SITEKNIK
Sistem Informasi, Teknik dan Teknologi Terapan
E-ISSN: 3032-3991 P-ISSN: 3090-1626
Vol. 3, No. 4 October 2026. Pages. 196-205

Integrasi IoT, GIS, dan AI untuk Pemantauan Hutan Cerdas Perhutani

(Integration of IoT, GIS, and AI for Perhutani's Smart Forest Monitoring)

Muhamad Sabri Ahmad[1], Moh. Syadad Mahiri[2]
[1] msabri@unkhair.ac.id; [2] sadadalmahiri@gmail.com
[1] informatika, Fakultas Teknik, Universitas Khairun, Indonesia
[2] Sekretaris Dewan Eksekutif Daerah (DED) Jaringan Pemantau Independen Kehutanan (JPIK) Jawa Timur
[1] ORCID ID[1]: 000-0003-4125-2792

Abstract

Perhutani's digital transformation has been supported by the use of geospatial information systems for collecting, centralizing, and presenting forest management information. However, geospatial systems do not yet automatically provide continuous microclimate monitoring, multimodal risk analysis, and early warning directly connected to field personnel follow-up. This study aims to design a smart forestry technology framework that integrates *Internet of Things* (IoT) sensors, *Long Range* (LoRa) communication, Geographic Information Systems (GIS), satellite imagery and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), as well as Artificial Intelligence (AI) for forest health monitoring and early detection of fire risks in areas managed by Perhutani. The study employs a *design science research* approach through requirements analysis, architectural design, risk score modeling, simulation based on the data range of the *UCI Forest Fires* dataset, and the development of evaluation indicators. The novelty of this study lies in integrating Perhutani's GIS with low-power environmental monitoring, multimodal risk assessment, and field personnel validation within a closed-loop operational cycle. The simulation results show that the average risk score increases from 0.148 for the low-risk category to 0.870 for the critical-risk category. The proposed framework provides a measurable foundation for pilot testing and calibration using local Perhutani data.

Keywords: smart forestry; Internet of Things; Geographic Information System; artificial intelligence; Perhutani.

Abstrak

Transformasi digital Perhutani telah ditopang oleh pemanfaatan sistem informasi geospasial untuk pengumpulan, pemusatan, dan penyajian informasi pengelolaan hutan. Namun, sistem geospasial belum secara otomatis menyediakan pemantauan mikroklimat secara kontinu, analisis risiko multimodal, dan peringatan dini yang terhubung langsung dengan tindak lanjut petugas. Penelitian ini bertujuan merancang kerangka teknologi hutan cerdas yang mengintegrasikan sensor *Internet of Things* (IoT), komunikasi *Long Range* (LoRa), Sistem Informasi Geografis (GIS), citra satelit dan wahana udara nirawak (UAV), serta kecerdasan buatan (AI) untuk pemantauan kesehatan hutan dan deteksi dini risiko kebakaran pada kawasan yang dikelola Perhutani. Penelitian menggunakan pendekatan *design science research* melalui analisis kebutuhan, perancangan arsitektur, pemodelan skor risiko, simulasi berbasis rentang data *UCI Forest Fires*, dan penyusunan indikator evaluasi. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi GIS Perhutani dengan pemantauan lingkungan berdaya rendah, penilaian risiko multimodal, dan validasi petugas dalam satu siklus operasional tertutup. Hasil simulasi menunjukkan skor rata-rata meningkat dari 0,148 pada kategori rendah menjadi 0,870 pada kategori kritis. Kerangka yang diusulkan memberikan dasar terukur untuk uji percontohan dan kalibrasi menggunakan data lokal Perhutani.

Kata kunci: kehutanan cerdas; Internet of Things; sistem informasi geografis; kecerdasan buatan; Perhutani.

Submitted/Dikirim:	23/09/2026
Revised/Direvisi:	14/10/2026
Accepted/Diterima:	17/10/2026
Published/Terbit:	18/10/2026

Corresponding Author/Korespondensi Penulis:
Author's Full Name
Study Programs, Faculties, Universities
University Address
Email: ----------@-----.---

PENDAHULUAN

Transformasi digital di bidang kehutanan tidak lagi berhenti pada pemetaan dan penyimpanan data. Perkembangannya bergerak menuju kehutanan cerdas (*smart forestry*), yaitu pengelolaan yang memadukan

Open Access under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

sensor, konektivitas, komputasi, kecerdasan buatan, dan sistem pendukung keputusan. Sensor lapangan dan jaringan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan kondisi hutan diamati secara berkala atau kontinu, sedangkan AI membantu menyaring data menjadi informasi yang lebih mudah digunakan dalam pengambilan keputusan (Ehrlich-Sommer et al., 2024; Damaševičius et al., 2024; Wang et al., 2025; Zhao et al., 2023).

Dalam konteks Perhutani, pengembangan tersebut tidak dimulai dari nol. Perum Perhutani telah memanfaatkan Perhutani *Digital Forest* berbasis ArcGIS untuk mendukung pengumpulan data lapangan, pemusatan informasi, dan penyajian data melalui *dashboard*. Pemanfaatan drone di lingkungan Perhutani juga menunjukkan bahwa teknologi spasial telah digunakan untuk inventarisasi, pemantauan kawasan, dan pengawasan areal kerja. Karena fondasi GIS sudah tersedia, persoalan yang lebih penting bukan lagi sekadar digitalisasi peta, melainkan bagaimana data spasial tersebut dapat dipadukan dengan pemantauan lapangan dan analitik risiko secara lebih cepat dan operasional (Perum Perhutani, 2022; Esri Indonesia, 2022; Perum Perhutani, 2025).

Pemantauan hutan memerlukan data yang berbeda dari sisi cakupan ruang dan frekuensi waktu. Penginderaan jauh dan LiDAR efektif untuk menggambarkan struktur tegakan, perubahan tutupan, dan karakteristik vegetasi pada wilayah yang luas, tetapi hasilnya tetap dipengaruhi oleh resolusi sensor, waktu perekaman, kondisi atmosfer, dan kebutuhan verifikasi lapangan. Deret waktu Sentinel-1/2 menunjukkan potensi untuk memperkuat pemetaan vegetasi, sedangkan data VIIRS telah digunakan di Indonesia untuk mendukung pemantauan titik panas dan verifikasi kejadian kebakaran (Tan et al., 2025; Indradjad et al., 2024).

Pada skala tapak, sensor IoT dapat melengkapi penginderaan jauh dengan menyediakan data mikroklimat berfrekuensi tinggi. Jaringan berdaya rendah seperti LoRa/LoRaWAN dan LPWAN relevan untuk kawasan hutan yang tidak seluruhnya memiliki infrastruktur komunikasi stabil. Parameter yang dapat diamati mencakup suhu, kelembapan, kondisi bahan bakar permukaan, gas, partikulat, dan indikator lingkungan lain yang berkaitan dengan risiko kebakaran. Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa sensor, IoT, dan *model machine learning* dapat digunakan bersama untuk membangun indikasi awal terhadap perubahan kondisi lingkungan (Sendra et al., 2020; Zhao et al., 2023; Mahaveerakannan et al., 2023; Üremek et al., 2024).

Peran AI kemudian memperluas fungsi pemantauan dari pencatatan kondisi menuju deteksi dan prediksi. *Model machine learning* telah digunakan untuk diagnosis risiko kebakaran, sementara *deep learning* banyak diterapkan pada citra untuk mendeteksi asap atau api dan memperkirakan tingkat bahaya. Pemrosesan pada perangkat *edge* dapat mengurangi kebutuhan pengiriman data mentah dan menekan latensi, sedangkan UAV dapat digunakan untuk memeriksa lokasi yang sulit dijangkau atau memerlukan konfirmasi visual (Roh et al., 2024; Huang et al., 2024; Yang et al., 2024; Ramadan et al., 2024).

Meskipun teknologi tersebut berkembang cepat, penerapan di lapangan masih menghadapi persoalan yang tidak selalu terlihat dari nilai akurasi *model*. Sumber data yang beragam perlu disatukan, jaringan harus tetap andal, keluaran AI harus dapat dipahami, dan *model* yang baik di satu lokasi belum tentu memberikan hasil yang sama di wilayah lain. Selain itu, sistem perlu mengikuti cara kerja organisasi agar informasi yang dihasilkan benar-benar berujung pada tindakan. Tinjauan terbaru di bidang kehutanan menempatkan interoperabilitas, kualitas data, generalisasi *model*, kapasitas komputasi, interpretabilitas, dan validasi lapangan sebagai persoalan penting dalam penerapan AI dan IoT (Giannakidou et al., 2024; Amoah-Nuamah et al., 2025; Forkuo et al., 2026; FAO, 2026).

Dari kondisi tersebut terlihat celah penelitian yang lebih spesifik. Belum banyak kajian yang menempatkan GIS Perhutani yang telah berjalan sebagai pusat integrasi data sensor mikroklimat, komunikasi LoRa/LPWAN, citra UAV atau satelit, analitik AI, dan verifikasi petugas dalam satu alur kerja yang utuh. Penelitian terdahulu umumnya kuat pada satu bagian, misalnya komunikasi sensor, deteksi asap, prediksi bahaya, pemetaan citra, atau UAV. Kebutuhan operasional Perhutani justru berada pada hubungan antarbagian tersebut: data harus diterima, dianalisis, dipetakan, diterjemahkan menjadi prioritas, kemudian diperiksa di lapangan. Dengan demikian, gap penelitian terletak pada keterputusan antara *sensing*, analitik, konteks spasial, dan tindakan operasional (Sendra et al., 2020; Huang et al., 2024; Tan et al., 2025; Forkuo et al., 2026).

Kebaruan penelitian ini berupa Perhutani Smart Forest Early-Warning Framework, yaitu rancangan arsitektur *closed-loop* yang menghubungkan data GIS dan inventarisasi yang sudah tersedia dengan sensor IoT berdaya rendah, citra satelit dan UAV, analitik risiko multimodal, *dashboard* GIS, serta verifikasi petugas lapangan. Hasil verifikasi tidak berhenti sebagai laporan, tetapi dikembalikan ke basis data untuk memperbaiki ambang dan *model* pada tahap berikutnya. Karena itu, kebaruan penelitian bukan terletak pada penciptaan sensor atau algoritma baru, melainkan pada rancangan integrasi yang disesuaikan dengan fondasi digital dan kebutuhan kerja Perhutani.

Penelitian ini menjawab tiga pertanyaan: bagaimana integrasi IoT, GIS, penginderaan jauh, dan AI dapat dirancang untuk konteks pengelolaan hutan Perhutani; bagaimana data dari beberapa sumber dapat diubah

menjadi prioritas risiko spasial yang tetap dapat diverifikasi; dan indikator apa yang perlu digunakan dalam uji percontohan. Tujuannya adalah menghasilkan arsitektur sistem, alur data, *model* penilaian risiko, dan kerangka evaluasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan prototipe. Manfaat yang diharapkan ialah meningkatnya ketepatan pemantauan, kecepatan deteksi anomali, prioritas patroli atau inspeksi, dan ketertelusuran tindak lanjut tanpa mengurangi peran pertimbangan profesional petugas kehutanan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *design science research* karena keluaran utama yang dibangun berupa artefak konseptual: arsitektur sistem, alur data, mekanisme penilaian risiko, dan rancangan evaluasi untuk pemantauan hutan cerdas Perhutani. Proses penelitian dilakukan melalui tujuh tahap yang saling berurutan, yaitu identifikasi masalah, penetapan kebutuhan, perancangan arsitektur, pemilihan parameter dan sumber data, penyusunan model skoring, simulasi menggunakan data publik, serta penyusunan indikator uji percontohan. Pendekatan ini sengaja dipilih agar penelitian tetap membedakan antara hasil perancangan dan bukti efektivitas lapangan yang baru dapat diperoleh setelah implementasi pada wilayah Perhutani.

Perumusan kebutuhan dimulai dari kondisi eksisting Perhutani yang telah memiliki fondasi *GIS* dan praktik pengumpulan data lapangan. Kebutuhan teknologi kemudian dipetakan dari literatur *smart forestry*, *IoT* kehutanan, *remote sensing*, *LiDAR*, *UAV*, kesehatan hutan, serta deteksi dan prediksi kebakaran. Hasil pemetaan digunakan untuk menentukan fungsi yang benar-benar diperlukan oleh sistem, keterkaitan antarlapisan, kebutuhan interoperabilitas, serta data minimum yang harus tersedia. Literatur dipakai sebagai dasar penetapan kebutuhan, bukan sebagai pengganti data lapangan Perhutani.

Kebutuhan fungsional dibagi menjadi enam kelompok: penginderaan lingkungan, komunikasi data, integrasi geospasial, analitik risiko, dukungan keputusan, dan validasi lapangan. Kebutuhan nonfungsional meliputi efisiensi energi, ketahanan terhadap gangguan jaringan, ketertelusuran data, keamanan akses, interoperabilitas, kemudahan penggunaan, serta kemampuan bekerja mendekati waktu nyata. Arsitektur dirancang modular agar setiap lapisan dapat diuji secara bertahap pada satu petak atau satu Kesatuan Pemangkuan Hutan sebelum diterapkan pada cakupan yang lebih luas.

Pada lapisan penginderaan, variabel utama yang dipertimbangkan adalah suhu udara, kelembapan relatif, kelembapan tanah atau bahan bakar permukaan, tekanan udara, serta gas atau partikulat yang berkaitan dengan indikasi pembakaran. Penempatan sensor dirancang berbasis prioritas, bukan seragam, dengan mempertimbangkan vegetasi, topografi, akses manusia, dan riwayat gangguan. Pada lokasi yang memiliki nilai risiko lebih tinggi, node dapat dilengkapi kamera *edge* atau sensor optik. Data titik tersebut selanjutnya dipadukan dengan data cuaca, riwayat kejadian, *hotspot*, serta citra satelit dan *UAV* untuk memperkuat konteks spasial.

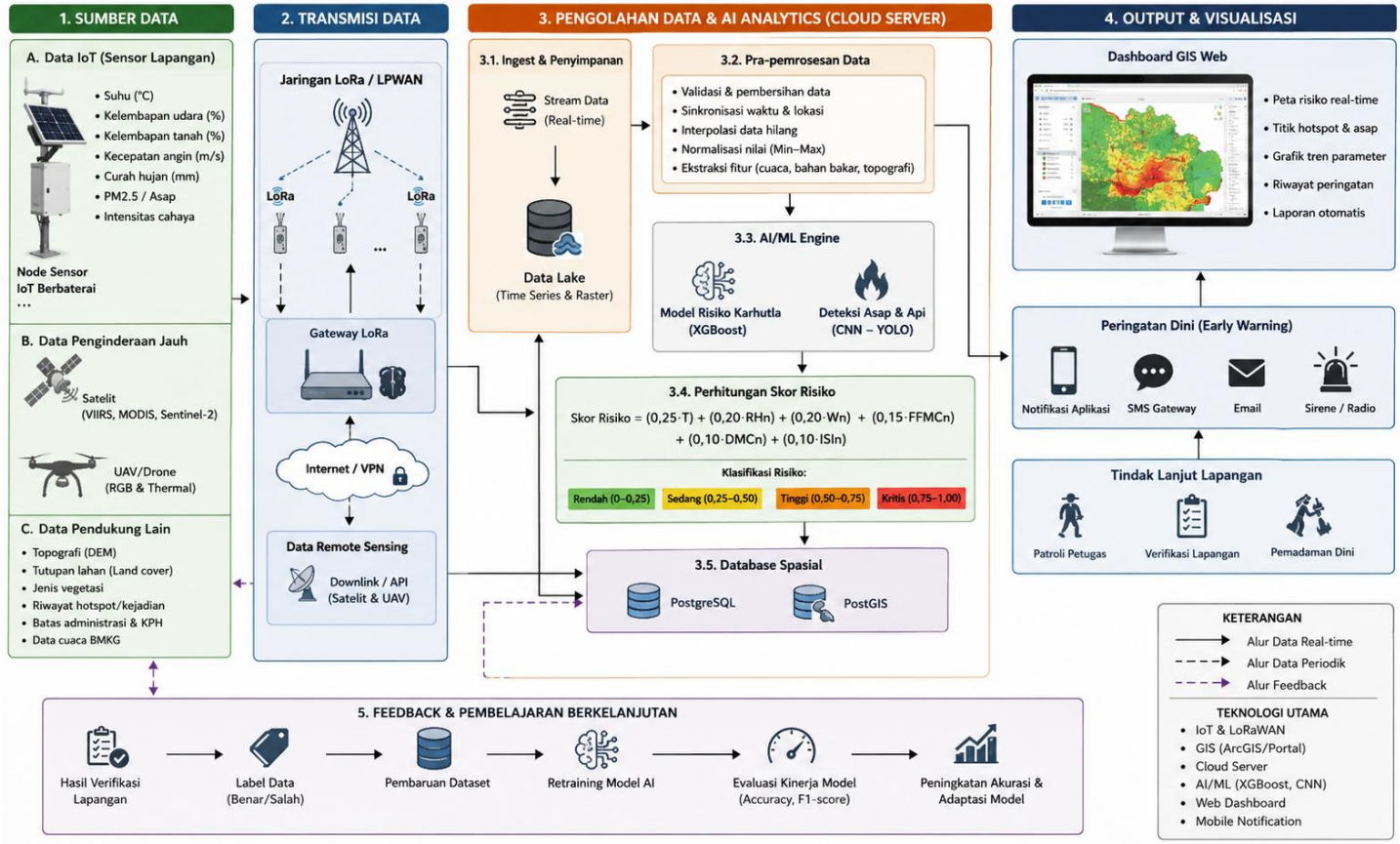
Komunikasi antarnode dirancang menggunakan *LoRa/LoRaWAN* atau *LPWAN* setara karena kebutuhan dayanya rendah dan sesuai untuk pengiriman paket data berukuran kecil. Gateway meneruskan data ke *server* melalui jaringan yang tersedia. Untuk lokasi dengan konektivitas tidak stabil, mekanisme *store-and-forward* digunakan agar data tidak hilang ketika jaringan terputus. Setiap rekaman membawa waktu, koordinat, identitas perangkat, status baterai, dan indikator kualitas sinyal sehingga sistem dapat membedakan perubahan lingkungan dari gangguan perangkat.

Analitik risiko dibangun melalui fusi data *multimodal*. Tahap pertama melakukan *screening* terhadap perubahan temporal, misalnya kenaikan suhu, penurunan kelembapan, atau anomali sensor. Tahap kedua menggabungkan informasi tersebut dengan variabel spasial seperti topografi, tutupan lahan, indeks vegetasi, *hotspot*, jarak dari akses, dan hasil interpretasi *UAV*. Pada tahap awal, model yang relatif mudah dijelaskan seperti *Random Forest* atau *gradient boosting* lebih sesuai dibanding model yang sangat kompleks. Keluaran sistem tidak hanya berupa kelas risiko, tetapi juga skor, lokasi, faktor dominan, tingkat keyakinan, dan rekomendasi verifikasi agar *AI* tetap berfungsi sebagai *decision support*.

Untuk menguji perilaku model sebelum tersedia data lapangan Perhutani, simulasi menggunakan rentang variabel UCI Forest Fires. Enam variabel yang digunakan ialah suhu, kelembapan relatif, kecepatan angin, FFMC, DMC, dan ISI. Setiap variabel dinormalisasi ke rentang 0-1. Suhu, angin, FFMC, DMC, dan ISI menggunakan normalisasi positif, sedangkan kelembapan relatif menggunakan normalisasi terbalik. Skor risiko dihitung dengan R = 0,20N_suhu + 0,15N_RH(inv) + 0,15N_angin + 0,20N_FFMC + 0,15N_DMC + 0,15N_ISI. Bobot tersebut digunakan sebagai konfigurasi awal untuk menguji konsistensi mekanisme skoring, bukan sebagai bobot operasional Perhutani. Skor kemudian dikelompokkan menjadi rendah (R < 0,25), sedang (0,25 <= R < 0,50), tinggi (0,50 <= R < 0,75), dan kritis (R >= 0,75).

Evaluasi uji percontohan dirancang pada dua tingkat. Evaluasi teknis mencakup ketersediaan node, *packet delivery ratio*, *latency* sensor-ke-*dashboard*, akurasi koordinat, kelengkapan data, serta *precision*, *recall*, F1, dan *false-positive rate* sesuai tugas model. Evaluasi operasional mencakup waktu dari *alert* hingga verifikasi, proporsi *alert* yang ditindaklanjuti, konsistensi pencatatan hasil pemeriksaan, dan perubahan kinerja setelah *feedback* petugas dimasukkan ke sistem. Untuk keluaran probabilistik, *calibration* juga perlu diperiksa agar skor probabilitas mencerminkan frekuensi kejadian aktual.

Alur metodologi penelitian yang digunakan dalam artikel ini disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Metodologi Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Arsitektur Perhutani Smart Forest Early-Warning Framework

Hasil perancangan menghasilkan arsitektur enam lapis yang menempatkan *GIS* Perhutani sebagai pusat integrasi. Lapisan penginderaan menangkap perubahan mikroklimat dan indikasi gangguan; lapisan komunikasi mengirimkan data dari node menuju *gateway* dan *server*; lapisan integrasi menyatukan sensor dengan basis data spasial, inventaris, cuaca, citra satelit, dan *UAV*; lapisan analitik menghasilkan deteksi anomali dan skor risiko; lapisan *decision support* menerjemahkan hasil analitik menjadi prioritas lokasi; sedangkan lapisan validasi mencatat hasil pemeriksaan petugas sebagai umpan balik. Susunan ini penting karena nilai sistem tidak berasal dari satu teknologi, melainkan dari kesinambungan aliran data sampai menjadi tindakan yang dapat ditelusuri.

Setiap teknologi mengisi kekosongan yang tidak dapat ditangani oleh teknologi lain. *IoT* memberikan resolusi waktu yang tinggi pada titik pengamatan, sementara satelit menyediakan cakupan luas tetapi dengan interval akuisisi tertentu. *UAV* memberikan detail pada area prioritas, *GIS* menyatukan posisi dan aset, dan *AI* membantu menyaring volume data menjadi urutan pemeriksaan. Dengan rancangan modular, penggantian sensor, metode komunikasi, atau model analitik tidak harus mengubah seluruh arsitektur. Karakter ini membuat kerangka lebih realistis untuk diuji pada kondisi KPH yang berbeda.

Tabel 1. Komponen arsitektur dan fungsi utama kerangka yang diusulkan

Lapisan	Teknologi/komponen	Fungsi utama
Sensing	Sensor suhu, RH, kelembapan tanah/bahan bakar, gas/partikulat, kamera opsional	Merekam kondisi lokal dan anomali secara kontinu
Komunikasi	LoRa/LoRaWAN, *gateway*, seluler/*backhaul*	Mengirim data dengan konsumsi daya rendah dan mekanisme *store-and-forward*
Integrasi geospasial	GIS, basis data spasial, API/ETL	Menyatukan sensor, inventaris, cuaca, topografi, satelit, UAV
Analitik AI	*Anomaly detection*, *Random Forest*/*XGBoost*, *model* citra	Menghasilkan probabilitas atau kelas risiko dan faktor dominan
Decision support	*Dashboard* GIS, peta prioritas, notifikasi	Mengubah keluaran analitik menjadi lokasi dan tugas yang dapat ditindaklanjuti
Validasi lapangan	Aplikasi petugas, foto/geotag, status tindak lanjut	Memastikan kejadian, menutup *alert*, dan menyediakan label untuk pembelajaran ulang

Gap Riset dan Posisi Kontribusi

Perbandingan dengan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kontribusi utama artikel ini berada pada tingkat integrasi operasional. Sebagian penelitian menghasilkan model deteksi, jaringan sensor, atau metode pemetaan yang baik, tetapi belum selalu menjelaskan bagaimana hasil model masuk ke alur pemeriksaan lapangan. Kajian terbaru juga menempatkan generalisasi model, interpretabilitas, kualitas data, interoperabilitas, dan validasi lapangan sebagai hambatan penting dalam penerapan *AI* kehutanan (Forkuo et al., 2026; Amoah-Nuamah et al., 2025; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2026). Karena itu, posisi kontribusi penelitian ini bukan menggantikan teknologi yang telah ada, melainkan menghubungkannya dalam satu proses yang dapat diuji dan diaudit.

Tabel 2. Perbandingan fokus penelitian terdahulu dan kontribusi artikel

Aspek	Kecenderungan penelitian terdahulu	Kontribusi artikel ini
GIS	Pemetaan, inventaris, *dashboard* dan analisis spasial	GIS Perhutani diposisikan sebagai *backbone* integrasi dan orkestrasi *alert*
IoT	Monitoring parameter lokal atau deteksi kebakaran	IoT dihubungkan dengan konteks spasial, *remote sensing*, dan tindak lanjut lapangan
AI	Klasifikasi/prediksi pada *dataset* tertentu	AI sebagai *risk scoring* multimodal yang disertai faktor dominan dan human validation
UAV/satelit	Deteksi/pemetaan skala luas atau detail lokal	Digunakan adaptif: satelit untuk *screening*, UAV untuk verifikasi area prioritas
Operasional	Sering berhenti pada performa algoritma/prototipe	*Closed-loop* dari *sensing* → analitik → tugas lapangan → label balik ke sistem
Evaluasi	Akurasi *model* dominan	Ditambah *latency*, reliabilitas *node*, *false alarm*, respons petugas, dan *traceability*

Skema Penilaian Risiko Multimodal

Penilaian risiko dua tahap digunakan untuk menjaga keseimbangan antara kecepatan dan kedalaman analisis. Screening awal berfungsi menangkap perubahan yang memerlukan perhatian, sedangkan pemodelan tahap kedua menambahkan konteks spasial dan historis. Pendekatan ini menghindari penggunaan model kompleks pada seluruh aliran data sekaligus, sekaligus memberi jejak penjelasan mengenai faktor yang menyebabkan suatu lokasi memperoleh skor lebih tinggi. Dalam praktiknya, keluaran tersebut lebih berguna bagi petugas dibanding satu label risiko tanpa alasan yang dapat ditelusuri.

Penggunaan *UAV* atau kamera *edge* ditempatkan sebagai pemeriksaan lanjutan, bukan sebagai sumber data yang harus aktif terus-menerus. Aktivasi berdasarkan skor risiko dapat menghemat energi, bandwidth, dan waktu inspeksi. Strategi ini juga mengurangi ketergantungan pada satu modalitas: sensor numerik dapat memberi sinyal awal, citra memberi bukti visual, sedangkan petugas memastikan kondisi sebenarnya. Kombinasi tersebut penting karena asap, suhu tinggi, atau anomali sensor masing-masing dapat menghasilkan false alarm apabila dipakai secara terpisah.

Empat tingkat risiko digunakan untuk menerjemahkan skor menjadi tindakan. Kategori rendah tidak memerlukan intervensi selain pemantauan rutin; kategori sedang memerlukan pengamatan lebih dekat; kategori tinggi memerlukan verifikasi berbasis citra atau pemeriksaan jarak jauh; dan kategori kritis menjadi prioritas pemeriksaan lapangan sesuai SOP. Ambang 0,25, 0,50, dan 0,75 pada simulasi hanya berfungsi sebagai batas demonstratif. Pada implementasi nyata, ambang harus diturunkan dari data lokal dan mempertimbangkan biaya false alarm serta konsekuensi keterlambatan deteksi.

Simulasi Berbasis Dataset Publik dan Hasil Perhitungan

Simulasi menggunakan UCI Forest Fires dipakai untuk memeriksa konsistensi model matematis, bukan untuk menilai akurasi sistem pada kawasan Perhutani. Dataset tersebut berisi 517 observasi dengan variabel meteorologi dan Indeks Cuaca Kebakaran, termasuk suhu, kelembaban relatif, kecepatan angin, FFMC, DMC, dan ISI (Cortez & Morais, 2007). Karena sumber data berasal dari Montesinho, Portugal, dataset hanya digunakan sebagai acuan rentang numerik. Pemisahan fungsi ini penting agar hasil simulasi tidak disimpan sebagai bukti kinerja lapangan pada ekosistem yang berbeda.

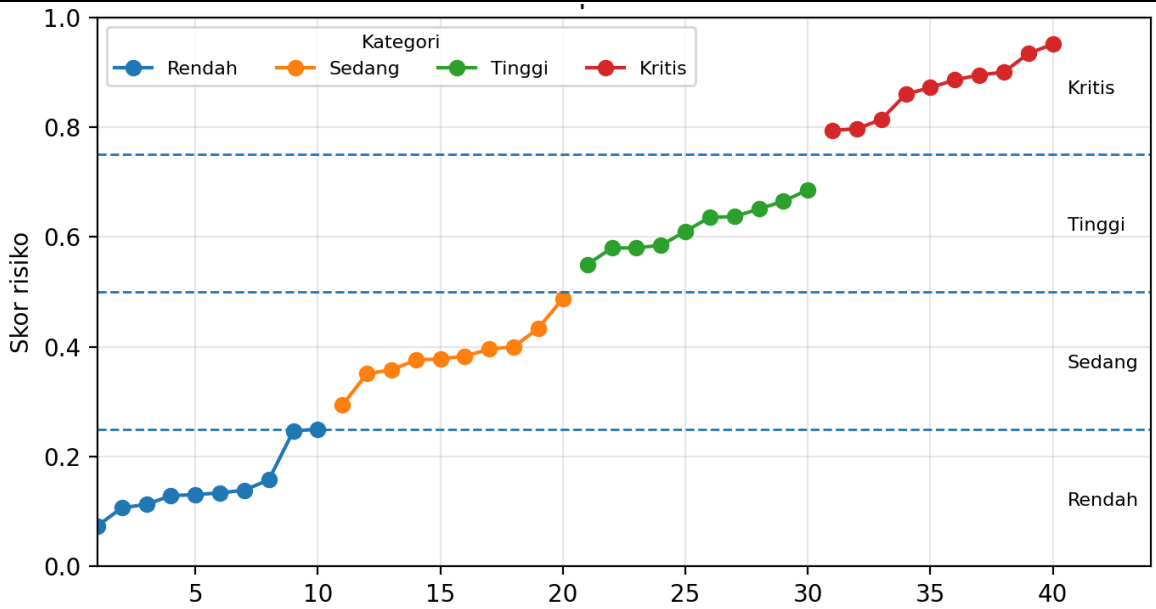
Dari rentang tersebut terbentuk 40 skenario sintetis yang dibagi merata ke dalam empat kategori risiko. Penyusunan skenario dilakukan terkontrol agar perubahan skor dapat diamati ketika suhu, angin, FFMC, DMC, dan ISI meningkat sementara kelembaban relatif menurun. Dengan rencana ini, simulasi digunakan sebagai uji logika internal: apabila kombinasi kondisi yang secara konseptual lebih kering dan lebih mendukung penyebaran api tidak menghasilkan skor lebih tinggi, maka formulasi bobot perlu ditinjau ulang sebelum digunakan pada uji percontohan.

Hasil normalisasi dan pembobotan menghasilkan klasifikasi kategori yang konsisten. Rata-rata skor bergerak dari 0,148 pada kategori rendah, 0,386 pada kategori sedang, 0,618 pada kategori tinggi, hingga 0,870 pada kategori kritis. Pola tersebut tidak membuktikan kemampuan prediksi terhadap kejadian kebakaran, tetapi menunjukkan bahwa formula merespons perubahan variabel sesuai arah yang dirancang. Dengan kata lain, simulasi memvalidasi perilaku pemeliharaan, bukan validitas ekologis atau akurasi model operasional.

Tabel 3. Ringkasan hasil olahan 40 skenario berbasis rentang UCI Forest Fires

Kategori	n	Suhu (°C)	RH (%)	Angin (km/jam)	FFMC	DMC	ISI	Skor R
Rendah	10	6,65	88,40	1,84	30,79	41,50	8,59	0,148
Sedang	10	13,60	67,45	4,03	48,18	116,65	22,00	0,386
Tinggi	10	21,24	46,74	5,84	65,52	186,30	35,34	0,618
Kritis	10	29,54	28,13	8,19	85,65	260,42	49,01	0,870

Sumber: simulasi penulis berdasarkan struktur dan rentang variabel UCI Forest Fires (Cortez & Morais, 2007).

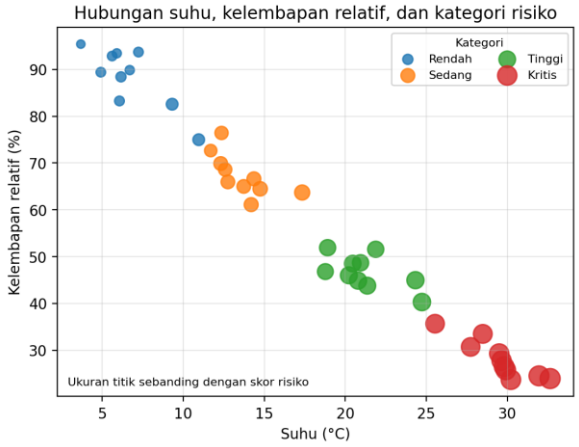


Gambar 2. Sebaran skor risiko pada 40 skenario simulasi

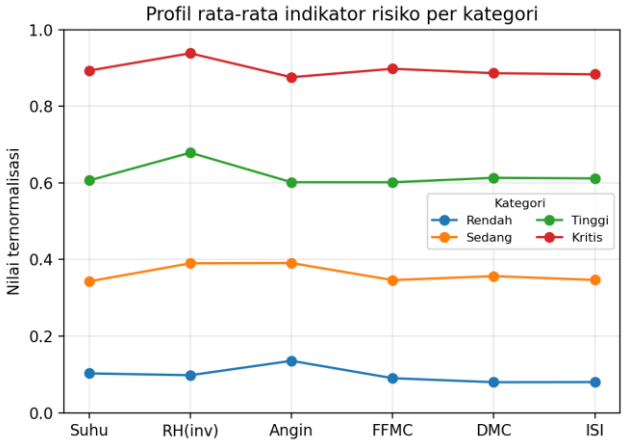
Tabel 4. Contoh rincian 8 skenario simulasi berbasis rentang UCI Forest Fires

Sken	Kat	Suhu	RH	Angin	FFMC	DMC	ISI	Skor
1	R	3.7	95.4	0.7	25.8	32.5	6.4	0.070
5	R	5.6	92.9	1.8	31.5	20.5	10.3	0.130
10	R	5.9	93.5	1.1	30.1	19.9	8.2	0.110
12	S	12.6	68.6	3.7	48.9	102.5	19.3	0.360
16	S	11.7	72.7	2.1	45.6	81.8	17.1	0.290
22	T	18.9	51.9	5.4	60.9	198.6	34.9	0.580
30	T	18.8	46.8	5.6	56.0	186.4	26.7	0.550
40	K	31.9	24.5	9.2	90.1	279.8	50.0	0.930

Sumber: olahan penulis; Kat = kategori (R = rendah, S = sedang, T = tinggi, K = kritis).



Gambar 3. Suhu, RH, dan kategori risiko



Gambar 4. Profil indikator per kategori

Tabel 3 dan Tabel 4 memperlihatkan konsistensi perubahan skor pada tingkat agregat maupun pada contoh skenario individual. Visualisasi pada Gambar 2-4 memperkuat pola tersebut: kelompok dengan risiko lebih tinggi cenderung berada pada suhu yang lebih tinggi, kelembapan relatif yang lebih rendah, serta nilai FFMC, DMC, dan ISI yang lebih besar. Hal penting dari hasil ini bukan sekadar perbedaan antarwarna atau kategori, tetapi keterbacaan hubungan antara perubahan masukan dan keluaran skor. Keterbacaan tersebut menjadi syarat penting apabila sistem akan digunakan sebagai dasar prioritas kerja petugas.

Dalam penerapan operasional, skor tinggi atau kritis harus diperlakukan sebagai sinyal untuk memeriksa lokasi, bukan sebagai keputusan bahwa kebakaran telah terjadi. Konfirmasi dapat dilakukan menggunakan *hotspot* VIIRS/MODIS, citra *UAV* atau Sentinel-2, serta pemeriksaan petugas. Mekanisme ini menempatkan model sebagai penyaring awal yang mempersempit area perhatian. Manfaat yang diharapkan adalah waktu dan sumber daya patroli dapat diarahkan ke lokasi yang lebih prioritas tanpa menghilangkan verifikasi manusia.

Keterbatasan utama simulasi terletak pada perbedaan domain data. Kondisi iklim, bahan bakar, jenis tegakan, topografi, dan aktivitas manusia di kawasan Perhutani tidak identik dengan lokasi asal UCI Forest Fires. Oleh karena itu, nilai minimum-maksimum, bobot, dan ambang yang digunakan dalam artikel ini tidak dapat langsung dijadikan standar operasional. Uji percontohan perlu mengumpulkan data lokal yang cukup untuk menilai ulang distribusi variabel, hubungan antarfitur, dan ambang yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara sensitivitas deteksi dan jumlah false alarm.

Human-in-the-Loop dan Tata Kelola Data

Mekanisme *human-in-the-loop* menjadi penghubung antara analitik dan keputusan lapangan. Setiap *alert* yang diperiksa petugas diberi status, misalnya kejadian kebakaran, pembakaran terkendali, aktivitas masyarakat, gangguan sensor, atau kondisi lain. Label tersebut kemudian disimpan sebagai data validasi. Jika proses ini dilakukan konsisten, sistem akan memiliki sumber data lokal untuk mengkalibrasi ambang, mengevaluasi false alarm, dan melakukan *retraining* model. Dengan demikian, kualitas sistem berkembang dari pengalaman operasi nyata, bukan hanya dari *dataset* publik.

Ketertelusuran data diperlukan karena satu *alert* dapat terbentuk dari beberapa sumber yang berbeda. Rekaman sensor perlu menyimpan identitas perangkat, koordinat, waktu, status kalibrasi, kualitas sinyal, dan daya; citra memerlukan metadata lokasi dan waktu; sementara perubahan model perlu dicatat melalui *model versioning*. Hak akses *dashboard* juga perlu dibedakan berdasarkan peran. Struktur ini memungkinkan penyebab suatu *alert* ditelusuri ketika hasil model berbeda dengan kondisi yang ditemukan petugas.

Interoperabilitas menentukan apakah kerangka dapat berkembang tanpa terikat pada satu perangkat atau aplikasi. Penggunaan format terbuka seperti *GeoJSON*, layanan web *GIS*, dan *API* yang terdokumentasi memungkinkan integrasi sumber baru dengan perubahan minimal pada arsitektur. Sebelum *scale-up*, data induk seperti kode petak, unit kerja, kategori kejadian, dan status tindak lanjut perlu distandardisasi. Tanpa keseragaman tersebut, penambahan sensor dan model justru berisiko memperbesar inkonsistensi data.

Rancangan Uji *Pilot* dan Indikator Keberhasilan

Uji percontohan sebaiknya dimulai pada wilayah terbatas yang memiliki variasi kondisi lingkungan dan akses komunikasi. Tahap awal berfungsi membangun *baseline*, menguji konektivitas, dan memastikan kualitas sensor. Setelah aliran data stabil, *risk scoring* sederhana dapat diaktifkan dan dibandingkan dengan hasil verifikasi lapangan. Citra dan model *AI* yang lebih kompleks baru ditambahkan ketika data lokal telah memadai. Urutan ini membuat evaluasi lebih terkontrol karena kegagalan pada satu tahap dapat diketahui sebelum investasi diperluas.

Tabel 5. Indikator evaluasi uji pilot

Dimensi	Indikator	Tujuan
Perangkat	*Availability node*; *drift*; umur baterai	Menilai keandalan *sensing* jangka panjang
Jaringan	*Packet delivery ratio*; *latency*; *downtime gateway*	Menilai kemampuan komunikasi di kondisi lapangan
Data	*Completeness*; *timestamp consistency*; *spatial accuracy*	Menilai kualitas data untuk analitik
AI	*Precision*; *recall*; F1; AUROC/PR-AUC; *calibration*	Menilai kemampuan diskriminasi dan probabilitas risiko
Operasional	*Alert-to-acknowledge time*; *alert-to-verification time*	Menilai manfaat sistem terhadap kecepatan respons
Kualitas *alert*	*False-positive rate*; *duplicate alert rate*	Mengendalikan alarm fatigue
Pembelajaran	Perubahan performa setelah feedback lapangan	Menilai nilai *closed-loop human-in-the-loop*
Governance	Persentase data memiliki *provenance* dan log tindakan	Menjamin ketertelusuran dan auditabilitas

Implikasi untuk Perhutani

Bagi Perhutani, nilai praktis kerangka ini adalah memperkuat fungsi *digital forest* yang telah ada. *GIS* tidak perlu diganti, tetapi digunakan sebagai ruang integrasi untuk menerima data sensor, menampilkan prioritas, dan merekam tindak lanjut. Dengan cara ini, digitalisasi tidak berhenti pada penyajian informasi, tetapi bergerak menuju siklus pemantauan, analisis, verifikasi, dan pembelajaran. Nilai tambah tersebut akan terlihat apabila sistem mampu mengurangi waktu pencarian lokasi bermasalah dan meningkatkan ketertelusuran tindakan petugas.

Manfaat tersebut masih bersifat potensial karena penelitian belum melakukan uji lapangan pada kawasan Perhutani. Artikel ini karena itu tidak menyatakan peningkatan efisiensi, penurunan kejadian kebakaran, atau akurasi tertentu. Hasil yang dapat dipertanggungjawabkan pada tahap ini adalah kelayakan konseptual arsitektur, konsistensi mekanisme skoring pada simulasi, serta tersusunnya indikator untuk menguji sistem secara objektif pada tahap berikutnya.

Roadmap Implementasi Bertahap

Implementasi dapat dilakukan dalam empat tahap. Tahap pertama menyiapkan data induk, perangkat, dan konektivitas; tahap kedua menghubungkan sensor dengan *GIS* dan memastikan kualitas aliran data; tahap ketiga mengaktifkan analitik risiko, notifikasi, dan verifikasi; sedangkan tahap keempat melakukan *scale-up* setelah indikator teknis dan operasional memenuhi target. Setiap tahap sebaiknya memiliki keluaran yang terukur agar keputusan untuk melanjutkan tidak hanya didasarkan pada tersedianya perangkat.

Setiap tahap membutuhkan kriteria lanjut atau berhenti. Model *AI* tidak layak diperluas jika data sensor masih sering hilang, georeferensi tidak konsisten, atau jumlah *alert* tidak dapat ditangani oleh petugas. Demikian pula, model yang bekerja baik pada satu KPH tidak boleh langsung diterapkan pada KPH lain tanpa validasi karena komposisi tegakan, mikroklimat, topografi, dan pola aktivitas manusia dapat berbeda. Validasi lokal dan *recalibration* menjadi bagian dari proses *scale-up*, bukan pekerjaan tambahan setelah sistem berjalan.

Keamanan Siber, Keandalan, dan Keberlanjutan Sistem

Penerapan *IoT* di kawasan hutan menambah kebutuhan pengamanan perangkat, komunikasi, dan akses data. Setiap node perlu memiliki identitas perangkat dan autentikasi, komunikasi *gateway-server* perlu dienkripsi, dan hak akses *dashboard* dibedakan menurut fungsi pengguna. Setiap perubahan konfigurasi serta *alert* penting juga perlu tercatat dalam *audit trail*. Pengamanan ini diperlukan tidak hanya untuk mencegah akses tidak sah, tetapi juga untuk menjaga keandalan bukti ketika keputusan operasional ditinjau kembali.

Keandalan fisik sama pentingnya dengan akurasi model. Sensor lapangan menghadapi kelembapan tinggi, perubahan suhu, gangguan satwa, petir, dan kerusakan mekanis, sehingga pelindung perangkat, sumber daya, kalibrasi, dan redundansi harus diuji sejak *pilot*. Selain itu, *total cost of ownership* perlu memasukkan biaya perangkat, energi, konektivitas, *server*, inspeksi, penggantian komponen, pemeliharaan model, dan pelatihan petugas. Sistem hanya layak diperluas apabila manfaat operasionalnya sebanding dengan beban pemeliharaan jangka panjang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Penelitian ini menghasilkan rancangan Perhutani Smart Forest Early-Warning Framework sebagai model teknologi terapan yang mengintegrasikan *Internet of Things* (IoT), LoRa/LPWAN, Sistem Informasi Geografis (GIS), *remote sensing*, UAV, kecerdasan buatan, serta verifikasi petugas lapangan dalam satu alur pemantauan terpadu. Kerangka tersebut dirancang untuk menjawab kesenjangan antara sistem informasi geospasial yang telah tersedia di lingkungan Perhutani dengan kebutuhan pemantauan mikroklimat, analisis risiko, dan tindak lanjut

lapangan secara lebih terstruktur. Hasil simulasi terhadap 40 skenario yang dibentuk berdasarkan struktur dan rentang variabel UCI Forest Fires menunjukkan pola peningkatan skor risiko yang konsisten. Nilai rata-rata skor risiko diperoleh sebesar 0,148 pada kategori rendah, 0,386 pada kategori sedang, 0,618 pada kategori tinggi, dan 0,870 pada kategori kritis. Pola tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kenaikan suhu, kecepatan angin, FFMC, DMC, dan ISI serta penurunan kelembapan relatif dapat dibedakan oleh mekanisme pembobotan yang digunakan dalam model.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode penilaian risiko yang dirancang mampu menghasilkan klasifikasi awal yang dapat digunakan sebagai dasar prioritas pemantauan dan verifikasi lapangan. Meskipun demikian, nilai skor yang diperoleh belum dapat diartikan sebagai tingkat akurasi operasional pada kawasan Perhutani karena data yang digunakan masih berupa simulasi dan bukan hasil pengamatan langsung di wilayah kerja Perhutani. Oleh karena itu, kontribusi utama penelitian ini terletak pada tersedianya arsitektur sistem, mekanisme integrasi data, model perhitungan risiko, visualisasi hasil, serta indikator evaluasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan prototipe dan uji percontohan. Pendekatan *human-in-the-loop* yang ditempatkan pada tahap akhir juga memastikan bahwa keluaran AI berfungsi sebagai sistem pendukung keputusan, sedangkan keputusan operasional tetap mempertimbangkan hasil verifikasi dan pengetahuan petugas kehutanan.

Saran

Penelitian selanjutnya perlu melakukan uji percontohan pada satu wilayah Kesatuan Pemangkuan Hutan (KPH) dengan menggunakan data lapangan aktual agar bobot, nilai normalisasi, dan batas klasifikasi risiko dapat dikalibrasi berdasarkan karakteristik lokal. Pengumpulan data disarankan mencakup suhu, kelembapan relatif, kelembapan bahan bakar atau tanah, kecepatan angin, kondisi vegetasi, riwayat hotspot, serta hasil verifikasi kejadian di lapangan. Data sebaiknya dikumpulkan sekurang-kurangnya selama satu siklus musim agar variasi kondisi basah dan kering dapat terwakili. Hasil uji lapangan kemudian perlu dibandingkan dengan keluaran model menggunakan indikator seperti *precision*, *recall*, F1-score, *false-positive rate*, latensi peringatan, waktu verifikasi petugas, dan tingkat keberhasilan tindak lanjut. Dengan cara tersebut, skor 0,148–0,870 yang dihasilkan pada simulasi saat ini dapat dibandingkan dengan distribusi risiko berdasarkan kondisi aktual dan selanjutnya digunakan untuk memperoleh ambang yang lebih sesuai bagi Perhutani.

Pengembangan berikutnya juga disarankan tidak hanya berfokus pada peningkatan akurasi algoritma, tetapi pada keberhasilan sistem dalam mendukung proses kerja Perhutani. Integrasi sensor IoT dengan GIS yang telah tersedia perlu diuji terhadap kestabilan jaringan LoRa/LPWAN, ketersediaan daya sensor, kualitas data, interoperabilitas antarsistem, keamanan akses, dan kemampuan petugas dalam menindaklanjuti peringatan. Setelah sistem terbukti stabil pada skala uji percontohan, penerapan dapat diperluas secara bertahap ke beberapa KPH dengan tetap melakukan kalibrasi pada setiap wilayah karena karakter tegakan, topografi, mikroklimat, dan aktivitas manusia dapat berbeda. Pengembangan lanjutan dapat mencakup deteksi kesehatan tegakan, identifikasi perubahan tutupan lahan, pemantauan gangguan atau penebangan ilegal berbasis citra dan suara, serta integrasi *digital twin*, tetapi pengembangan tersebut sebaiknya dilakukan setelah fondasi data, jaringan, dan prosedur verifikasi lapangan telah terbukti berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Amoah-Nuamah, J., Child, B., Okyere, E. Y., Adams, O., & Danquah, J. A. (2025). Applications of artificial intelligence in forest health surveillance and management. Discover Forests, 1, 56. https://doi.org/10.1007/s44415-025-00061-w

Cortez, P., & Morais, A. (2007). Forest fires [Dataset]. UCI Machine Learning Repository. https://doi.org/10.24432/C5D88D

Damaševičius, R., Mozgeris, G., Kurti, A., & Maskeliūnas, R. (2024). Digital transformation of the future of forestry: An exploration of key concepts in the principles behind Forest 4.0. Frontiers in Forests and Global Change, 7, 1424327. https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1424327

Ehrlich-Sommer, F., Hoenigsberger, F., Gollob, C., Nothdurft, A., Stampfer, K., & Holzinger, A. (2024). Sensors for digital transformation in smart forestry. Sensors, 24(3), 798. https://doi.org/10.3390/s24030798

Esri Indonesia. (2022). Indonesian innovation recognised at global technology awards: Perhutani Digital Forest.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). Artificial intelligence in forest monitoring: Uses, applications, adoption and precautions. FAO Forest Monitoring.

Forkuo, G. O., Picchio, R., Proto, A. R., et al. (2026). Applications of artificial intelligence in forest operations engineering research: A systematic review. Current Forestry Reports, 12, 14. https://doi.org/10.1007/s40725-026-00275-x

Giannakidou, S., et al. (2024). Leveraging the power of Internet of Things and artificial intelligence in forest fire prevention, detection, and restoration: A comprehensive survey. Internet of Things, 26, 101171. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101171

Huang, J., Yang, H., Liu, Y., & Liu, H. (2024). A forest fire smoke monitoring system based on a lightweight neural network for edge devices. Forests, 15(7), 1092. https://doi.org/10.3390/f15071092

Indradjad, A., Dimyati, M., Vetrita, Y., Adiningsih, E. S., & Rokhmatuloh. (2024). Enhancing fire monitoring method over peatlands and non-peatlands in Indonesia using Visible Infrared Imaging Radiometer Suite data. Fire, 7(1), 9. https://doi.org/10.3390/fire7010009

Mahaveerakannan, R., Anitha, C., Thomas, A. K., Rajan, S., Muthukumar, T., & Rajulu, G. G. (2023). An IoT based forest fire detection system using integration of cat swarm with LSTM model. Computer Communications, 211, 37–45. https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.08.020

Perum Perhutani. (2022). Inovasi Perum Perhutani dan Kementerian ATR/BPN raih penghargaan teknologi global.

Perum Perhutani. (2025). Inhutani I gelar pelatihan drone dorong transformasi digital kehutanan.

Ramadan, M. N. A., Basmaji, T., Gad, A., Hamdan, H., Akgün, B. T., Ali, M. A. H., Alkhedher, M., & Ghazal, M. (2024). Towards early forest fire detection and prevention using AI-powered drones and the IoT. Internet of Things, 27, 101248. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101248

Roh, M., Lee, S., Jo, H.-W., & Lee, W.-K. (2024). Development of a forest fire diagnostic model based on machine learning techniques. Forests, 15(7), 1103. https://doi.org/10.3390/f15071103

Sendra, S., García, L., Lloret, J., Bosch, I., & Vega-Rodríguez, R. (2020). LoRaWAN network for fire monitoring in rural environments. Electronics, 9(3), 531. https://doi.org/10.3390/electronics9030531

Tan, J., Li, J., Ma, T., Yan, X., & Huo, Z. (2025). Leveraging Sentinel-1/2 time series and deep learning for accurate forest tree species mapping. Frontiers in Forests and Global Change, 8, 1599510. https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1599510

Üremek, İ., Leahy, P., & Popovici, E. (2024). A system for efficient detection of forest fires through low power environmental data monitoring and AI. Engineering Proceedings, 68(1), 38. https://doi.org/10.3390/engproc2024068038

Wang, G. G., Lu, D., Gao, T., Zhang, J., Sun, Y., Teng, D., Yu, F., et al. (2025). Climate-smart forestry: An AI-enabled sustainable forest management solution for climate change adaptation and mitigation. Journal of Forestry Research, 36, 7. https://doi.org/10.1007/s11676-024-01802-x

Yang, J., Jiang, H., Wang, S., & Ma, X. (2024). A multi-scale deep learning algorithm for enhanced forest fire danger prediction using remote sensing images. Forests, 15(9), 1581. https://doi.org/10.3390/f15091581

Zhao, M., Ye, R.-J., Chen, S.-T., Chen, Y.-C., & Chen, Z.-Y. (2023). Realization of forest Internet of Things using wireless network communication technology of low-power wide-area network. Sensors, 23(10), 4809. https://doi.org/10.3390/s23104809