

## Evaluasi Pengamanan Hutan Berbasis Risiko: Hubungan Intensitas Patroli, Pemantauan Satelit, dan Temuan Kayu Ilegal di Bolaang Mongondow

Abdul Samad Hiola<sup>1\*</sup>, Nabila Margareta Hakim<sup>2</sup>, Abdul Alim<sup>3</sup>, Daud Sandalayuk<sup>4</sup>, Alexander Ruruh<sup>5</sup>,  
Ernikawati<sup>6</sup>, Dian Puspaningrum<sup>7</sup>

Fakultas Kehutanan Universitas Gorontalo, Gorontalo, Indonesia  
shiola@unigo.ac.id

### Informasi Artikel

E-ISSN : 3026-6874  
Vol: 4 No : 6 Juni 2026  
Halaman : 1-22

### Abstract

*Forest protection operations require data-driven evaluation to improve the effectiveness of field patrols, satellite-based monitoring, and law enforcement responses to deforestation and forest-related crimes. This study evaluates risk-based forest protection operations in Bolaang Mongondow Regency, North Sulawesi, Indonesia, by examining the association between patrol intensity and detected deforestation, comparing response times before and after the use of near-real-time satellite monitoring, and identifying temporal patterns and spatial indications of illegal timber findings. The study used operational forest protection data, including ten observation sectors, thirty matched case pairs for response-time analysis, and 150 illegal timber finding points collected during the observation period. Data were analyzed using descriptive statistics, simple linear regression, paired-sample t-test, Cohen's d effect size, Kruskal-Wallis test, and outlier identification based on the 90th percentile threshold. The results show a strong negative association between patrol intensity and detected deforestation, with a regression coefficient of  $-1.05$ ,  $R^2 = 0.919$ ,  $F(1,8) = 91.03$ , and  $p < 0.001$ . However, this relationship should be interpreted as an operational association rather than causal evidence due to the observational design and the limited number of sectors. The use of near-real-time satellite monitoring was associated with a substantial reduction in average response time, from 51.5 hours under the manual system to 23.6 hours after satellite-supported monitoring, with a mean difference of  $-27.9$  hours,  $t(29) = -14.72$ ,  $p < 0.001$ , and Cohen's  $d = 2.69$ . Illegal timber findings also showed significant temporal variation, with the highest average volume recorded in the third quarter, at  $60.2 \pm 14.5 \text{ m}^3$ , and a significant difference across quarters based on the Kruskal-Wallis test,  $H(3) = 28.74$ ,  $p < 0.001$ . Spatially, 80% of outlier points were located in high-risk areas. These findings suggest that integrating risk-based patrol allocation, near-real-time satellite monitoring, and operational spatio-temporal evaluation can support more targeted forest protection strategies, particularly in high-risk areas and during periods of increased illegal timber activity.*

### Keywords:

Forest protection  
Risk-based patrol  
Near-real-time satellite  
monitoring

### Abstrak

Operasi pengamanan hutan membutuhkan evaluasi berbasis data agar alokasi patroli, pemantauan satelit, dan respons penegakan hukum dapat diarahkan pada wilayah serta periode yang paling berisiko. Penelitian ini mengevaluasi hubungan antara intensitas patroli dan luas deforestasi, perubahan waktu respons penanganan kasus setelah pemanfaatan pemantauan satelit near-real-time, serta pola temporal dan indikasi konsentrasi spasial temuan kayu ilegal di Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara. Penelitian menggunakan desain kuantitatif evaluatif berbasis data operasional Balai Penegakan Hukum Kehutanan. Data mencakup 150 titik patroli dan temuan kayu ilegal selama 1 Januari-31 Desember 2023, 10 sektor pengamatan hasil agregasi titik patroli, serta 30 pasang kasus respons yang dipadankan antara periode manual Januari-Juni 2022 dan periode berbasis satelit Januari-Juni 2023. Analisis dilakukan menggunakan statistik deskriptif, regresi linear sederhana, uji-t berpasangan, ukuran efek Cohen's d, uji Kruskal-Wallis, dan identifikasi outlier berbasis persentil ke-90. Hasil menunjukkan bahwa intensitas patroli berasosiasi negatif dan signifikan dengan luas deforestasi pada tingkat sektor ( $B = -1,05$ ;  $R^2 = 0,919$ ;  $F(1,8) = 91,03$ ;  $p < 0,001$ ). Waktu respons rata-rata menurun dari 51,5 jam pada metode manual menjadi 23,6 jam setelah pemanfaatan pemantauan satelit, dengan selisih rata-rata  $-27,9$  jam,  $t(29) = -14,72$ ;  $p < 0,001$ ; dan Cohen's  $d = 2,69$ . Volume temuan kayu ilegal tertinggi terjadi pada Q3 atau Juli-September ( $60,2 \pm 14,5 \text{ m}^3$ ), dengan perbedaan signifikan antarkuartal ( $H(3) = 28,74$ ;  $p < 0,001$ ). Sebanyak 80% titik outlier berada pada wilayah berkerawanan tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi patroli terarah,

pemantauan satelit, dan evaluasi spasial-temporal sederhana dapat memperkuat pengamanan hutan berbasis risiko. Namun, seluruh hasil perlu ditafsirkan sebagai asosiasi operasional karena penelitian bersifat observasional, jumlah sektor regresi terbatas, dan analisis spasial belum menggunakan pemodelan hotspot formal.

**Kata Kunci** : pengamanan hutan; patroli berbasis risiko; pemantauan satelit

## **PENDAHULUAN**

Deforestasi dan kejahatan kehutanan masih menjadi tantangan penting dalam tata kelola hutan tropis. Kehilangan tutupan hutan dapat berdampak pada keanekaragaman hayati, fungsi hidrologis, stok karbon, stabilitas ekosistem, dan kehidupan sosial-ekonomi masyarakat sekitar kawasan. Di Indonesia, tekanan terhadap hutan berkaitan dengan pembalakan ilegal, pembukaan lahan, perkebunan, pertambangan, aksesibilitas kawasan, serta lemahnya pengawasan terhadap perubahan tutupan hutan (Abood et al., 2015; Margono et al., 2014). Karena itu, pengamanan hutan tidak cukup dilakukan secara reaktif, melainkan perlu didukung sistem pemantauan, analisis risiko, dan evaluasi berbasis bukti.

Patroli lapangan merupakan instrumen utama untuk mendeteksi, mencegah, dan menindak pelanggaran kehutanan. Melalui patroli, aparat memperoleh informasi langsung mengenai kondisi tapak, indikasi pelanggaran, jalur angkut, dan keberadaan barang bukti. Data patroli juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi tren aktivitas ilegal, menilai distribusi ancaman, dan mengarahkan alokasi sumber daya penegakan hukum secara lebih efisien (Critchlow et al., 2015, 2017; Khac et al., 2021, 2022). Namun, efektivitas patroli sangat dipengaruhi oleh luas wilayah kerja, ketersediaan personel, akses medan, kualitas pencatatan, dan ketepatan penentuan lokasi prioritas.

Di sisi lain, teknologi penginderaan jauh memberikan peluang untuk mempercepat deteksi gangguan hutan. Sistem peringatan deforestasi berbasis satelit, baik optik maupun radar, mampu menyediakan informasi perubahan tutupan hutan pada wilayah yang luas dan sulit dijangkau. Studi mengenai sistem DETER di Brasil, GLAD Landsat alerts, Sentinel-1, dan pemantauan komunitas berbasis alert menunjukkan bahwa informasi satelit dapat memperkuat penegakan hukum apabila dihubungkan dengan respons lapangan yang memadai (Hansen et al., 2016; Assuncao et al., 2023; Reiche et al., 2021; Slough et al., 2021). Dengan demikian, satelit berfungsi sebagai sistem deteksi dini, sedangkan patroli tetap diperlukan untuk verifikasi, pengamanan barang bukti, dan tindak lanjut hukum.

Aktivitas ilegal di kawasan hutan juga memiliki dimensi spasial dan temporal. Kejadian cenderung terkonsentrasi pada wilayah dengan aksesibilitas tinggi, nilai ekonomi kayu yang besar, riwayat deforestasi, atau kedekatan dengan jalur angkut. Secara temporal, peningkatan kejadian dapat mengikuti musim, kondisi jalan, atau periode tertentu ketika mobilitas pelaku lebih mudah. Oleh sebab itu, evaluasi operasi pengamanan hutan perlu menilai bukan hanya jumlah patroli atau volume temuan, tetapi juga hubungan antarkomponen operasional, pola waktu, dan indikasi konsentrasi wilayah.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis hubungan antara intensitas patroli dan luas deforestasi pada sektor pengamatan; (2) mengevaluasi perbedaan waktu respons penanganan kasus antara metode manual dan metode berbasis pemantauan satelit near-real-time; serta (3) mengidentifikasi pola temporal dan indikasi konsentrasi spasial temuan kayu ilegal berdasarkan volume temuan dan tingkat kerawanan hutan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar penguatan operasi pengamanan hutan berbasis risiko di tingkat tapak.

## **TINJAUAN PUSTAKA**

Patroli hutan merupakan bentuk pengawasan langsung yang digunakan untuk membangun kehadiran aparat di lapangan, meningkatkan risiko deteksi bagi pelaku, dan mengumpulkan data pelanggaran. Critchlow et al. (2017) menunjukkan bahwa data yang dikumpulkan ranger dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi penegakan hukum apabila digunakan untuk merancang patroli berbasis ancaman. Gonedele Bi et al. (2019) juga menunjukkan bahwa patroli kaki yang konsisten dapat memperkuat upaya konservasi di kawasan hutan terancam. Dalam sistem SMART law enforcement, indikator seperti durasi patroli, jarak tempuh, sebaran upaya, dan rasio temuan ilegal dapat digunakan untuk menilai kinerja perlindungan kawasan (Hotte et al., 2016; Khac et al., 2021, 2022).

Namun, data patroli tidak bebas dari bias. Wilayah yang lebih sering dikunjungi memiliki peluang lebih besar untuk menghasilkan temuan, sehingga temuan lapangan dapat mencerminkan kombinasi antara aktivitas ilegal dan intensitas pencarian. Dobson et al. (2019) menekankan bahwa analisis deterrence dari data patroli harus memperhitungkan peluang deteksi dan distribusi upaya. Plumtre et al. (2014) juga menunjukkan bahwa sumber daya pengamanan perlu ditargetkan secara efisien pada lokasi berisiko tinggi. Dalam konteks ini, patroli berbasis risiko menjadi pendekatan yang lebih relevan dibandingkan distribusi patroli yang sama rata.

Pemantauan satelit memperluas kapasitas deteksi karena mampu mengamati perubahan tutupan hutan pada skala luas. Hansen et al. (2013) menyediakan dasar penting berupa peta perubahan tutupan hutan resolusi tinggi, sedangkan Hansen et al. (2016) mengembangkan peringatan gangguan hutan tropis lembap berbasis Landsat. Assuncao et al. (2023) menunjukkan bahwa informasi satelit dapat memperkuat penegakan hukum terhadap deforestasi ketika digunakan untuk menargetkan pengawasan. Reiche et al. (2021) menambahkan bahwa radar Sentinel-1 berguna pada wilayah tropis yang sering tertutup awan. Teknologi ini tidak menggantikan patroli, tetapi memperkuat prioritas verifikasi lapangan.

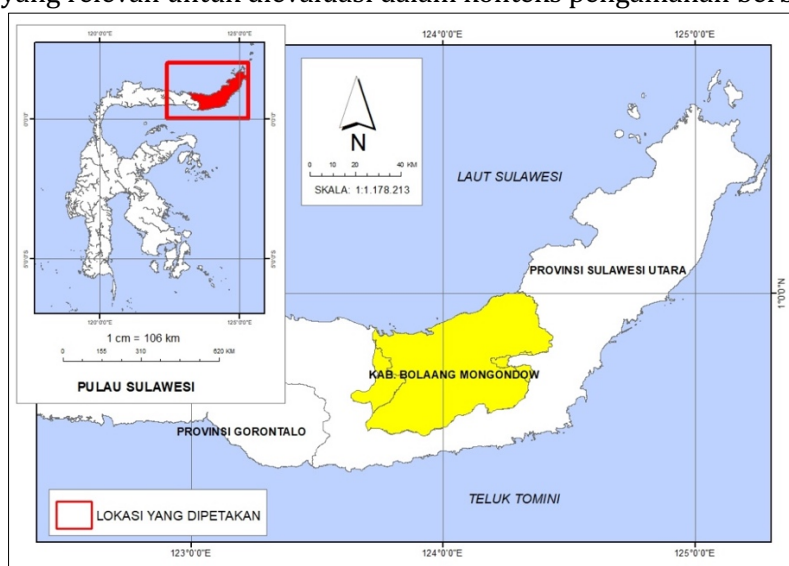
Pendekatan spasial-temporal diperlukan karena kejahatan kehutanan tidak terjadi secara acak. Critchlow et al. (2015) menunjukkan bahwa data patroli dapat mengungkap tren spasial dan temporal aktivitas ilegal di kawasan konservasi. Hu et al. (2018) mengembangkan kerangka spatio-temporal kernel density estimation untuk memetakan hotspot kejahatan. Dalam ekologi spasial, Legendre dan Legendre (2012) menekankan pentingnya analisis numerik dan spasial untuk memahami distribusi fenomena lingkungan. Dengan dasar tersebut, evaluasi operasi pengamanan hutan perlu menggabungkan data patroli, data satelit, dan analisis risiko wilayah.

## METODE PENELITIAN

### 1. Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain evaluatif berbasis data operasional pengamanan hutan. Desain evaluatif dipilih karena penelitian tidak dimaksudkan untuk membuktikan hubungan kausal secara eksperimental, melainkan menilai asosiasi statistik, perubahan indikator operasional, serta pola distribusi temuan berdasarkan data yang tersedia. Oleh karena itu, seluruh hasil ditafsirkan sebagai indikasi hubungan operasional dan prioritas manajerial.

Penelitian dilakukan di wilayah kerja Balai Penegakan Hukum Kehutanan Sulawesi, khususnya Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara. Wilayah ini dipilih karena memiliki variasi tingkat kerawanan hutan, riwayat kejadian kehutanan, perbedaan aksesibilitas kawasan, dan dinamika temuan kayu ilegal yang relevan untuk dievaluasi dalam konteks pengamanan berbasis risiko.



**Gambar 1. Lokasi Penelitian. Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara**

## 2. Periode Pengamatan dan Sumber Data

Data patroli, temuan kayu ilegal, dan analisis kuartal dikumpulkan selama 1 Januari-31 Desember 2025. Rentang satu tahun digunakan untuk menangkap variasi musiman lengkap dari Q1 hingga Q4. Data waktu respons sebelum pemanfaatan satelit menggunakan periode 1 Januari-30 Juni 2024, sedangkan data setelah pemanfaatan satelit menggunakan periode 1 Januari-30 Juni 2025. Pemadanan periode ini dilakukan untuk mengurangi potensi bias musiman karena kedua periode mencakup kuartal pertama dan kedua.

Sumber data utama terdiri atas log patroli harian pada aplikasi Ranger Mobile, Laporan Kejadian Perkara (LKP), dan peta indeks kerawanan berbasis GIS. Ranger Mobile memuat timestamp patroli, koordinat, durasi, jumlah personel, jenis pelanggaran, volume temuan kayu ilegal, serta dokumentasi foto lapangan. LKP memuat informasi nomor perkara, waktu kejadian, waktu pelaporan, waktu respons atau turun lapangan, waktu penyelesaian penanganan, jenis tindak pidana, lokasi, barang bukti, dan petugas penanganan. Peta indeks kerawanan disusun melalui overlay deforestasi historis 2020-2022, jaringan jalan, dan indikasi nilai ekonomi kayu ilegal.

## 3. Unit Analisis dan Struktur Dataset

Unit analisis disesuaikan dengan tujuan pengujian. Analisis hubungan patroli-deforestasi menggunakan 10 sektor pengamatan sebagai unit agregat. Masing-masing sektor memuat rata-rata intensitas patroli dalam jam per bulan per sektor dan luas deforestasi terdeteksi dalam hektare. Analisis waktu respons menggunakan 30 pasang kasus yang dipadankan berdasarkan sektor, jenis pelanggaran, dan kesamaan pos atau petugas pelapor. Analisis temporal menggunakan 150 titik temuan kayu ilegal yang dikelompokkan berdasarkan kuartal kejadian. Analisis spasial deskriptif menggunakan 15 titik outlier yang memiliki volume temuan di atas persentil ke-90 tahunan atau lebih dari 70 m<sup>3</sup>.

Sebanyak 150 titik patroli dipilih dengan stratified random sampling berdasarkan tingkat kerawanan hutan. Kategori kerawanan terdiri atas tinggi, sedang, dan rendah. Wilayah berkerawanan tinggi diberi alokasi titik lebih besar karena penelitian menggunakan pendekatan berbasis risiko, bukan proporsi luas wilayah semata. Skor risiko lebih dari 75 dikategorikan tinggi, skor 40-75 dikategorikan sedang, dan skor kurang dari 40 dikategorikan rendah.

**Tabel 1. Ringkasan desain analisis dan struktur data**

No	Analisis	Unit analisis	Jumlah data	Variabel utama	Sumber data
1	Regresi patroli-deforestasi	Sektor pengamatan	10 sektor	X: intensitas patroli; Y: luas deforestasi	Ranger Mobile, LKP, agregasi sektor
2	Perbandingan waktu respons	Kasus berpasangan	30 pasang kasus	Waktu respons manual dan berbasis satelit	LKP 2022 dan LKP 2023
3	Pola temporal temuan	Titik temuan kayu ilegal	150 titik	Volume temuan dan kuartal kejadian	Ranger Mobile dan LKP 2023
4	Indikasi konsentrasi spasial	Titik outlier	15 titik	Volume > persentil ke-90 dan strata kerawanan	Subset temuan dan peta indeks kerawanan

**Tabel 2. Distribusi titik patroli berdasarkan tingkat kerawanan hutan**

No	Tingkat kerawanan	Skor risiko	Proporsi area populasi (%)	Jumlah titik sampel
1	Tinggi	>75	25	80
2	Sedang	40-75	45	50

3	Rendah	<40	30	20
	Total	-	100	150

#### 4. Variabel Penelitian

Variabel utama penelitian meliputi intensitas patroli, luas deforestasi, waktu respons, volume temuan kayu ilegal, tingkat kerawanan hutan, dan kuartal kejadian. Intensitas patroli dihitung sebagai rata-rata jam patroli per bulan pada setiap sektor pengamatan. Luas deforestasi merupakan luas kehilangan tutupan hutan yang terdeteksi pada sektor yang sama. Waktu respons didefinisikan sebagai durasi sejak indikasi kejadian atau laporan awal diterima hingga tindakan penanganan dilakukan. Volume temuan kayu ilegal diukur dalam meter kubik dan digunakan untuk analisis temporal serta identifikasi outlier. Tingkat kerawanan digunakan untuk mengelompokkan wilayah menjadi tinggi, sedang, dan rendah.

#### 5. Pembersihan, Validasi, dan Keamanan Data

Data mentah melalui pemeriksaan duplikasi, kelengkapan, konsistensi koordinat, validasi logis, dan verifikasi pencilaan teknis. Entri dengan timestamp, koordinat, dan ID petugas identik dihapus sebagai duplikasi. Entri dengan kolom wajib kosong diverifikasi ke petugas pelapor dan dikeluarkan apabila tidak dapat dilengkapi. Durasi patroli harus lebih dari 0 dan tidak melebihi 24 jam, jumlah personel minimal dua orang, dan volume temuan tidak boleh bernilai negatif. Titik yang berada di luar poligon kawasan hutan diperiksa dan dikoreksi apabila merupakan kesalahan GPS; jika tidak dapat dikoreksi, titik dikeluarkan dan diganti dengan titik cadangan sesuai desain sampling.

Validasi operasional dilakukan secara berlapis melalui pemeriksaan ketua tim patroli, supervisor sektor, validasi silang timestamp satelit dan pelaporan manual, audit internal triwulanan terhadap sampel data, serta rekonsiliasi akhir antara Ranger Mobile, LKP, dan logbook pos jaga. Data mentah mengandung informasi sensitif, seperti koordinat presisi, nama petugas, rute, dan jadwal patroli. Oleh karena itu, data publikasi telah dianonimkan: identitas petugas diganti kode numerik, koordinat digeneralisasi ke tingkat sektor, dan rute patroli tidak disajikan. Data mentah disimpan pada server internal dengan akses terbatas dan digunakan setelah memperoleh izin internal untuk publikasi ilmiah dengan syarat anonimisasi penuh.

#### 6. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap untuk menjawab tujuan penelitian, yaitu mengevaluasi hubungan antara intensitas patroli dan luas deforestasi, membandingkan waktu respons penanganan kasus sebelum dan sesudah penggunaan pemantauan satelit near-real-time, serta mengidentifikasi pola temporal dan indikasi konsentrasi spasial temuan kayu ilegal. Seluruh analisis dilakukan menggunakan data yang telah melalui proses pembersihan, validasi kelengkapan, pemeriksaan konsistensi logis, verifikasi koordinat, dan anonimisasi informasi sensitif.

##### a. Statistik Deskriptif

Tahap pertama adalah analisis statistik deskriptif untuk menggambarkan karakteristik data patroli, deforestasi, waktu respons, volume temuan kayu ilegal, dan distribusi titik berdasarkan tingkat kerawanan hutan. Ukuran pemusatan dan penyebaran yang digunakan meliputi rata-rata, standar deviasi, median, interquartile range, nilai minimum, nilai maksimum, serta proporsi.

Rata-rata dihitung menggunakan rumus:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

dengan  $(\bar{x})$  adalah rata-rata,  $(x_i)$  adalah nilai pengamatan ke-(i), dan (n) adalah jumlah pengamatan. Standar deviasi dihitung untuk menggambarkan variasi data terhadap nilai rata-rata dengan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Untuk data yang berpotensi tidak berdistribusi normal, seperti volume temuan kayu ilegal, median dan interquartile range digunakan sebagai ukuran deskriptif tambahan. Interquartile range dihitung sebagai selisih antara kuartil ketiga dan kuartil pertama:

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

Proporsi digunakan untuk menggambarkan distribusi titik patroli dan titik outlier berdasarkan tingkat kerawanan hutan. Proporsi dihitung dengan rumus:

$$P = \frac{f}{N} \times 100\%$$

dengan (P) adalah persentase, (f) adalah jumlah kasus atau titik dalam kategori tertentu, dan (N) adalah total kasus atau titik yang dianalisis.

#### **b. Analisis Hubungan Intensitas Patroli dan Luas Deforestasi**

Hubungan antara intensitas patroli dan luas deforestasi dianalisis menggunakan regresi linear sederhana. Unit analisis pada tahap ini adalah 10 sektor pengamatan. Variabel prediktor adalah intensitas patroli, yaitu rata-rata jam patroli per bulan per sektor, sedangkan variabel respons adalah luas deforestasi terdeteksi pada sektor yang sama.

Model regresi linear sederhana dirumuskan sebagai berikut:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

dengan:

$Y_i$  = adalah luas deforestasi terdeteksi pada sektor ke-(i),

$X_i$  = adalah intensitas patroli pada sektor ke-(i),

$\beta_0$  = adalah konstanta atau intersep,

$\beta_1$  = adalah koefisien regresi yang menunjukkan perubahan rata-rata luas deforestasi untuk setiap peningkatan satu satuan intensitas patroli, dan

$\varepsilon_i$  = adalah komponen galat model.

Koefisien regresi diestimasi menggunakan metode ordinary least squares, yaitu dengan meminimalkan jumlah kuadrat residual:

$$\min \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Nilai prediksi model dihitung sebagai:

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i$$

Residual dihitung sebagai selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i$$

Kekuatan hubungan dalam model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang dihitung dengan rumus:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Nilai ( $R^2$ ) menunjukkan proporsi variasi luas deforestasi yang berkaitan dengan variasi intensitas patroli dalam model. Namun, karena model ini hanya menggunakan 10 sektor pengamatan dan bersifat observasional, nilai ( $R^2$ ) tidak ditafsirkan sebagai bukti kausal, melainkan sebagai ukuran asosiasi statistik pada skala operasional yang dianalisis.

Signifikansi koefisien regresi diuji menggunakan statistik t:

$$t = \frac{\hat{\beta}_1}{SE(\hat{\beta}_1)}$$

dengan ( $SE(\hat{\beta}_1)$ ) adalah galat baku koefisien regresi. Signifikansi model secara keseluruhan diuji menggunakan statistik F:

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

dengan (MSR) adalah mean square regression dan (MSE) adalah mean square error. Tingkat signifikansi ditetapkan pada ( $\alpha = 0,05$ ).

Sebelum interpretasi model, dilakukan pemeriksaan diagnostik regresi secara eksploratif, meliputi pemeriksaan sebaran residual, identifikasi pencilan, dan evaluasi pola residual terhadap nilai prediksi. Pemeriksaan ini dilakukan untuk menilai apakah model linear sederhana cukup memadai secara deskriptif. Mengingat jumlah unit analisis terbatas, hasil regresi ditafsirkan secara hati-hati sebagai indikasi hubungan, bukan sebagai estimasi dampak langsung patroli terhadap deforestasi.

### c. Analisis Perbandingan Waktu Respons Sebelum dan Sesudah Pemantauan Satelit

Perbedaan waktu respons penanganan kasus sebelum dan sesudah penggunaan pemantauan satelit near-real-time dianalisis menggunakan uji-t berpasangan. Uji ini dipilih karena data disusun dalam bentuk pasangan kasus yang dipadankan berdasarkan sektor, jenis pelanggaran, kesamaan petugas atau pos pelapor, serta karakteristik lokasi. Data manual berasal dari periode sebelum implementasi pemantauan satelit, sedangkan data sesudah berasal dari periode setelah penggunaan pemantauan satelit near-real-time.

Selisih waktu respons untuk setiap pasangan kasus dihitung menggunakan rumus:

$$d_i = X_{2i} - X_{1i}$$

dengan:

$d_i$  = adalah selisih waktu respons pada pasangan kasus ke-(i),

$X_{1i}$  = adalah waktu respons pada metode manual, dan

$X_{2i}$  = adalah waktu respons setelah penggunaan pemantauan satelit near-real-time.

Rata-rata selisih dihitung sebagai:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

Standar deviasi selisih dihitung sebagai:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

Statistik uji-t berpasangan dihitung dengan rumus:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}$$

dengan derajat kebebasan:

$$df = n - 1$$

Dalam penelitian ini, ( $n = 30$ ), sehingga derajat kebebasan untuk uji-t berpasangan adalah ( $df = 29$ ). Nilai ( $p < 0,05$ ) digunakan sebagai dasar untuk menyatakan adanya perbedaan yang signifikan secara statistik antara waktu respons manual dan waktu respons setelah penggunaan pemantauan satelit.

Selain signifikansi statistik, ukuran efek dihitung menggunakan Cohen's ( $d$ ) untuk data berpasangan:

$$d_z = \frac{\bar{d}}{s_d}$$

Nilai Cohen's ( $d_z$ ) digunakan untuk menilai besarnya perbedaan waktu respons dalam satuan standar deviasi selisih. Interpretasi umum ukuran efek mengacu pada kriteria kecil, sedang, dan besar, tetapi tetap disesuaikan dengan konteks operasional pengamanan hutan.

Interval kepercayaan 95% untuk rata-rata selisih dihitung menggunakan rumus:

$$\bar{d} \pm t_{\alpha/2, df} \left( \frac{s_d}{\sqrt{n}} \right)$$

dengan ( $t_{\alpha/2, df}$ ) adalah nilai kritis distribusi t pada taraf kepercayaan 95% dan derajat kebebasan ( $df$ ). Interval kepercayaan digunakan untuk menunjukkan rentang estimasi perubahan rata-rata waktu respons secara lebih informatif dibandingkan hanya melaporkan nilai p.

Meskipun desain berpasangan digunakan untuk meningkatkan kesepadanan perbandingan, hasil analisis tetap ditafsirkan sebagai perubahan indikator operasional yang berkaitan dengan penggunaan pemantauan satelit near-real-time. Hasil ini tidak ditafsirkan sebagai bukti kausal tunggal karena perubahan waktu respons juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain, seperti kesiapan personel, aksesibilitas lokasi, kondisi cuaca, kapasitas logistik, pengalaman petugas, dan koordinasi antarunit.

#### **d. Analisis Pola Temporal Volume Temuan Kayu Ilegal**

Pola temporal temuan kayu ilegal dianalisis dengan membandingkan volume temuan antar-kuartal, yaitu Q1, Q2, Q3, dan Q4. Unit analisis pada tahap ini adalah 150 titik temuan kayu ilegal. Karena volume temuan berpotensi memiliki distribusi tidak normal, mengandung nilai ekstrem, dan dibandingkan pada lebih dari dua kelompok waktu, maka digunakan uji Kruskal-Wallis sebagai metode non-parametrik.

Uji Kruskal-Wallis digunakan untuk menguji hipotesis nol bahwa distribusi volume temuan kayu ilegal sama pada seluruh kuartal. Statistik uji Kruskal-Wallis dihitung dengan rumus:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(N+1)$$

dengan:

$H$  = adalah statistik Kruskal-Wallis,

$N$  = adalah jumlah total pengamatan,

$k$  = adalah jumlah kelompok kuartal,

$n_j$  = adalah jumlah pengamatan pada kelompok kuartal ke-(j), dan

$R_j$  = adalah jumlah peringkat pada kelompok kuartal ke-(j).

Dalam penelitian ini, ( $k = 4$ ), yaitu Q1, Q2, Q3, dan Q4. Nilai statistik ( $H$ ) dibandingkan dengan distribusi chi-square dengan derajat kebebasan:

$$df = k - 1$$

Karena terdapat empat kuartal, derajat kebebasan adalah:

$$df = 4 - 1 = 3$$

Apabila nilai ( $p < 0{,}05$ ), maka terdapat perbedaan signifikan volume temuan kayu ilegal antar-kuartal. Untuk mendukung interpretasi, hasil uji Kruskal-Wallis disajikan bersama statistik deskriptif berupa rata-rata, standar deviasi, median, interquartile range, dan nilai maksimum pada setiap kuartal.

Jika diperlukan dalam analisis lanjutan, perbandingan antar-kuartal secara berpasangan dapat dilakukan menggunakan uji Dunn dengan koreksi Bonferroni atau Holm. Namun, dalam penelitian ini, fokus utama analisis temporal adalah mengidentifikasi adanya variasi volume temuan antar-kuartal dan menentukan periode dengan rata-rata volume temuan tertinggi sebagai dasar penyusunan kalender risiko operasional.

#### e. Identifikasi Outlier dan Indikasi Konsentrasi Spasial

Indikasi konsentrasi spasial temuan kayu ilegal dianalisis secara deskriptif melalui identifikasi titik outlier berdasarkan volume temuan. Outlier ditetapkan menggunakan ambang persentil ke-90 dari distribusi volume temuan kayu ilegal tahunan. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi titik dengan volume temuan yang relatif ekstrem dibandingkan keseluruhan titik pengamatan.

Persentil ke-90 didefinisikan sebagai nilai yang membatasi 90% data berada di bawah atau sama dengan nilai tersebut. Secara umum, posisi persentil ke-( $p$ ) dalam data yang telah diurutkan dapat dihitung dengan rumus:

$$L_p = \frac{p}{100} (N + 1)$$

dengan:

$L_p$  = adalah posisi persentil ke-( $p$ ),

$p$  = adalah persentil yang digunakan, dan

$N$  = adalah jumlah pengamatan.

Dalam penelitian ini, titik outlier ditentukan dengan aturan:

$$Outlier_i = \begin{cases} 1, & \text{jika } V_i > P_{90} \\ 0, & \text{jika } V_i \leq P_{90} \end{cases}$$

dengan ( $V_i$ ) adalah volume temuan kayu ilegal pada titik ke-(i), dan ( $P_{90}$ ) adalah nilai persentil ke-90 distribusi volume temuan tahunan. Berdasarkan ambang tersebut, titik dengan volume temuan lebih dari  $70 \text{ m}^3$  dikategorikan sebagai titik outlier.

Setelah titik outlier diidentifikasi, distribusinya dianalisis berdasarkan tingkat kerawanan hutan, yaitu tinggi, sedang, dan rendah. Persentase titik outlier pada setiap kategori kerawanan dihitung menggunakan rumus:

$$P_j = \frac{O_j}{O_T} \times 100\%$$

dengan:

$P_j$  = adalah persentase outlier pada kategori kerawanan ke-(j),

$O_j$  = adalah jumlah titik outlier pada kategori kerawanan ke-(j), dan

$O_T$  = adalah total seluruh titik outlier.

Analisis ini digunakan untuk menilai apakah temuan kayu ilegal dengan volume ekstrem cenderung berada pada wilayah berkerawanan tinggi, sedang, atau rendah. Namun, karena analisis spasial dilakukan secara deskriptif dan belum menggunakan koordinat presisi dalam pemodelan spasial formal, istilah konsentrasi spasial dalam penelitian ini merujuk pada distribusi outlier berdasarkan strata kerawanan, bukan pada hasil analisis hotspot statistik.

#### f. Pemeriksaan Asumsi dan Validasi Analitik

Untuk meningkatkan kualitas inferensi, dilakukan beberapa pemeriksaan asumsi dan validasi analitik. Pada analisis regresi, pemeriksaan dilakukan terhadap pola residual, pencilan, dan kesesuaian arah hubungan antara variabel prediktor dan variabel respons. Residual dianalisis untuk memastikan tidak terdapat pola penyimpangan sistematis yang menunjukkan ketidakcocokan model secara ekstrem.

Pada uji-t berpasangan, asumsi utama yang diperhatikan adalah distribusi selisih waktu respons antar-pasangan. Distribusi selisih diperiksa secara deskriptif melalui ringkasan statistik dan histogram. Apabila distribusi selisih menunjukkan penyimpangan berat dari normalitas, maka uji non-parametrik Wilcoxon signed-rank dapat dipertimbangkan sebagai analisis sensitivitas.

Pada uji Kruskal-Wallis, tidak diperlukan asumsi normalitas karena metode ini berbasis peringkat. Namun, interpretasi hasil tetap memperhatikan ukuran sampel antar-kuartal dan kemungkinan perbedaan bentuk distribusi antar-kelompok. Oleh karena itu, hasil Kruskal-Wallis dilaporkan bersama statistik deskriptif untuk menghindari interpretasi yang hanya bergantung pada nilai p.

Selain pemeriksaan statistik, validasi analitik juga dilakukan melalui verifikasi sumber data. Data patroli dan temuan diperiksa terhadap log Ranger Mobile, Laporan Kejadian Perkara, dokumentasi foto lapangan, serta peta indeks kerawanan. Data yang memiliki ketidaksesuaian logis, duplikasi, atau informasi wajib yang tidak lengkap diverifikasi ulang dan dikeluarkan apabila tidak dapat diklarifikasi. Seluruh data yang digunakan dalam publikasi telah dianonimkan untuk melindungi identitas petugas, koordinat presisi, rute operasi, dan informasi sensitif lainnya.

#### g. Batasan Interpretasi Statistik

Seluruh hasil analisis ditafsirkan dalam kerangka evaluasi operasional berbasis data, bukan sebagai pembuktian kausal final. Regresi linear sederhana dengan 10 sektor pengamatan digunakan untuk mengidentifikasi asosiasi antara intensitas patroli dan luas deforestasi, tetapi belum mampu mengendalikan seluruh faktor perancu. Uji-t berpasangan digunakan untuk membandingkan waktu respons pada kasus yang dipadankan, tetapi hasilnya masih dapat dipengaruhi oleh perubahan kapasitas kelembagaan, aksesibilitas, cuaca, dan koordinasi lapangan. Uji Kruskal-Wallis menunjukkan adanya variasi temporal volume temuan kayu ilegal, tetapi tidak menjelaskan penyebab langsung dari perbedaan antar-kuartal. Analisis outlier menunjukkan indikasi konsentrasi temuan ekstrem pada strata kerawanan tertentu, tetapi belum setara dengan pemodelan hotspot spasial formal.

Dengan batasan tersebut, hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk menyusun rekomendasi operasional, seperti penguatan patroli berbasis risiko, pemanfaatan pemantauan satelit near-real-time, penyusunan kalender risiko, dan prioritas pengawasan pada wilayah berkerawanan tinggi.

## HASIL

### 1. Distribusi Titik Patroli Berbasis Risiko

Distribusi titik patroli menunjukkan bahwa desain pengamatan memprioritaskan wilayah berkerawanan tinggi. Dari 150 titik, sebanyak 80 titik berada pada zona kerawanan tinggi, 50 titik pada zona kerawanan sedang, dan 20 titik pada zona kerawanan rendah. Meskipun zona kerawanan tinggi hanya mencakup 25% proporsi area populasi, zona tersebut memperoleh alokasi titik terbesar. Pola ini mencerminkan pendekatan berbasis risiko karena wilayah dengan riwayat deforestasi, aksesibilitas tinggi, dan nilai ekonomi kayu yang besar memiliki peluang gangguan yang lebih tinggi daripada wilayah yang lebih luas tetapi berisiko rendah.

### 2. Hubungan Intensitas Patroli dan Luas Deforestasi

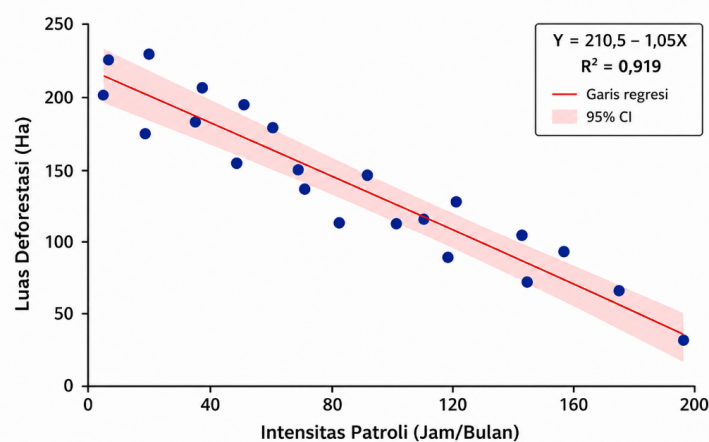
Hasil regresi linear sederhana pada 10 sektor pengamatan menunjukkan hubungan negatif dan signifikan antara intensitas patroli dan luas deforestasi. Model menghasilkan konstanta 210,5 dan koefisien regresi intensitas patroli -1,05. Dengan demikian, setiap tambahan satu jam patroli per bulan per sektor berasosiasi dengan luas deforestasi yang lebih rendah sebesar 1,05 hektare. Model signifikan secara statistik,  $F(1,8) = 91,03$ ;  $p < 0,001$ , dengan  $R^2 = 0,919$ .

Walaupun hubungan ini kuat secara statistik, interpretasinya harus berhati-hati. Jumlah unit analisis hanya 10 sektor sehingga model rentan terhadap pengaruh titik ekstrem dan belum mengendalikan faktor perancu seperti aksesibilitas, jarak terhadap jalan atau sungai, riwayat kasus, tekanan ekonomi lokal, konflik tenurial, dan kapasitas tindak lanjut penegakan hukum. Oleh karena itu, hasil regresi diposisikan sebagai indikasi awal bahwa sektor dengan intensitas patroli lebih tinggi cenderung memiliki deforestasi lebih rendah, bukan sebagai bukti bahwa peningkatan patroli secara langsung menyebabkan penurunan deforestasi.

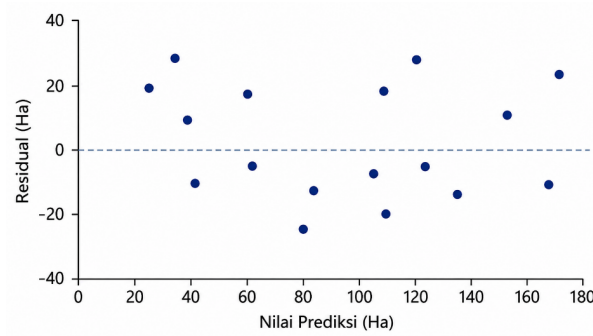
**Tabel 3. Hasil regresi linear sederhana antara intensitas patroli dan luas deforestasi**

No	Variabel	Koefisien (B)	Galat baku (SE)	t-hitung	p-value
1	Konstanta	210,5	12,34	17,06	<0,001
2	Intensitas patroli	-1,05	0,11	-9,54	<0,001

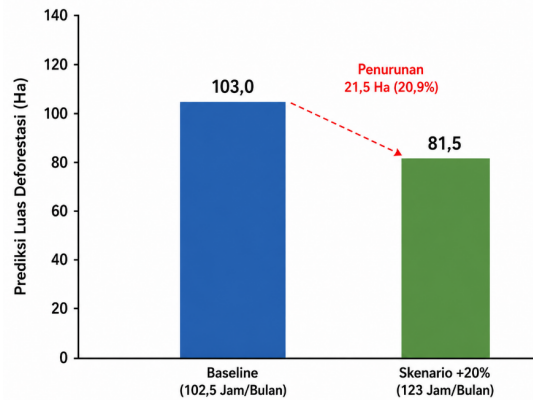
Keterangan:  $R^2 = 0,919$ ;  $F(1,8) = 91,03$ ;  $p < 0,001$



**Gambar 2. Hubungan antara intensitas patroli per bulan dan luas deforestasi**



Gambar 3. Sebaran residual terhadap nilai prediksi luas deforestasi



Gambar 4. Proyeksi luas deforestasi berdasarkan skenario peningkatan intensitas patroli.

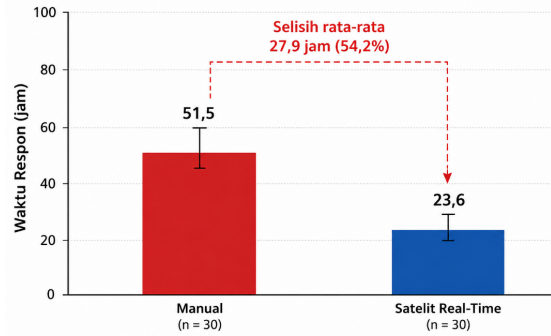
### 3. Perbandingan Waktu Respons Sebelum dan Sesudah Pemanfaatan Satelit

Rata-rata waktu respons pada metode manual adalah 51,5 +/- 6,2 jam, dengan median 51,0 jam dan rentang 42-60 jam. Setelah pemanfaatan pemantauan satelit near-real-time, rata-rata waktu respons menurun menjadi 23,6 +/- 4,1 jam, dengan median 23,0 jam dan rentang 19-30 jam. Uji-t berpasangan menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua kondisi,  $t(29) = -14,72$ ;  $p < 0,001$ . Rata-rata selisih adalah -27,9 jam dengan interval kepercayaan 95% antara -31,7 hingga -24,1 jam. Cohen's d sebesar 2,69 menunjukkan ukuran efek yang sangat besar.

Tabel 4. Perbandingan waktu respons penanganan kasus

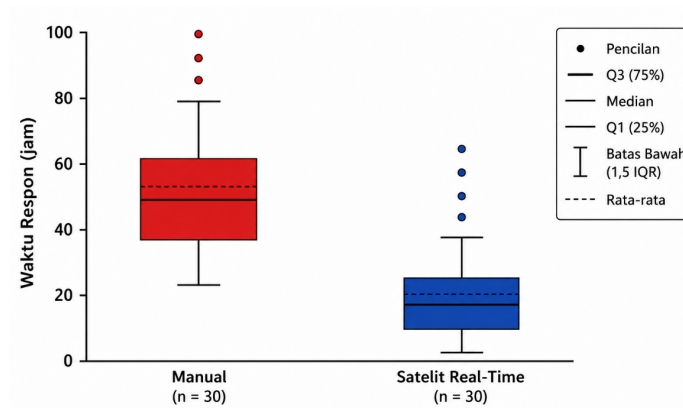
No	Kondisi pengamatan	Rata-rata +/- SD (jam)	Median (IQR)	Rentang min-maks (jam)
1	Metode manual	51,5 +/- 6,2	51,0 (47,0-56,0)	42-60
2	Satelit near-real-time	23,6 +/- 4,1	23,0 (20,0-27,0)	19-30

Keterangan:  $t(29) = -14,72$ ;  $p < 0,001$ ; rata-rata selisih = -27,9 jam; 95% CI = -31,7 hingga -24,1; Cohen's d = 2,69.

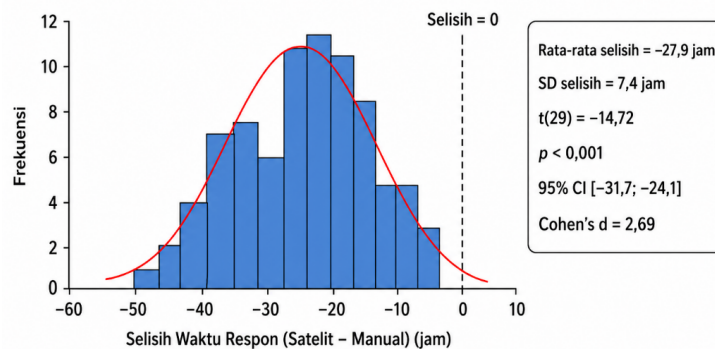


Catatan: perbedaan signifikan berdasarkan uji-t berpasangan ( $p < 0,001$ )

**Gambar 5. Perbandingan rata-rata waktu respons antara metode manual dan pemantauan satelit near-real-time**



**Gambar 6. Boxplot waktu respons sebelum dan sesudah pemanfaatan pemantauan satelit.**



**Gambar 7. Histogram distribusi selisih waktu respons penanganan kasus**

#### 4. Pola Temporal Volume Temuan Kayu Ilegal

Volume temuan kayu ilegal berbeda antarkuartal. Pada Q1, rata-rata volume temuan adalah 35,0 +/- 10,2 m<sup>3</sup>; pada Q2 meningkat menjadi 40,5 +/- 11,8 m<sup>3</sup>; pada Q3 mencapai nilai tertinggi sebesar 60,2 +/- 14,5 m<sup>3</sup>; dan pada Q4 menurun menjadi 42,1 +/- 12,1 m<sup>3</sup>. Uji Kruskal-Wallis menunjukkan perbedaan signifikan antarkuartal,  $H(3) = 28,74$ ;  $p < 0,001$ . Dengan demikian, temuan kayu ilegal tidak

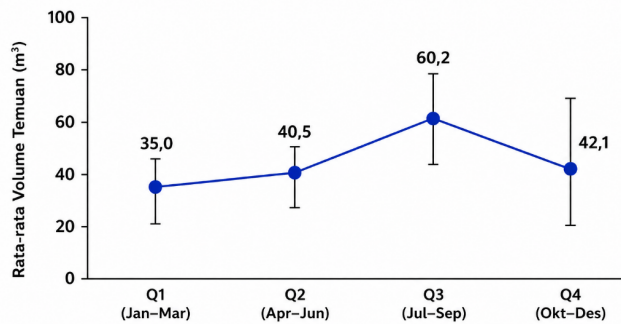
tersebar merata sepanjang tahun, melainkan menunjukkan pola temporal yang perlu dipertimbangkan dalam kalender operasi.

Puncak volume pada Q3 dapat berkaitan dengan periode kemarau ketika akses menuju kawasan hutan dan jalur angkut lebih mudah. Namun, interpretasi ini masih memerlukan pengujian lebih lanjut menggunakan data curah hujan, kondisi jalan, intensitas patroli per kuartal, dan aktivitas ekonomi lokal.

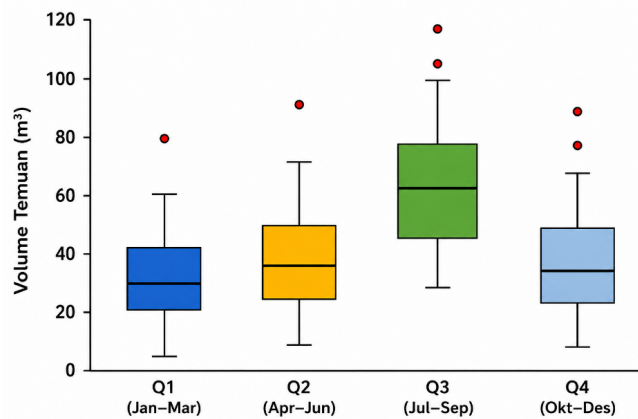
**Tabel 5. Statistik deskriptif volume temuan kayu ilegal per kuartal**

Kuartal	Jumlah temuan (n)	Rata-rata +/- SD (m3)	Median (IQR)	Nilai maksimum (m3)
Q1 (Januari-Maret)	38	35,0 +/- 10,2	32,0 (27,0-42,0)	60
Q2 (April-Juni)	37	40,5 +/- 11,8	37,0 (31,0-48,0)	70
Q3 (Juli-September)	38	60,2 +/- 14,5	48,0 (50,0-71,0)	85
Q4 (Oktober-Desember)	37	42,1 +/- 12,1	39,5 (33,0-50,0)	72

Keterangan: Uji Kruskal-Wallis menunjukkan perbedaan signifikan antarkuartal,  $H(3) = 28,74; p < 0,001$ .



**Gambar 8. Rata-rata volume temuan kayu ilegal per kuartal.**



**Gambar 9. Boxplot volume temuan kayu ilegal pada setiap kuartal**

**5. Indikasi Konsentrasi Spasial Titik Outlier**

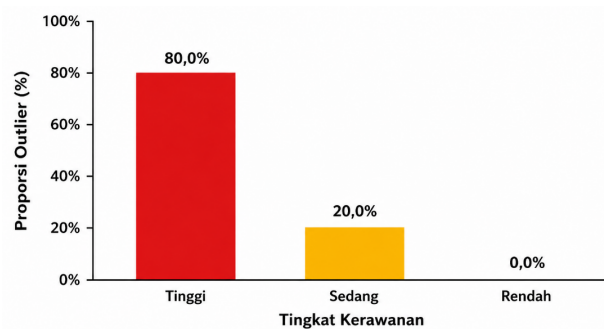
Outlier ditetapkan sebagai titik dengan volume temuan kayu ilegal di atas persentil ke-90 tahunan, yaitu lebih dari 70 m3. Berdasarkan kriteria tersebut, diperoleh 15 titik outlier dari 150 titik temuan. Sebanyak 12 titik atau 80,0% berada pada wilayah berkerawanan tinggi, 3 titik atau 20,0% berada pada wilayah berkerawanan sedang, dan tidak terdapat outlier pada wilayah berkerawanan rendah.

Distribusi ini menunjukkan bahwa temuan kayu ilegal dalam volume ekstrem cenderung terkonsentrasi pada wilayah yang sebelumnya diklasifikasikan sebagai kerawanan tinggi. Dengan demikian, peta indeks kerawanan memiliki relevansi operasional sebagai dasar prioritas patroli. Namun, karena analisis hanya berbasis klasifikasi strata dan tidak menggunakan koordinat presisi, hasil ini harus dipahami sebagai indikasi wilayah prioritas, bukan pemodelan hotspot spasial formal.

**Tabel 6. Distribusi titik outlier temuan kayu ilegal berdasarkan tingkat kerawanan hutan**

No	Tingkat kerawanan	Jumlah titik outlier	Persentase dari total outlier (%)
1	Tinggi	12	80,0
2	Sedang	3	20,0
3	Rendah	0	0,0
	Total	15	100,0

*Keterangan: Outlier ditetapkan berdasarkan volume temuan kayu ilegal yang berada di atas persentil ke-90 tahunan (>70 m3).*



**Gambar 10. Proporsi titik outlier temuan kayu ilegal berdasarkan tingkat kerawanan hutan.**

## PEMBAHASAN

### 1. Hubungan Intensitas Patroli dan Luas Deforestasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa intensitas patroli memiliki hubungan negatif dan signifikan dengan luas deforestasi pada tingkat sektor pengamatan. Koefisien regresi sebesar  $-1,05$  mengindikasikan bahwa peningkatan satu jam patroli per bulan per sektor berasosiasi dengan luas deforestasi yang lebih rendah sebesar 1,05 hektare. Nilai  $R^2$  sebesar 0,919 menunjukkan adanya asosiasi statistik yang kuat antara intensitas patroli dan luas deforestasi dalam model regresi linear sederhana yang digunakan.

Temuan ini memperkuat argumen bahwa patroli lapangan merupakan instrumen penting dalam pengamanan hutan. Patroli tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme pengawasan fisik, tetapi juga sebagai sarana kehadiran negara di tingkat tapak, deteksi awal pelanggaran, pencatatan bukti lapangan, dan peningkatan risiko tertangkap bagi pelaku kejahatan kehutanan. Dalam konteks kawasan konservasi dan hutan lindung, data patroli telah terbukti dapat digunakan untuk memahami pola aktivitas ilegal dan meningkatkan efisiensi alokasi sumber daya penegakan hukum. Critchlow et al. (2017) menunjukkan bahwa data yang dikumpulkan oleh ranger dapat membantu meningkatkan efektivitas dan efisiensi penegakan hukum apabila digunakan untuk merancang strategi patroli berbasis ancaman. Temuan serupa juga dikemukakan oleh Khac et al. (2021, 2022), yang menekankan bahwa indikator usaha patroli, seperti durasi, jarak tempuh, dan distribusi patroli, dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja perlindungan kawasan.

Meskipun demikian, hubungan negatif antara intensitas patroli dan luas deforestasi dalam penelitian ini tidak dapat ditafsirkan sebagai hubungan kausal langsung. Analisis regresi dilakukan pada 10 sektor pengamatan, sehingga jumlah unit analisis relatif terbatas. Kondisi ini membuat hasil model perlu dibaca sebagai indikasi awal pada skala operasional, bukan sebagai generalisasi luas untuk seluruh

wilayah hutan. Selain itu, model yang digunakan belum memasukkan berbagai faktor perancu yang dapat memengaruhi deforestasi, seperti aksesibilitas wilayah, jarak terhadap jalan dan sungai, tekanan ekonomi lokal, riwayat deforestasi, nilai ekonomi kayu, konflik tenurial, serta kapasitas tindak lanjut penegakan hukum.

Potensi bias deteksi juga perlu diperhatikan. Wilayah yang lebih sering dipatrol memiliki peluang lebih besar untuk menghasilkan catatan temuan, sedangkan wilayah yang jarang dikunjungi dapat tampak memiliki tingkat gangguan lebih rendah bukan karena benar-benar aman, melainkan karena rendahnya peluang deteksi. Dobson et al. (2019) mengingatkan bahwa data patroli harus dianalisis secara hati-hati karena hasil temuan lapangan dipengaruhi oleh pola pencarian, intensitas kunjungan, dan peluang deteksi. Oleh karena itu, intensitas patroli dalam penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai indikator operasional yang berkaitan dengan rendahnya deforestasi, bukan sebagai satu-satunya penyebab penurunan deforestasi.

Hasil ini juga menunjukkan pentingnya pendekatan patroli berbasis risiko. Peningkatan jumlah jam patroli secara merata di semua wilayah belum tentu menjadi strategi paling efisien, terutama ketika sumber daya pengamanan terbatas. Plumptre et al. (2014) menegaskan bahwa sumber daya konservasi dan penegakan hukum perlu diarahkan secara selektif pada lokasi dengan tingkat ancaman tinggi. Dalam konteks Kabupaten Bolaang Mongondow, pendekatan tersebut relevan karena data penelitian menunjukkan adanya konsentrasi titik outlier temuan kayu ilegal pada wilayah berkerawanan tinggi. Dengan demikian, strategi patroli sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan luas wilayah, tetapi juga tingkat risiko, aksesibilitas, riwayat gangguan, dan potensi nilai ekonomi kayu.

## 2. Peran Pemantauan Satelit Near-Real-Time dalam Mempercepat Respons Operasional

Hasil uji-t berpasangan menunjukkan bahwa waktu respons penanganan kasus lebih rendah setelah pemanfaatan pemantauan satelit near-real-time dibandingkan metode manual. Rata-rata waktu respons menurun dari 51,5 jam pada metode manual menjadi 23,6 jam setelah penggunaan pemantauan satelit. Selisih rata-rata sebesar -27,9 jam, nilai  $t(29) = -14,72$ ,  $p < 0,001$ , dan Cohen's  $d = 2,69$  menunjukkan bahwa perbedaan waktu respons antara kedua kondisi tidak hanya signifikan secara statistik, tetapi juga memiliki ukuran efek yang sangat besar.

Temuan ini mengindikasikan bahwa pemantauan satelit near-real-time dapat mendukung percepatan deteksi awal dan pengambilan keputusan operasional. Sistem peringatan berbasis satelit memungkinkan indikasi perubahan tutupan hutan diterima lebih cepat, sehingga petugas dapat melakukan verifikasi dan penugasan lapangan secara lebih terarah. Hansen et al. (2016) menunjukkan bahwa sistem peringatan gangguan hutan tropis berbasis Landsat dapat menyediakan informasi cepat mengenai kehilangan tutupan hutan. Dalam konteks penegakan hukum, Assunção et al. (2023) membuktikan bahwa sistem pemantauan satelit DETER di Brasil berkontribusi pada penguatan penegakan hukum terhadap deforestasi karena informasi spasial digunakan untuk menargetkan tindakan pengawasan.

Penggunaan istilah near-real-time lebih tepat dibandingkan real-time karena sistem pemantauan satelit umumnya memiliki jeda waktu antara perekaman citra, pemrosesan data, validasi indikasi gangguan, dan penyampaian peringatan kepada unit operasional. Dengan demikian, manfaat utama teknologi satelit bukan terletak pada kemampuan mendeteksi kejadian secara seketika, melainkan pada peningkatan kecepatan, cakupan, dan ketepatan informasi dibandingkan pelaporan manual. Slough et al. (2021) menunjukkan bahwa peringatan deforestasi berbasis satelit menjadi lebih efektif ketika dikombinasikan dengan pelatihan, insentif, dan patroli komunitas. Hal ini menegaskan bahwa teknologi satelit perlu dipahami sebagai bagian dari sistem pengamanan terpadu, bukan sebagai pengganti patroli lapangan.

Dalam penelitian ini, desain perbandingan waktu respons diperkuat melalui pemadanan kasus manual dan kasus berbasis satelit berdasarkan sektor, jenis pelanggaran, kesamaan petugas atau pos pelapor, dan karakteristik lokasi. Pemadanan tersebut penting untuk mengurangi perbedaan karakteristik antar-kasus yang dapat memengaruhi waktu respons. Namun, hasil ini tetap perlu ditafsirkan secara hati-hati karena perbandingan sebelum dan sesudah implementasi satelit dapat dipengaruhi oleh faktor lain, seperti perubahan kapasitas personel, perbaikan prosedur koordinasi,

pengalaman petugas, ketersediaan logistik, dan kondisi akses lapangan. Oleh karena itu, penurunan waktu respons sebaiknya dipahami sebagai perubahan indikator operasional yang berkaitan dengan pemanfaatan sistem satelit, bukan sebagai bukti tunggal bahwa teknologi satelit secara langsung menyelesaikan persoalan penegakan hukum kehutanan.

Secara praktis, temuan ini mendukung perlunya integrasi antara sistem peringatan satelit, komando respons cepat, dan verifikasi lapangan. Informasi satelit perlu diterjemahkan menjadi keputusan operasional yang jelas, seperti prioritas lokasi verifikasi, penugasan tim, estimasi akses menuju lokasi, pengamanan barang bukti, dan tindak lanjut perkara. Reiche et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan radar Sentinel-1 dapat memperkuat deteksi gangguan hutan di wilayah tropis yang sering tertutup awan. Namun, informasi deteksi tetap membutuhkan mekanisme respons kelembagaan agar dapat menghasilkan dampak nyata terhadap pengamanan hutan.

### **3. Pola Temporal Temuan Kayu Ilegal dan Implikasi Kalender Risiko**

Hasil analisis temporal menunjukkan bahwa volume temuan kayu ilegal berbeda secara signifikan antarkuartal. Rata-rata volume temuan tertinggi terjadi pada Q3 atau periode Juli–September, yaitu  $60,2 \pm 14,5 \text{ m}^3$ . Hasil uji Kruskal-Wallis,  $H(3) = 28,74$ ;  $p < 0,001$ , menunjukkan bahwa volume temuan kayu ilegal tidak tersebar merata sepanjang tahun, melainkan memiliki variasi temporal yang bermakna secara statistik.

Peningkatan volume temuan pada Q3 dapat berkaitan dengan kondisi musim kemarau, ketika akses menuju kawasan hutan, jalur angkut, dan aktivitas lapangan menjadi lebih mudah. Pada periode tersebut, hambatan cuaca relatif lebih rendah, sehingga mobilitas pelaku dan pengangkutan kayu ilegal berpotensi meningkat. Namun, interpretasi ini masih bersifat kontekstual dan perlu diuji lebih lanjut menggunakan data pendukung, seperti curah hujan, kondisi jalan, intensitas patroli per kuartal, aktivitas ekonomi lokal, serta dinamika permintaan kayu. Tanpa variabel tambahan tersebut, penelitian ini belum dapat menyimpulkan bahwa musim kemarau merupakan penyebab langsung peningkatan volume temuan.

Temuan mengenai variasi temporal ini sejalan dengan pendekatan spasial-temporal dalam studi aktivitas ilegal di kawasan hutan dan kawasan lindung. Critchlow et al. (2015) menunjukkan bahwa data patroli ranger dapat digunakan untuk mengidentifikasi tren aktivitas ilegal dari waktu ke waktu dan memahami perubahan pola ancaman di kawasan konservasi. Hu et al. (2018) juga menekankan bahwa pemetaan hotspot kejahatan perlu mempertimbangkan dimensi waktu karena konsentrasi kejadian dapat berubah mengikuti kondisi lingkungan, aksesibilitas, dan pola aktivitas pelaku. Dengan demikian, analisis temporal tidak hanya penting untuk memahami kapan kejadian meningkat, tetapi juga untuk menyusun strategi pengamanan yang lebih antisipatif.

Implikasi operasional dari temuan ini adalah perlunya penyusunan kalender risiko pengamanan hutan. Jika Q3 merupakan periode dengan rata-rata volume temuan tertinggi, maka penguatan patroli, kesiapan logistik, pemantauan satelit, dan koordinasi respons sebaiknya dimulai sejak akhir Q2. Strategi ini memungkinkan operasi pengamanan bergeser dari pendekatan reaktif menuju pendekatan preventif. Kalender risiko juga dapat digunakan untuk menentukan periode peningkatan intensitas patroli, penempatan personel pada titik akses, pengawasan jalur angkut, dan koordinasi lintas-instansi menjelang periode rawan.

Namun, kalender risiko tidak boleh dipahami sebagai pola tetap yang berlaku setiap tahun tanpa evaluasi. Aktivitas ilegal dapat berubah mengikuti tekanan penegakan hukum, perubahan harga kayu, pergeseran jalur angkut, kondisi sosial-ekonomi, serta adaptasi pelaku terhadap pola patroli. Oleh karena itu, kalender operasi perlu diperbarui secara berkala berdasarkan data terbaru. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip adaptive management, yaitu pengambilan keputusan yang terus diperbaiki melalui pemantauan, evaluasi, dan pembelajaran dari data lapangan.

### **4. Konsentrasi Spasial Titik Outlier dan Relevansi Pendekatan Berbasis Risiko**

Hasil identifikasi outlier menunjukkan bahwa 80% titik temuan kayu ilegal dengan volume ekstrem berada pada wilayah berkerawanan tinggi, 20% berada pada wilayah berkerawanan sedang, dan tidak terdapat titik outlier pada wilayah berkerawanan rendah. Outlier ditetapkan berdasarkan

volume temuan kayu ilegal di atas persentil ke-90 tahunan, yaitu lebih dari 70 m<sup>3</sup>. Pola ini menunjukkan bahwa temuan kayu ilegal dalam volume besar cenderung terkonsentrasi pada wilayah dengan tingkat kerawanan tinggi.

Temuan tersebut mendukung relevansi pendekatan pengamanan hutan berbasis risiko. Wilayah berkerawanan tinggi dalam penelitian ini ditentukan melalui kombinasi riwayat deforestasi, aksesibilitas jalan, dan indikasi nilai ekonomi kayu. Kombinasi faktor tersebut secara teoritis dapat meningkatkan peluang terjadinya aktivitas ilegal karena pelaku cenderung memilih lokasi yang memiliki nilai sumber daya tinggi, akses angkut yang memungkinkan, serta risiko deteksi yang masih dapat dikelola. Hu et al. (2018) menjelaskan bahwa pemetaan konsentrasi kejadian kejahatan dapat membantu memahami lokasi dan periode dengan risiko lebih tinggi. Dalam konteks ekologi dan lingkungan, Legendre dan Legendre (2012) juga menekankan pentingnya analisis spasial untuk memahami distribusi fenomena ekologis yang tidak selalu tersebar secara acak.

Namun, analisis spasial dalam penelitian ini masih bersifat deskriptif. Istilah konsentrasi spasial digunakan untuk menggambarkan distribusi titik outlier berdasarkan strata kerawanan, bukan sebagai hasil pemodelan hotspot spasial formal. Penelitian ini belum menggunakan analisis kernel density estimation, Getis-Ord  $G_i^*$ , Moran's I, atau pengujian autokorelasi spasial berbasis koordinat. Oleh karena itu, hasil spasial perlu diposisikan sebagai indikasi awal prioritas wilayah pengamanan, bukan sebagai bukti statistik mengenai keberadaan hotspot spasial yang komprehensif.

Keterbatasan tersebut penting dinyatakan karena judul dan ruang lingkup penelitian memuat istilah spasial-temporal. Untuk memperkuat kontribusi spasial pada penelitian lanjutan, diperlukan data koordinat yang lebih rinci, peta batas sektor, peta jaringan jalan dan sungai, data aksesibilitas, serta peta perubahan tutupan hutan. Dengan data tersebut, peneliti dapat menguji apakah temuan kayu ilegal benar-benar membentuk klaster spasial yang signifikan atau hanya tampak terkonsentrasi karena desain sampling dan intensitas patroli yang tidak merata. Joppa dan Pfaff (2010) mengingatkan bahwa evaluasi dampak kawasan perlindungan atau intervensi konservasi harus memperhatikan persoalan lokasi yang tidak acak. Hal ini relevan karena sektor berkerawanan tinggi mungkin memang memperoleh alokasi patroli lebih besar sejak awal, sehingga peluang pencatatan temuan juga lebih tinggi.

Meskipun demikian, secara praktis hasil distribusi outlier tetap memiliki nilai operasional. Wilayah berkerawanan tinggi yang memiliki konsentrasi temuan ekstrem dapat diprioritaskan untuk patroli intensif, verifikasi satelit, pemantauan jalur angkut, dan penyelidikan jaringan pelaku. Dalam konteks penegakan hukum kehutanan, temuan kayu ilegal dalam volume besar dapat mengindikasikan aktivitas yang lebih terorganisasi. Oleh karena itu, tindak lanjut tidak seharusnya berhenti pada penyitaan barang bukti di lapangan, tetapi juga diarahkan pada identifikasi aktor pembiaya, pengangkut, pemodal, dan jaringan distribusi.

## **5. Integrasi Patroli, Pemantauan Satelit, dan Evaluasi Berbasis Data**

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengamanan hutan berbasis risiko memerlukan integrasi antara patroli lapangan, pemantauan satelit near-real-time, dan evaluasi data operasional. Patroli lapangan memberikan informasi langsung mengenai kondisi tapak, pemantauan satelit menyediakan indikasi awal gangguan tutupan hutan, sedangkan analisis statistik dan spasial-temporal sederhana membantu mengidentifikasi prioritas sektor, periode rawan, dan wilayah berkerawanan tinggi.

Integrasi tersebut sejalan dengan perkembangan pengelolaan kawasan berbasis data. Hansen et al. (2013) menunjukkan bahwa peta perubahan tutupan hutan berskala luas dapat menjadi dasar penting untuk pemantauan kehilangan hutan. Hansen et al. (2016) kemudian menunjukkan bahwa sistem peringatan gangguan hutan tropis dapat mendukung deteksi yang lebih cepat. Di sisi lain, Critchlow et al. (2017) menegaskan bahwa data patroli yang dikumpulkan secara sistematis dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi alokasi sumber daya penegakan hukum. Dengan demikian, kombinasi antara data satelit dan data patroli dapat memperkuat rantai pengamanan dari deteksi, verifikasi, respons, hingga evaluasi.

Dalam konteks kelembagaan, hasil penelitian ini dapat diarahkan untuk membangun model operasi pengamanan hutan berbasis data. Model tersebut dapat mencakup empat komponen utama. Pertama, pemetaan risiko berdasarkan riwayat deforestasi, aksesibilitas, nilai ekonomi kayu, dan riwayat kasus. Kedua, pemantauan satelit near-real-time untuk mendeteksi indikasi awal gangguan hutan. Ketiga, patroli lapangan yang diarahkan pada wilayah dan periode berisiko tinggi. Keempat, evaluasi berkala menggunakan indikator kuantitatif, seperti intensitas patroli, luas deforestasi, waktu respons, volume temuan, distribusi outlier, dan tindak lanjut perkara.

Namun, keberhasilan model tersebut sangat bergantung pada kualitas data dan kapasitas institusi. Data patroli perlu dicatat secara konsisten, mencakup lokasi, waktu, durasi, personel, jenis temuan, volume barang bukti, dokumentasi foto, dan tindak lanjut. Data satelit perlu dihubungkan dengan sistem komando lapangan agar peringatan dapat segera diverifikasi. Selain itu, hasil evaluasi statistik perlu dibahas secara berkala dalam forum operasional agar strategi patroli dapat disesuaikan dengan perubahan pola ancaman.

Penguatan sistem data juga harus memperhatikan keamanan informasi. Data operasional pengamanan hutan umumnya mengandung informasi sensitif, seperti koordinat titik patroli, rute operasi, nama petugas, dan lokasi temuan barang bukti. Oleh karena itu, publikasi ilmiah perlu menerapkan anonimisasi, generalisasi koordinat, dan pembatasan informasi yang dapat membahayakan petugas maupun efektivitas operasi. Prinsip ini penting agar transparansi akademik tetap berjalan tanpa mengorbankan keamanan operasional.

## **6. Implikasi Manajerial dan Kebijakan**

Temuan penelitian ini memiliki beberapa implikasi manajerial dan kebijakan. Pertama, alokasi patroli sebaiknya tidak hanya didasarkan pada luas wilayah administratif, tetapi juga pada tingkat kerawanan, riwayat deforestasi, aksesibilitas, dan pola temuan sebelumnya. Wilayah berkerawanan tinggi perlu memperoleh prioritas lebih besar karena menunjukkan konsentrasi temuan ekstrem yang lebih tinggi dibandingkan wilayah berkerawanan sedang dan rendah.

Kedua, pemantauan satelit near-real-time perlu diposisikan sebagai sistem pendukung keputusan. Informasi dari satelit harus dihubungkan dengan mekanisme respons cepat, penugasan tim lapangan, dokumentasi kasus, dan tindak lanjut penegakan hukum. Tanpa integrasi kelembagaan, peringatan satelit hanya akan menjadi informasi teknis yang tidak sepenuhnya menghasilkan perubahan operasional.

Ketiga, operasi pengamanan perlu mempertimbangkan kalender risiko. Peningkatan volume temuan pada Q3 menunjukkan bahwa penguatan pengawasan sebaiknya dilakukan sebelum periode puncak. Strategi ini dapat mencakup peningkatan patroli menjelang musim kemarau, pengawasan jalur angkut, penempatan personel pada titik akses, serta koordinasi dengan aparat penegak hukum lainnya.

Keempat, evaluasi kuantitatif perlu menjadi bagian rutin dari manajemen pengamanan hutan. Indikator seperti jam patroli, luas deforestasi, waktu respons, volume temuan, distribusi outlier, dan penyelesaian perkara dapat digunakan untuk menilai efektivitas operasi dan memperbaiki alokasi sumber daya. Pendekatan ini mendukung adaptive management karena keputusan operasional diperbarui berdasarkan data dan evaluasi lapangan.

Kelima, penanganan kasus kayu ilegal perlu diarahkan tidak hanya pada respons lapangan, tetapi juga pada analisis jaringan. Temuan volume besar dapat mengindikasikan keterlibatan aktor yang lebih terorganisasi. Oleh karena itu, strategi pengamanan perlu mencakup penyelidikan rantai pasok, jalur distribusi, aktor pembiaya, serta hubungan antara titik temuan dan pasar kayu ilegal.

## **7. Keterbatasan Penelitian dan Arah Penelitian Lanjutan**

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, analisis regresi dilakukan pada 10 sektor pengamatan sehingga hasilnya perlu dipahami sebagai indikasi awal pada skala operasional. Jumlah sektor yang terbatas membuat model rentan terhadap pengaruh nilai ekstrem dan belum cukup kuat untuk mendukung generalisasi luas.

Kedua, hubungan antara intensitas patroli dan luas deforestasi bersifat asosiatif. Penelitian ini belum menggunakan desain eksperimental atau kuasi-eksperimental yang dapat menguji hubungan

kausal secara lebih kuat. Faktor-faktor perancu seperti aksesibilitas, tekanan ekonomi, riwayat konflik, jarak terhadap jalan, dan kapasitas penegakan hukum belum dimasukkan ke dalam model. Penelitian lanjutan dapat menggunakan regresi multivariat, model panel, difference-in-differences, atau pendekatan matching untuk memperkuat inferensi.

Ketiga, data patroli dan temuan lapangan berpotensi mengandung bias deteksi. Wilayah yang lebih sering dikunjungi petugas memiliki peluang lebih besar untuk menghasilkan temuan dibandingkan wilayah yang jarang dipatrol. Oleh karena itu, volume temuan tidak selalu dapat disamakan dengan tingkat aktivitas ilegal aktual. Penelitian berikutnya perlu mempertimbangkan effort correction, yaitu menyesuaikan temuan dengan durasi patroli, jarak tempuh, jumlah personel, dan frekuensi kunjungan.

Keempat, analisis spasial masih terbatas pada distribusi outlier berdasarkan strata kerawanan. Penelitian lanjutan perlu menggunakan koordinat yang lebih rinci dan metode spasial formal, seperti kernel density estimation, Getis-Ord  $G_i^*$ , Moran's I, atau analisis jarak terhadap jalan dan sungai. Dengan pendekatan tersebut, klaim mengenai hotspot atau konsentrasi spasial dapat diuji secara lebih kuat.

Kelima, analisis waktu respons menggunakan 30 pasang kasus yang dipilih berdasarkan kelengkapan dan kesepadanan data. Meskipun pemadanan kasus telah dilakukan, masih terdapat kemungkinan bias seleksi karena kasus yang terdokumentasi lengkap mungkin memiliki karakteristik berbeda dari kasus yang tidak terdokumentasi lengkap. Penelitian lanjutan perlu menggunakan jumlah kasus yang lebih besar dan periode pengamatan yang lebih panjang untuk memperkuat validitas hasil.

Dengan mempertimbangkan keterbatasan tersebut, hasil penelitian ini sebaiknya diposisikan sebagai dasar evaluasi operasional dan pengembangan strategi pengamanan hutan berbasis risiko. Kontribusi utama penelitian terletak pada upaya mengintegrasikan data patroli, pemantauan satelit near-real-time, dan evaluasi spasial-temporal sederhana untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengamanan hutan.

## **KESIMPULAN**

Penelitian ini menunjukkan bahwa operasi pengamanan hutan berbasis risiko dapat dievaluasi melalui integrasi data patroli, pemantauan satelit, dan temuan lapangan. Intensitas patroli berasosiasi negatif dan signifikan dengan luas deforestasi pada tingkat sektor pengamatan. Setiap tambahan satu jam patroli per bulan per sektor berasosiasi dengan penurunan luas deforestasi sebesar 1,05 hektare dalam model regresi sederhana. Namun, hubungan ini harus ditafsirkan sebagai asosiasi operasional, bukan bukti kausal langsung.

Pemantauan satelit near-real-time berkaitan dengan penurunan waktu respons penanganan kasus dari rata-rata 51,5 jam menjadi 23,6 jam. Temuan ini menunjukkan bahwa alert satelit dapat memperkuat deteksi dini dan mempercepat respons apabila terhubung dengan verifikasi lapangan dan komando respons cepat. Secara temporal, volume temuan kayu ilegal tertinggi terjadi pada Q3, sedangkan secara spasial deskriptif 80% titik outlier berada pada wilayah berkerawanan tinggi.

Berdasarkan temuan tersebut, operasi pengamanan hutan perlu diarahkan pada wilayah berkerawanan tinggi, periode risiko musiman, dan sektor dengan aksesibilitas tinggi. Strategi yang disarankan meliputi peningkatan patroli terarah, integrasi sistem peringatan satelit dengan respons lapangan, penyusunan kalender operasi berbasis risiko, serta evaluasi berkala menggunakan indikator kuantitatif yang terdokumentasi dengan baik.

## **REFERENSI**

- Abood, S. A., Lee, J. S. H., Burivalova, Z., Garcia-Ulloa, J., & Koh, L. P. (2015). Relative contributions of the logging, fiber, oil palm, and mining industries to forest loss in Indonesia. *Conservation Letters*, 8(1), 58-67. <https://doi.org/10.1111/conl.12103>
- Afriyie, J. O., Asare, M. O., Osei-Mensah, J., & Hejermanova, P. (2021). Evaluation of long-term law enforcement monitoring in a West African protected area. *Oryx*, 55(5), 732-738. <https://doi.org/10.1017/S0030605320000228>
- Assuncao, J., Gandour, C., & Rocha, R. (2023). DETER-ing deforestation in the Amazon: Environmental monitoring and law enforcement. *American Economic Journal: Applied Economics*, 15(2), 125-156. <https://doi.org/10.1257/app.20200196>

- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Critchlow, R., Plumptre, A. J., Alidria, B., Nsubuga, M., Driciru, M., Rwetsiba, A., Wanyama, F., & Beale, C. M. (2017). Improving law-enforcement effectiveness and efficiency in protected areas using ranger-collected monitoring data. *Conservation Letters*, 10(5), 572-580. <https://doi.org/10.1111/conl.12288>
- Critchlow, R., Plumptre, A. J., Driciru, M., Rwetsiba, A., Stokes, E. J., Tumwesigye, C., Wanyama, F., & Beale, C. M. (2015). Spatiotemporal trends of illegal activities from ranger-collected data in a Ugandan national park. *Conservation Biology*, 29(5), 1458-1470. <https://doi.org/10.1111/cobi.12538>
- Dobson, A. D. M., Milner-Gulland, E. J., Beale, C. M., Ibbett, H., & Keane, A. (2019). Detecting deterrence from patrol data. *Conservation Biology*, 33(3), 665-675. <https://doi.org/10.1111/cobi.13222>
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Gonedele Bi, S., Bitty, E. A., Yao, A. K., & McGraw, W. S. (2019). Foot patrols enhance conservation efforts in threatened forest reserves of coastal Cote d'Ivoire. *Tropical Conservation Science*, 12, 1-10. <https://doi.org/10.1177/1940082919872637>
- Hansen, M. C., Krylov, A., Tyukavina, A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Zutta, B., Ifo, S., Margono, B., Stolle, F., & Moore, R. (2016). Humid tropical forest disturbance alerts using Landsat data. *Environmental Research Letters*, 11(3), Article 034008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034008>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & 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>
- Hotte, M. H. H., Kolodin, I. A., Bereznuik, S. L., Slaght, J. C., Kerley, L. L., Soutyrina, S. V., Salkina, G. P., Zaumyslova, O. Y., Stokes, E. J., & Miquelle, D. G. (2016). Indicators of success for smart law enforcement in protected areas: A case study for Russian Amur tiger reserves. *Integrative Zoology*, 11(1), 2-15. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12168>
- Hu, Y., Wang, F., Guin, C., & Zhu, H. (2018). A spatio-temporal kernel density estimation framework for predictive crime hotspot mapping and evaluation. *Applied Geography*, 99, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.08.001>
- Joppa, L. N., & Pfaff, A. (2010). Reassessing the forest impacts of protection: The challenge of nonrandom location and a corrective method. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1710), 1633-1640. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1713>
- Khac, D. L., Hoa, A. X., Nguyen, N. T. H., Thu, H. H. T., & Techato, K. (2022). Comparing law enforcement performance of forest stations at Pu Hu Nature Reserve, Vietnam. *Sustainability*, 14(21), Article 13867. <https://doi.org/10.3390/su142113867>
- Khac, D. L., Hoa, A. X., Tai, L. N., Nguyen, N. T. H., & Techato, K. (2021). Monitoring of field patrolling efforts, Vietnam: Insights from a forest station in Pu Hu Nature Reserve. *Sustainability*, 13(15), Article 8407. <https://doi.org/10.3390/su13158407>
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3rd English ed.). Elsevier.
- 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, 730-735. <https://doi.org/10.1038/nclimate2277>
- Nolte, C., Agrawal, A., Silvius, K. M., & Soares-Filho, B. S. (2013). Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), 4956-4961. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214786110>
- Plumptre, A. J., Fuller, R. A., Rwetsiba, A., Wanyama, F., Kujirakwinja, D., Driciru, M., Nangendo, G., Watson, J. E. M., & Possingham, H. P. (2014). Efficiently targeting resources to deter illegal activities in

protected areas. *Journal of Applied Ecology*, 51(3), 714-725. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12227>

Reiche, J., Mullissa, A., Slagter, B., Gou, Y., Tsendbazar, N. E., Odongo-Braun, C., Vollrath, A., Weisse, M. J., Stolle, F., Pickens, A., Donchyts, G., Clinton, N., Gorelick, N., & Herold, M. (2021). Forest disturbance alerts for the Congo Basin using Sentinel-1. *Environmental Research Letters*, 16(2), Article 024005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd0a8>

Slough, T., Kopas, J., & Urpelainen, J. (2021). Satellite-based deforestation alerts with training and incentives for patrolling facilitate community monitoring in the Peruvian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(29), Article e2015171118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2015171118>

Spracklen, B. D., Kalamandeen, M., Galbraith, D., Gloor, E., & Spracklen, D. V. (2015). A global analysis of deforestation in moist tropical forest protected areas. *PLOS ONE*, 10(12), Article e0143886. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143886>

Tyukavina, A., Hansen, M. C., Potapov, P. V., Parker, D., Okpa, C., Stehman, S. V., Kommareddy, I., & Turubanova, S. (2018). Congo Basin forest loss dominated by increasing smallholder clearing. *Science Advances*, 4(11), Article eaat2993. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2993>

Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Pearson.