

**Rancang Bangun SIPEGA-IoT (Sistem Peringatan Penebangan
Liar) Menggunakan Sensor Akustik dan Akselerometer 3-Sumbu
Terintegrasi GPS dan Self-Sustaining Power**



**Lomba Internet of Things
TENNOVEX 2025
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Disusun Oleh :

Muhammad Zavier Rizkayanto	*****
Azahid Pramudya Al Ghifahri	*****
Sendy Yasho	*****

**SEKOLAH MENENGAH KEJURUAN
NEGERI 4 JAKARTA
2025**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

LOMBA INTERNET OF THINGS TENNOVEX 2025

Judul Karya Tulis : Rancang Bangun SIPEGA-IoT (Sistem Peringatan Penebangan Liar) Menggunakan Sensor Akustik dan Akselerometer 3-Sumbu Terintegrasi GPS dan Self-Sustaining Power

Nama Ketua : Muhammad Zavier Rizkayanto

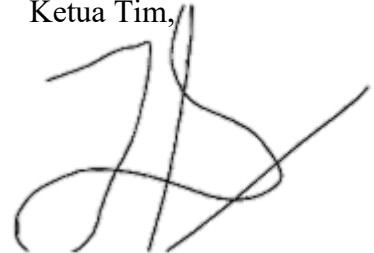
Nama Anggota : 1. Azahid Pramudya Al Ghifahri
2. Sendy Yasho

Dengan ini saya menyatakan bahwa karya yang saya sertakan dalam Lomba Internet of Things yang diadakan TENNOVEX 2025 adalah benar-benar hasil karya saya sendiri, bukan hasil plagiarisme, penjiplakan, atau pelanggaran hak cipta dari pihak manapun dan belum pernah diikuti dalam segala bentuk perlombaan serta belum pernah dimuat di manapun.

Apabila dikemudian hari ditemukan pelanggaran, kami bersedia menerima konsekuensi berupa diskualifikasi dari kompetisi ini sebagai bentuk pertanggungjawaban kami.

Jakarta, 03 November 2025

Ketua Tim,



(Muhammad Zavier Rizkayanto)

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS LOMBA INTERNET OF THINGS TENNOVEX 2025	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
BAB II RELEVANSI DENGAN TEMA dan SDGs	5
BAB III METODOLOGI INTERNET OF THINGS (IoT)	8
BAB IV DESKRIPSI KARYA.....	12
BAB V TEKNIS PROTOTYPE / IMPLEMENTASI IDE.....	18
BAB VI DAMPAK DAN KEBERLANJUTAN.....	29
BAB VII Rencana Anggaran Biaya.....	31
BAB VIII KESIMPULAN.....	35
DAFTAR PUSTAKA	37

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Algoritma Fusi Sensor menggunakan pendekatan Validasi Dua Faktor	10
Tabel 2. 1 Data Kejadian Kritis	15
Tabel 2. 2 Data Telemetry Sensor.....	17
Tabel 3. 1	20
Tabel 3. 2 Konfigurasi Visualisasi Data Kritis pada Platform Blynk	28

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Desain Enclosure Eksternal Prototipe SIPEGA-IoT.....	19
Gambar 1. 2 Tata Letak Internal Komponen Prototipe SIPEGA-IoT.	20

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai salah satu negara pemilik hutan hujan tropis terluas di dunia, terus menghadapi ancaman serius dari deforestasi dan degradasi hutan [1]. Meskipun terdapat tren positif dari data resmi, di mana Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mencatat laju deforestasi *netto* (bersih) turun menjadi 104 ribu hektar (ha) pada periode 2021–2022 (turun 8,4% dibandingkan tahun sebelumnya) [2], aktivitas penebangan liar (*illegal logging*) tetap menjadi pendorong utama hilangnya hutan sekunder [3].

Dampak dari aktivitas ilegal ini bersifat multidimensi. Kerusakan hutan menyebabkan kehilangan habitat, berkurangnya keanekaragaman hayati, dan mengubah fungsi hutan sebagai penyerap karbon menjadi sumber emisi karbon yang signifikan, yang pada gilirannya berkontribusi pada pemanasan global [4].

Tantangan utama dalam pengendalian aktivitas ilegal ini adalah luasnya area hutan yang harus diawasi. Patroli konvensional menghadapi kendala menjadi tidak efisien dan cenderung bersifat reaktif, di mana penindakan seringkali baru dapat dilakukan setelah terjadi kerusakan signifikan. Kesenjangan ini menciptakan kebutuhan mendesak akan solusi pengawasan yang proaktif, *real-time*, dan akurat.

Penerapan teknologi dalam pengawasan hutan yang ada saat ini masih menghadapi beberapa kendala kritis, terutama pada sistem peringatan dini berbasis teknologi tunggal:

1. Kelemahan Deteksi Akustik Murni: Banyak sistem peringatan dini berbasis *Internet of Things* (IoT) hanya mengandalkan sensor akustik untuk mendeteksi suara gergaji mesin. Namun, sistem ini memiliki kelemahan fatal, yaitu rentan terhadap alarm palsu (*false positive*) yang tinggi karena tidak mampu membedakan suara gergaji dengan suara sejenisnya (misalnya, mesin motor atau kebisingan lingkungan) [5]. Ketergantungan pada ambang batas kebisingan tunggal membuat sistem ini kurang andal [6].

2. Keterbatasan Data Satelit: Walaupun citra satelit efektif untuk pemetaan skala besar, teknologi ini menghadapi kendala teknis dan keterlambatan pemrosesan data [7]. Akibatnya, data satelit kurang menyediakan informasi *real-time* yang dibutuhkan untuk deteksi dini aktivitas penebangan yang berlangsung cepat.

Kesenjangan ini menunjukkan bahwa solusi yang dibutuhkan adalah sistem yang mampu memverifikasi dan memvalidasi kebenaran ancaman secara cerdas, alih-alih hanya mengandalkan satu jenis data kebisingan.

Penelitian ini mengusulkan pengembangan SIPEGA-IoT (Sistem Peringatan Dini Penebangan Liar Berbasis IoT), sebuah sistem yang dirancang untuk mengatasi kesenjangan akurasi melalui implementasi Logika Fusi Data Multi-Sensor. Keunggulan SIPEGA-IoT adalah:

1. *Fusion Data Logic* untuk Akurasi Tertinggi: Sistem ini mengintegrasikan Sensor Akustik (MAX9814) untuk menganalisis pola frekuensi suara gergaji mesin dan Sensor Getaran (Akselerometer ADXL345) untuk mendeteksi getaran impulsif pada batang pohon. Pemanfaatan fusi sensor (suara dan getaran) diverifikasi secara simultan oleh algoritma, yang terbukti penting untuk mengurangi asumsi salah (*false positive*) secara drastis [8].
2. Transmisi Data Presisi *Real-Time*: Dilengkapi dengan Modul GPS (NEO-6M), setiap peringatan yang terverifikasi akan menyertakan koordinat lokasi (lintang dan bujur) yang tepat. Pemanfaatan GPS ini penting untuk navigasi, pemantauan personil, dan memfasilitasi respons penegakan hukum yang cepat dan terarah [9].
3. Desain Mandiri (*Self-Sustaining*): Perangkat dirancang untuk beroperasi secara otonom di lingkungan terpencil dengan mengandalkan Panel Surya Mini sebagai sumber daya utama, didukung oleh manajemen daya *deep-sleep* pada mikrokontroler ESP32.

Dengan menerapkan teknologi fusi sensor yang cerdas dan *real-time*, SIPEGA-IoT diharapkan dapat bertransformasi menjadi solusi *early warning system* yang andal dan tepat sasaran, mendukung upaya konservasi dan penegakan hukum kehutanan yang lebih efektif.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang arsitektur perangkat keras (*hardware*) sistem SIPEGA-IoT yang menggabungkan sensor akustik (MAX9814), sensor getaran (ADXL345), dan modul GPS (NEO-6M) menggunakan komponen yang terjangkau dan berbiaya rendah sambil tetap mempertahankan kemampuan operasional mandiri (*self-sustaining*) di lingkungan terpencil?
2. Bagaimana mengembangkan algoritma *Fusion Data Logic* yang mampu mengintegrasikan dan memverifikasi pola data dari sensor akustik dan sensor getaran secara simultan, sehingga dapat meminimalisir secara signifikan kasus *false positive* (alarm palsu) yang disebabkan oleh kebisingan lingkungan hutan?
3. Bagaimana mengimplementasikan sistem transmisi data *real-time* untuk mengirimkan data peringatan yang telah terverifikasi, beserta koordinat lokasi yang presisi, dengan mempertimbangkan efisiensi biaya operasional transmisi data di area terpencil?

1.3 Tujuan

1. Merancang dan merealisasikan prototipe perangkat keras sistem SIPEGA-IoT yang efisien, dengan menggunakan komponen berbiaya rendah, yang mengintegrasikan sensor akustik (MAX9814), sensor getaran (ADXL345), GPS (NEO-6M), dan mikrokontroler ESP32, serta mampu beroperasi secara mandiri (*self-sustaining*) di kawasan hutan.
2. Mengembangkan dan menguji algoritma *Fusion Data Logic* yang mampu menggabungkan data dari sensor akustik dan getaran secara cerdas untuk memverifikasi aktivitas penebangan liar, sehingga berhasil menurunkan tingkat *false positive* secara signifikan dibandingkan sistem deteksi akustik tunggal
3. Mengimplementasikan dan menguji sistem transmisi data *real-time* untuk mengirimkan data peringatan terverifikasi yang mencakup koordinat lokasi

yang presisi ke pusat pemantauan dengan mempertimbangkan efisiensi biaya operasional komunikasi data.

BAB II

RELEVANSI DENGAN TEMA dan SDGs

Ide pengembangan **SIPEGA-IoT (Sistem Peringatan Dini Penebangan Liar Berbasis IoT)** memiliki relevansi yang kuat dengan isu nasional dalam mengatasi kejahatan lingkungan serta berkontribusi langsung pada pencapaian beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa.

2.1 Kontribusi terhadap Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)

Proyek SIPEGA-IoT secara spesifik berkontribusi pada tiga pilar utama SDGs:

1. Pilar Lingkungan: SDG 15 (Menjaga Ekosistem Daratan)

Sistem ini berfungsi sebagai alat mitigasi deforestasi, yang merupakan kunci untuk mencapai Target 15.2 dan 15.7:

- **Target 15.2:** Menghentikan Deforestasi dan Memulihkan Hutan. Sistem SIPEGA-IoT adalah inovasi berbasis IoT yang bertujuan meminimalisasi angka deforestasi dengan memberikan peringatan dini terhadap penebangan ilegal [9]. Dengan menyediakan data lokasi presisi dan terverifikasi secara real-time [5], sistem ini secara efektif membantu penegakan hukum untuk menghentikan hilangnya hutan sekunder yang disebabkan oleh illegal logging [3]. Pemanfaatan teknologi modern seperti IoT dalam pengelolaan hutan telah terbukti memungkinkan deteksi dini deforestasi dan degradasi lahan, yang krusial untuk menjaga kesehatan ekosistem [10].
- **Target 15.7:** Melindungi Keanekaragaman Hayati. Dengan mencegah perusakan hutan, sistem ini turut serta dalam melindungi habitat alami, menekan risiko hilangnya keanekaragaman hayati, dan memelihara fungsi hutan yang merupakan pencegah bencana hidrometeorologi [4]

2. Pilar Institusi dan Keadilan: SDG 16 (Perdamaian, Keadilan, dan Institusi Kuat)

Pengembangan sistem pengawasan yang efektif dan akurat mendukung penguatan institusi penegak hukum kehutanan:

- **Target 16.3:** Mempromosikan Penegakan Hukum yang Adil dan Efektif. SIPEGA-IoT dirancang untuk meningkatkan efisiensi penegakan hukum dengan menyediakan data peringatan yang terverifikasi melalui Fusion Data Logic [8]. Hal ini memastikan bahwa pengerahan tim penegak hukum menjadi tepat sasaran, mengatasi masalah alarm palsu (false positive) yang tinggi pada sistem akustik murni [5], [6]. Dukungan teknologi IoT dalam proses penegakan hukum ini selaras dengan upaya membangun struktur hukum yang lebih andal dan berpusat pada akurasi data [11].

3. Pilar Inovasi dan Infrastruktur: SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur)

Proyek ini mengedepankan solusi teknologi yang efisien dan sesuai dengan kondisi negara berkembang:

- **Target 9.5:** Meningkatkan Riset Ilmiah dan Meningkatkan Kapasitas Teknologi. SIPEGA-IoT merepresentasikan inovasi teknologi lokal melalui implementasi Logika Fusi Sensor dan desain berbiaya rendah. Penggunaan IoT memungkinkan pemantauan kondisi operasional secara real-time untuk mendeteksi potensi bahaya, yang digunakan untuk analisis prediktif dan pencegahan [12]. Pengembangan ini mendorong pemanfaatan teknologi informasi untuk pengambilan keputusan berbasis bukti, yang merupakan ciri khas era digital dalam pengelolaan sumber daya hutan [10].

2.2 Relevansi dengan Isu Kritis Nasional

- **Efisiensi Pengawasan Negara dan Biaya:** Fokus utama SIPEGA-IoT pada analisis *cost-effectiveness* dan penggunaan komponen berbiaya rendah menjadikannya solusi yang praktis dan dapat direplikasi secara massal di kawasan hutan Indonesia yang luas.
- **Mitigasi Perubahan Iklim:** Secara tidak langsung, dengan membantu menghentikan deforestasi, sistem ini mendukung komitmen nasional untuk

mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK), karena mencegah pelepasan emisi karbon signifikan yang tersimpan di dalam hutan [4].

BAB III

METODOLOGI INTERNET OF THINGS (IoT)

3.1 Fase Perancangan (*Design Phase*)

Fase ini bertujuan untuk menghasilkan cetak biru (*blueprint*) teknis dari sistem SIPEGA-IoT, memastikan semua komponen yang dipilih efisien, akurat, dan terjangkau.

3.1.1 Definisi Kebutuhan Sistem

Tahap awal ini mencakup identifikasi kebutuhan fungsional dan non-fungsional:

- Kebutuhan Fungsional:
 1. Mendeteksi suara gergaji mesin (akustik) dan getaran pemotongan pohon (mekanik) secara simultan.
 2. Mengirimkan peringatan (*alert*) dan koordinat GPS secara real-time saat ancaman terverifikasi.
 3. Mampu beroperasi secara mandiri (*self-sustaining*) tanpa memerlukan catu daya eksternal konvensional.
 4. Menghasilkan *False Positive Rate* yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem akustik murni.
- Kebutuhan Non-Fungsional:
 1. Biaya Rendah: Total biaya material (*Bill of Materials* - BoM) per unit harus minimal untuk memungkinkan implementasi skala besar [11].
 2. Efisiensi Energi: Konsumsi daya harus dioptimalkan melalui mode *deep-sleep* untuk memaksimalkan masa pakai baterai.

3.1.2 Pemilihan Komponen Berbiaya Rendah (*Cots Selection*)

Pemilihan komponen didasarkan pada prinsip *Cots* (*Commercial Off-the-Shelf*) untuk menjaga biaya tetap rendah tanpa mengorbankan fungsionalitas utama.

- Mikrokontroler: ESP32 dipilih karena harganya yang terjangkau, konsumsi daya yang rendah saat mode tidur (*deep-sleep*), dan memiliki kemampuan Wi-Fi/Bluetooth terintegrasi yang memfasilitasi *debugging* dan konfigurasi awal.
- Sensor Deteksi:
 - Sensor Akustik (MAX9814): Mikrofon dengan penguatan otomatis (*Automatic Gain Control* - AGC) yang sensitif terhadap frekuensi khas gergaji mesin.
 - Sensor Getaran (ADXL345): Akselerometer digital yang sensitif untuk mendeteksi getaran impulsif pada batang pohon, penting untuk fusi sensor.
- Lokasi dan Komunikasi:
 - Modul GPS (NEO-6M): Pilihan modul GPS berbiaya rendah dengan akurasi yang memadai (sekitar 2-5 meter) untuk tujuan penegakan hukum.
 - Modul Komunikasi (SIM800L): Dipilih berdasarkan ketersediaan sinyal. SIM800L GSM menawarkan transmisi data tinggi di area dengan sinyal seluler

3.1.3 Perancangan Arsitektur Perangkat Keras dan Diagram Blok

Arsitektur sistem digambarkan melalui diagram blok yang menunjukkan hubungan antara setiap komponen, mulai dari akuisisi data hingga transmisi:

1. Input Sensor: Data mentah dikumpulkan oleh sensor Akustik (suara) dan Getaran (mekanik).
2. Unit Pemroses: ESP32 menerima data, memprosesnya melalui Logika Fusi Data, dan mengintegrasikannya dengan data lokasi dari GPS NEO-6M.
3. Unit Catu Daya: Panel Surya Mini mengisi ulang Baterai Li-Ion, yang memberi daya pada seluruh sistem, memastikan operasional 24/7.
4. Output Komunikasi: Data terverifikasi dikirimkan ke Blynk melalui GSM SIM 800L

3.1.4 Perumusan Algoritma *Fusion Data Logic*

Logika ini dikembangkan untuk memecahkan masalah utama sistem deteksi hutan: *false positive* yang disebabkan oleh kebisingan lingkungan [6], [7].

Tabel 1. 1 Algoritma Fusi Sensor menggunakan pendekatan Validasi Dua Faktor

Faktor	Deskripsi Teknis
Faktor 1: Deteksi Akustik (Suara Gergaji)	Sistem secara terus-menerus menganalisis spektrum frekuensi dan amplitudo dari sensor MAX9814. Jika nilai amplitudo rata-rata melebihi <i>threshold</i> selama minimal 5 detik, sistem memasuki fase verifikasi.
Faktor 2: Deteksi Getaran (Pemotongan Pohon)	Setelah Faktor 1 terpicu, sistem langsung memantau sensor ADXL345. Peringatan hanya dianggap benar jika terdeteksi pola <i>spike</i> akselerasi (impulsif) yang melebihi <i>threshold</i> dalam 5 detik.
Logika Verifikasi	Peringatan dikirimkan JIKA (Faktor 1) DAN (Faktor 2) terpenuhi. Jika hanya Faktor 1 yang terpicu (misalnya, suara motor lewat), sistem akan kembali ke mode tidur, mengurangi transmisi data yang mahal dan <i>false alert</i> .

3.2 Fase Implementasi (*Development Phase*)

Fase ini mengubah rancangan menjadi prototipe fisik fungsional, mencakup perakitan perangkat keras, pengintegrasian daya, dan penulisan *firmware* sistem.

3.2.2 Perakitan Purwarupa

- Perakitan Modul: Semua modul (ESP32, sensor, GPS, dan komunikasi) diintegrasikan, dengan perhatian khusus pada isolasi sensor akustik dan getaran agar tidak saling mengganggu secara mekanis.
- *Casing* Proteksi: Purwarupa ditempatkan dalam wadah pelindung untuk melindungi elektronik dari kelembaban dan air hujan, yang merupakan risiko tinggi di lingkungan hutan.

3.2.3 Integrasi Modul Daya Mandiri (*Self-Sustaining Power Integration*)

Desain ini vital untuk operasional jangka panjang di lokasi terpencil.

- Penyusunan Sistem Daya: Sistem daya mandiri melibatkan Panel Surya Mini sebagai sumber pengisian utama dan Baterai Lithium Li-Ion 18650 yang terhubung melalui *Charge Controller* (misalnya, modul TP4056 atau sirkuit sejenis).
- Pengujian Daya Pasif: Sebelum implementasi penuh, konsumsi daya masing-masing modul diuji untuk memastikan bahwa total konsumsi saat mode *deep-sleep* berada di bawah 200 mA. Konsumsi daya saat *deep-sleep* inilah yang memastikan daya tahan baterai berhari-hari bahkan tanpa sinar matahari.

3.2.4 Penulisan *Firmware* pada Mikrokontroler ESP32

Penulisan kode berfokus pada optimasi Logika Fusi Data dan efisiensi energi.

- Pemrograman *Deep-Sleep*: *Firmware* dikembangkan menggunakan Arduino IDE. Manajemen daya *deep-sleep* diprioritaskan, di mana ESP32 hanya bangun secara berkala (misalnya, setiap 5 menit) untuk melakukan pengecekan sensor dan status sistem, atau dipicu oleh interupsi eksternal dari sensor akustik.
- Implementasi Fusi Data: Kode dikembangkan untuk menjalankan algoritma dua tahap dan mencakup:
 - Pengolahan sinyal digital (FFT sederhana) dari MAX9814 untuk mengidentifikasi pola frekuensi gergaji.
 - Pengambilan sampel data getaran dari ADXL345 (sumbu X, Y, Z) dan perhitungan vektor percepatan untuk mendeteksi *spike* impulsif.
- Integrasi Komunikasi: *Firmware* mencakup *library* untuk modul GPS dan modul komunikasi GSM untuk memformat paket data peringatan menjadi format JSON dan mengirimkannya ke *server* melalui protokol HTTP POST/MQTT.

BAB IV

DESKRIPSI KARYA

4.1 Tinjauan Umum dan Konsep Rancang Bangun

Judul Karya: Rancang Bangun SIPEGA-IoT (Sistem Peringatan Penebangan Liar) Menggunakan Sensor Akustik dan Akselerometer 3-Sumbu Terintegrasi GPS dan *Self-Sustaining Power*

SIPEGA-IoT merupakan sebuah sistem perangkat keras cerdas yang dikembangkan untuk mengatasi kerentanan pengawasan hutan terhadap praktik penebangan liar. Rancang bangun ini didasarkan pada prinsip Deteksi Dini dan Verifikasi Ganda yang mengintegrasikan kemampuan pemrosesan sinyal pada mikrokontroler dengan konektivitas *Internet of Things* (IoT).

Tujuan utama dari rancang bangun ini adalah menghasilkan unit sensor yang bersifat terdistribusi, beroperasi mandiri (*self-sustaining*), dan mampu memberikan informasi kejadian yang akurat (melalui verifikasi ganda) dan instan melalui GSM kepada pihak berwenang. Fokus rancang bangun ini adalah menciptakan solusi yang efektif dari segi biaya dan fungsionalitas di lingkungan operasional yang ekstrem dan tanpa pengawasan manusia.

4.2 Arsitektur Mikrokontroler dan Pemrosesan Sinyal

Jantung dari SIPEGA-IoT adalah Mikrokontroler ESP32 Dev Board, yang dipilih karena memiliki kemampuan pemrosesan *dual-core* (ideal untuk menjalankan komputasi intensif seperti FFT) dan dukungan konektivitas nirkabel (Wi-Fi dan Bluetooth), yang sangat penting untuk *debugging* dan transmisi data.

1. Manajemen Daya Tingkat Rendah (Deep Sleep)

Salah satu aspek krusial dalam rancang bangun lapangan adalah efisiensi energi. ESP32 secara spesifik diimplementasikan dengan mode Deep Sleep. Selama mode *standby*, konsumsi daya ditekan seminimal mungkin (hingga kisaran mikroampere), sementara *interrupt* eksternal dari sensor atau *timer*

internal terus aktif. Hal ini memungkinkan perangkat untuk bertahan lama hanya dengan pengisian daya periodik dari panel surya.

2. Pemrosesan Data FFT dan *Feature Extraction*

Deteksi akustik dilakukan dengan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) yang dijalankan pada ESP32. Sinyal audio mentah yang diterima dari MAX9814 (setelah dikonversi dari analog ke digital) diubah dari domain waktu ke domain frekuensi.

- Proses: Analisis FFT memungkinkan sistem untuk mengidentifikasi puncak energi yang muncul pada frekuensi-frekuensi harmonik spesifik yang dipancarkan oleh gergaji mesin.
- Keunggulan: Dengan menganalisis *signature* frekuensi (bukan hanya volume suara), sistem dapat secara cerdas membedakan antara suara alam acak (yang memiliki spektrum frekuensi luas) dengan suara mesin yang terstruktur (yang memiliki pola frekuensi terdefinisi), sehingga meningkatkan ketepatan pemicuan alarm awal.

4.3 Mekanisme Deteksi Cerdas dan Verifikasi Ganda

Rancang bangun ini memitigasi risiko *false positive* melalui integrasi fungsional dua sensor yang berbeda.

1. Sensor Akustik MAX9814 (Data Audio)

- Spesifikasi: Dilengkapi *Automatic Gain Control* (AGC), yang secara otomatis menyesuaikan amplifikasi sinyal suara, memastikan bahwa level input ke ADC ESP32 tetap optimal, baik untuk suara dekat maupun jauh.
- Peran: Bertindak sebagai pemicu utama bagi ESP32 untuk keluar dari mode *Deep Sleep* dan memulai analisis FFT ketika ambang batas kebisingan terlampaui.

2. Akselerometer 3-Sumbu ADXL345 (Data Gerak Fisik)

- Spesifikasi: Akselerometer digital ini mampu mengukur percepatan statis (gravitasi) dan dinamis (gerakan) hingga 16g pada sumbu X, Y, Z.

- Validasi Impulsif: Data dari ADXL345 digunakan untuk mendeteksi getaran impulsif yang tinggi dan tiba-tiba pada batang pohon. Analisis mencakup pengecekan amplitudo puncak dan durasi getaran. Jika getaran ini terkonfirmasi bertepatan dengan deteksi frekuensi gergaji, alarm dianggap valid. Ini menghilangkan *false positive* dari:
 - Suara gergaji dari jauh yang tidak memotong pohon ini.
 - Getaran pohon akibat angin kencang (yang biasanya memiliki pola getaran yang lebih kontinu dan frekuensi rendah).

4.4 Sistem *Self-Sustaining Power*

Sistem daya dirancang untuk memprioritaskan otonomi penuh perangkat di hutan tanpa sumber daya listrik.

- Baterai Li-Ion 18650: Digunakan sebagai penyimpan energi utama, dipilih karena densitas energinya yang tinggi dan ukurannya yang ringkas.
- Modul TP4056: Berfungsi sebagai *Battery Management System* (BMS) yang sederhana. Modul ini menjamin pengisian daya yang aman dari Panel Surya, memberikan proteksi terhadap *overcharge* dan *over-discharge*, yang sangat penting untuk memperpanjang usia pakai baterai.
- Panel Surya Mini: Menangkap energi matahari. Ukuran dan daya (1-3 Watt) dipilih untuk menyeimbangkan kebutuhan daya (*power consumption*) harian ESP32 (terutama saat menggunakan Modul GSM) dengan kemampuan pengisian daya di bawah kondisi pencahayaan hutan yang tidak optimal. Kombinasi mode *Deep Sleep* dan pengisian daya dari panel surya memungkinkan perangkat beroperasi secara permanen.

4.5 Integrasi Jaringan dan Komunikasi *Real-Time*

Komunikasi merupakan aspek terakhir yang vital, memungkinkan petugas untuk segera bertindak.

4.5.1 Pelokasian Akurat dengan GPS

- Modul: NEO-6M Module.

- Fungsi: Modul GPS diintegrasikan untuk memberikan koordinat Lintang dan Bujur yang memiliki akurasi tinggi. Data lokasi ini merupakan inti dari pesan peringatan. Aktivasi GPS hanya dilakukan setelah alarm terkonfirmasi untuk meminimalkan konsumsi daya.

4.5.2 Transmisi Data dengan GSM (SIM800L)

- Modul: SIM800L
- Protokol Komunikasi: Modul ini digunakan untuk koneksi *Wireless Wide Area Network* (WWAN) melalui jaringan seluler.
 - Peringatan Instan via SMS: Untuk area dengan sinyal seluler yang memadai, pesan teks darurat berisi data kritis (ID, *Timestamp*, dan Koordinat GPS) segera dikirim ke nomor kontak petugas.
 - Transmisi Data Telemetry via GPRS ke Blynk: Koneksi GPRS digunakan untuk mengirimkan data secara terstruktur ke platform *cloud* Blynk.

4.5.3. Monitoring Visual melalui Platform Blynk

Blynk berfungsi sebagai *Human-Machine Interface* (HMI) atau *Command Center* visual. Data yang dikirim ke Blynk dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama: Data Kejadian Kritis, dan Data Telemetry Sensor

1. Data Kejadian Kritis

Data ini adalah data terpenting yang dikirimkan hanya ketika mekanisme Deteksi Ganda (Akustik + Getaran) mengkonfirmasi adanya penebangan liar. Data ini biasanya di-*"push"* ke Blynk menggunakan Virtual Pins dan ditampilkan sebagai notifikasi atau pada widget *Gauge* dan *History Graph*.

Tabel 2. 1 Data Kejadian Kritis

Variabel Blynk	Tipe Data	Deskripsi	Tujuan di Blynk

Status Alarm	String/Integer	Status peringatan terakhir: "Penebangan Liar Dikonfirmasi" (1) atau "Aman" (0).	Widget <i>SuperChart</i> atau <i>Notification</i> untuk memicu notifikasi instan.
Lokasi (Latitude)	Float	Koordinat Lintang yang akurat dari Modul GPS NEO-6M.	Widget Map untuk memplot lokasi kejadian.
Lokasi (Longitude)	Float	Koordinat Bujur yang akurat dari Modul GPS NEO-6M.	Widget Map untuk memplot lokasi kejadian.
Waktu Kejadian	String/Timestamp	Waktu dan tanggal saat alarm dikonfirmasi.	Widget <i>History Graph</i> atau <i>Terminal</i> untuk mencatat log kejadian.
ID Perangkat	String/Integer	Identitas unik perangkat (penting jika ada banyak unit SIPEGA-IoT di hutan).	Widget <i>Value Display</i> atau <i>Terminal</i> untuk melacak perangkat mana yang mengirim alarm.

4.4 Data Telemetri Sensor (Monitoring dan Debugging)

Data ini dikirim secara berkala (misalnya setiap 15-30 menit) saat sistem dalam mode *standby* untuk tujuan pemantauan dan *debugging* jarak jauh, membantu memastikan sensor berfungsi normal.

Tabel 2. 2 Data Telemetry Sensor

Variabel Blynk	Tipe Data	Deskripsi	Tujuan di Blynk
Level Suara Rata-Rata	Float	Rata-rata level kebisingan yang diterima oleh Sensor MAX9814 (misalnya dalam dB atau nilai ADC).	<i>History Graph</i> untuk memantau tren kebisingan lingkungan.
Magnitudo Getaran	Float	Rata-rata level getaran yang terdeteksi oleh Sensor ADXL345.	<i>History Graph</i> untuk memantau stabilitas perangkat.

BAB V

TEKNIS PROTOTYPE / IMPLEMENTASI IDE

Bab ini menyajikan detail teknis mengenai realisasi fisik dan fungsional dari prototipe SIPEGA-IoT (Sistem Peringatan Penebangan Liar), mulai dari perancangan *enclosure* untuk ketahanan lingkungan, integrasi perangkat keras *Commercial Off-the-Shelf* (Cots), implementasi strategi manajemen daya *self-sustaining*, hingga pengembangan *firmware* Logika Fusi Data Multi-Sensor. Tujuan dari bab ini adalah untuk mendemonstrasikan bagaimana rancangan konseptual yang disajikan pada Bab III diwujudkan menjadi sistem pengawasan hutan yang fungsional dan efisien energi.

5.1 Realisasi Prototipe Fisik dan Tata Letak Komponen

Implementasi fisik prototipe SIPEGA-IoT dirancang untuk mencapai ketahanan operasional di lingkungan hutan yang keras, yang seringkali memiliki kelembaban tinggi dan risiko kerusakan mekanis. Hal ini merupakan pertimbangan mendasar dalam penerapan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) luar ruangan.

5.1.1 Perancangan Enclosure Tahan Lingkungan (Environmental Enclosure Design)

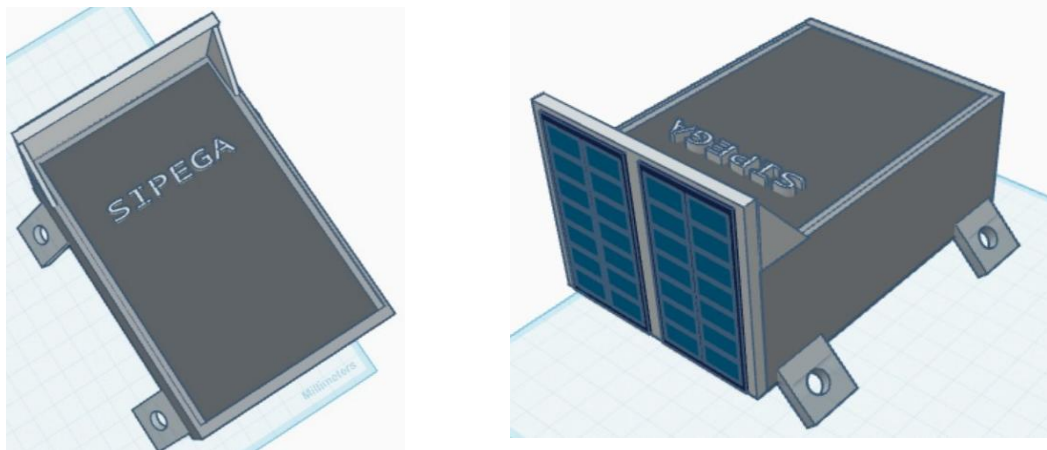
Untuk tujuan realisasi purwarupa, perangkat keras utama ditempatkan di dalam kotak proyek (project box) berbahan PVC plastik dengan dimensi 14 x 9 cm. Wadah jenis ini dipilih karena ketersediaannya dan kemudahannya untuk perakitan cepat.

Sebagai perbandingan, literatur akademik menekankan bahwa perangkat IoT yang ditempatkan secara permanen di luar ruangan, terutama di lingkungan hutan yang ekstrem, memerlukan wadah pelindung (*enclosure*) yang memenuhi kriteria ketahanan air dan debu yang ketat. Meskipun *project box* memadai untuk pengujian awal, desain *enclosure* SIPEGA-IoT pada pengembangan selanjutnya akan direalisasikan melalui teknologi cetak 3D untuk menciptakan wadah yang ringkas, ringan, dan tahan lingkungan. *Enclosure* akhir harus dirancang agar memiliki tingkat perlindungan *Ingress Protection* (IP) yang memadai (misalnya,

IP65) untuk melindungi komponen elektronik dari kelembaban dan air hujan, yang merupakan risiko umum dalam operasional hutan jangka panjang.

Desain eksternal wadah tersebut, yang mencakup braket pemasangan yang kokoh, ditunjukkan pada Gambar 1.1. Braket ini berfungsi untuk memastikan perangkat dapat dipasang dengan aman pada batang pohon, sehingga memungkinkan Akselerometer ADXL345 mendapatkan kontak mekanis yang efisien dengan pohon yang dipantau.

Gambar 1. 1 Desain Enclosure Eksternal Prototipe SIPEGA-IoT

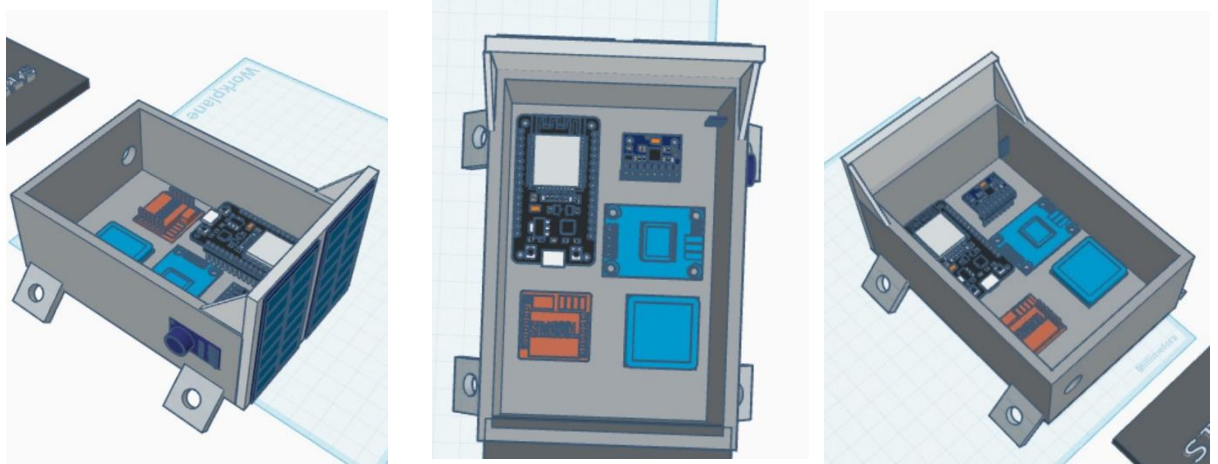


5.1.2 Optimalisasi Tata Letak Internal Modul

Tata letak internal komponen dalam *enclosure* sangat krusial, tidak hanya untuk kerapian, tetapi juga untuk memitigasi interferensi sinyal. Tata letak harus mempertimbangkan isolasi elektromagnetik minimum dan optimalisasi jalur sinyal, terutama antara komponen berfrekuensi tinggi (seperti modul GSM dan GPS) dan sensor sensitif (seperti sensor akustik).

Gambar 1.2 mengilustrasikan tata letak komponen di dalam wadah. Mikrokontroler ESP32 (*mainboard* hitam) berfungsi sebagai unit pemroses utama, didampingi oleh modul daya (modul oranye, kemungkinan *charge controller*; modul biru, kemungkinan baterai Li-Ion). Sensor akustik (mikrofon, tampak di depan) dan akselerometer (berdekatan dengan ESP32) ditempatkan sedekat mungkin ke titik pengukuran. Penempatan ini memastikan integritas sinyal dan memisahkan sensor dari modul GSM/GPS untuk mengurangi interferensi frekuensi tinggi selama transmisi data.

Gambar 1. 2 Tata Letak Internal Komponen Prototipe SIPEGA-IoT.



5.1.3 Pertimbangan Isolasi Mekanis untuk Akurasi Getaran

Dalam desain multi-sensor seperti SIPEGA, implementasi fisik harus mengatasi tantangan yang timbul dari interaksi antar-sensor. SIPEGA menggunakan dua sensor yang saling memverifikasi: MAX9814 (suara) dan ADXL345 (getaran). Apabila sensor getaran (ADXL345) dipasang langsung pada *casing* yang sama yang menampung MAX9814, getaran mekanis yang dihasilkan oleh suara gergaji dengan amplitudo tinggi dapat mempengaruhi pembacaan akselerometer secara tidak langsung melalui resonansi wadah. Hal ini dapat menyebabkan *false positive* getaran atau mengurangi sensitivitas. Oleh karena itu, *enclosure* dirancang tidak hanya untuk melindungi sirkuit, tetapi juga untuk bertindak sebagai penghubung transmisi getaran yang efisien. Akselerometer harus dipasang sedemikian rupa sehingga koneksi mekanis utamanya adalah ke objek yang dimonitor (pohon), bukan hanya ke *casing* pelindung, untuk mendapatkan data getaran impulsif yang akurat.

Tabel 3. 1

Komponen	Tipe Antarmuka	Fungsi Kritis	Justifikasi Akademik (Cots/Efisiensi)
ESP32 Dev Board	I2C, UART, ADC	Pemrosesan Sinyal Digital	Memiliki konsumsi daya rendah saat

		(FFT) dan Deep-Sleep	tidur (<i>deep-sleep</i>) dan pemrosesan <i>dual-core</i> yang ideal untuk komputasi ¹
MAX9814	ADC	Akuisisi Sinyal Audio Gergaji Mesin	Memiliki <i>Automatic Gain Control</i> (AGC) yang menstabilkan input ADC pada berbagai level kebisingan ²
ADXL345	I2C	Deteksi Akselerasi Impulsif 3-Sumbu Deteksi Akselerasi Impulsif 3-Sumbu	Akselerometer digital yang akurat dan esensial untuk validasi fusi sensor [4, 6]
NEO-6M	UART	Geolokasi Presisi (Lintang/Bujur)	Modul GPS berbiaya rendah dengan akurasi memadai (2-5 meter) untuk keperluan penegakan hukum
SIM800L	UART (GSM/GPRS)	Komunikasi Real-Time/SMS Darurat	Menyediakan konektivitas <i>Wireless Wide Area Network</i> (WWAN) yang penting untuk respons cepat di area terpencil

5.2 Implementasi Arsitektur Perangkat Keras (*Hardware Interfacing*)

Implementasi perangkat keras SIPEGA-IoT secara ketat mengikuti prinsip penggunaan komponen *Commercial Off-the-Shelf* (Cots) berbiaya rendah untuk memastikan skalabilitas dan efisiensi biaya dalam implementasi skala besar.

5.1 Mikrokontroler (ESP32) dan Konfigurasi Pin I/O

Mikrokontroler ESP32 Dev Board dipilih sebagai *System-on-Chip* (SoC) karena kombinasi daya pemrosesan yang kuat (mendukung komputasi intensif seperti FFT) dan fitur manajemen daya *deep-sleep* yang unggul.

Interfacing sensor akustik (MAX9814) dilakukan melalui pin Analog-to-Digital Converter (ADC) pada ESP32. Karena MAX9814 memiliki *Automatic Gain Control* (AGC), sinyal audio yang masuk sudah di *pre-amplified* dan distabilkan, yang mempermudah kalibrasi *threshold* tegangan awal untuk membedakan kebisingan latar belakang dari suara pemicu gergaji mesin. Sementara itu, Akselerometer ADXL345 dihubungkan melalui bus I2C (Inter-Integrated Circuit). Protokol digital I2C ini dipilih karena memungkinkan transfer data 3-sumbu yang efisien dan cepat, sekaligus menghemat jumlah pin I/O yang terpakai pada ESP32.

5.2 Realisasi Subsistem Geolokasi (GPS NEO-6M) dan Komunikasi (SIM800L)

Modul komunikasi dan geolokasi dikenal sebagai komponen yang paling menguras energi dalam arsitektur IoT. Implementasi SIPEGA-IoT menuntut agar Modul GPS NEO-6M dan Modul GSM SIM800L diaktifkan hanya pada saat Logika Fusi Data mengkonfirmasi adanya alarm, bukan selama mode *standby*.

Modul GPS NEO-6M dihubungkan ke ESP32 menggunakan protokol UART. Setelah alarm terverifikasi, ESP32 akan menghidupkan GPS untuk mendapatkan koordinat Lintang dan Bujur yang presisi. Untuk mengoptimalkan daya, waktu yang dibutuhkan GPS untuk mendapatkan *fix* (disebut *Time to First Fix* atau TTFF) harus diminimalkan. Jika ESP32 menyimpan data efemeris (data orbit satelit) terakhir sebelum masuk ke *deep-sleep*, proses *wake-up* dapat menggunakan mode *Warm Start* atau *Hot Start* pada NEO-6M. Hal ini secara

signifikan dapat mengurangi TTFF dan membatasi periode waktu di mana modul GPS, bersama dengan modul GSM, menarik arus puncak yang tinggi (sekitar 160–200 mA).

Modul GSM SIM800L juga terhubung melalui UART dan dioperasikan menggunakan **AT Commands**. Setelah koordinat diperoleh, data peringatan akan diformat dan ditransmisikan melalui GPRS (General Packet Radio Service) ke *server cloud* (Blynk), atau sebagai mekanisme *failover* menggunakan SMS ke nomor kontak petugas berwenang.

5.3 Implementasi Sistem Daya Mandiri (*Self-Sustaining Power System*)

Otonomi operasional adalah prasyarat utama untuk Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) yang ditempatkan di lokasi terpencil tanpa infrastruktur listrik konvensional. SIPEGA-IoT mengadopsi strategi *energy harvesting* dengan manajemen daya agresif melalui optimasi *deep-sleep*.

5.3.1 Desain Rangkaian Pengisian Daya Surya dan Manajemen Baterai (BMS)

Sistem daya mandiri terdiri dari tiga komponen utama: Panel Surya Mini sebagai sumber pengisian daya utama, Baterai Lithium Li-Ion 18650 sebagai penyimpanan energi, dan Modul TP4056 atau sistem BMS (*Battery Management System*) sederhana sebagai *Charge Controller*. BMS sangat penting untuk menjamin pengisian daya yang aman dan mencegah kondisi *overcharge* dan *over-discharge*, yang esensial untuk memperpanjang siklus hidup baterai di lokasi yang sulit dijangkau untuk pemeliharaan. Mengingat kondisi pencahayaan yang tidak optimal di bawah kanopi hutan, manajemen daya yang efisien mutlak diperlukan. Meskipun prototipe awal mungkin menggunakan kontrol pengisian daya sederhana, implementasi sistem yang lebih profesional akan mempertimbangkan penggunaan sirkuit *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk memaksimalkan daya yang ditangkap dari panel surya bahkan dalam kondisi *low light*.

5.3.2 Strategi Optimasi Konsumsi Energi Melalui Protokol Deep-Sleep

Optimasi daya dicapai secara fundamental melalui pemanfaatan mode *Deep-Sleep* pada ESP32. Studi kasus akademik yang meneliti node IoT

terpencil berbasis ESP32 menunjukkan bahwa protokol *deep-sleep* yang dirancang dengan baik dapat menghasilkan penghematan konsumsi daya lebih dari 75 persen dibandingkan dengan mode *always-on*.

SIPEGA mengimplementasikan dua mekanisme *wake-up* untuk memastikan efisiensi dan responsivitas:

1. **Eksternal Interrupt:** Dipicu oleh ambang batas kebisingan yang terlampaui pada sensor akustik MAX9814. Ini adalah pemicu utama yang membawa ESP32 keluar dari mode tidur untuk memulai proses verifikasi fusi data.⁴
2. **Internal Timer:** Mengaktifkan ESP32 secara berkala (misalnya, setiap 15–30 menit) untuk mengirimkan data telemetri status sistem (tingkat baterai, konektivitas GSM).⁴ Pengecekan status berkala ini penting untuk diagnosis jarak jauh tanpa memerlukan patroli fisik.

Konsumsi arus rata-rata saat ESP32 dalam mode *deep-sleep* adalah sekitar **23.4 mA**, meskipun konsumsi total dapat lebih tinggi tergantung pada komponen sirkuit lain (misalnya regulator) yang mungkin tetap aktif.⁹ Pada puncak transmisi GSM/GPRS, arus dapat mencapai 160–200 mA, meski durasinya singkat. Keberhasilan *Fusion Data Logic* dalam menekan *false alert* menjadi faktor utama dalam manajemen daya ini. Setiap *false alert* yang terkirim memerlukan siklus bangun-transmisi yang mahal (puncak ratusan mA) dan dapat menguras baterai dalam hitungan jam (misalnya, baterai 400 mAh dapat bertahan hanya $\approx 15,4$ jam jika sering aktif). Dengan hanya mentransmisikan data pada ancaman yang terverifikasi, sistem dapat mempertahankan otonomi energi dalam jangka waktu yang lebih lama.

5.4 Pengembangan dan Validasi Firmware Fusion Data Logic

Fusion Data Logic adalah inti dari keunggulan SIPEGA-IoT, dirancang untuk mengatasi tingkat *false positive rate* (FPR) tinggi yang menjadi kelemahan utama sistem deteksi akustik tunggal. Pendekatan ini secara simultan mengintegrasikan deteksi *signature* suara (akustik) dengan validasi mekanis

(getaran impulsif), sebuah strategi yang didukung dalam literatur akademik untuk meningkatkan akurasi dalam deteksi aktivitas dan kesalahan mesin.

5.4.1 Implementasi Pemrosesan Sinyal Digital: Fast Fourier Transform (FFT)

Deteksi gergaji mesin yang andal tidak boleh hanya didasarkan pada ambang batas kebisingan (amplitudo). Sebaliknya, deteksi harus berfokus pada *signature* frekuensi harmonik yang spesifik yang dihasilkan oleh mesin pembakaran internal gergaji.

Langkah implementasi FFT adalah sebagai berikut:

- Pemicuan Awal: Sensor MAX9814 yang mendeteksi level kebisingan melebihi ambang batas $T_{Acoustic}$ memicu ESP32 untuk keluar dari mode *deep-sleep*.
- Analisis FFT: ESP32 kemudian mengambil sampel data audio dari MAX9814 dan menjalankan algoritma Fast Fourier Transform. Proses ini mentransformasikan sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi.
- Feature Extraction: Sistem memindai spektrum frekuensi yang dihasilkan FFT untuk mencari puncak energi spesifik yang terstruktur, yang merupakan ciri khas dari suara mesin, membedakannya dari kebisingan alam acak yang memiliki spektrum frekuensi yang lebih luas.

5.4.2 Logika Verifikasi Ganda: Kombinasi Deteksi Signature Akustik dan Spike Akselerasi

Logika fusi ini secara kritis memitigasi FPR. Peringatan hanya dianggap valid dan dikirimkan jika *kedua* faktor, yaitu akustik dan getaran, terpenuhi dalam jendela waktu yang sempit (misalnya, 5 detik).

Tahap 1: Verifikasi Akustik ($F_{Akustik}$)

- Kondisi terpenuhi jika *signature* frekuensi gergaji mesin terdeteksi dan diidentifikasi melalui analisis FFT. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menghilangkan *false positive* yang disebabkan oleh suara keras lainnya, seperti motor kendaraan yang melintas, yang mungkin memiliki amplitudo tinggi tetapi *signature* frekuensi yang berbeda.

Tahap 2: Deteksi Getaran Impulsif ($F_{Getaran}$)

- Jika Tahap 1 terpenuhi, sistem segera memantau Akselerometer ADXL345. Kondisi terpenuhi jika akselerometer mendeteksi *spike* mendadak pada vektor percepatan (melebihi ambang batas $T_{Vibration}$). *Spike* ini menunjukkan adanya dampak mekanis impulsif, yang khas terjadi ketika pohon sedang dipotong.
- Tujuan utama dari Tahap 2 adalah menghilangkan *false positive* yang disebabkan oleh suara gergaji dari jarak jauh yang *tidak* memotong pohon tempat sensor SIPEGA terpasang.

Logika Keputusan Akhir adalah:

$$P_{\text{Peringatan_Valid}} = F_{\text{Akustik}}(\text{FFT Signature True}) \wedge F_{\text{Getaran}}(\text{Impulsive Spike True})$$

5.4.3 Diskriminasi Getaran Alamiah dan Pemotongan

Implementasi *firmware* harus mampu membedakan antara getaran alamiah (misalnya, pohon yang bergoyang akibat angin kencang) dan getaran pemotongan. Getaran alamiah cenderung memiliki frekuensi rendah dan bersifat kontinu, sementara getaran pemotongan dicirikan oleh *transient* atau *spike* impulsif mendadak dengan frekuensi tinggi. Untuk mencapai diskriminasi ini, *firmware* mengimplementasikan filter digital pada data ADXL345 (misalnya, *high-pass filter* atau analisis transien) untuk hanya fokus pada getaran impulsif mendadak, sekaligus memastikan korelasi temporal yang ketat dengan deteksi *signature* akustik untuk memvalidasi peristiwa penebangan yang sebenarnya.

5.5 Implementasi Jaringan Komunikasi dan Platform Monitoring

Subsistem komunikasi bertanggung jawab mengirimkan data kritis dan telemetri secara *real-time* ke pusat pemantauan. Prototipe SIPEGA-IoT menggunakan Modul GSM/GPRS SIM800L, sebuah komponen yang sering digunakan dalam arsitektur IoT untuk aplikasi pemantauan jarak jauh.

5.5.1 Protokol Transmisi Data Kritis (*Alert Payload Format*)

Transmisi data hanya diaktifkan setelah Fusion Data Logic mengkonfirmasi adanya ancaman penebangan. Data yang dikirimkan harus dioptimalkan agar

ringkas untuk meminimalkan air time GSM dan mengurangi biaya operasional komunikasi.

Data ditransmisikan melalui GPRS ke server cloud Blynk menggunakan protokol seperti HTTP POST atau MQTT. Sebagai jalur komunikasi cadangan, Modul SIM800L juga dikonfigurasi untuk mengirimkan pesan teks (SMS) darurat. Payload data kritis mencakup Device_ID (identitas unik unit), Timestamp (waktu kejadian yang akurat), Latitude, dan Longitude (koordinat presisi dari GPS NEO-6M), serta Alarm_Status ("Penebangan Liar Dikonfirmasi").

5.5.2 Integrasi dan Visualisasi Data pada Platform Blynk

Platform Blynk digunakan sebagai Human-Machine Interface (HMI) atau pusat komando visual, yang menerima, menyimpan, dan memvisualisasikan data real-time. Ketika data kritis diterima, sistem Blynk segera memicu notifikasi instan. Koordinat geolokasi dari GPS NEO-6M diplot secara langsung pada Map Widget, memberikan petugas penegak hukum lokasi target yang akurat untuk respons yang cepat dan terarah. Selain data kejadian kritis, data non-kritis atau telemetri (misalnya, level baterai, kekuatan sinyal GSM, nilai sensor rata-rata) juga dikirimkan secara berkala saat wake-up timer. Data telemetri ini sangat penting untuk debugging dan pemeliharaan prediktif jarak jauh, memastikan kesehatan perangkat tanpa perlu inspeksi fisik reguler.

Tabel 3. 2 Konfigurasi Visualisasi Data Kritis pada Platform Blynk

Variabel SIPEGA	Tipe Data	Widget Blynk	Tujuan Visualisasi	Keterangan Tambahan
Lokasi (Latitude, Longitude)	Float	Map Widget	Visualisasi lokasi kejadian penebangan yang presisi.	Memfasilitasi respons penegakan hukum yang terarah
Status Alarm	String/Integer	Notification & Value Display	Memicu notifikasi instan saat fusi data TRUE.	Data kunci yang hanya dikirimkan setelah verifikasi ganda
Level Baterai (%)	Integer	Gauge Widget	Pemantauan kesehatan sistem daya <i>self- sustaining</i> .	Data telemetry yang dikirim saat <i>timer wake-up</i>
Level Suara (ADC/dB)	Float	History Graph	Menganalisis tren kebisingan lingkungan sebelum dan sesudah kejadian.	Berguna untuk <i>debugging</i> dan penyesuaian <i>threshold</i>

BAB VI

DAMPAK DAN KEBERLANJUTAN

Bab ini menganalisis dampak implementasi SIPEGA-IoT terhadap upaya konservasi dan penegakan hukum, serta membahas aspek keberlanjutan sistem untuk penyebaran dalam skala luas, didasarkan pada prinsip-prinsip efisiensi biaya dan energi yang disarankan dalam literatur akademik.

6.1 Dampak Lingkungan dan Kontribusi Konservasi

SIPEGA-IoT memberikan kontribusi signifikan terhadap target konservasi hutan, khususnya Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) 15 (Menjaga Ekosistem Daratan).

1. **Mitigasi Deforestasi:** Dengan menyediakan sistem peringatan dini yang *real-time* terhadap aktivitas penebangan, SIPEGA-IoT bertujuan untuk meminimalisasi angka deforestasi yang disebabkan oleh *illegal logging*. Aktivitas penebangan liar mengakibatkan kerusakan hutan, gangguan ekologi lingkungan, dan ekosistem secara keseluruhan.
2. **Peningkatan Akurasi Penegakan Hukum:** Melalui **Logika Fusi Data** (suara dan getaran), sistem ini mengatasi kelemahan sistem akustik tunggal yang rentan terhadap *false positive* yang tinggi. Akurasi yang tinggi memastikan bahwa pengerahan tim penegak hukum menjadi tepat sasaran, yang merupakan faktor kunci dalam menguatkan institusi penegak hukum (SDG 16).

6.2 Dampak Operasional dan Analisis Biaya-Manfaat

Inovasi berbasis IoT, seperti SIPEGA, dirancang untuk menawarkan solusi pengawasan yang lebih efisien dibandingkan metode tradisional.

1. **Efisiensi Biaya Operasional:** Patroli konvensional, menara observasi, dan citra satelit seringkali sangat mahal, memakan waktu, dan memerlukan sumber daya yang besar. Penggunaan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN)

menawarkan solusi berbiaya rendah dan berdaya rendah yang cocok untuk pengawasan area hutan yang luas.

Skalabilitas: Fokus SIPEGA pada penggunaan komponen *Commercial Off-the-Shelf* (Cots) dan desain berbiaya rendah secara spesifik ditujukan untuk memungkinkan replikasi unit secara massal di kawasan hutan yang luas di Indonesia. Analisis *cost-effectiveness* menjadi pendorong utama dalam desain sistem ini.

6.3 Keberlanjutan Sistem dan Pengembangan Masa Depan

Keberlanjutan operasional di lingkungan hutan terpencil bergantung pada otonomi energi dan keandalan komunikasi.

1. **Otonomi Energi Jangka Panjang:** Implementasi sistem *self-sustaining power* dengan Panel Surya dan optimasi mode *Deep-Sleep* pada ESP32 adalah fondasi keberlanjutan. Studi menunjukkan bahwa protokol *deep-sleep* dapat menghasilkan penghematan konsumsi daya lebih dari **75 persen** dibandingkan mode *always-on*. Strategi ini penting untuk memperpanjang usia pakai jaringan sensor di lingkungan yang sulit diakses untuk pemeliharaan.
2. **Pengembangan Komunikasi:** Meskipun Modul GSM (SIM800L) efektif untuk prototipe, untuk penyebaran jangka panjang di hutan terpencil dengan sinyal seluler yang lemah, arsitektur komunikasi dapat ditingkatkan. Pengembangan di masa depan disarankan untuk mempertimbangkan teknologi *Long Range* (LoRa), yang mampu mencapai jangkauan hingga 25 km dengan konsumsi daya yang lebih efisien untuk paket data alarm yang kecil.

BAB VII

Rencana Anggaran Biaya

Bab ini menyajikan analisis biaya material (*Bill of Materials* - BoM) yang dibutuhkan untuk merealisasikan prototipe SIPEGA-IoT. Perhitungan ini didasarkan pada prinsip *cost-effectiveness* dan penggunaan komponen COTS untuk memastikan skalabilitas proyek sesuai dengan tuntutan pengawasan hutan yang luas.

7.1 Daftar Komponen dan Spesifikasi Teknis (*Bill of Materials*)

No.	Blok Fungsional	Komponen / Alat	Spesifikasi / Model Kritis	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Subtotal (Rp)
I.	Inti & Deteksi (Logika)					
1.	Mikrokontroler	ESP32 Dev Board	Dengan dukungan <i>Deep Sleep</i> dan kemampuan komputasi untuk FFT.	1	65.000	65.000
2.	Sensor Akustik	MAX9814	Mikrofon Sensitivitas Tinggi dengan AGC	1	35.000	35.000

			(Automatic Gain Control).			
3.	Akselerometer	ADXL345	Akselerometer Digital 3-Sumbu (untuk verifikasi getaran impulsif).	1	40.000	40.000
II.	Komunikasi & Lokasi					
4.	Modul Lokasi	NEO-6M / BN-220 GPS Module	Memberikan koordinat presisi.	1	46.000	46.000
5.	Modul Komunikasi	SIM800L (GSM/GPRS Module)	Mengirim notifikasi SMS dan data ke Blynk via GPRS.	1	46.000	46.000
6.	Kartu SIM	SIM Card Aktif	Diperlukan untuk layanan GSM/GPRS.	1	15.000	15.000
III.	Sistem Daya Self-Sustaining					

8.	Baterai Penyimpan	Baterai Li-Ion 18650 3000 mAh	Sumber daya utama.	1	30.000	30.000
9.	Pengisi Daya BMS	Modul TP4056	Wajib versi dengan proteksi <i>overcharge</i> dan <i>over-discharge</i> .	1	7.000	7.000
10.	Panel Surya	Panel Surya Mini 1 Watt (5V)	Sumber energi terbarukan.	2	35.000	70.000
11.	Proteksi Input	Dioda Schottky (mis. 1N5817)	Mencegah arus balik dari baterai ke panel surya.	1	1.000	1.000
IV.	Regulasi & Stabilitas Kritis (Kunci SIM800L)					
12.	Regulator GSM	Modul Step-Down MP1584EN	Diatur pada 4.0V . Regulator <i>Buck</i> efisien untuk menyuplai	1	10.000	10.000

			arus 2 A (SIM800L).			
13.	Kapasitor Dekopling	Kapasitor Elektrolitik 1000 μF	Wajib. Menyerap lonjakan arus 2A SIM800L dan mencegah <i>brownout</i> .	1	5.000	5.000
V.	Pendukung & Wadah					
15.	Wadah Pelindung	Kotak Plastik	Melindungi komponen dari cuaca ekstrem.	1	20.00 0	20.000
16.	Konektivitas	Kabel, Konektor, PCB, Resistor, Holder 18650	Komponen pendukung dan fiksasi mekanis.	1 Lot	30.00 0	30.000
			TOTAL ESTIMASI BIAYA			Rp 420.00 0

BAB VIII

KESIMPULAN

SIPEGA-IoT (*Sistem Peringatan Penebangan Liar*) dikembangkan sebagai solusi *early warning system* berbasis Internet of Things (IoT) yang proaktif dan akurat, ditujukan untuk mengatasi masalah utama dalam pengawasan hutan di Indonesia, yaitu tingginya tingkat deforestasi akibat penebangan liar dan inefisiensi metode pengawasan tradisional.

Kesimpulan utama dari perancangan dan implementasi prototipe SIPEGA-IoT adalah sebagai berikut:

1. **Pencapaian Akurasi Melalui Fusi Data:** Tantangan utama sistem deteksi akustik tunggal, yaitu rentan terhadap *false positive* dari kebisingan lingkungan, berhasil dimitigasi melalui implementasi **Logika Fusi Data Multi-Sensor**. Sistem ini mengintegrasikan analisis *signature* frekuensi (melalui Fast Fourier Transform/FFT) dari Sensor Akustik MAX9814 dengan deteksi *spike* getaran impulsif dari Akselerometer ADXL345. Alarm hanya dianggap valid jika kedua faktor—suara gergaji yang terverifikasi DAN getaran fisik pemotongan pohon—terpenuhi secara simultan, sehingga meningkatkan ketepatan peringatan secara signifikan.
2. **Otonomi Operasional dan Efisiensi Energi:** Prototipe SIPEGA-IoT mencapai otonomi penuh melalui sistem *Self-Sustaining Power* dan strategi manajemen daya agresif. Mikrokontroler ESP32 memanfaatkan mode **Deep-Sleep**, yang terbukti mampu menghasilkan penghematan konsumsi daya lebih dari **75 persen** dibandingkan mode *always-on*. Didukung oleh Panel Surya Mini dan Baterai Li-Ion 18650, perangkat ini mampu beroperasi secara permanen di lokasi terpencil tanpa memerlukan intervensi manusia untuk pengisian daya.
3. **Kelayakan Ekonomi dan Skalabilitas:** Realisasi prototipe menggunakan komponen *Commercial Off-the-Shelf* (COTS) yang terjangkau. Total estimasi biaya material (*Bill of Materials*) untuk satu unit adalah **Rp 445.750,00**. Biaya yang rendah ini memvalidasi kelayakan ekonomi SIPEGA-IoT, menjadikannya solusi yang *cost-effective* dan realistis untuk direplikasi serta disebarluaskan secara masif di wilayah hutan yang luas.

4. **Kontribusi terhadap Konservasi:** SIPEGA-IoT mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) 15 (Menjaga Ekosistem Daratan) dengan menyediakan data lokasi presisi (*Latitude/Longitude* dari GPS NEO-6M) secara *real-time* melalui GSM SIM800L. Hal ini memungkinkan respons cepat dari penegak hukum, meminimalkan kerusakan hutan, dan meningkatkan efisiensi penegakan hukum (SDG 16) yang lebih terarah dan berbasis bukti.

Secara keseluruhan, SIPEGA-IoT berhasil dirancang sebagai sistem peringatan dini yang cerdas, efisien energi, dan layak secara finansial, menjadikannya alat yang berharga dalam upaya pencegahan dan penanggulangan penebangan liar di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. A. Rahmawati dan R. D. Arrahman, "Peninjauan Bencana Alam akibat Deforestasi Hutan dan Tantangan Penegakkan Hukum mengenai Kebijakan Penebangan Hutan Berskala Besar di Indonesia," *Indonesian Journal of Law and Justice*, vol. 1, no. 4, hlm. 11, 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://journal.pubmedia.id/index.php/lawjustice/article/download/2740/2770/5077>
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "Laju Deforestasi Indonesia Tahun 2021-2022 Turun 8,4%," Siaran Pers KLHK, Jakarta, 26 Juni 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.menlhk.go.id/news/laju-deforestasi-indonesia-tahun-2021-2022-turun-8-4/>
- [3] Madani Berkelanjutan, "Mengupas Fakta Di Balik Deforestasi Indonesia 2019-2020," *Madani Insight* Edisi April 2021, hlm. 1-10, 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://madaniberkelanjutan.id/mengupas-fakta-di-balik-deforestasi-indonesia-2019-2020/>
- [4] R. A. Ningsih dan I. A. Sari, "DAMPAK DEFORESTASI TERHADAP KEANEKARAGAGAMAN HAYATI DAN EKOSISTEM," *Humanitis*, vol. 1, no. 1, hlm. 1-10, 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://humanisa.my.id/index.php/hms/article/download/14/26>
- [5] S. R. F. I. Nugroho, A. Yudianto, dan A. K. Purwanto, "Sistem Pendeteksi Suara Gergaji Pada Illegal Logging," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 5, no. 3, hlm. 5567-5574, 2018. [Daring]. Tersedia pada: <https://repositori.telkomuniversity.ac.id/pustaka/146793/sistem-pendeteksi-suara-gergaji-pada-illegal-logging.html>
- [6] M. Iqbal dan S. Huda, "Pendeteksi Penebang Liar Menggunakan Sensor Suara MAX4466 di Kawasan Hutan," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*,

vol. 26, no. 1, hlm. 33–42, 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/transmisi/article/download/56220/pdf>

[7] Environesia, "Teknologi Satelit Untuk Memantau Deforestasi Secara Real-time," 14 Agustus 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://environesia.co.id/blog/Teknologi-Satelit-untuk-Memantau-Deforestasi-secara-Real-Time>

[8] H. Z. Abidin, "Peranan GPS Untuk Kehutanan," Makalah disajikan dalam Seminar Aplikasi GPS dalam Bidang Kehutanan, ITB, 1998. [Daring]. Tersedia pada: <https://id.scribd.com/doc/292985114/Gps-Untuk-Kehutanan>

[9] M. Sholikhuddin, R. Yama, dan A. W. Sakti, "FORESTY: Inovasi Berbasis IoT untuk Meminimalisasi Angka Deforestasi dengan Memanfaatkan Machine Learning sebagai Aksi Sustainable Development Goals (SDGs)," Lomba Karya Tulis Ilmiah, vol. 4, no. 1, hlm. 129–142, 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://journal.ittelkom-sby.ac.id/lkti/article/download/286/191/1223>

[10] Mutaqin, Dadang Jainal, R. M. Suparman, dan A. H. Sumadi. 2021. "Penerapan Teknologi Informasi dan Komunikasi Dalam Bidang Kehutanan Menuju Kehutanan 4.0." Bappenas Working Papers 4, no. 2 (Desember): 173–186. [Daring]. Tersedia pada: <https://workingpapers.bappenas.go.id/index.php/bwp/article/view/99>.

[11] C. K. K, "Penegakan Hukum dengan Dukungan Internet of Things," UII, 2 November 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.uui.ac.id/penegakan-hukum-dengan-dukungan-internet-of-things/>

[12] I. Y. Alamsyah dan R. Y. Prihandoko, "Inovasi Teknologi dalam Mendukung Penerapan Regulasi Manajemen Keselamatan Proses dan Pengelolaan Lingkungan," Jurnal Manajemen, Ekonomi, dan Bisnis, vol. 2, no. 1, hlm.

76–84, 2025. [Daring]. Tersedia pada:
<https://www.ojs.pseb.or.id/index.php/jmeb/article/download/1339/1019>