

Smart Forest Guardian: Merancang Sistem IoT Otonom dengan Kecerdasan Buatan untuk Pencegahan Kebakaran di Area Rawan Deforestasi

Yusuf Febriansyah, Akmal Mustaqim, Abel Voura Ghea Adefika, Zam Zam Zahrina, Suhartono

Universitas Sebelas Maret
yusuffebriansyah327@student.uns.ac.id

Article History

accepted 1/7/2026

approved 1/8/2026

published 21/9/2026

Abstract

Forest fires and deforestation are serious threats to the environment and the achievement of SDG 13, SDG 15, and SDG 11. This study aims to develop Smart Forest Guardian, an Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI)-based system for early detection of fire risks in deforestation-prone areas. The research method integrates field sensors, satellite imagery, drones, and regional mapping into a cloud-based platform. The collected data are analyzed in real time using AI algorithms to predict fire risks, detect anomalies, and provide action recommendations. The results show that the system improves forest monitoring effectiveness and accelerates responses to potential fires. Therefore, Smart Forest Guardian can serve as an adaptive and sustainable solution to support efficient and measurable forest ecosystem protection.

Keywords: Forest Fires, Deforestation, Internet of Things, Artificial Intelligence, Early Detection.

Abstrak

Kebakaran hutan dan deforestasi menjadi ancaman serius bagi lingkungan serta pencapaian SDG 13, SDG 15, dan SDG 11. Penelitian ini bertujuan mengembangkan Smart Forest Guardian, yaitu sistem berbasis Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) untuk mendeteksi potensi kebakaran secara dini pada wilayah rawan deforestasi. Metode penelitian dilakukan dengan mengintegrasikan sensor lapangan, citra satelit, drone, dan pemetaan wilayah ke dalam platform berbasis cloud. Data dianalisis secara real-time menggunakan algoritma AI untuk memprediksi risiko kebakaran, mendeteksi anomali, dan memberikan rekomendasi tindakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan efektivitas pemantauan hutan dan mempercepat respons terhadap potensi kebakaran. Dengan demikian, Smart Forest Guardian dapat menjadi solusi adaptif dan berkelanjutan dalam mendukung perlindungan ekosistem hutan secara efisien dan terukur.

Kata Kunci: Kebakaran Hutan, Deforestasi, Internet of Things, Kecerdasan Buatan, Deteksi Dini.

Social, Humanities, and Education Studies (SHEs): Conference Series

<https://jurnal.uns.ac.id/shes>

p-ISSN 2620-9284

e-ISSN 2620-9292



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan (karhutla) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memberikan dampak serius terhadap ekosistem, keanekaragaman hayati, kesehatan masyarakat, serta stabilitas sosial dan ekonomi di Indonesia. Peristiwa karhutla masih sering terjadi di berbagai wilayah rawan kebakaran dan cenderung meningkat pada musim kemarau. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Kalimantan Selatan menjadi provinsi dengan luas kebakaran hutan dan lahan terbesar pada tahun 2023, yaitu mencapai 138.865,87 hektare hingga Oktober 2023. Sementara itu, pada tahun 2024, Nusa Tenggara Timur mencatat luas areal terbakar tertinggi sebesar 93.572,19 hektare hingga September 2024. Data tersebut menunjukkan bahwa karhutla masih menjadi ancaman serius yang memerlukan upaya penanganan secara berkelanjutan.

Penelitian ini difokuskan pada kawasan Hutan Jati Kaliabu di Kabupaten Madiun, Jawa Timur, yang memiliki riwayat kejadian karhutla berulang pada tahun 2008, 2013, 2015, dan 2021. Berdasarkan penelitian pada periode 2011–2015 di wilayah Kesatuan Pemangkuan Hutan (KPH) Madiun, faktor manusia menjadi penyebab dominan terjadinya kebakaran hutan, khususnya akibat aktivitas pembukaan dan pembersihan lahan dengan metode pembakaran di sekitar Desa Kaliabu. Selain faktor manusia, kerentanan wilayah terhadap kebakaran juga dipengaruhi oleh kondisi geografis, perubahan tutupan lahan akibat deforestasi, serta fenomena cuaca ekstrem seperti El Nino yang meningkatkan tingkat kekeringan pada kawasan hutan (Meivinia et al., 2024a).

Karhutla memberikan dampak yang luas, baik pada skala lokal maupun global. Dampak tersebut meliputi kerusakan lingkungan, hilangnya keanekaragaman hayati, peningkatan emisi gas rumah kaca, gangguan kesehatan akibat paparan asap, serta kerugian ekonomi bagi masyarakat dan pemerintah (Meivinia et al., 2024a). Selain itu, karhutla juga menjadi hambatan dalam pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 13 tentang penanganan perubahan iklim, SDG 15 tentang ekosistem daratan, dan SDG 11 tentang kota dan permukiman berkelanjutan (Sholikhuddin, Yama, & Aditya Wibawa Sakti, 2023). Kondisi tersebut semakin diperparah oleh deforestasi yang menyebabkan lingkungan menjadi lebih kering dan rentan terhadap kebakaran (Meivinia et al., 2024b).

Metode pemantauan dan pencegahan karhutla secara konvensional masih memiliki berbagai keterbatasan, terutama dalam aspek cakupan wilayah, kecepatan respons, dan akurasi deteksi dini. Oleh karena itu, diperlukan solusi berbasis teknologi yang mampu mendukung sistem pemantauan dan pencegahan kebakaran secara lebih efektif dan efisien (Carta et al., 2023). Perkembangan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), data satelit, dan drone memiliki potensi besar dalam mendukung deteksi dini, pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time*, serta pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam mitigasi kebakaran hutan dan lahan (Carta et al., 2023; Ramadan et al., 2024; Avazov et al., 2023).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan solusi berbasis teknologi dalam mendukung sistem pemantauan dan pencegahan karhutla di kawasan Hutan Jati Kaliabu, Kabupaten Madiun. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap upaya mitigasi bencana karhutla secara lebih proaktif, efektif, dan berkelanjutan, serta mendukung pembangunan lingkungan yang tangguh.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk merancang dan mengembangkan konsep sistem "*Smart Forest Guardian*" sebagai solusi teknologi dalam pencegahan kebakaran hutan dan

deforestasi (Gustiani & Sriwijaya, 2019). Penelitian difokuskan pada tahap analisis kebutuhan, perancangan sistem, dan pengembangan desain konseptual berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Artificial Intelligence* (AI).

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, pengumpulan data sekunder, dan perancangan skenario konseptual. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji jurnal ilmiah, prosiding, buku, laporan teknis, serta website resmi terkait IoT, AI, drone, GIS, satelit, kebakaran hutan, deforestasi, dan SDGs. Data sekunder meliputi data geospasial, historis kebakaran, dan cuaca yang diperoleh dari Perhutani KPH Madiun, BIG melalui InaGEOPORTAL, serta BMKG. Selain itu, dirancang skenario data sensor IoT virtual, citra satelit/drone, dan parameter topografi untuk pengujian konseptual sistem. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi literatur, dokumentasi, dan analisis kebutuhan sistem.

Teknik analisis data menggunakan analisis deskriptif untuk merancang arsitektur dan alur kerja sistem *Smart Forest Guardian* secara terintegrasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

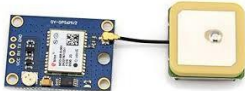
Implementasi konsep "*Smart Forest Guardian*" menunjukkan bahwa integrasi teknologi IoT, AI, drone, satelit, dan GIS berpotensi meningkatkan efektivitas sistem deteksi dini kebakaran hutan dibandingkan metode konvensional. Hasil rancangan ini sejalan dengan penelitian Avazov et al. (2023) dan Ramadan et al. (2024) yang menyatakan bahwa penggunaan data multi-sumber berbasis AI mampu meningkatkan akurasi pemantauan lingkungan secara real-time. Sistem "*Smart Forest Guardian*" dirancang menggunakan arsitektur berlapis yang terdiri atas lapisan penginderaan, komunikasi, pemrosesan data, dan aplikasi pengguna.

1. Lapisan Penginderaan (*Perception Layer*)

Pada lapisan penginderaan, berbagai sensor seperti DHT22, MQ-7, MQ-135, sensor flame infrared, sensor PIR, dan modul GPS digunakan untuk memperoleh data lingkungan secara langsung. Sensor-sensor tersebut dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 dan jaringan LoRaWAN untuk mendukung transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah. Penentuan lokasi pemasangan sensor akan didasarkan pada hasil analisis risiko awal yang dihasilkan AI dan pertimbangan faktor topografi (Kalantar et al. 2020). Jenis-jenis sensor utama yang diimplementasikan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Sensor

No	Nama Sensor	Kegunaan	Gambar
1.	Sensor Suhu dan Kelembaban Udara, DHT22/AM2302	Mengukur suhu dan kelembaban relatif udara secara akurat menggunakan sensor kelembaban kapasitif dan termistor.	
2.	Sensor Gas Karbon Monoksida (CO), MQ-7	Mendeteksi konsentrasi CO via perubahan resistansi sensor semikonduktor (SnO ₂), dengan siklus pemanasan internal untuk akurasi.	

- | | | | |
|----|--|--|---|
| 3. | Sensor Kualitas Udara / Indikator Gas Lain, MQ-135 | Sensitif terhadap gas berbahaya (NH_3 , Benzena, CO_2 , asap); indikasi polusi udara sebagai penanda awal potensi kebakaran. |  |
| 4. | Sensor Deteksi Nyala Api, Modul IR Flame Sensor | Mendeteksi spektrum inframerah dari nyala api menggunakan fotodiode/fototransistor IR untuk deteksi kebakaran langsung. |  |
| 5. | Sensor Gerak (PIR - Passive Infrared Sensor) | Mendeteksi perubahan radiasi inframerah dari gerakan objek panas (manusia/hewan besar) untuk indikasi aktivitas mencurigakan peningkatan risiko. |  |
| 6. | Modul GPS | Menyediakan data koordinat geografis presisi pada tiap node sensor untuk pemetaan spasial dan penentuan lokasi insiden akurat. |  |

2. Skema Aliran Data dalam Subsistem IoT

Untuk memberikan pemahaman yang jelas mengenai bagaimana data dari berbagai sensor IoT di lapangan dikumpulkan, ditransmisikan melalui jaringan, dan diproses awal sebelum mencapai platform cloud pusat, skema aliran data spesifik untuk subsistem IoT *"Smart Forest Guardian"* dapat dilihat pada Gambar 1

Gambar 1. Skema Aliran Data



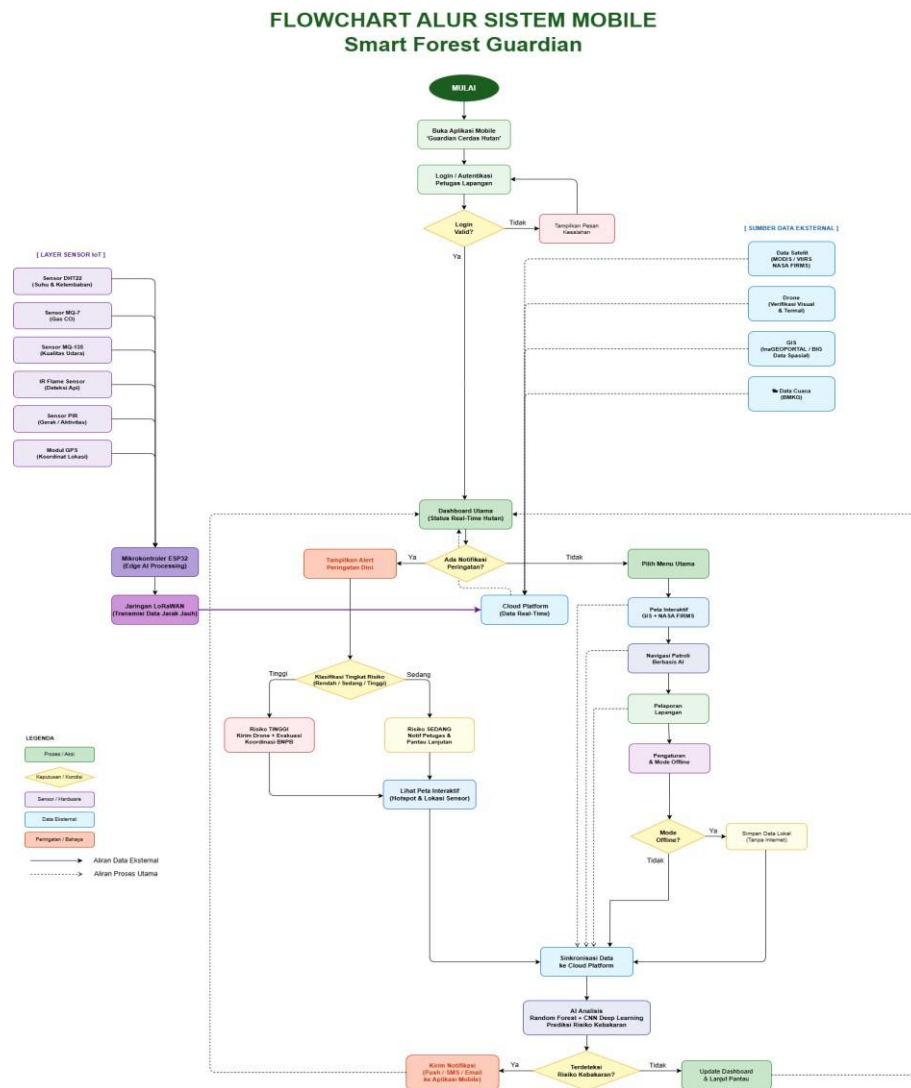
Skema Aliran Data Dari hasil rancangan menunjukkan bahwa penggunaan LoRaWAN dan Edge AI mampu meningkatkan efisiensi komunikasi data di kawasan hutan dengan keterbatasan jaringan internet. Temuan ini mendukung penelitian Ginting et al. (2024) yang menyatakan bahwa kombinasi LoRaWAN dan pemrosesan lokal efektif digunakan dalam sistem pemantauan berbasis IoT.

3. Penerapan algoritma Random Forest
Digunakan untuk memprediksi tingkat risiko kebakaran berdasarkan data suhu, kelembaban, konsentrasi gas, data cuaca, topografi, dan vegetasi. Algoritma ini dipilih karena mampu melakukan klasifikasi terhadap data yang kompleks dan heterogen. Hasil ini sejalan dengan penelitian Kalantar et al. (2020) yang menunjukkan bahwa kombinasi data topografi, cuaca, dan vegetasi dapat meningkatkan akurasi prediksi kebakaran hutan.
4. Analisis Citra Menggunakan *Deep Learning*
Selain itu, model *Deep Learning* berbasis *Convolutional Neural Networks* (CNN) digunakan untuk analisis citra satelit dan drone. Implementasi CNN memungkinkan sistem melakukan deteksi asap, api, dan perubahan tutupan lahan secara otomatis. Penggunaan teknologi ini mendukung penelitian Avazov et al. (2023) dan Yandouzi et al. (2022) yang menjelaskan bahwa deep learning efektif digunakan untuk object detection dan change detection pada kawasan hutan.
5. Mekanisme Respons Sistem
Sistem juga dilengkapi mekanisme respons otomatis berupa notifikasi SMS, email, dan push notification ke aplikasi mobile petugas. Informasi tersebut diintegrasikan dengan dashboard pusat untuk mendukung koordinasi dan pengambilan keputusan secara cepat. Selain itu, drone dapat dikirim ke lokasi terdeteksi guna melakukan verifikasi visual dan termal. Mekanisme ini meningkatkan responsivitas sistem dibandingkan metode pemantauan manual.
6. Sinergi dan Integrasi Teknologi
Integrasi teknologi IoT, AI, drone, GIS, dan satelit menjadi kekuatan utama sistem "*Smart Forest Guardian*". IoT berfungsi menyediakan data lingkungan secara *real-time*, satelit mendukung deteksi hotspot berskala luas, drone membantu verifikasi lapangan, GIS memberikan konteks spasial, sedangkan AI menjadi pusat analisis data. Integrasi multi-teknologi ini menghasilkan sistem yang lebih adaptif, efisien, dan akurat dalam mendukung mitigasi kebakaran hutan dan deforestasi.

Rancangan Aplikasi Mobile Pendukung "*Smart Forest Guardian*"

Aplikasi mobile "*Smart Forest Guardian*" dirancang sebagai antarmuka utama bagi petugas lapangan. Tujuannya adalah menyajikan informasi penting secara cepat dan intuitif, memandu tindakan lapangan, serta memfasilitasi pelaporan yang efisien. Fitur utama aplikasi meliputi sistem peringatan dini, peta interaktif, navigasi rute patroli berbasis AI, pelaporan lapangan, serta mode offline. Keberadaan aplikasi ini mempermudah akses informasi dan koordinasi lapangan secara cepat dan terstruktur. Flowchart Alur Sistem Smart Forest Guardian dapat dilihat pada Gambar 2.

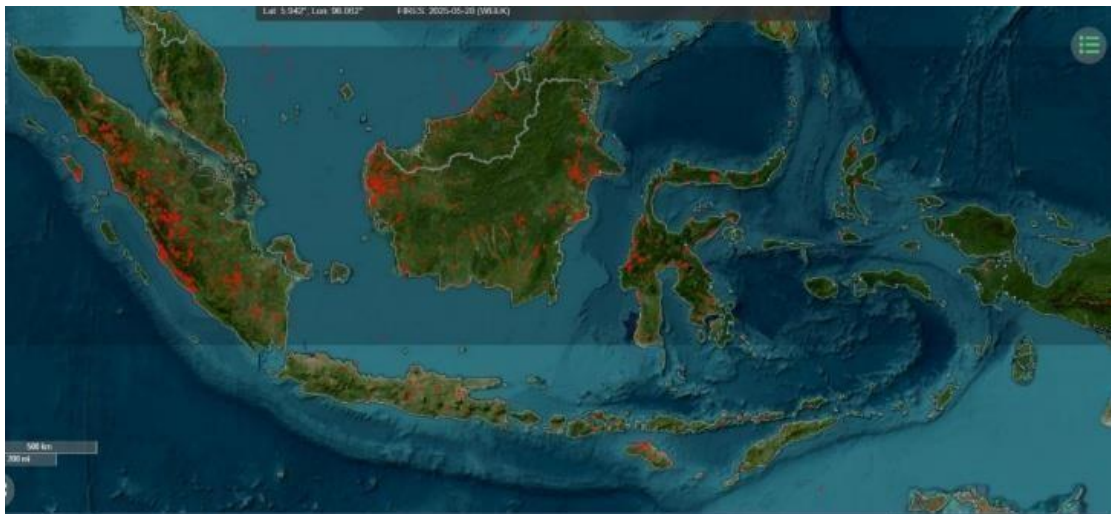
Gambar 2. Flowchart Alur Sistem



GIS Suhu Panas Penyebab Kebakaran (Berbasis Data NASA FIRMS)

Pemanfaatan GIS berbasis data NASA FIRMS juga menjadi bagian penting dalam sistem. Data hotspot dari sensor MODIS dan VIIRS digunakan untuk mendeteksi suhu panas berpotensi kebakaran secara lebih cepat dan akurat. Integrasi data GIS dan satelit memberikan dukungan penting dalam proses mitigasi dan pengambilan keputusan berbasis lokasi. Visualisasi GIS dapat dilihat pada Gambar 3 yang menunjukkan titik merah sebagai lokasi suhu tinggi berpotensi kebakaran, dengan konsentrasi tertinggi di Sumatera bagian selatan, serta Kalimantan Barat dan Tengah (NASA | LANCE | FIRMS, n.d.).

Gambar 3. Visualisasi GIS



Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa konsep “*Smart Forest Guardian*” memiliki potensi besar sebagai solusi teknologi yang adaptif dan berkelanjutan dalam mitigasi kebakaran hutan dan deforestasi. Sistem ini tidak hanya mendukung perlindungan lingkungan, tetapi juga berkontribusi terhadap pencapaian SDG 13 tentang penanganan perubahan iklim, SDG 15 tentang ekosistem daratan, SDG 11 tentang kota dan permukiman berkelanjutan, serta SDG 9 tentang industri, inovasi, dan infrastruktur.

SIMPULAN

Sistem “*Smart Forest Guardian*” dapat membantu petugas dalam memprediksi dan mendeteksi daerah rawan kebakaran dan deforestasi sehingga mendukung penyusunan strategi mitigasi yang lebih cepat, tepat sasaran, dan berbasis data lingkungan aktual. Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), GIS, drone, dan data satelit memungkinkan proses pemantauan, analisis data, serta pemberian peringatan dini dilakukan secara otomatis dan real-time. Selain itu, fitur *Geographic Information System* (GIS) memberikan informasi kondisi lahan secara visual dan aktual untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif dan responsif di lapangan.

Implementasi konsep ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas mitigasi kebakaran hutan serta mendukung perlindungan ekosistem secara berkelanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan prototipe dan melakukan validasi langsung di Hutan Jati Kaliabu, meningkatkan akurasi AI menggunakan data nyata, mengoptimalkan efisiensi energi dan komunikasi sensor, serta memperkuat kolaborasi dengan Perhutani, pemerintah daerah, BNPB, dan masyarakat dalam mendukung implementasi sistem secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Avazov, K. ;, Hyun, A. E. ;, Sami, S., Khaitov, A. A. ;, Abdusalomov, A. ;, Cho, A.B. ;, Forest, Y. I., Avazov, K., Hyun, A. E., Sami, A. A., Khaitov, A., Abdusalomov, A. B., & Cho, Y. I. (2023). Forest Fire Detection and Notification Method Based on AI and IoT Approaches. *Future Internet* 2023, Vol. 15, Page 61, 15(2), 61. <https://doi.org/10.3390/FI15020061>
- Carta, F., Zidda, C., Putzu, M., Loru, D., Anedda, M., & Giusto, D. (2023).

- Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 6635, 23(14), 6635. <https://doi.org/10.3390/S23146635>
- Ginting, N. D. B., Handayani, A. S., & Sarjana, S. (2024). Implementasi IoT dan Sensor Termal untuk Mitigasi Kebakaran Hutan dan Lahan dengan Penentuan Koordinat. *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)*, 6(2), 817–824-817–824. <https://doi.org/10.47065/BITS.V6i2.5594>
- Gustiani, S., & Sriwijaya, P. N. (2019). RESEARCH AND DEVELOPMENT (R&D) METHOD AS A MODEL DESIGN IN EDUCATIONAL RESEARCH AND ITS ALTERNATIVES. *Holistics (Hospitality and Linguistics) : Jurnal Ilmiah Bahasa Inggris*, 11(2). <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/holistic/article/view/1849>
- Kalantar, B., Ueda, N., Idrees, M. O., Janizadeh, S., Ahmadi, K., & Shabani, F. (2020). Forest Fire Susceptibility Prediction Based on Machine Learning Models with Resampling Algorithms on Remote Sensing Data. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 3682, 12(22), 3682. <https://doi.org/10.3390/RS12223682>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (n.d.). SiPongi - Sistem Pemantauan Kebakaran Hutan dan Lahan Indonesia. Diakses pada 24 Mei 2025, dari <https://sipongi.menlhk.go.id/>
- Meivinia, A. P., Despitri, E., S. R. F., Putri, R. H., Sulman, G., Megawati, M., vauzia, vauzia, & Razak, A. (2024). Kebakaran hutan dan deforestasi: menggali solusi berbasis teknologi dan komunitas. *Education and Social Sciences Review*, 5(2), 166–175. <https://doi.org/10.29210/07ESSR509300>
- NASA | LANCE | FIRMS. (n.d.). Retrieved May 28, 2025, from <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:2025-05-22,2025-05-28:@115.8,-3.2,5.6z>
- 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>
- Sholikhuddin, M., Yama, R., & Aditya Wibawa Sakti, Ph. D. (2023). FORESTY: INOVASI BERBASIS IOT UNTUK MEMINIMALISASI ANGKA DEFORESTASI DENGAN MEMANFAATKAN MACHINE LEARNING SEBAGAI AKSI SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS (SDGS). *Lomba Karya Tulis Ilmiah*, 4(1), 129–142. <https://journal.itelkom-sby.ac.id/lkti/article/view/286>
- Yandouzi, M., Grari, M., Idrissi, I., Moussaoui, O., Azizi, M., Ghoumid, K., & Kerkour Elmiad, A. (2022). REVIEW ON FOREST FIRES DETECTION AND PREDICTION USING DEEP LEARNING AND DRONES. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 100(12), 4565–4576.