Purwanto dan Lukiawan (2019) mengingatkan bahwa standarisasi teknis merupakan salah satu kunci agar hasil analisis dapat diterima dan digunakan secara lintas instansi.

Menyikapi tantangan tersebut, sejumlah arah pengembangan dapat dirumuskan. Pemanfaatan data satelit generasi baru dengan resolusi spasial dan temporal yang lebih tinggi, integrasi data optik dengan radar untuk mengatasi kendala awan, serta penerapan algoritma pembelajaran mesin dan pembelajaran mendalam (*deep learning*) yang lebih canggih berpotensi meningkatkan akurasi dan kedalaman analisis. Selain itu, penguatan kerangka evaluasi kesesuaian yang menghubungkan hasil analisis spasial dengan instrumen kebijakan tata ruang perlu terus dikembangkan agar analisis spasial benar-benar menjadi basis bukti bagi pengelolaan hutan berkelanjutan. Yang tidak kalah penting, transparansi metodologi dan keterbukaan data (*open data*) akan meningkatkan keterbandingan antarstudi dan mempercepat akumulasi pengetahuan di bidang ini.

5. KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini menunjukkan bahwa analisis spasial telah berperan sentral dan semakin strategis dalam mendukung pengelolaan hutan berkelanjutan sepanjang tahun 2005–2025. Selama periode tersebut terjadi transformasi paradigma yang jelas, yaitu peralihan dari interpretasi visual manual dan

analisis citra tunggal menuju analisis deret waktu multitemporal, penerapan algoritma pembelajaran mesin seperti Random Forest, dan pemanfaatan platform komputasi awan seperti *Google Earth Engine*. Transformasi ini secara nyata meningkatkan cakupan, frekuensi pembaruan, dan akurasi informasi kehutanan.

Ragam aplikasi analisis spasial yang teridentifikasi mencakup pemantauan deforestasi dan degradasi hutan, klasifikasi tutupan lahan berbasis pembelajaran mesin, evaluasi kesesuaian fungsi kawasan terhadap arahan tata ruang, serta pemodelan risiko kebakaran hutan dan penilaian jasa ekosistem. Keempat arus aplikasi tersebut menegaskan posisi analisis spasial sebagai basis bukti (*evidence base*) yang menjembatani data biofisik dengan proses perencanaan dan pengambilan keputusan.

Meskipun demikian, efektivitas analisis spasial masih dibatasi oleh sejumlah tantangan, meliputi keterbatasan validasi lapangan, kendala tutupan awan di wilayah tropis, persoalan keterbandingan antarsensor, dan lemahnya integrasi hasil analisis ke dalam kebijakan tata ruang. Oleh karena itu, penguatan kualitas data, transparansi metodologi, harmonisasi data multisumber, dan keterpaduan kelembagaan merupakan prasyarat agar potensi analisis spasial dapat terwujud sepenuhnya. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan kerangka evaluasi kesesuaian yang lebih terintegrasi dengan instrumen perencanaan, serta memanfaatkan kemajuan teknologi penginderaan jauh dan kecerdasan buatan guna memperkuat dukungan analisis spasial bagi pengelolaan hutan yang benar-benar lestari.

REFERENSI

- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Boyd, D.S., and Danson, F.M. 2005. Satellite Remote Sensing of Forest Resources: Three Decades of Research Development. *Sage Journal* 29(1) <https://doi.org/10.1191/0309133305pp432ra>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Danoedoro, P. (2012). Pengantar penginderaan jauh digital. Penerbit Andi.
- Dariono. (2018). Analisis spasial deforestasi dan degradasi hutan di Suaka Margasatwa Kerumutan Provinsi Riau. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 5(2). <https://doi.org/10.31258/dli.5.2>
- DeFries, R. S., Rudel, T., Uriarte, M., & Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3(3), 178–181. <https://doi.org/10.1038/ngeo756>
- FAO. (1976). A framework for land evaluation (Soils Bulletin No. 32). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hidayat, T., Priyatna, M., Sutanto, A., Alkhudri, A., & Khomarudin, M. R. (2019). Informasi sebaran titik panas berbasis WebGIS untuk pemantauan kebakaran hutan dan lahan di Indonesia. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1), 121–130. <https://doi.org/10.29122/jtl.v20i1.2961>
- Humam, A., Hidayat, M., Nurrochman, A., Anestatia, A. I., Yuliantina, A., & Aji, S. P. (2020). Identifikasi daerah kerawanan kebakaran hutan dan lahan menggunakan Sistem Informasi Geografis dan penginderaan jauh di kawasan Tanjung Jabung Barat Provinsi Jambi. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 1(1), 32–42. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2020.v1i1.14>
- Margono, B. A., Turubanova, S., Zhuravleva, I., Potapov, P., Tyukavina, A., Baccini, A., ... Hansen, M. C. (2012). Mapping and monitoring deforestation and forest degradation in Sumatra (Indonesia) using Landsat time series data sets from 1990 to 2010. *Environmental Research Letters*, 7(3), 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034010>
- Margono, B. A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Stolle, F., & Hansen, M. C. (2014). Primary forest cover loss in Indonesia over 2000–2012. *Nature Climate Change*, 4(8), 730–735. <https://doi.org/10.1038/nclimate2277>
- Margono, B. A. (2016). Indonesia's forest resource monitoring. *Indonesian Journal of Geography*, 48(1), 7–20. <https://doi.org/10.22146/ijg.12496>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and Random Forest classifier The role of image composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411. <https://doi.org/10.3390/rs12152411>
- Purwanto, E. H., & Lukiawan, R. (2019). Parameter teknis dalam usulan standar pengolahan penginderaan jauh: Metode klasifikasi terbimbing. *Jurnal Standardisasi*, 21(1), 67–78. <https://doi.org/10.31153/js.v21i1.741>
- Ramdani, F., & Hino, M. (2013). Land use changes and GHG emissions from tropical forest conversion by oil palm plantations in Riau Province, Indonesia. *PLoS ONE*, 8(7), e70323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070323>
- Saharjo, B. H., & Nasution, M. R. A. (2021). Pola sebaran titik panas (hotspot) sebagai indikator terjadinya kebakaran hutan dan lahan di Kabupaten Aceh Barat. *Journal of Tropical Silviculture*, 12(2), 60–66. <https://doi.org/10.29244/j-siltrop.12.2.60-66>
- Sitanggang, G. (2010). Kajian pemanfaatan satelit masa depan: Sistem penginderaan jauh satelit LDCM (Landsat-8). *Berita Dirgantara*, 11(2), 47–58.
- Widodo, R. B. (2014). Pemodelan spasial risiko kebakaran hutan (Studi kasus Provinsi Jambi, Sumatera). *Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota*, 10(2), 127–138. <https://doi.org/10.14710/pwk.v10i2.7643>