

Trajektori perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra berbasis analisis spasio-temporal

Trajectory of vegetation cover change on Sumatra Island based on spatio-temporal analysis

Yudi Setiawan^{1,2*}, Kustiyo³, Sahid Agustian Hudjimartsu⁴

¹Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata, IPB University, Bogor, Indonesia

²Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, IPB University, Bogor, Indonesia

³Pusat Riset Geoinformatika, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bogor, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Informatika, Universitas Ibn Khaldun, Bogor, Indonesia

Abstrak.

Perubahan tutupan lahan di Pulau Sumatra berlangsung sangat cepat dalam beberapa dekade terakhir, ditandai oleh adanya deforestasi hutan tropis, gangguan ekosistem lahan gambut dan peningkatan kejadian bencana. Analisis spasio-temporal dengan data satelit multi-temporal memberikan wawasan mengenai trajektori perubahan tutupan vegetasi di wilayah ini. Penelitian ini mensintesis temuan terkait pola konversi hutan menjadi penggunaan lain (perkebunan, pertanian, infrastruktur) dan pola pemulihan vegetasi pasca kebakaran, terutama pada lahan gambut. Hasil kajian menunjukkan beberapa trajektori perubahan utama: (1) deforestasi yang diikuti konversi menjadi lahan pertanian/perkebunan, (2) siklus perubahan hutan tanaman, meliputi: penanaman, penebangan, dan penanaman ulang, serta (3) pemulihan sekunder alami pada lahan yang ditinggalkan pasca deforestasi. Selain itu, pada kasus kejadian deforestasi yang disebabkan oleh kebakaran lahan, frekuensi kebakaran berpengaruh signifikan pada jalur suksesi vegetasi. Vegetasi di area yang terbakar satu kali mampu tumbuh kembali mendekati kondisi awal setelah beberapa tahun, sedangkan area yang terbakar berulang kali mengalami pemulihan lebih lambat dan cenderung didominasi semak belukar. Studi ini merekomendasikan perlunya strategi pengelolaan lanskap berkelanjutan berbasis data spasio-temporal, seperti penghentian laju deforestasi tak terkendali dan restorasi ekosistem gambut (*rewetting* dan rehabilitasi vegetasi), untuk mencegah trajektori degradasi lebih lanjut dan mendukung pemulihan tutupan vegetasi jangka panjang.

Kata kunci: perubahan tutupan vegetasi, analisis spasio-temporal, restorasi ekosistem, satelit multi-temporal

Abstract

Land cover change on Sumatra Island has accelerated rapidly over recent decades, marked by extensive tropical forest deforestation, widespread peatland degradation, and increasing disaster occurrences. Spatio-temporal analysis using multi-temporal satellite data provides valuable insights into the trajectories of vegetation cover change in this region. This study synthesizes findings on patterns of forest conversion to other land uses (plantations, agriculture, and infrastructure), as well as vegetation recovery patterns following fire events, particularly in peatland areas. The results reveal several dominant change trajectories: (1) deforestation followed by conversion to agricultural and plantation land, (2) cyclical changes in plantation forests, including planting, harvesting, and replanting phases, and (3) natural secondary regeneration on abandoned land after deforestation. Furthermore, in cases where deforestation is driven by land and forest fires, fire frequency plays a significant role in shaping vegetation succession pathways. Areas burned only once are able to recover toward near-original conditions after several years, whereas areas subjected to repeated fires exhibit slower recovery and tend to be dominated by shrub vegetation. These findings highlight the importance of sustainable landscape management informed by spatio-temporal data, including controlling deforestation and restoring peatlands through rewetting and vegetation rehabilitation, to prevent further degradation and support long-term ecosystem recovery.

Keywords: *vegetation cover change, spatio-temporal analysis, ecosystem restoration, multi-temporal satellite*

* Korespondensi Penulis
Email : setiawan.yudi@apps.ipb.ac.id

1. PENDAHULUAN

Perubahan penggunaan dan tutupan lahan (*land use and land cover change*, LULCC) merupakan kunci bagi berbagai isu lingkungan regional dan global, seperti degradasi lahan, hilangnya keanekaragaman hayati, perubahan iklim, ketahanan pangan, serta keberlanjutan lingkungan (Foley *et al.* 2005; Lambin and Geist 2006; Turner *et al.* 2007). Di wilayah tropis, perhatian terhadap LULCC meningkat seiring percepatan konversi hutan dan ekosistem rentan, seperti lahan gambut, yang berdampak langsung terhadap siklus karbon global dan stabilitas ekosistem (Lambin *et al.* 2003). Indonesia, khususnya Pulau Sumatra, mengalami laju konversi hutan yang tinggi akibat ekspansi perkebunan dan pembangunan, sehingga menimbulkan keprihatinan global terkait emisi karbon, kehilangan biodiversitas, dan degradasi jasa ekosistem (Miettinen *et al.* 2011; Margono *et al.* 2014). Selama periode 1990-2000, Sumatra kehilangan sekitar 7,5 juta hektare hutan, dengan Provinsi Riau sebagai kontributor terbesar (42%) serta mencatat laju deforestasi tertinggi di Sumatra pada periode 2009-2011 yang didorong oleh perluasan perkebunan kelapa sawit dan hutan tanaman industri (Carlson *et al.* 2012; Margono *et al.* 2014).

Meskipun sektor perkebunan berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi, deforestasi dan degradasi hutan yang tidak terkendali menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan. Secara global, deforestasi dan degradasi hutan tropis merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar kedua setelah sektor energi (IPCC 2019). Dampak lainnya meliputi gangguan siklus hidrologi yang meningkatkan risiko banjir dan kekeringan, konflik penggunaan lahan, serta hilangnya habitat satwa liar endemik Sumatra (Bradshaw *et al.* 2007; Hansen *et al.* 2013).

Selain konversi lahan, Sumatra juga rawan mengalami kebakaran hutan dan lahan, terutama di lahan gambut dataran rendah yang kaya menyimpan karbon namun rentan terhadap gangguan antropogenik dan cuaca ekstrem (Turetsky *et al.* 2015). Pada periode kering akibat El Niño, kebakaran gambut dapat meluas dan sulit dikendalikan, seperti yang terjadi pada tahun 1997 dan 2015 menyebabkan degradasi gambut jangka panjang dan emisi karbon besar (Page *et al.* 2002; Field *et al.* 2016). Kebakaran berulang menyebabkan kehilangan karbon tanah, penurunan muka lahan, serta kerusakan keanekaragaman hayati, sehingga menegaskan pentingnya pemantauan spasio-temporal dan pemulihan vegetasi dalam pengelolaan ekosistem.

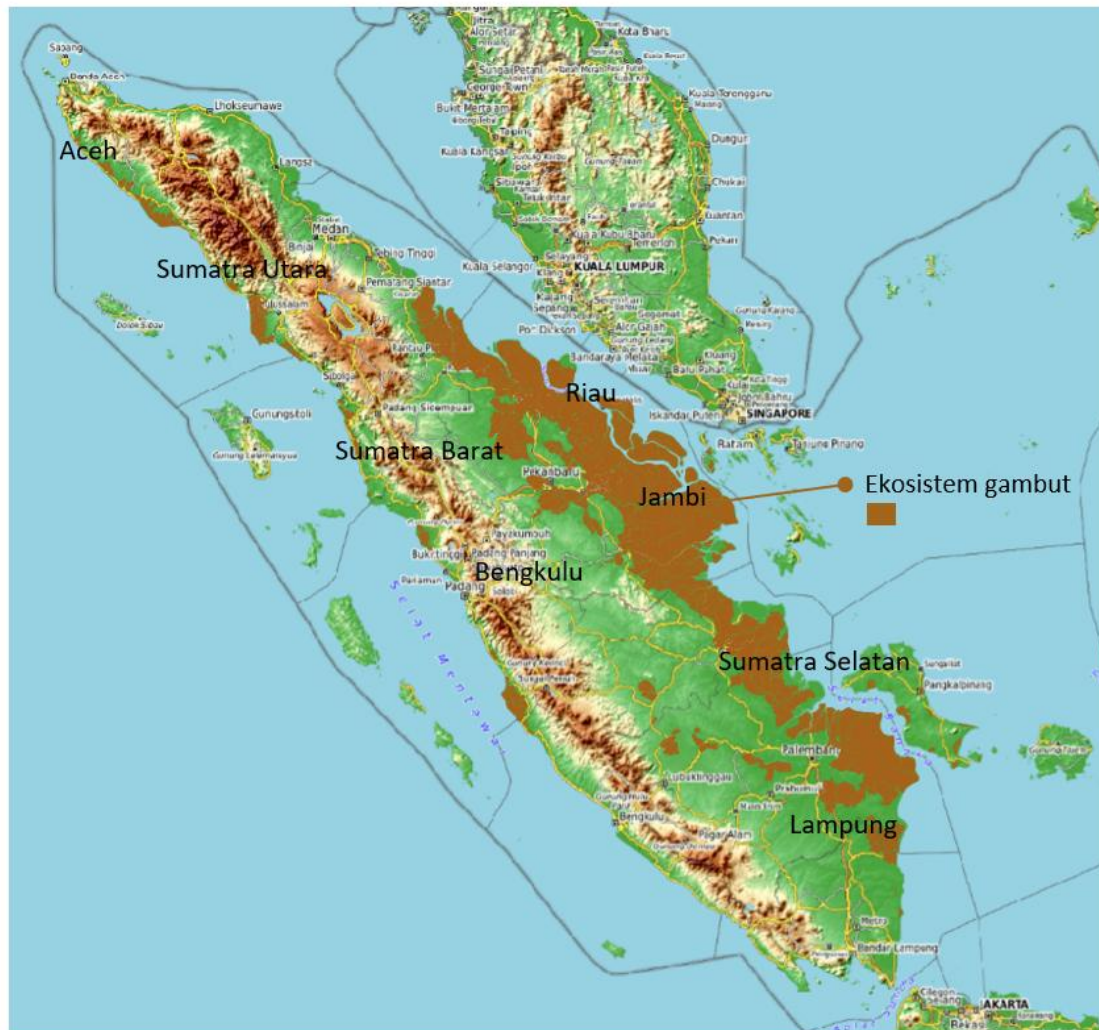
Dalam konteks tersebut, pemahaman mengenai trajektori perubahan tutupan vegetasi menjadi sangat penting. Trajektori perubahan menggambarkan urutan transisi tutupan lahan dari waktu ke waktu, misalnya dari hutan primer menjadi lahan terdegradasi, lalu dikonversi menjadi perkebunan atau berkembang menjadi hutan sekunder (Lambin *et al.* 2003). Pendekatan analisis trajektori dinilai lebih informatif dibandingkan analisis perubahan neto, karena mampu mengungkap proses dan mekanisme perubahan yang mendasari dinamika tutupan lahan (Malanson & Pontius 2005). Melalui pendekatan ini, perubahan akibat gangguan mendadak seperti penebangan atau kebakaran dapat dibedakan dari degradasi bertahap, serta dikaitkan dengan faktor pendorong alami maupun antropogenik (Zhu 2017).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji dinamika tutupan lahan di Sumatra, termasuk identifikasi pola perubahan vegetasi jangka panjang (Setiawan *et al.* 2015) dan proses pemulihan vegetasi pasca kebakaran gambut yang dipengaruhi oleh frekuensi kebakaran (Setiawan *et al.* 2025). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengkarakterisasi trajektori perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra secara spasio-temporal menggunakan data satelit multi-temporal. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai implikasi ekologis dari berbagai trajektori perubahan, khususnya terkait peran gangguan berulang dan ekspansi perkebunan terhadap kapasitas pemulihan ekosistem, serta relevansinya dalam mendukung pengelolaan lanskap dan perumusan kebijakan pembangunan berkelanjutan di Sumatra.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi penelitian

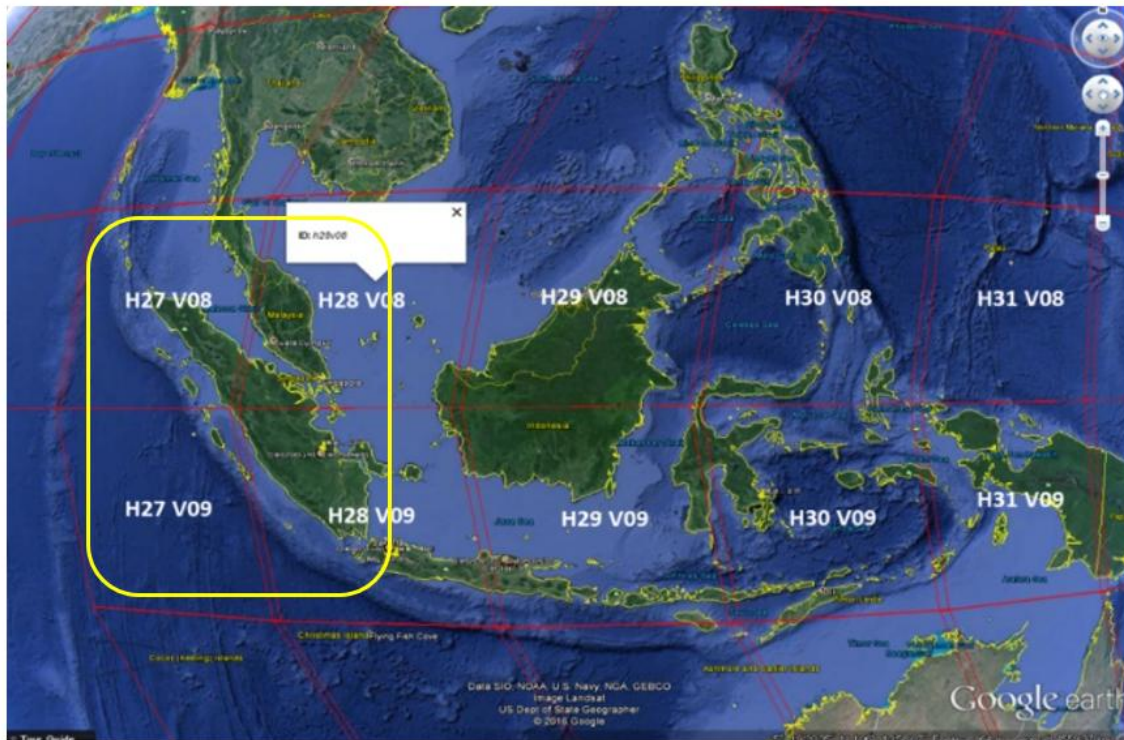
Cakupan studi analisis perubahan tutupan vegetasi meliputi seluruh Pulau Sumatra. Secara geografis, Sumatra terbagi menjadi beberapa provinsi, dari Aceh hingga Lampung, dengan luasan sekitar 47,3 juta hektare (**Gambar 1**). Beberapa provinsi memiliki ekosistem lahan gambut cukup luas yaitu Provinsi Riau, Jambi, dan Sumatra Selatan, yang sering kali secara historis sering kali mengalami kebakaran hutan dan lahan.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Pulau Sumatra.

2.2. Data spasial

Penelitian ini menggunakan data penginderaan jauh multi-temporal untuk menganalisis perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra. Data utama berupa citra satelit MODIS produk MOD13Q1 dengan resolusi spasial 250 m yang menyediakan *Enhanced Vegetation Index* (EVI) komposit 16-harian dengan koreksi awan, sehingga sesuai untuk memantau dinamika vegetasi secara kontinu. Analisis dilakukan pada periode 2001-2020 untuk merepresentasikan variasi antar dekade, termasuk kejadian El Niño tahun 2015 dan penerapan moratorium hutan sejak 2011. Wilayah kajian dicakup oleh empat tile MODIS (h27v08, h27v09, h28v08, dan h28v09) dengan total sekitar 460 komposit per piksel selama periode pengamatan. Data MODIS diperoleh dari *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) dan diproyeksikan ke sistem koordinat geografis WGS84.



Gambar 2. Cakupan tile H/V data MODIS untuk wilayah Sumatra.

Sebagai data pendukung, penelitian ini memanfaatkan citra Landsat dan peta tutupan lahan multi-temporal dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tahun 2000, 2010, dan 2020 skala 1:250.000 untuk membantu interpretasi jenis dan arah perubahan vegetasi. Selain itu, data titik panas MODIS (*Fire Hotspots Terra/Aqua*) periode 2001-2020 digunakan untuk mengidentifikasi kejadian kebakaran, khususnya di wilayah lahan gambut timur Sumatra yang rentan terhadap gangguan api. Validasi ekologis dilakukan menggunakan data lapangan dan referensi sekunder terkait kondisi vegetasi pada lahan gambut yang terbakar, termasuk informasi struktur tegakan sebelum dan sesudah kebakaran sebagaimana dilaporkan dalam studi sebelumnya (Setiawan *et al.* 2025).

2.3. Metode analisis

2.3.1. Pra-pengolahan data

Seluruh citra EVI MODIS 16-harian disusun menjadi deret waktu per *pixel*. Redaksi derau dilakukan melalui *Maximum Value Composite* (MVC) bulanan, yakni memilih nilai EVI maksimum tiap bulan per *pixel* agar efek awan tersisa berkurang. Hasilnya, diperoleh 12 nilai EVI per tahun per *pixel* (total 240 *time-points* 2001-2020). Data *hotspot* di-*overlay* ke *grid* MODIS untuk menandai *pixel-pixel* yang mengalami

kebakaran pada tahun tertentu. *MODIS Land Discipline Group* (MODLAND) mengembangkan indeks vegetasi EVI MODIS data dengan **Persamaan 1**. Sementara itu, **Gambar 3** mengilustrasikan perubahan nilai indeks dalam beberapa periode tahun yang terdeteksi dan menggambarkan perubahan tutupan lahan yang terjadi.

$$EVI = G \frac{\rho_{nir}^* - \rho_{red}^*}{\rho_{nir}^* + C_1 \rho_{red}^* - C_2 \rho_{blue}^* + L} (1 + L) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

ρ_{nir}^* = nilai reflektan dari infra-merah dekat (NIR)

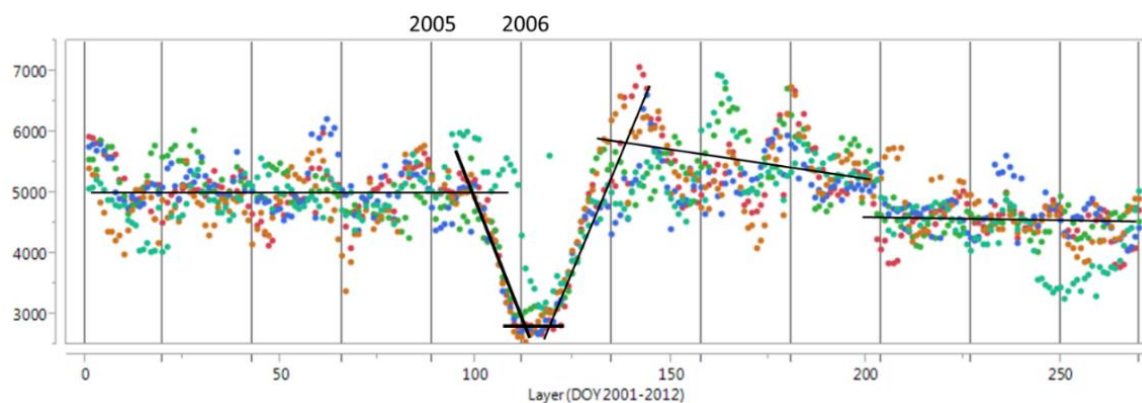
ρ_{red}^* = nilai reflektan dari pita merah (*red*)

ρ_{blue}^* = nilai reflektan dari pita biru (*blue*)

L = faktor koreksi tanah (nilai = 1,0)

C = koefisien koreksi kanal merah akibat efek atmosfer / *aerosol scattering* (nilai C_1 = 6,0; nilai C_2 = 7,5)

G = faktor gain (nilai = 2,5)



Gambar 3. Perubahan pola indeks vegetasi yang terdeteksi sebagai perubahan tutupan lahan.

Normalized Burn Ratio (NBR) adalah indeks spektral yang dikembangkan untuk mendeteksi dan mengevaluasi dampak kebakaran terhadap vegetasi, khususnya pada ekosistem hutan dan lahan gambut. NBR memanfaatkan perbedaan respons spektral vegetasi sehat dan vegetasi terbakar pada kanal *Near Infrared* (NIR) dan *Shortwave Infrared* (SWIR). Vegetasi sehat umumnya memiliki reflektansi tinggi pada NIR dan rendah pada SWIR, sedangkan area terbakar atau terdegradasi menunjukkan penurunan reflektansi NIR dan peningkatan reflektansi SWIR akibat hilangnya biomassa hijau, perubahan struktur kanopi, serta peningkatan kandungan abu dan tanah terbuka. Secara matematis, NBR dirumuskan pada **Persamaan 2**.

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

$SWIR$ = nilai reflektan *shortwave infrared*

NIR = nilai reflektan dari infra-merah dekat

2.3.2. Deteksi perubahan tahunan

Perbedaan nilai EVI antar tahun dideteksi dengan metode dalam Setiawan *et al.* (2015). Setiap *pixel* dilakukan perhitungan $\Delta\text{EVI} = |\text{EVI}(t) - \text{EVI}(t+1)|$ untuk semua pasangan tahun $t..t+1$. *Pixel* dianggap mengalami perubahan signifikan pada interval $t..t+1$ jika ΔEVI melebihi ambang α , yang ditentukan berdasarkan distribusi ΔEVI di area hutan stabil (*baseline*). Nilai α dipilih setara penurunan >20% dari nilai EVI rata-rata tahunan *pixel*, yang melebihi 2 standar deviasi variabilitas musiman normal. Arah perubahan juga dicatat, di mana penurunan EVI menunjukkan gangguan vegetasi, sedangkan peningkatan EVI mengindikasikan pemulihan. Hasilnya berupa peta *pixel* yang berubah per tahun, yang kemudian dikelompokkan ke dalam segmen trajektori dengan perbedaan nilai rata-rata EVI. Selanjutnya, dihitung perbedaan nilai dari dua tahun secara berurutan (*successive years*) dengan formula jarak (**Persamaan 3**).

$$d_{k,l} = \frac{N_k}{N_{\text{new}}} |\mu_k - \mu_{\text{new}}|^2 + \frac{N_l}{N_{\text{new}}} |\mu_l - \mu_{\text{new}}|^2 \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

$d_{k,l}$ = jarak antara dua segmen tahun secara berurutan

N = jumlah data yang diobservasi ($N_{\text{new}} = N_k + N_l$)

μ = nilai rata-rata segmen

2.3.3. Analisis trajektori perubahan tutupan

Berdasarkan peta perubahan tahunan, trajektori perubahan tutupan lahan diidentifikasi untuk setiap piksel selama periode 20 tahun. Trajektori didefinisikan sebagai urutan keadaan tutupan lahan suatu piksel, yang dimulai dari kondisi awal tahun 2001, mengalami satu atau lebih perubahan pada tahun-tahun tertentu, hingga mencapai kondisi akhir pada tahun 2020. Beberapa kategori trajektori utama yang digunakan antara lain:

- a. Hutan menjadi Pertanian Permanen: penurunan EVI tajam lalu stabil rendah, kelas akhir pertanian/perkebunan
- b. Hutan menjadi Permukiman/Infrastruktur: penurunan EVI tajam, kelas akhir lahan terbangun
- c. Hutan menjadi Hutan Sekunder: penurunan EVI kemudian meningkat kembali mendekati semula, kelas akhir kembali hutan (regenerasi)
- d. Hutan menjadi Belukar terbuka: penurunan EVI, kelas akhir semak belukar (tidak diolah lanjut)

- e. Siklus Hutan Tanaman: fluktuasi EVI periodik (turun-naik), kelas tutupan berganti hutan tanaman ↔ lahan terbuka
- f. Ekspansi Pertanian pada lahan terbuka: kenaikan EVI bertahap dari lahan tadah hujan/belukar menjadi lahan budidaya.

Kriteria setiap kategori disusun berdasarkan literatur dan contoh empiris, termasuk rujukan Setiawan *et al.* (2015), misalnya dalam mengidentifikasi siklus hutan tanaman melalui pola penurunan EVI signifikan (pemanenan) yang diikuti peningkatan kembali (*replanting*) dalam selang waktu beberapa tahun.

Pixel yang terindikasi kebakaran berdasarkan *hotspot* dan penurunan EVI bersamaan, dilakukan analisis tambahan menggunakan NBR dari citra *Landsat* pasca kejadian. Selisih nilai NBR sebelum dan sesudah kebakaran (dNBR) dihitung untuk menguantifikasi tingkat keparahan kebakaran, di mana nilai dNBR yang tinggi mencerminkan dampak kebakaran yang besar terhadap vegetasi. Selanjutnya, trajektori EVI pasca kebakaran dianalisis guna mengevaluasi laju dan tingkat pemulihan vegetasi, yaitu dengan menilai apakah nilai EVI kembali mendekati kondisi pra-kebakaran. Mengacu pada Setiawan *et al.* (2025), laju pemulihan ditentukan berdasarkan waktu yang dibutuhkan EVI untuk kembali hingga $\pm 10\%$ dari nilai pra-kebakaran, sedangkan piksel yang tidak mencapai tingkat tersebut dalam periode lebih dari lima tahun diklasifikasikan sebagai mengalami degradasi permanen.

2.3.4. Validasi dan evaluasi

Validasi dilakukan melalui dua tahap, yaitu validasi deteksi perubahan dan validasi klasifikasi trajektori. Validasi deteksi perubahan menggunakan 10.000 titik sampel acak yang mewakili area terdeteksi berubah dan tidak berubah, yang diverifikasi menggunakan peta tutupan lahan, citra resolusi tinggi *Google Earth*, serta laporan kasus terkait. Berdasarkan hasil verifikasi, dihitung akurasi keseluruhan serta akurasi produser dan pengguna untuk kelas “berubah” dan “tidak berubah”, dengan target akurasi keseluruhan $\geq 80\%$ sesuai Setiawan *et al.* (2015). Validasi klasifikasi trajektori dilakukan melalui studi kasus pada lokasi representatif, seperti wilayah deforestasi intensif di Riau dan lahan gambut terbakar di Sumatra Selatan, dengan membandingkan hasil klasifikasi terhadap data lapangan, perizinan, survei vegetasi, serta informasi pendukung dari masyarakat lokal, data sekunder, dan media.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pola spasio-temporal perubahan tutupan vegetasi

Hasil analisis menunjukkan bahwa Pulau Sumatra mengalami kehilangan tutupan hutan yang signifikan selama dua dekade terakhir. Total deforestasi pada periode 2001-2020 diperkirakan mencapai sekitar 6-7 juta hektare, konsisten dengan berbagai sumber independen yang melaporkan kehilangan hutan sekitar 67.000 km² hingga tahun 2018 (Hansen *et al.* 2013; Margono *et al.* 2014; Gaveau *et al.* 2016). Laju deforestasi rata-rata selama periode tersebut melebihi 3.000 km² per tahun, yang menempatkan Sumatra sebagai salah satu *hotspot* deforestasi tropis di dunia (Margono *et al.* 2014). Secara spasial, perubahan tutupan vegetasi tidak terjadi secara merata, dengan konsentrasi kehilangan hutan terbesar teridentifikasi di wilayah Sumatra bagian tengah dan timur, sebagaimana ditunjukkan pada peta distribusi perubahan (**Gambar 4**).



Gambar 4. Distribusi perubahan tutupan vegetasi yang terdeteksi di Pulau Sumatra tahun 2014-2024.

Kawasan dengan aktivitas deforestasi paling intensif di Pulau Sumatra meliputi Provinsi Riau, Jambi, Sumatra Selatan, serta sebagian wilayah pantai timur Sumatra Utara. Riau muncul sebagai *hotspot* deforestasi utama akibat kombinasi ekspansi perkebunan kelapa sawit dan hutan tanaman industri di lahan gambut. Sebaliknya, provinsi di ujung selatan dan utara Sumatra, yaitu Lampung dan Aceh, menunjukkan laju perubahan yang relatif lebih rendah.

Kondisi tersebut dipengaruhi oleh keterbatasan sisa hutan di Lampung yang hanya menyisakan kurang dari 10% tutupan hutan, serta dominasi hutan pegunungan yang relatif masih utuh di Aceh dan Sumatra Utara bagian barat, khususnya pada ekosistem Leuser-Ulu Masen. Di wilayah pegunungan Bukit Barisan secara umum, perubahan tutupan hutan lebih banyak berupa degradasi lokal akibat pembalakan liar dibandingkan konversi masif menjadi lahan pertanian

Dengan mengintegrasikan hasil deteksi perubahan tahunan dan peta tutupan lahan, penelitian ini mengidentifikasi lima trajektori perubahan tutupan vegetasi dominan di Sumatra. Trajektori pertama merupakan pola deforestasi klasik, yaitu perubahan hutan menjadi lahan terbuka yang selanjutnya dikonversi menjadi pertanian permanen. Pola ini ditandai oleh kehilangan tajuk hutan secara *abrupt* yang tercermin dari penurunan nilai EVI yang signifikan, sering kali didahului oleh kebakaran atau fase lahan kosong, sebelum akhirnya berkembang menjadi perkebunan homogen seperti kelapa sawit atau akasia. Trajektori ini paling banyak ditemukan di Riau, Jambi, dan Sumatra Selatan, terutama pada awal tahun 2000-an, dan memberikan kontribusi terbesar terhadap total deforestasi di Sumatra.

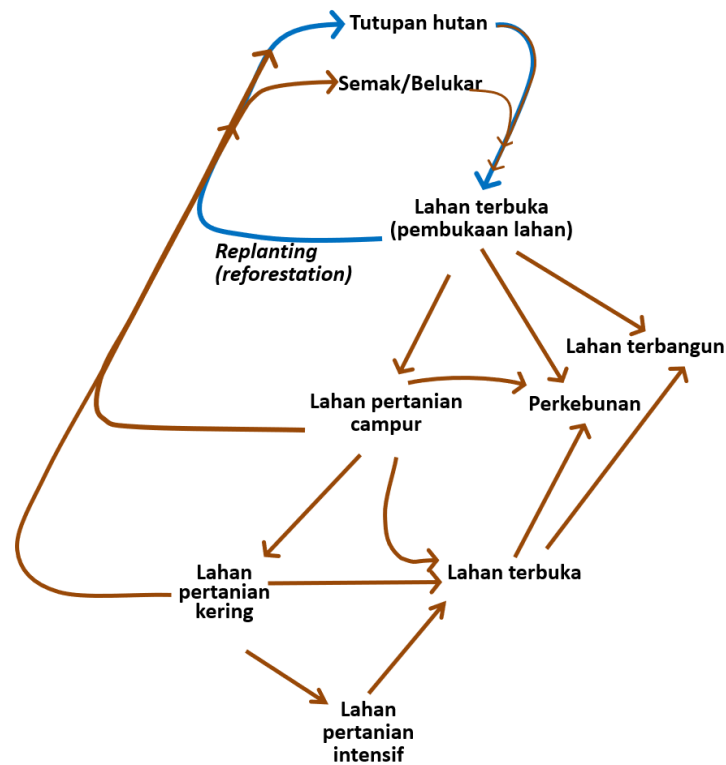
Trajektori kedua menunjukkan perubahan hutan menjadi lahan terbuka yang kemudian dialihfungsikan menjadi permukiman atau infrastruktur. Meskipun memiliki fase awal yang serupa dengan konversi ke pertanian, tujuan akhir trajektori ini bersifat non-pertanian, seperti pembangunan kawasan permukiman, jaringan jalan, atau pertambangan terbuka. Pola ini teridentifikasi di koridor perkotaan Medan-Binjai, sepanjang proyek Jalan Tol Trans-Sumatra, serta di wilayah pertambangan batu bara di Sumatra Selatan. Secara regional, frekuensinya lebih rendah dibandingkan konversi ke pertanian, namun berdampak signifikan pada skala lokal di sekitar pusat pertumbuhan urban dan industri.

Trajektori ketiga mencerminkan ekspansi pertanian pada lahan tidak berhutan, yaitu perubahan dari lahan terbuka atau bersemak menjadi lahan budidaya. Pola ini ditandai oleh peningkatan nilai EVI secara bertahap atau relatif cepat pada piksel non-hutan, tergantung pada intensitas pengelolaan lahan. Trajektori ini umum dijumpai di wilayah pinggiran hutan atau lahan gambut yang telah lama terdegradasi, seperti di perbatasan Jambi-Sumatra Selatan, di mana lahan gambut terbuka banyak dikonversi menjadi kebun sawit rakyat.

Trajektori 4 mencerminkan siklus rotasi hutan tanaman, ditandai oleh perubahan berulang dari hutan tanaman menjadi lahan terbuka dan kembali menjadi hutan tanaman. Pola ini terutama terjadi di kawasan hutan tanaman industri, di mana nilai EVI menunjukkan fluktuasi periodik akibat kegiatan tebang habis dan penanaman kembali. Dalam periode pengamatan 20 tahun, siklus ini dapat terjadi lebih dari satu kali, misalnya pada interval 6-7 tahun. Trajektori ini banyak terdeteksi di Riau dan Sumatra Selatan yang memiliki konsesi hutan tanaman luas, serta penting untuk membedakan antara perubahan tutupan yang bersifat sementara dengan deforestasi permanen. Meskipun tidak menyebabkan kehilangan hutan secara netto dalam jangka panjang, fase lahan terbuka pada siklus ini tetap mencerminkan degradasi habitat sementara.

Trajektori terakhir atau trajektori 5 menunjukkan perubahan hutan menjadi semak belukar atau vegetasi sekunder terdegradasi dengan regenerasi terbatas. Trajektori ini umumnya dipicu oleh kebakaran atau penebangan selektif yang tidak diikuti konversi lahan lebih lanjut. Pola temporal EVI menunjukkan penurunan saat gangguan terjadi, diikuti peningkatan parsial yang tidak kembali ke tingkat semula, sehingga stabil pada nilai yang lebih rendah. Kondisi ini umum dijumpai pada lahan gambut terbakar yang ditinggalkan, di mana vegetasi yang tumbuh kembali didominasi spesies pionir berstruktur rendah. Temuan ini sejalan dengan hasil Setiawan *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa kebakaran berulang menyebabkan stagnasi nilai EVI dan perubahan struktur vegetasi menuju semak belukar. Trajektori ini banyak ditemukan di kawasan konservasi yang mengalami gangguan, seperti pinggir taman nasional atau lahan yang sebelumnya dikelola namun kemudian ditinggalkan.

Gambar 5 menunjukkan trajektori perubahan tutupan hutan yang bersifat *multi-directional*, di mana hutan tidak hanya mengalami konversi satu arah menuju lahan terbuka atau penggunaan budidaya, tetapi juga melalui berbagai jalur transisi yang berbeda. Tutupan hutan dapat berubah menjadi semak/belukar atau lahan terbuka sebagai tahap awal pembukaan lahan, yang selanjutnya berkembang menjadi pertanian campur, pertanian intensif, maupun perkebunan. Sebaliknya, sebagian lahan terbuka atau lahan terdegradasi juga dapat kembali menuju kondisi berhutan melalui *replanting* atau *reforestasi*, menunjukkan adanya dinamika gangguan-pemulihan dalam sistem penggunaan lahan.



Gambar 5. Trajektori multi-arah perubahan tutupan hutan.

3.2. Perbedaan antar kawasan (kawasan produksi vs kawasan lindung)

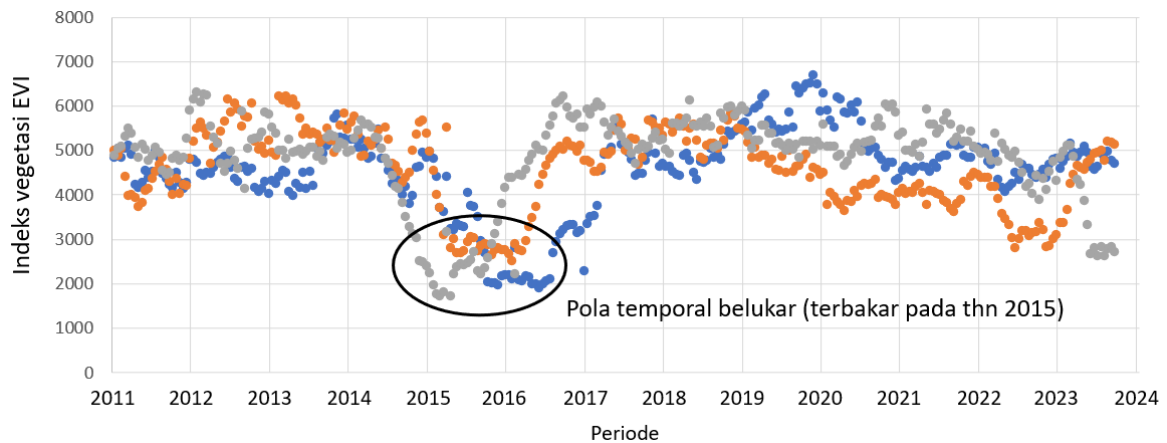
Analisis trajektori per kategori kawasan hutan menunjukkan dinamika yang berbeda antara hutan produksi dan hutan lindung. Pada kawasan hutan produksi (HP), terdeteksi banyak perubahan bersifat siklikal dan terencana. Misalnya di konsesi HPK/HTI, kurva EVI menampilkan pola tebang tanam (Trajektori 4) dan ada juga perubahan gradual akibat praktik *selective logging* yang tersebar (EVI turun sedikit tanpa putus, sulit terdeteksi *threshold*). Pola perubahan *abrupt* maupun gradual di hutan produksi ini mencerminkan dampak aktivitas pengelolaan lahan (*land management*) yang intens di Sumatra. Sebaliknya, di kawasan hutan lindung dan konservasi, secara ideal tidak boleh ada perubahan berarti kecuali gangguan alami.

Perubahan tutupan di TN Tesso Nilo dan TN Gunung Leuser didominasi perambahan serta kebakaran. Penurunan nilai EVI di TN Tesso Nilo mencerminkan konversi hutan menjadi sawit ilegal, sementara kebakaran 2015 merusak SM Giam Siak Kecil. Trajektori hutan konservasi umumnya berubah permanen menjadi belukar atau pertanian ilegal, berbeda dengan siklus tebangan di hutan produksi. Hal ini menegaskan kerentanan kawasan lindung terhadap degradasi jika penegakan hukum lemah.

3.3. Kasus khusus: kebakaran dan pemulihan vegetasi

Dinamika perubahan tutupan vegetasi di Sumatra, khususnya pada ekosistem lahan gambut. Analisis spasio-temporal pasca kebakaran memberikan gambaran mengenai kapasitas pemulihan ekosistem gambut. Studi trajektori oleh Setiawan *et al.* (2025) di lahan gambut Merang, Sumatra Selatan menunjukkan perbedaan pemulihan yang jelas antara area yang mengalami kebakaran tunggal dan kebakaran berulang. Pada lahan gambut yang hanya terbakar satu kali, seperti pada peristiwa kebakaran tahun 2015, nilai EVI meningkat secara bertahap pasca kebakaran dan mendekati kondisi pra-kebakaran dalam kurun waktu sekitar 3-5 tahun yang mengindikasikan adanya potensi suksesi alami. Sebaliknya, area yang mengalami kebakaran berulang (mengalami 3-4 kali kebakaran antara 2005-2019) menunjukkan pola EVI yang fluktuatif namun stagnan pada nilai rendah, akibat vegetasi yang terus terbakar sebelum sempat membentuk tutupan yang rapat. Survei lapangan mengonfirmasi bahwa kebakaran berulang menurunkan kompleksitas struktur hutan - hampir semua pohon besar mati, hanya menyisakan tumbuhan bawah seperti paku-pakuan (*Stenochlaena palustris*) dan semak (*Melastoma* sp.). Kondisi vegetasi dengan biomassa rendah ini menyebabkan nilai EVI tetap rendah meskipun terdapat penutupan vegetasi, sehingga mencerminkan pergeseran trajektori ekosistem menuju kondisi terdegradasi permanen apabila gangguan kebakaran terus berulang.

Indeks vegetasi EVI dan NBR sangat berguna dalam memetakan dampak kebakaran di Sumatra. Hasil analisis menunjukkan ratusan ribu hektar lahan terbakar terutama di Sumsel dan Jambi. Ketika *overlay* dengan trajektori, hampir semua *pixel* yang terbakar 2015 masuk kategori "Hutan menjadi Belukar" atau "Hutan Tanaman menjadi Belukar" (karena banyak HTI gambut juga terbakar). Hanya sedikit yang pulih menjadi "Hutan kembali". Ini menandakan *severity* kebakaran 2015 menyebabkan perubahan permanen di banyak area. Berdasarkan hasil analisis, sekitar 6,5% dari hutan Sumatra terbakar setidaknya sekali 2002-2019, dengan beberapa area gambut terbakar berkali-kali (berdasarkan akumulasi *burn area*). Pola spasial menunjukkan area gambut yang dikeringkan untuk konsesi paling rentan terbakar.



Gambar 6. Perubahan dinamika temporal vegetasi yang diperoleh dari data MODIS.

Temuan lain, analisis trajektori juga mengungkap resiliensi relatif hutan non-gambut terhadap kebakaran. Di hutan tanah mineral, jika terbakar sekali umumnya tutupan bisa pulih lebih baik karena pohon-pohon besar mungkin sebagian selamat atau sumber biji dekat. Ini berbeda dengan gambut yang sekali terbakar pun susah pulih karena kondisi tanah berubah (kering dan subsiden). Hal ini menggarisbawahi perlunya perhatian khusus pada trajektori kebakaran di lahan gambut.

3.4. Interpretasi ekologis dan hubungan dengan penggunaan lahan

Hasil analisis trajektori menunjukkan bahwa konversi hutan akibat aktivitas manusia merupakan pendorong utama hilangnya tutupan hutan di Sumatra, terutama melalui jalur hutan menjadi lahan pertanian/perkebunan. Meskipun indeks vegetasi (NDVI/EVI) pada lahan budidaya dapat kembali tinggi, kondisi ini tidak merepresentasikan pemulihan ekosistem, melainkan penggantian hutan alam yang kompleks oleh vegetasi homogen, sehingga analisis trajektori penggunaan lahan menjadi penting untuk membedakan “*greening*” semu dari pemulihan ekologis yang sesungguhnya.

Selain konversi langsung, trajektori hutan menjadi belukar menunjukkan luasnya degradasi tanpa perubahan fungsi lahan permanen, yang berdampak pada penurunan kualitas habitat dan stok karbon, namun sekaligus menyimpan potensi restorasi alami jika gangguan dihentikan. Di sisi lain, trajektori siklik pada hutan tanaman mencerminkan intensifikasi kehutanan yang secara tutupan tampak stabil, tetapi secara ekologis rentan terhadap erosi, emisi karbon, dan kehilangan biodiversitas selama fase lahan terbuka. Pola-pola trajektori ini juga memperlihatkan

kuatnya pengaruh kebijakan dan ekonomi, di mana pembatasan deforestasi skala besar pasca 2011 diimbangi oleh ekspansi lahan skala kecil yang tersebar. Dengan demikian, pemetaan trajektori tidak hanya menjelaskan arah perubahan tutupan hutan, tetapi juga mengidentifikasi wilayah prioritas untuk pencegahan konversi lanjutan dan intervensi restorasi.

3.5. Implikasi dan rekomendasi kebijakan

Implikasi kebijakan dari hasil analisis trajektori menegaskan perlunya perlindungan ketat terhadap sisa hutan alam Sumatra, terutama blok hutan besar dan utuh seperti Leuser dan Ulu Masen, serta kantong hutan dataran rendah yang masih tersisa namun berada di bawah tekanan tinggi. Data trajektori menunjukkan bahwa area ini rentan terhadap konversi ilegal, sehingga penguatan patroli, penegakan hukum dan pelibatan masyarakat lokal menjadi krusial untuk mencegah deforestasi.

Selain perlindungan, restorasi ekosistem pada area terdegradasi (trajektori hutan → belukar) perlu diprioritaskan sebelum lahan berubah fungsi permanen. Lahan gambut terdegradasi dan area hulu DAS yang mengalami degradasi merupakan target strategis untuk rehabilitasi melalui *rewetting*, revegetasi spesies asli, dan pengendalian kebakaran. Integrasi peta trajektori ke dalam perencanaan rehabilitasi hutan dan lahan nasional akan meningkatkan ketepatan sasaran dan efisiensi alokasi sumber daya. Pengendalian kebakaran, khususnya di lahan gambut, muncul sebagai faktor penentu arah trajektori. Area dengan kebakaran berulang perlu menjadi fokus pencegahan berbasis komunitas dan penegakan larangan pembukaan lahan dengan api, disertai kewajiban pengelolaan air oleh pemegang konsesi. Hasil studi ini juga mengindikasikan bahwa moratorium hutan primer dan gambut pasca 2011 efektif menekan deforestasi, namun perlu diperkuat melalui sinkronisasi kebijakan pusat-daerah dan perluasan perlindungan ke hutan sekunder bernilai konservasi tinggi.

Di tingkat tata kelola, informasi trajektori dapat dimanfaatkan untuk penataan ruang dan perizinan berbasis bukti, dengan mengarahkan ekspansi pertanian ke lahan terdegradasi dan menghindari pembukaan hutan baru. Di sisi lain, komitmen nol deforestasi sektor swasta perlu diawasi secara ketat melalui transparansi rantai pasok dan penegakan standar keberlanjutan, serta didukung oleh pemberdayaan petani kecil agar peningkatan produksi tidak mendorong ekspansi ke kawasan hutan.

Secara keseluruhan, studi ini menegaskan bahwa pencegahan deforestasi dan pemulihan lahan terdegradasi harus berjalan beriringan, didukung oleh sistem *monitoring* spasio-temporal yang berkelanjutan. Pemanfaatan analisis trajektori memungkinkan intervensi yang lebih dini, terarah, dan adaptif untuk membelokkan trajektori negatif menuju pemulihan hutan jangka panjang..

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi ini menyajikan karakterisasi yang komprehensif terhadap trajektori spasio-temporal perubahan tutupan vegetasi di Pulau Sumatra, yang menunjukkan bahwa kehilangan hutan meningkat tajam pada awal tahun 2000-an, terutama didorong oleh ekspansi perkebunan dan kebakaran berulang di lahan gambut, sebelum melambat dalam satu dekade terakhir seiring intervensi kebijakan dan semakin terbatasnya hutan dataran rendah yang tersisa. Meskipun terjadi perlambatan, kehilangan dan degradasi hutan masih terkonsentrasi pada *hotspot* tertentu, khususnya di Provinsi Riau, Jambi, Sumatra Selatan, dan Sumatra Utara, sementara wilayah lain menunjukkan kondisi relatif stabil atau pemulihan terbatas.

Analisis berbasis trajektori menunjukkan keunggulan yang jelas dibandingkan pendekatan dua-waktu, karena mampu membedakan konversi penggunaan lahan yang bersifat permanen dari gangguan sementara yang diikuti pemulihan, serta mengungkap dinamika perubahan tutupan hutan yang bersifat multi-arah dan multi-tahap. Berbagai tipe trajektori berkorelasi kuat dengan faktor penggerak spesifik, termasuk konversi menuju perkebunan, degradasi akibat pembalakan dan kebakaran, serta dinamika siklik pada hutan tanaman industri. Integrasi deret waktu indeks vegetasi dengan metrik kebakaran semakin memperkuat ketepatan atribusi perubahan.

Dari perspektif ekologi, hasil penelitian ini menegaskan bahwa frekuensi gangguan merupakan faktor kunci yang menentukan ketahanan ekosistem. Gangguan tunggal masih memungkinkan terjadinya pemulihan parsial, namun gangguan berulang, terutama kebakaran, secara signifikan menurunkan kapasitas pemulihan dan mendorong pergeseran menuju kondisi ekosistem yang terdegradasi. Temuan ini menekankan pentingnya pendekatan pengelolaan lanskap yang mempertimbangkan tekanan kumulatif, bukan hanya kejadian gangguan secara individual.

Berdasarkan temuan tersebut, strategi pengelolaan yang efektif perlu memprioritaskan perlindungan hutan alam yang tersisa, restorasi dini pada lahan terdegradasi sebelum terjadi konversi permanen, penguatan pencegahan kebakaran lahan gambut, serta keberlanjutan kebijakan moratorium hutan dan gambut yang didukung penegakan hukum yang konsisten. Integrasi informasi trajektori ke dalam sistem pemantauan dan perencanaan tata ruang berpotensi meningkatkan ketepatan sasaran intervensi konservasi dan restorasi.

Secara keseluruhan, analisis trajektori spasio-temporal merupakan kerangka kerja yang kuat dan relevan secara kebijakan untuk memahami dinamika perubahan tutupan hutan di Sumatra, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti dalam pengelolaan hutan dan lanskap yang adaptif dan berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh pendanaan RIIM LPDP dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui Program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) *Batch* 3, dengan Nomor Kontrak 4/IV/KS/05/2023 dan 13955/IT3/PT.01.03/P/B/2023. Kami juga menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, *International Research Institute for Environment and Climate Change* (PPLH-LRI LPI), IPB University, serta para mitra kolaborasi, termasuk Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan, Kementerian Kehutanan Republik Indonesia, dan Laboratorium Analisis Lingkungan dan Pemodelan Geospasial, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University, atas dukungan berharga mereka dalam kegiatan validasi lapangan dan penyediaan data. Selain itu, kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh tim lapangan, para pemangku kepentingan lokal, dan mitra peneliti yang telah memberikan kontribusi penting, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Bradshaw CJA, Sodhi NS, Peh KSH, Brook BW. 2007. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity. *Global Change Biology* 13:237-256.
- Carlson KM, Curran LM, Ratnasari D, Pittman AM, Soares-Filho BS, Asner GP, Trigg SN, Gaveau DA, Lawrence D, and Rodrigues HO. 2012. Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion

- in West Kalimantan, Indonesia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(19):7559-7564. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200452109>
- Field RD, van der Werf GR, Fanin T, Fetzner EJ, Fuller R, Jethva H, Levy R, Livesey NJ, Luo M, Torres O, and Worden HM. 2016. Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(33):9204-9209. <https://doi.org/10.1073/pnas.1524888113>
- Foley JA, Defries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, and Snyder PK. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309(5734):570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>.
- Gaveau DLA, Sheil D, Husnayaen, Salim MA, Arjasakusuma S, Ancrenaz M, Pacheco P, and Meijaard E. 2016. Rapid conversions and avoided deforestation: examining four decades of industrial plantation expansion in Borneo. *Scientific Reports* 6:32017.
- Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, and Townshend JR. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* 342:850-853.
- Lambin EF and Geist H. 2006. *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. Springer 10.1007/3-540-32202-7.
- Lambin EF, Geist HJ, Lepers E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources* 28:205-241.
- Margono BA, Potapov PV, Turubanova S, Stolle F, Hansen MC. 2014. Primary forest cover loss in Indonesia over 2000-2012. *Nature Climate Change* 4:730-735.
- Malanson J and Pontius RG. 2005. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *Internasional Journal of Geographical Information Science* 19(2):243-265.
- Miettinen J, Shi C, Liew SC. 2011. Deforestation rates in insular Southeast Asia between 2000 and 2010. *Global Change Biology* 17:2261-2270.

- Page SE, Siegert F, Rieley JO, Boem HDV, Jaya A, and Limin S. 2002. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420:61-65.
- Setiawan Y, Lubis MI, Yusuf SM, Prasetyo LB. 2015. Identifying change trajectory over the Sumatra's forestlands using moderate image resolution imagery. *Procedia Environmental Sciences* 24:189-198.
- Setiawan Y, Kustiyo, Hudjimartsu SA, Handayani MA, Jamil A, and Putra EI. 2025. Spatio-temporal detection of vegetation change and recovery in fire-affected peatlands of Sumatra, Indonesia. *Journal of Natural Resources and Environmental Management (JPSL)* 15(6):1034-1050. DOI: 10.29244/jpsl.15.6.1034.
- Turner BL, Lambin EF, Reenberg A. 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability *PNAS* 104:20666-20671
- Turetsky MR, Benscoter B, Page S, Rein G, van der Werf GR, Watts A. 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience* 8:11-14.
- Zhu Z. 2017. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130:370-384