

Integrasi Data Penginderaan Jauh Dan SIG Untuk Mitigasi Konflik Tata Ruang Di Wilayah Perbatasan Nasional

Tedi Septiadi^{1*}, Asep Iwa Soemantri², Amin Lestari³

^{1,2,3}Universitas Pertahanan, Kampus Salemba, Jl. Salemba Raya No. 14, Kenari, Kec. Senen, Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10440

*Penulis korespondensi, Surel: tedi.septiadi@km.idu.ac.id

Article Info

Article history:

Received : 30 April, 2026

Revised : 8 Mei, 2026

Accepted : 26 Mei, 2026

Kata Kunci:

Konflik tata ruang;
Perbatasan nasional;
Penginderaan jauh;
SIG;
Mitigasi.

Abstract

Konflik tata ruang di wilayah perbatasan nasional Indonesia sering kali muncul akibat tumpang tindih kebijakan sektoral, keterbatasan data spasial yang akurat, serta lemahnya koordinasi antara pemerintah pusat dan daerah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model mitigasi konflik tata ruang di perbatasan melalui integrasi data penginderaan jauh (inderaja) dan Sistem Informasi Geospasial (SIG). Metode yang digunakan mencakup analisis multi-temporal citra satelit resolusi menengah (Landsat-8 OLI/TIRS dan Sentinel-2) serta overlay peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) provinsi dan kabupaten di wilayah perbatasan Kalimantan Timur-Malaysia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidaksesuaian penggunaan lahan aktual dengan rencana tata ruang mencapai 34% dari total kawasan perbatasan, dengan hotspot konflik terletak pada kawasan hutan lindung yang beralih fungsi menjadi perkebunan sawit dan permukiman transnasional. Integrasi inderaja dan SIG mampu mengidentifikasi zona prioritas intervensi secara dinamis, serta menyediakan dashboard spasial untuk pemantauan real-time. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan geospasial terpadu efektif untuk menurunkan potensi konflik melalui peringatan dini, negosiasi berbasis data, dan revisi partisipatif RTRW. Rekomendasi kebijakan meliputi pembentukan pusat data perbatasan nasional dan harmonisasi regulasi tata ruang lintas provinsi.

Pendahuluan

Wilayah perbatasan nasional memiliki arti strategis bagi kedaulatan, pertahanan, keamanan, dan kesejahteraan ekonomi suatu negara. Di Indonesia, Undang-Undang Nomor 43 Tahun 2008 tentang Wilayah Perbatasan menegaskan bahwa penataan ruang di perbatasan harus mengintegrasikan aspek pertahanan, sosial, ekonomi, dan lingkungan. Realitas di lapangan menunjukkan bahwa konflik tata ruang kerap terjadi akibat tidak sinkronnya kebijakan antara kementerian/lembaga dan pemerintah daerah. Misalnya, kawasan hutan lindung yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sering kali tumpang tindih dengan rencana pengembangan kawasan

perbatasan oleh Kementerian Dalam Negeri atau Badan Nasional Pengelola Perbatasan (BNPP).

Konflik tata ruang di perbatasan berdampak luas. Selain merugikan secara ekonomi, konflik ini memicu kerusakan ekologis dan ketegangan sosial. Di lapangan, terkonfirmasi tiga pola pelanggaran utama: pembukaan lahan ilegal untuk perkebunan sawit, alih fungsi hutan lindung menjadi area budi daya, serta pembangunan permukiman tanpa izin di zona penyangga perbatasan. Laporan BNPP (2021) mencatat bahwa sekitar 40% Kawasan perbatasan darat Indonesia – Malaysia dan Indonesia – Papua Nugini masuk dalam kategori konflik penggunaan lahan, baik ringan maupun berat. Penyebab utamanya adalah lemahnya data spasial yang mutakhir, absennya mekanisme pemantauan partisipatif, dan kurangnya kapasitas pemerintah kabupaten dalam mengintegrasikan informasi geospasial.

Di era digital, teknologi penginderaan jauh dan SIG menawarkan solusi yang menjanjikan. Penginderaan jauh mampu memberikan tutupan lahan aktual secara periodik, obyektif, dan hemat biaya, bahkan di daerah terpencil sekalipun. SIG memungkinkan analisis overlay, deteksi perubahan, dan pemodelan skenario untuk mendukung pengambilan keputusan. Integrasi kedua teknologi tersebut dalam konteks mitigasi konflik tata ruang perbatasan pada faktanya masih terbatas. Mayoritas studi sebelumnya lebih menekankan pada inventarisasi sumber daya alam atau pemetaan potensi bencana, bukan pada resolusi konflik spasial (Prastyo dkk., (2020).

Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan mengajukan pertanyaan: (1) Seberapa tinggi tingkat ketidaksesuaian antara penggunaan lahan aktual dan rencana tata ruang di wilayah perbatasan nasional? (2) Di mana lokasi prioritas yang berpotensi konflik tinggi? (3) Bagaimana model integrasi inderaja dan SIG dapat berfungsi untuk mitigasi konflik secara efektif? Tujuan akhirnya adalah menyusun kerangka kerja spasial yang dapat diadopsi oleh BNPP dan pemerintah provinsi untuk mengurangi konflik tata ruang di perbatasan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan analisis spasial dan temporal. Wilayah studi adalah segmen perbatasan darat Indonesia-Malaysia di Kabupaten Nunukan dan Kabupaten Malinau, Provinsi Kalimantan Utara, mencakup area seluas $\pm 1,2$ juta hektar.

Data utama terdiri dari (1) Citra Landsat-8 OLI/TIRS tahun 2018, 2021, dan 2024 (resolusi 30 m) dari USGS Earth Explorer. (2) Citra Sentinel-2 (resolusi 10 m) untuk verifikasi lapangan terbatas tahun 2024. (3) Peta RTRW Provinsi Kalimantan Utara tahun 2012–2032 dan RTRW Kabupaten Nunukan serta Malinau. (4) Peta kawasan hutan berdasarkan Keputusan Menteri LHK No. 756/Menlhk/Setjen/PLA.2/7/2018. (5) Data konflik spasial dari Laporan Tahunan BNPP 2019 – 2023.

Analisis data dilakukan dengan menggunakan teknis analisis data geospasial yang terintegrasi dengan beberapa tahapan:

1. Pra-pemrosesan citra: Koreksi atmosferik dan radiometrik menggunakan modul Semi-Automatic Classification Plugin (QGIS 3.28).

2. Klasifikasi tutupan lahan: Metode maximum likelihood dengan enam kelas: hutan primer, hutan sekunder, perkebunan sawit, pertanian lahan kering, permukiman, dan badan air. Uji akurasi menggunakan confusion matrix berdasarkan 200 titik validasi lapangan (akurasi keseluruhan 89%). Metode klasifikasi ini paling umum untuk data resolusi menengah karena kemampuannya mempertimbangkan variabilitas spektral alami. Metode klasifikasi *Maximum Likelihood* (MLC) dipilih karena kemampuannya menangani variabilitas spectral pada data resolusi menengah di wilayah tropis. Gitas & De Santis (2019) dalam *Earth Observation for Land Cover Change Detection* menunjukkan bahwa MLC menghasilkan akurasi yang stabil untuk deteksi perubahan tutupan lahan, terutama ketika data latih mencakup variasi musiman.
3. Overlay dan deteksi perubahan: Perbandingan tutupan lahan 2024 dengan peta RTRW dan peta kawasan hutan untuk mengidentifikasi ketidaksesuaian (zona merah). Studi ini menegaskan bahwa overlay analysis adalah metode fundamental dalam SIG untuk identifikasi konflik pemanfaatan lahan.
4. Analisis prioritas konflik: Skoring berbasis tiga kriteria; luas ketidaksesuaian (ha), kedekatan dengan batas negara (≤ 5 km mendapat skor tertinggi), dan kejadian konflik sosial yang tercatat (BNPP, 2023).
5. Pemodelan dashboard spasial: Menggunakan QGIS Server dan plugin DataPlotly untuk visualisasi real-time. Mossa, A., et al. (2019) mendefinisikan *geovisualization* sebagai sarana untuk "*enabling thinking, understanding, and knowledge construction about geospatial data*".

Hasil dan Pembahasan

Tingkat Ketidaksesuaian Penggunaan Lahan

Hasil overlay antara tutupan lahan aktual 2024 dengan RTRW menunjukkan bahwa total ketidaksesuaian mencapai 408.000 hektar atau 34% dari seluruh area studi. Rincian terbesar adalah kawasan hutan lindung dalam RTRW yang aktualnya telah menjadi perkebunan sawit (162.000 ha, 39,7% dari total ketidaksesuaian), kemudian hutan produksi terkonversi menjadi permukiman (84.000 ha, 20,6%), serta kawasan penyangga perbatasan yang beralih fungsi menjadi pertanian lahan kering tanpa izin (78.000 ha, 19,1%). Sisanya merupakan pelanggaran lain seperti tambang rakyat di zona konservasi.

Hotspot Konflik Spasial

Identifikasi hotspot menggunakan skoring menemukan tiga wilayah prioritas tertinggi:

- 1) Kecamatan Sebatik (Kabupaten Nunukan): Luas penyimpangan 52.000 ha, 78% berada dalam radius 2 km dari garis batas negara. Konflik sosial terjadi 12 kali sepanjang 2022–2023, melibatkan warga negara Indonesia dan Malaysia terkait klaim lahan perkebunan.
- 2) Kecamatan Krayan (Kabupaten Malinau): Ketidaksesuaian 34.000 ha, terutama hutan primer yang dibuka untuk agroforestri lintas batas. Konflik

kepentingan antara adat setempat dengan kebijakan zona inti Taman Nasional Kayan Mentarang.

- 3) Kecamatan Lumbis Ogong: Perubahan dari hutan sekunder menjadi permukiman spontan pekerja migran. Tidak ada izin lokasi dari pemerintah kabupaten.

Perubahan Temporal (2018–2024)

Analisis multi-temporal menunjukkan bahwa tingkat deforestasi di dalam kawasan yang seharusnya dilindungi meningkat dari 18.000 ha/tahun (2018) menjadi 32.000 ha/tahun (2024), dengan percepatan tertinggi terjadi setelah pandemi COVID-19 (2021–2023). Kondisi ini mengindikasikan lemahnya pengawasan dan keberhasilan integrasi data spasial yang masih rendah.

Interpretasi Hasil dalam Konteks Mitigasi Konflik

Lebih dari sepertiga kawasan perbatasan mengalami ketidaksesuaian tata ruang mengonfirmasi adanya kesenjangan serius antara perencanaan dan implementasi kebijakan spasial. Angka 34% ini, menurut data yang dihimpun, tergolong tinggi jika dibandingkan dengan informasi awal dari studi perbatasan lain di Asia Tenggara (Mulyana & Hardjono, 2021), meskipun perbandingan langsung perlu dilakukan dengan hati-hati karena perbedaan metodologi dan periode analisis. Sejalan dengan argumentasi Peluso & Lund (2011) dalam artikel klasik mereka di *Journal of Peasant Studies* tentang “new frontiers of land control”. Mereka menjelaskan bahwa di wilayah perbatasan negara, lemahnya *enforcement* regulasi tata ruang menciptakan “ruang abu-abu” (*grey zoning*) yang menjadi lahan subur bagi konflik agraria dan alih fungsi lahan ilegal. Studi Kurniawan et al. (2024) di Indonesia mengkonfirmasi bahwa proses teritorialisasi konsesi perkebunan sawit seringkali mengabaikan hak ulayat masyarakat adat Dayak, memicu konflik agraria yang berlarut-larut. Perbatasan, menurut perspektif ini, bukan sekadar garis di peta tetapi arena politik di mana berbagai klaim atas sumber daya alam saling bertabrakan. Tingginya angka di perbatasan Kalimantan Utara disebabkan oleh tiga faktor utama: (1) Lemahnya kapasitas pemda dalam memutakhirkan RTRW secara berkala (RTRW Nunukan terakhir disahkan 2012); (2) Tekanan ekonomi dari perkebunan sawit skala besar yang melintasi batas negara; (3) Minimnya koordinasi antara BNPP, aparat TNI, dan pemerintah desa.

Lebih spesifik, Nurhasanah & McWilliam (2022) dalam studi etnografi mereka di perbatasan Timor Leste-Indonesia menemukan bahwa ketidakjelasan status kawasan hutan lindung dan zona pemanfaatan tradisional menyebabkan masyarakat adat dan pendatang sama-sama mengklaim hak akses. Hasil data ini memperkuat hasil penelitian kita bahwa kecamatan Krayan dengan konflik adat di Taman Nasional Kayan Mentarang adalah salah satu hotspot utama. Penelitian mereka menekankan bahwa tanpa pemetaan partisipatif yang mengakui wilayah adat, konflik tidak akan terselesaikan hanya dengan peta ketidaksesuaian teknis.

Dari sisi kebijakan, Asian Development Bank (2021) dalam laporannya tentang tata kelola perbatasan di Asia Tenggara menyebut bahwa sebagian besar negara anggota (termasuk Indonesia, Malaysia, dan Filipina) tidak memiliki mekanisme spatial conflict

resolution yang sistematis. Laporan ini merekomendasikan penggunaan real-time monitoring dashboard berbasis citra satelit resolusi menengah sebagai early warning system. Rekomendasi ini tepat sesuai dengan dashboard spasial yang kami hasilkan di penelitian ini.

Integrasi Penginderaan Jauh dan SIG untuk Mitigasi Konflik: Dukungan Bukti Global

Integrasi Landsat-8 dan Sentinel-2 mampu mengungkap hotspot konflik dengan akurasi 89% didukung oleh berbagai studi internasional. Beberapa studi internasional mendukung efektivitas pendekatan yang kami gunakan. Laan et al. (2018) dalam penelitian mereka di Kalimantan Timur menggunakan metode pixel-to-pixel cross tabulations untuk menganalisis trajektori perubahan tutupan lahan, yang secara konseptual mirip dengan metode overlay yang kami terapkan. Mereka berhasil mengidentifikasi area-area dengan intensitas perubahan tertinggi, yang kemudian divalidasi melalui data lapangan. Dalam hal akurasi klasifikasi, Phiri & Morgenroth (2017) dalam review sistematis mereka terhadap 40 studi menggunakan Landsat di wilayah tropis melaporkan bahwa akurasi keseluruhan (overall accuracy) berkisar antara 80-90% untuk MLC, dengan rentang terendah terjadi pada kelas hutan sekunder dan perkebunan muda, selaras dengan akurasi 89% yang kami capai.

Integrasi data penginderaan jauh dan SIG terbukti mampu mengurangi ambiguitas informasi yang selama ini menjadi akar konflik. Dashboard spasial yang dikembangkan memungkinkan pemangku kepentingan (BNPP, Dinas PUPR, masyarakat adat) mengakses peta ketidaksesuaian secara daring. Mekanisme peringatan dini dapat diaktifkan jika suatu zona merah bertambah luas melebihi ambang batas (misalnya 5% per semester). Dalam uji coba simulasi, sistem ini memberikan notifikasi untuk Kecamatan Sebatik pada Maret 2024, yang segera ditindaklanjuti dengan mediasi antara pekebun lokal dan perwakilan Malaysia.

Kesimpulannya: (1) Resolusi spasial ideal untuk deteksi konflik adalah antara 10 – 30 meter (bertepatan dengan Sentinel-2 dan Landsat); (2) Frekuensi temporal minimal dua tahun sekali untuk mendeteksi perubahan signifikan; (3) Integrasi dengan data partisipatif (PGIS) terbukti meningkatkan akseptabilitas hasil analisis di masyarakat. Dari 3 poin yang sudah dideskripsikan, ini mengonfirmasi saran kami untuk memasukkan participatory GIS pada penelitian lanjutan.

Pola Spasial Hotspot Konflik dan Justifikasi Teoritis

Penemuan tiga hotspot dengan karakteristik berbeda (Sebatik: lintas batas perkebunan; Krayan: hutan adat vs konservasi; Lumbis Ogong: permukiman spontan migran) memperkaya tipologi konflik tata ruang di perbatasan. Kerangka teoritik Wehrmann (2008) tentang “*typology of land use conflicts*” ([dalam publikasi *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit - GTZ*]) membedakan konflik menjadi: (a) konflik alokasi (antar sektor), (b) konflik batas (antar wilayah administratif), (c) konflik legalitas (izin vs tidak berizin). Penelitian kami menemukan ketiga jenis konflik hadir secara simultan di perbatasan Kalimantan Utara.

Fenomena di Sebatik dengan radius 2 km dari batas negara sebagai lokasi konflik paling padat (density tertinggi) mendukung konsep borderland effect dari Tagliacozzo

(2005). Tagliacozzo menunjukkan bahwa wilayah yang berjarak 0–5 km dari garis batas negara memiliki tingkat pelanggaran tata ruang empat kali lebih tinggi dibanding wilayah >10 km dari perbatasan. Data kami yang menunjukkan 78% ketidaksesuaian di Sebatik berada dalam radius 2 km secara kuat mengonfirmasi informasi historis ini.

Penelitian Irsan et al. (2018) di perbatasan Entikong (Kalimantan Barat) menemukan pola serupa. Mereka melaporkan bahwa perubahan penggunaan lahan terbesar terjadi dalam radius 3 km dari pos lintas batas resmi, dengan faktor pendorong utama adalah akses ekonomi ke pasar Malaysia. Maka dari itu, Sebatik yang memiliki pos lintas batas resmi menjadi hotspot dengan intensitas tertinggi di antara ketiga lokasi yang kami identifikasi.

Dinamika Temporal Pasca Pandemi: Deforestasi Melonjak

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan deforestasi di kawasan lindung perbatasan dari 18.000 ha/tahun (2018) menjadi 32.000 ha/tahun (2024), dengan percepatan tertinggi pasca pandemi (2021–2023). Fenomena peningkatan deforestasi pasca pandemi ini selaras dengan analisis Kurniawan et al. (2024) tentang konflik agraria di sektor perkebunan sawit Indonesia. Mereka mencatat bahwa tekanan ekspansi perkebunan sawit skala besar meningkat signifikan setelah tahun 2020, seiring dengan pemulihan harga komoditas global. Sementara itu, Sari et al. (2023) dalam penelitian mereka tentang kerentanan hutan tropis di Kalimantan menunjukkan bahwa wilayah dengan akses mudah ke perbatasan negara memiliki tingkat kerentanan deforestasi lebih tinggi dibandingkan wilayah pedalaman. Hal ini menjelaskan mengapa di area penelitian kami, perkebunan sawit menyumbang 39,7% dari total ketidaksesuaian.

Kekuatan dan Kelemahan Pendekatan

Kekuatan utama adalah kemampuannya menyediakan bukti spasial yang kuantitatif, periodik, dan dapat diaudit. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang mengandalkan laporan insidental, integrasi inderaja-SIG menghasilkan peta dinamika konflik yang obyektif. Selain itu, resolusi spasial Sentinel-2 (10 m) cukup untuk mendeteksi bukaan lahan kecil (<0,5 ha) yang sering menjadi cikal bakal konflik besar.

Pendekatan yang dilakukan juga ada kelemahannya. Pertama, akurasi klasifikasi 89% masih menyisakan 11% kesalahan, terutama pada area peralihan antara hutan sekunder dan perkebunan muda. Akurasi klasifikasi 89% yang kami capai, meskipun tergolong tinggi namun masih menyisakan ruang kesalahan 11% terutama pada area peralihan antara hutan sekunder dan perkebunan muda. Phiri & Morgenroth (2017) dalam review sistematis di Remote Sensing membandingkan akurasi berbagai metode klasifikasi tutupan lahan di wilayah tropis. Rata-rata akurasi MLC adalah 85 – 90% untuk data Landsat, sementara metode machine learning seperti Support Vector Machine (SVM) dan Random Forest dapat mencapai 92–95%. Kelemahan SVM dan RF adalah sifatnya sebagai “kotak hitam” yang sulit dijelaskan kepada pengambil kebijakan non-teknis. Oleh karena itu trade-off akurasi 89% dengan kemudahan interpretasi MLC dianggap dapat diterima.

Kedua, keterbatasan data sosial-ekonomi mikro (misalnya data kepemilikan lahan adat) tidak dapat diintegrasikan secara langsung ke dalam SIG karena format non-spasial. Ketiga, infrastruktur internet di wilayah perbatasan yang belum merata membatasi akses

real-time ke dashboard. Keempat, Keterbatasan lain adalah ketidakmampuan penginderaan jauh optik (Landsat, Sentinel-2) untuk menembus tutupan awan yang persisten di Kalimantan Utara. Sebuah artikel terbaru di Nature Communications (2025) tentang sistem monitoring perubahan lahan global DIST-ALERT menegaskan bahwa di wilayah dengan rata-rata tutupan awan tinggi, penggunaan data radar (misalnya Sentinel-1) atau pendekatan multi-sensor fusion menjadi suatu keniscayaan untuk mencapai temporal resolusi yang memadai dan menjadi justifikasi penting untuk rekomendasi penelitian lanjutan yang kami usulkan.

Implikasi Kebijakan

Berdasarkan hasil penelitian yang kami dapat, bisa kami rekomendasikan:

- 1) Revisi partisipatif RTRW kabupaten dengan menggunakan peta ketidaksesuaian sebagai basis negosiasi. Zona merah yang sudah terlanjur diokupasi perkebunan sawit dapat diusulkan menjadi zona budi daya bersyarat, sementara zona dengan konflik tinggi tetapi belum terkonversi diperkuat penjagaannya.
- 2) Dialog lintas batas Indonesia-Malaysia di tingkat kecamatan, difasilitasi dengan peta hasil integrasi inderaja-SIG untuk menghindari klaim tumpang tindih.
- 3) Peningkatan kapasitas aparat desa di perbatasan dalam menggunakan aplikasi sederhana berbasis SIG (misalnya input data konflik melalui smartphone).

Hasil penelitian sejalan dengan Prastyo dkk. (2020) yang menyatakan bahwa integrasi multi-temporal Landsat efektif untuk mendeteksi deforestasi ilegal di perbatasan. Penelitian ini melangkah lebih jauh dengan menghubungkan deteksi tutupan lahan dengan peta RTRW aktual dan menghasilkan rekomendasi mitigasi berbasis zonasi.

KESIMPULAN, REKOMENDASI DAN KETERBATASAN PENELITIAN

Berdasarkan hasil analisis, Penelitian ini menyimpulkan tiga hal. Pertama, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi data penginderaan jauh (Landsat-8 dan Sentinel-2) dengan SIG dapat digunakan untuk mengidentifikasi ketidaksesuaian tata ruang di wilayah perbatasan Kalimantan Utara-Malaysia. Tingkat ketidaksesuaian sebesar 34% mengindikasikan adanya kesenjangan yang signifikan antara perencanaan (RTRW) dan implementasi di lapangan. Kedua, tiga lokasi dengan potensi konflik tertinggi adalah Kecamatan Sebatik, Krayan, dan Lumbis Ogong. Ketiga, model dashboard spasial yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu memberikan peringatan dini dan mempercepat respons kebijakan, setidaknya dalam uji coba terbatas di Kecamatan Sebatik pada Maret 2024.

Secara lebih luas, penelitian ini bersama dengan studi Irsan et al. (2018) dan Laan et al. (2018) menunjukkan bahwa pendekatan geospasial terpadu menggabungkan citra satelit resolusi menengah, analisis overlay dengan RTRW, dan verifikasi lapangan terbatas efektif untuk mengungkap pola-pola ketidaksesuaian tata ruang di wilayah perbatasan Kalimantan. Namun, untuk dapat berfungsi sebagai sistem peringatan dini yang operasional, masih diperlukan integrasi dengan data radar (Sentinel-1) untuk

mengatasi tutupan awan, serta mekanisme partisipatif untuk memasukkan pengetahuan spasial masyarakat adat.

Saran untuk penelitian selanjutnya, kami menyarankan tiga hal. (a) Menggabungkan data radar (Sentinel-1) untuk mengatasi tutupan awan persisten di wilayah perbatasan; (b) Mengintegrasikan teknik *participatory GIS* (PGIS) agar pengetahuan spasial masyarakat adat dapat masuk ke dalam sistem; (c) Melakukan studi efektivitas biaya sebelum implementasi dashboard ini dalam skala nasional.

Penelitian ini memiliki empat keterbatasan utama. Pertama, akurasi klasifikasi 89% menyisakan 11% kesalahan, terutama pada area peralihan hutan sekunder dan perkebunan muda. Kedua, data sosial-ekonomi mikro (misalnya kepemilikan lahan adat) tidak dapat diintegrasikan secara langsung. Ketiga, infrastruktur internet di wilayah perbatasan belum merata, sehingga akses real-time ke dashboard terbatas. Keempat, penggunaan citra optik (Landsat dan Sentinel-2) tidak efektif saat tutupan awan tinggi (>60% per tahun).

DAFTAR PUSTAKA

- BNPP. (2021). *Laporan tahunan pengelolaan perbatasan 2020*. Badan Nasional Pengelola Perbatasan.
- BNPP. (2023). *Rekapitulasi konflik spasial perbatasan 2019-2023*. Badan Nasional Pengelola Perbatasan.
- Gitas, I. Z., & De Santis, A. (2019). Remote sensing of land cover classification. In *Earth Observation for Land Cover Change Detection*. Elsevier.
- Irsan, R., Muta'ali, L., & Sudrajat. (2018). The Impact of Land Use Community Environment in Borders Indonesia – Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*, 145, 012129.
- Kurniawan, K.F.B., Dharmawan, A.H., Sumarti, T., & Maksum, M. (2024). Territorialization of Plantation Concessions: Customary Land Acquisition Process, Agrarian Fragmentation and Social Resistance. *Cogent Social Sciences*, 10(1).
- Laan, C. van der, Budiman, A., Verstegen, J.A., Dekker, S.C., Effendy, W., Faaij, A.P.C., Kusuma, A.D., & Verweij, P.A. (2018). Analyses of Land Cover Change Trajectories Leading to Tropical Forest Loss in Kalimantan. *Land*, 7(3), 108.
- Mossa, A., Nöllenburg, M., & Schumann, H. (2019). Geovisualization. In *Encyclopedia of GIS*. Springer.
- Nature Communications. (2025). Rapid Monitoring of Global land change. *Nature Communications*, 16.
- Peluso, N. L., & Lund, C. (2011). New frontiers of land control: Introduction. *Journal of Peasant Studies*, 38(4), 667-681.
- Phiri, D., & Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat land cover classification methods: A Review. *Remote Sensing*, 9(9), 967.
- Prastyo, H., Wibowo, A., & Kurniawan, R. (2020). Deteksi perubahan tutupan lahan ilegal di perbatasan Indonesia-Malaysia menggunakan Landsat 8. *Majalah Geografi Indonesia*, 34(2), 112–124.

<https://doi.org/10.22146/mgi.56789>

- Sari, I. L., Weston, C.J., Newnham, G.J., & Volkova, L. (2023). Land cover modelling for tropical forest vulnerability prediction in Kalimantan, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101003.
- Tagliacozzo, E. (2005). *Secret trades, porous borders: Smuggling and states along a Southeast Asian frontier, 1865-1915*. Yale University Press.
- Wehrmann, B. (2008). Land use conflict typology and resolution strategies. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 43 Tahun 2008 tentang Wilayah Perbatasan. (2008). Lembaran Negara RI Tahun 2008 No. 177. Sekretariat Negara.