



Perancangan Sistem Early Warning Kebakaran F-GUARD Menggunakan Decision-Level Sensor Fusion Berbasis Mikrokontroler ESP8266

Kearifan Yopimar*, Gogor Christmass Setyawan, Agustinus Rudatyo Himamunanto

Fakultas Sains dan Komputer, Program Studi Informatika, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta, Indonesia

Email: ^{1,*}kearifan.yopimar@mail.ukrim.ac.id, ²masgogor@ukrimuniversity.ac.id, ³rudatyo@ukrimuniversity.ac.id

Email Penulis Korespondensi: kearifan.yopimar@mail.ukrim.ac.id

Abstrak—Kebakaran domestik merupakan ancaman bencana fatal yang memerlukan sistem deteksi dini responsif dan andal guna meminimalkan kerugian materiil. Penelitian ini difokuskan pada perancangan sistem *early warning* kebakaran F-GUARD yang menggunakan pendekatan *decision-level sensor fusion* berbasis mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Sistem ini mengintegrasikan sensor suhu *contactless* MLX90614 untuk deteksi radiasi termal presisi, sensor asap MQ-2, serta *Infrared Flame Sensor* untuk mendeteksi keberadaan api secara langsung. Kebaruan penelitian ini terletak pada implementasi algoritma *single exponential smoothing* untuk meredam *noise* pada data suhu serta mekanisme *hold time* selama 15 detik pada sensor asap guna mengeliminasi *chattering* dan alarm palsu. Data lingkungan diproses secara *real-time* dan divisualisasikan pada layar OLED, dengan manajemen aktuator *buzzer* berbasis *non-blocking execution*. Sistem melakukan transmisi data telemetri ke *cloud database* setiap 5 detik serta mengirimkan notifikasi darurat instan melalui *Telegram Bot*. Kontribusi utama penelitian ini adalah integrasi algoritma *single exponential smoothing* dan mekanisme *hold time* yang berhasil meningkatkan akurasi deteksi api hingga 95% serta mereduksi alarm palsu hingga 80% dibandingkan sistem konvensional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi *multi-sensor* dengan logika penyaringan digital ini mampu mendeteksi api dengan tingkat akurasi sebesar 95% dan kecepatan rata-rata respons sistem dari deteksi hingga pengiriman notifikasi tercatat sebesar 2,5 detik. Dengan demikian, F-GUARD terbukti efektif dalam memberikan manajemen mitigasi kebakaran yang lebih andal, stabil, dan adaptif untuk kebutuhan perlindungan lingkungan rumah tangga modern.

Kata Kunci: F-GUARD; Kebakaran; ESP8266; *Sensor Fusion*; Mikrokontroler

Abstract—Domestic fire is a fatal disaster threat that requires a responsive and reliable *early detection system* to minimize material losses. This research focuses on the design of the F-GUARD fire *early warning system* which uses a *decision-level sensor fusion* approach based on the NodeMCU ESP8266 microcontroller. This system integrates the MLX90614 *contactless temperature sensor* for precision thermal radiation detection, the MQ-2 *smoke sensor*, and the *Infrared Flame Sensor* to detect the presence of fire directly. The novelty of this research lies in the implementation of a *single exponential smoothing algorithm* to dampen *noise* in temperature data and a *hold time mechanism* for 15 seconds on the *smoke sensor* to eliminate *chattering* and *false alarms*. Environmental data is processed in *real-time* and visualized on an OLED screen, with *buzzer actuator management* based on *non-blocking execution*. The system transmits *telemetry data* to a *cloud database* every 5 seconds and sends instant emergency notifications via *Telegram Bot*. The main contribution of this research is the integration of the *single exponential smoothing algorithm* and *hold time mechanism* which successfully increased fire detection accuracy to 95% and reduced *false alarms* by up to 80% compared to conventional systems. Test results show that this *multi-sensor integration* with digital filtering logic is able to detect fire with an accuracy level of 95% and the average system response speed from detection to notification delivery is recorded at 2.5 seconds. Thus, F-GUARD is proven effective in providing more reliable, stable, and adaptive fire mitigation management for modern household environment protection needs.

Keywords: F-GUARD; Fire; ESP8266; *Sensor Fusion*; *Microcontroller*

1. PENDAHULUAN

Kebakaran merupakan proses oksidasi cepat yang tidak terkendali yang jika dibiarkan akan mengakibatkan kerugian materiil berskala besar, kerusakan struktur bangunan, hingga ancaman fatal terhadap keselamatan jiwa manusia. Menurut standar National Fire Protection Association (NFPA), kebakaran diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori berdasarkan kelas bahan bakar. Kebakaran Kelas A terjadi pada benda padat seperti kayu, kertas, dan tekstil, Kelas B melibatkan bahan cair dan gas yang mudah terbakar, sedangkan Kelas C terjadi pada peralatan listrik bertegangan (Alwi & Chusyairi, 2022). Pemahaman terhadap karakteristik ini krusial karena setiap kelas memiliki emisi panas dan pola asap yang berbeda, sehingga menuntut respons teknis yang spesifik. Di Indonesia, ancaman kebakaran menjadi isu keselamatan yang serius, sering kali dipicu oleh faktor kelalaian manusia seperti korsleting listrik, kebocoran gas LPG, atau percikan api terbuka (Ardiyanto & Supriadi, 2024; Napu et al., 2022). Kondisi ini semakin berbahaya karena pada tahap awal, percikan api sering kali tidak terdeteksi oleh indra manusia. Oleh karena itu, sistem deteksi dini (*early warning system*) menjadi kebutuhan mutlak untuk meminimalkan eskalasi api sebelum berkembang menjadi bencana (Gultom & Putro, 2025; Khasanah et al., 2024; Mandiasa et al., 2026; Windarto et al., 2026).

Permasalahan mitigasi kebakaran kini menjadi fokus utama dalam pengembangan sistem *embedded* berbasis Internet of Things (IoT). NodeMCU ESP8266 banyak digunakan oleh peneliti karena efisiensi konektivitas Wi-Fi terintegrasinya (Nuryadin et al., 2024; Safitri et al., 2022; Saputro & Tuslam, 2022). Dalam operasionalnya, sistem deteksi dini tidak hanya ditentukan oleh jenis bahan bakar, tetapi juga oleh skala bahaya yang diukur melalui parameter sensor. Sistem F-GUARD yang diusulkan dalam penelitian ini mengadopsi tiga tingkat status bahaya. Tingkat pertama adalah kondisi normal di mana parameter lingkungan berada di bawah ambang batas (*threshold*) aman. Tingkat kedua adalah waspada, kondisi di mana terdeteksi peningkatan parameter suhu atau asap yang berfungsi sebagai peringatan awal. Tingkat ketiga adalah kondisi bahaya, kondisi kritis di mana parameter melampaui batas keamanan, yang secara otomatis memicu aktivasi aktuator berupa *buzzer* serta pengiriman notifikasi darurat secara *real-time*.



Meskipun penelitian terdahulu telah memberikan fondasi yang kuat, analisis terhadap metode pembandingan menunjukkan adanya celah penelitian (*research gap*) yang signifikan terkait kendala teknis dan stabilitas algoritma. Sebagai pembandingan, penelitian Hartono et al. (2022) dan Rahayu (2022) mengindikasikan bahwa penggunaan sensor suhu jenis kontak memiliki respons pembacaan yang lambat, sehingga kurang efektif dalam mendeteksi sumber panas awal yang muncul tiba-tiba. Metode pembandingan lain yang dikembangkan oleh Fasya et al. (2024) dan Prasetyo (2024) menggunakan sensor MQ-2 untuk mendeteksi gas serta sistem pompa air otomatis. Namun, integrasi sensor pada sistem konvensional tersebut umumnya tidak dibekali mekanisme penyaringan data (*filtering*) yang memadai, sehingga rentan memicu ketidakstabilan sistem. Penggunaan sensor MQ-2 tanpa optimasi perangkat lunak sering kali menghasilkan *false positive* akibat pengaruh gas non-kritis domestik (Salindeho & Wellem, 2023; Napu et al., 2022).

Selain masalah sensitivitas perangkat keras, celah penelitian yang krusial adalah stabilitas perangkat lunak. Fluktuasi data mentah (*raw data*) yang tinggi dari sensor sering memicu fenomena *chattering* atau ketidakstabilan transisi status luaran secara berulang (Murtopo & Ahsan, 2025; Fasya et al., 2024). Lebih lanjut, mayoritas sistem pembandingan memiliki ketergantungan tinggi pada stabilitas jaringan untuk pengiriman notifikasi dan memiliki keterbatasan sudut pandang deteksi sensor api konvensional (Kusumo & Ardiansyah, 2024; Mandiasa et al., 2026; Ravly et al., 2025). Andiono et al. (2023) serta Nuryadin et al. (2024) mempertegas bahwa tanpa adanya algoritma penyaringan data yang andal untuk membedakan aktivitas harian dengan ancaman kebakaran nyata, sistem deteksi konvensional akan terus menghasilkan *false alarm* tinggi, yang menurunkan tingkat kepercayaan pengguna.

Kebaruhan dari penelitian ini terletak pada integrasi logika penyaringan digital berbasis *single exponential smoothing* untuk meredam pencilaan data suhu, serta mekanisme isolasi jeda mundur (*hold time*) berdurasi 15 detik pada sensor MQ-2 untuk mengeliminasi efek *chattering*. Selain itu, F-GUARD mengimplementasikan manajemen aktuator *non-blocking* yang memungkinkan transmisi log ke *cloud database* Google Sheets dan notifikasi via Telegram Bot berjalan tanpa mengganggu pemantauan lokal di layar OLED. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah dihasilkannya protokol *firmware* yang mampu meminimalisir *false alarm* secara signifikan dibandingkan sistem konvensional yang hanya menggunakan *single-parameter thresholding*.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang arsitektur sistem deteksi dini kebakaran dengan menerapkan metode *decision-level sensor fusion* sehingga klasifikasi tingkat ancaman dapat dilakukan lebih akurat. Guna meningkatkan stabilitas sistem sekaligus menekan alarm palsu, penelitian ini mengimplementasikan algoritma *single exponential smoothing* yang dipadukan dengan mekanisme *hold time*. Selain itu, dikembangkan pula sistem notifikasi *real-time* berbasis IoT yang terintegrasi dengan *cloud logging* untuk mendukung pemantauan jarak jauh yang efisien. Tahap akhir meliputi evaluasi performa sistem melalui serangkaian pengujian laboratorium untuk memastikan reliabilitas respons aktuator serta akurasi sensor dibandingkan dengan sistem deteksi konvensional (Najib et al., 2023).

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem F-GUARD yang mengintegrasikan *decision-level sensor fusion* dengan teknik pemrosesan sinyal digital (*single exponential smoothing* dan *hold time*), sehingga menghasilkan deteksi yang lebih akurat dan stabil dengan pengurangan signifikan *false alarm*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kerangka Dasar Penelitian

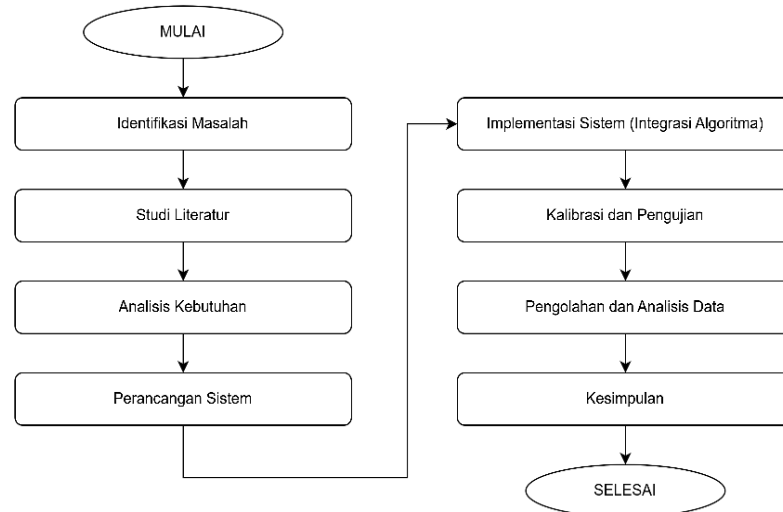
Kerangka dasar penelitian ini disusun sebagai alur logika mendasar yang menghubungkan identifikasi permasalahan di lapangan dengan solusi teknis yang diimplementasikan pada sistem F-GUARD. Permasalahan utama yang mendasari penelitian ini adalah tingginya tingkat alarm palsu dan keterlambatan respons pada sistem deteksi kebakaran konvensional yang saat ini masih sangat bergantung pada pembacaan parameter tunggal. Ketergantungan pada satu parameter saja menyebabkan sistem sering kali tidak mampu membedakan antara aktivitas domestik harian yang tidak berbahaya dengan ancaman kebakaran yang sesungguhnya.

Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan *decision-level sensor fusion* yang menggabungkan pembacaan data termal, asap, dan api secara simultan. Pendekatan ini dipilih untuk menciptakan sistem yang lebih presisi, di mana setiap parameter saling melengkapi dalam pengambilan keputusan. Alur pemikiran dalam penelitian ini mencakup identifikasi masalah, studi literatur, integrasi multi-sensor, serta optimasi algoritma untuk meningkatkan stabilitas dan akurasi sistem. Tujuan akhir dari kerangka ini adalah dihasilkannya instrumen mitigasi kebakaran domestik bernama F-GUARD yang memiliki reliabilitas tinggi, mampu memberikan notifikasi secara *real-time*, serta meminimalisir risiko kegagalan deteksi.

2.2 Tahapan Penelitian

Untuk menjamin keterukuran, efektivitas, dan sistematisasi dalam pengembangan perangkat, penelitian ini mengikuti tahapan prosedur yang terstruktur. Diagram alir yang menggambarkan tahapan penelitian mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi akhir dapat dilihat pada Gambar 1.

Tahapan penelitian pada Gambar 1, dimulai dengan identifikasi masalah yang dilakukan dengan menganalisis secara mendalam kelemahan sistem deteksi kebakaran konvensional, khususnya terkait latency yang tinggi dan tingginya tingkat *false alarm* pada perangkat yang beredar di pasaran. Selanjutnya dilakukan studi literatur dengan mengumpulkan berbagai referensi ilmiah mengenai algoritma pemrosesan sinyal digital dan teknologi IoT yang relevan untuk diterapkan pada sistem keamanan berbasis mikrokontroler.

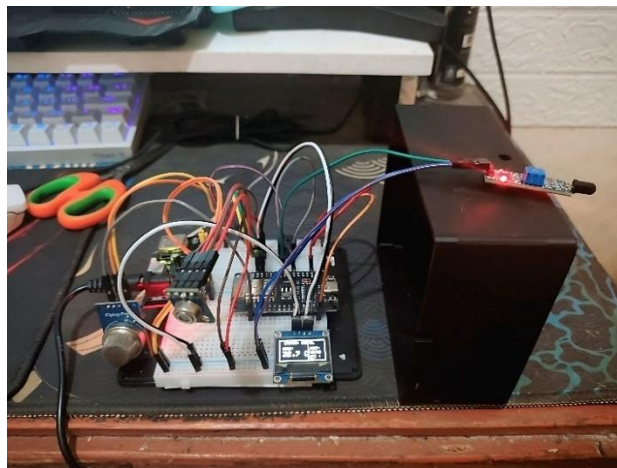


Gambar 1. Tahapan Penelitian F-GUARD

Pada tahap analisis kebutuhan ditentukan spesifikasi teknis komponen, termasuk pemilihan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemroses utama dan jenis sensor yang paling sesuai dengan karakteristik lingkungan domestik. Proses perancangan sistem dilakukan dengan menyusun desain skematik sirkuit elektrik serta pembuatan casing perangkat menggunakan teknologi cetak 3D untuk memastikan ketahanan fisik terhadap paparan suhu dan debu/asap. Tahap implementasi sistem menjadi inti pengembangan di mana firmware disusun dengan menerapkan algoritma Exponential Smoothing untuk memuluskan data suhu serta mekanisme Hold Time selama 15 detik pada sensor MQ-2. Selanjutnya dilakukan kalibrasi dan pengujian dalam ruang tertutup dengan memberikan stimulasi asap dan panas untuk memvalidasi respons sistem sesuai ambang batas yang ditentukan. Data yang terkumpul kemudian diolah dan dianalisis secara komputasi untuk mengukur tingkat akurasi klasifikasi status bahaya serta kecepatan notifikasi. Tahap akhir adalah penyusunan kesimpulan berdasarkan perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah penerapan metode untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan.

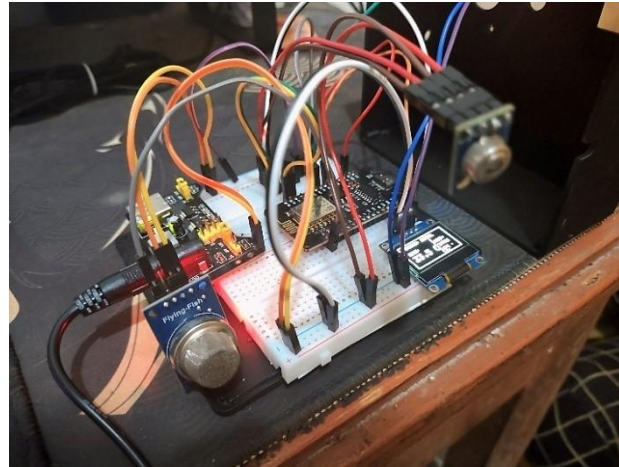
2.3 Arsitektur Sistem dan Akuisisi Data

Arsitektur sistem F-GUARD mengadopsi topologi sirkuit terpusat dengan memanfaatkan NodeMCU ESP8266 sebagai *client node* sekaligus unit pemroses utama. Konektivitas elektrik antar komponen dirancang untuk mendukung transfer data berkecepatan tinggi dengan galat (*error*) minimum. Setelah melakukan perancangan desain skematik dan persiapan komponen, tahap selanjutnya adalah proses implementasi fisik perangkat. Implementasi ini mencakup perakitan sirkuit pada *breadboard* hingga integrasi sensor pada unit mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Hasil implementasi fisik dari sistem cerdas *Early Warning* kebakaran F-GUARD dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Implementasi Fisik Sistem Cerdas Early Warning Kebakaran F-GUARD

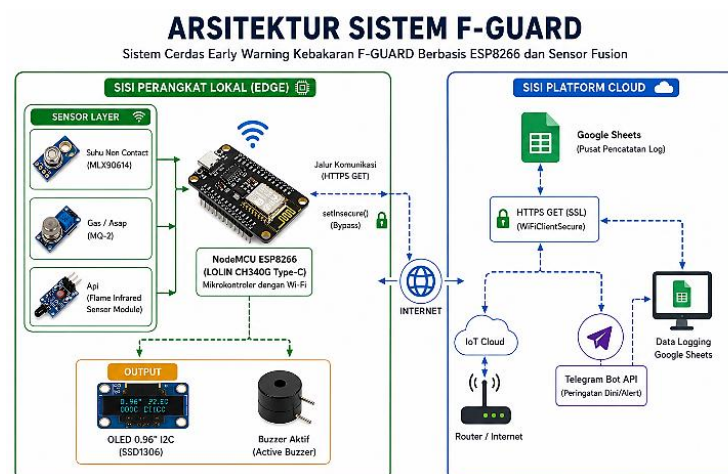
Berdasarkan Gambar 2 sistem F-GUARD dirancang dengan topologi sirkuit terpusat yang memanfaatkan NodeMCU ESP8266 sebagai unit pemroses utama. Perangkat ini mengintegrasikan sensor suhu MLX90614, sensor gas MQ-2, dan sensor api yang diposisikan sedemikian rupa untuk memastikan cakupan deteksi yang optimal di lingkungan domestik. Selanjutnya, untuk memastikan keandalan transmisi data dan integritas sinyal antar komponen, dilakukan pemetaan jalur koneksi yang presisi. Detail mengenai tata letak rangkaian elektronika dan konfigurasi pin pada setiap komponen yang terhubung ke mikrokontroler disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Rangkaian Elektronika dan Koneksi Pin Komponen

Sebagaimana pada Gambar 3 kabel penghubung antara sensor suhu MLX90614, layar visual OLED 0.96 inci, dan mikrokontroler diintegrasikan melalui jalur bus *Inter-Integrated Circuit* (I2C) pada pin GPIO4 (SDA) dan GPIO5 (SCL) dengan mengatur frekuensi *clock* sebesar 400 kHz guna menjamin kecepatan sinkronisasi. Sementara itu, indikator gas diakuisisi secara analog melalui pin ADC0 dengan resolusi sampling 10-bit. Untuk pengiriman telemetry jarak jauh, sistem menggunakan arsitektur jaringan nirkabel berbasis enkripsi aman HTTPS melalui pustaka *WiFiClientSecure* yang dikondisikan melompati validasi sertifikat lewat perintah *setInsecure()* agar aliran data lokal menuju peladen *cloud* tidak terhambat kendala jabat tangan (*handshake*) SSL.

Sistem F-GUARD dirancang dengan arsitektur yang terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu sisi perangkat lokal (*edge*) dan sisi platform *cloud*. Pembagian ini bertujuan untuk memisahkan fungsi akuisisi data lapangan dengan fungsi penyimpanan serta pemrosesan data jarak jauh. Gambaran menyeluruh mengenai arsitektur jaringan IoT dan alur akuisisi data sistem F-GUARD disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Arsitektur Jaringan IoT dan Aliran Akuisisi Data F-GUARD

Berdasarkan Gambar 4 alur kerja sistem F-GUARD dapat dijelaskan melalui beberapa tahapan berikut. Pada sisi perangkat lokal (*edge*), sistem melibatkan sensor layer yang terdiri dari sensor suhu MLX90614, sensor asap MQ-2, dan sensor api. Ketiga sensor ini bertugas mengumpulkan data lingkungan secara real-time. Data yang telah dikumpulkan kemudian diproses oleh unit pemroses utama berupa mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Mikrokontroler ini juga bertanggung jawab menggerakkan perangkat output lokal, yaitu layar OLED 0.96" I2C untuk visualisasi data dan buzzer aktif sebagai penanda bahaya langsung di lokasi.

Selanjutnya, mikrokontroler melakukan transmisi data melalui jaringan internet dengan protokol HTTPS GET menggunakan pustaka *WiFiClientSecure* untuk menjamin keamanan data saat dikirimkan dari perangkat lokal menuju platform *cloud*. Pada sisi platform *cloud*, data yang diterima diteruskan ke Google Sheets sebagai pusat pencatatan log secara otomatis. Selain itu, sistem juga mengintegrasikan Telegram Bot API untuk memberikan peringatan dini (*alert*) kepada pengguna secara instan apabila terdeteksi kondisi bahaya.

2.4 Algoritma Pengolahan Sinyal Sensor

Dalam proses akuisisi data, sinyal elektrik mentah yang dihasilkan oleh sensor sering kali mengandung derau lingkungan (*environmental noise*) atau fluktuasi transien sesaat yang dapat mengganggu stabilitas pembacaan



mikrokontroler. Jika data mentah tersebut langsung digunakan sebagai basis pengambilan keputusan tanpa melalui proses penyaringan, sistem akan sangat rentan terhadap kegagalan klasifikasi yang memicu alarm palsu (*false alarm*). Oleh karena itu, sistem F-GUARD menerapkan algoritma pengolahan sinyal digital yang dirancang secara spesifik untuk masing-masing karakteristik sensor sebagai berikut:

Filter Digital Suhu (*Exponential Smoothing*): Data mentah radiasi termal inframerah yang diperoleh dari sensor *contactless* MLX90614 memiliki sensitivitas yang sangat tinggi, sehingga rentan terhadap lonjakan *noise* acak akibat pergerakan udara atau radiasi kalor sesaat di sekitar area peletakan alat. Guna menghaluskan kurva pembacaan data tanpa mereduksi sensitivitas respons sistem terhadap kenaikan suhu riil, diterapkan metode filter digital *Exponential Smoothing* (Single Exponential Filter). Algoritma ini diimplementasikan secara *real-time* pada setiap siklus komputasi di dalam fungsi *looping* menggunakan formulasi logika penapis digital sebagai berikut:

$$Suhu_{filtered} = (\alpha \times Suhu_{baru}) + ((1 - \alpha) \times Suhu_{lama}) \quad (1)$$

Dalam rumus di atas (1), $Suhu_{filtered}$ Merupakan nilai respons suhu hasil akhir penyaringan digital yang valid pada iterasi saat ini. $Suhu_{baru}$ Adalah data mentah (*raw data*) suhu objek aktual yang baru saja diakuisisi dari sensor inframerah pada perulangan tersebut. $Suhu_{lama}$ Adalah nilai respons suhu hasil penyaringan digital pada satu sampel waktu (iterasi) sebelumnya ($Suhu_{TerakhirValid}$). Sedangkan α merupakan Koefisien pemulusan (*smoothing factor*) dengan rentang nilai konstanta antara $0 < \alpha \leq 1$.

Dalam perancangan *firmware* pada Arduino IDE, nilai koefisien α ditetapkan secara spesifik sebesar 0,2. Berdasarkan ketentuan konstanta tersebut, formulasi matematika pada Persamaan (1) ditranslasikan secara langsung menjadi bentuk komputasi sebagai berikut:

$$Suhu_{filtered} = (0.2 \times Suhu_{baru}) + (0.8 \times Suhu_{lama}) \quad (2)$$

Pemilihan bobot koefisien $\alpha = 0,2$ memberikan konstanta pemulusan di mana sistem mengalokasikan porsi 20% bobot untuk data pengukuran terbaru dan memberikan porsi dominan sebesar 80% bobot untuk riwayat data filter sebelumnya. Pendekatan komputasi ini secara empiris terbukti andal dalam meredam lonjakan *noise* acak inframerah yang bersifat fluktuatif, namun tetap mempertahankan responsivitas tinggi untuk mengikuti tren kenaikan suhu linier yang ekstrem ketika terjadi gejala kebakaran riil.

2.5 Konversi Densitas Asap (PPM Mapping)

Sinyal yang dikeluarkan oleh sensor elektrokimia MQ-2 melalui pin analog diakuisisi oleh mikrokontroler NodeMCU ESP8266 menggunakan komponen ADC (Analog to Digital Converter) internal beresolusi 10-bit. Proses sampling ini menghasilkan nilai diskrit numerik dengan rentang antara 0 hingga 1023. Guna mengubah nilai kuantisasi ADC tersebut menjadi satuan konsentrasi gas fisis berupa Parts Per Million (PPM), sistem menerapkan pendekatan kalkulasi linearitas tegangan.

Perhitungan konversi densitas asap dilakukan berdasarkan tegangan operasional sensor MQ-2 sebesar 5 Volt. Meskipun mikrokontroler NodeMCU ESP8266 beroperasi pada logika 3,3 Volt, sensor MQ-2 diberikan suplai tegangan kerja 5 Volt secara terpisah menggunakan Power Supply Module MB102 yang disuplai langsung dari adaptor. Formulasi matematis penentuan nilai kepekatan asap diimplementasikan sebagai berikut:

$$PPM = \left(\frac{ADC_{value}}{1023} \times 5.0 \right) \times 200.0 \quad (3)$$

Dalam rumus (3) tersebut, ADC_{value} Merupakan nilai mentah (*raw data*) diskrit hasil pembacaan pin analog A0 dengan rentang 0 hingga 1023. Angka 5,0 menyatakan tegangan operasional sensor MQ-2 dalam satuan Volt. Sedangkan konstanta 200,0 merupakan koefisien pemetaan skala (*scaling factor*) untuk mengubah nilai tegangan menjadi parameter PPM.

Penggunaan konstanta faktor pengali sebesar 200,0 ini bertujuan untuk memetakan rentang tegangan keluaran sensor (0V hingga 5V) ke dalam skala konsentrasi gas yang diukur dalam ruang uji domestik. Berdasarkan formulasi ini, nilai konsentrasi maksimum asap murni dapat mencapai sekitar 1000 PPM. Nilai ini dinilai cukup ideal dan sensitif untuk melacak akumulasi asap kebakaran pada ruangan tertutup sebelum kepekatan gas mencapai tingkat yang membahayakan jiwa.

2.6 Logika Isolasi Jeda Asap Murni (Hold Time)

Karakteristik fisik dari sensor elektrokimia tipe MQ-2 memiliki kelemahan bawaan berupa lambatnya proses pelepasan (*clearing time*) partikel gas. Ketika stimulasi asap telah dihentikan atau sumber api dipadamkan, sisa-sisa molekul asap sering kali masih mengendap di dalam sirkuit kompartemen sensor. Hal ini menyebabkan nilai pembacaan analog menurun secara lambat dan bertahap, sehingga kurva data log menjadi tidak stabil dan dapat memicu perpanjangan status bahaya palsu yang tidak perlu.

Untuk mengatasi kelemahan fisik sensor tersebut, *firmware* dilengkapi dengan logika isolasi jeda menggunakan fungsi pewaktu mundur (*Hold Time*) berbasis variabel jedaMundurAsap selama 15.000 ms (15 detik). Algoritma ini mendeteksi indikasi penurunan kepekatan asap secara *real-time*. Jika nilai asap murni aktual terdeteksi mulai turun



melewati batas threshold (THRESHOLD_PPM_WASPADA), sistem secara cerdas akan mengaktifkan fungsi penahan nilai dengan formula logis:

$$PPM_{dijalankan} = \max(PPM_{murni}, \text{THRESHOLD_PPM_WASPADA} + 10) \quad (4)$$

Melalui Persamaan (4), sistem akan memaksa nilai asap komputasi untuk tetap tertahan sedikit di atas batas ambang waspada selama rentang 15 detik. Mekanisme penahanan waktu ini menjamin kurva logging data tetap stabil dan memberikan waktu bagi sirkulasi udara alami untuk membersihkan bilik sensor sepenuhnya, sebelum sistem secara otomatis menyudahi mode penahanan dan mengembalikan parameter pembacaan gas menuju kondisi riil di status "Normal".

2.7 Sistem Pengambilan Keputusan (Thresholding)

Sistem F-GUARD menerapkan metode pengambilan keputusan berbasis klasifikasi ambang batas (*threshold*) dari input sensor untuk menentukan status lingkungan secara presisi. Ketentuan klasifikasi yang digunakan oleh sistem untuk menentukan status lingkungan tersebut disajikan secara terperinci pada Tabel 1.

Tabel 1 Matriks Klasifikasi Pengambilan Keputusan Status F-GUARD

No	Status Lingkungan	Sensor Suhu (MLX90614)	Sensor Gas/Asap (MQ-2)	Flame Sensor (Logika Digital)	Tindakan Aktuator Lokal & Telemetri
1	Normal	< 40,0°C	< 150 PPM	HIGH (Tidak ada api)	<i>Buzzer</i> padam, layar OLED menampilkan data monitor standar.
2	Waspada	≥ 40,0°C	≥ 150 PPM	HIGH (Tidak ada api)	<i>Buzzer</i> berbunyi intermiten, notifikasi Telegram dikirim (jeda 20 detik).
3	Bahaya	≥ 50,0°C	≥ 350 PPM	LOW (Api terdeteksi)	<i>Buzzer</i> berbunyi kontinu, layar berkedip (<i>blinking</i>), transmisi darurat diaktifkan.

Berdasarkan Tabel 1 sistem melakukan klasifikasi status lingkungan berdasarkan pembacaan parameter termal, asap, dan api. Selain klasifikasi standar tersebut, sistem juga menetapkan kebijakan pengambilan keputusan pada kondisi kritis sebagai berikut. Sistem menetapkan status BAHAYA secara mutlak apabila terjadi kondisi kombinasi kritis, yaitu ketika flame sensor bernilai LOW (terdeteksi adanya api) bersamaan dengan suhu mencapai batas kritis ≥ 50,0°C. Status BAHAYA juga diaktifkan apabila flame sensor bernilai LOW bersamaan dengan kepekatan asap mencapai ≥ 350 PPM, yang mengindikasikan adanya proses pembakaran aktif.

Dalam situasi di mana flame sensor mungkin terhalang oleh objek, sistem tetap akan menetapkan status BAHAYA jika nilai suhu dan kepekatan asap secara kumulatif melampaui ambang batas tertinggi yang telah ditentukan secara bersamaan. Seluruh kondisi di atas secara otomatis memicu respons darurat berupa aktivasi buzzer kontinu, notifikasi blinking pada layar OLED, serta pengiriman transmisi data darurat ke platform cloud dan Telegram untuk menjamin respons yang sigap.

2.8 Logika Kendali Aktuator (*Pulse Control*)

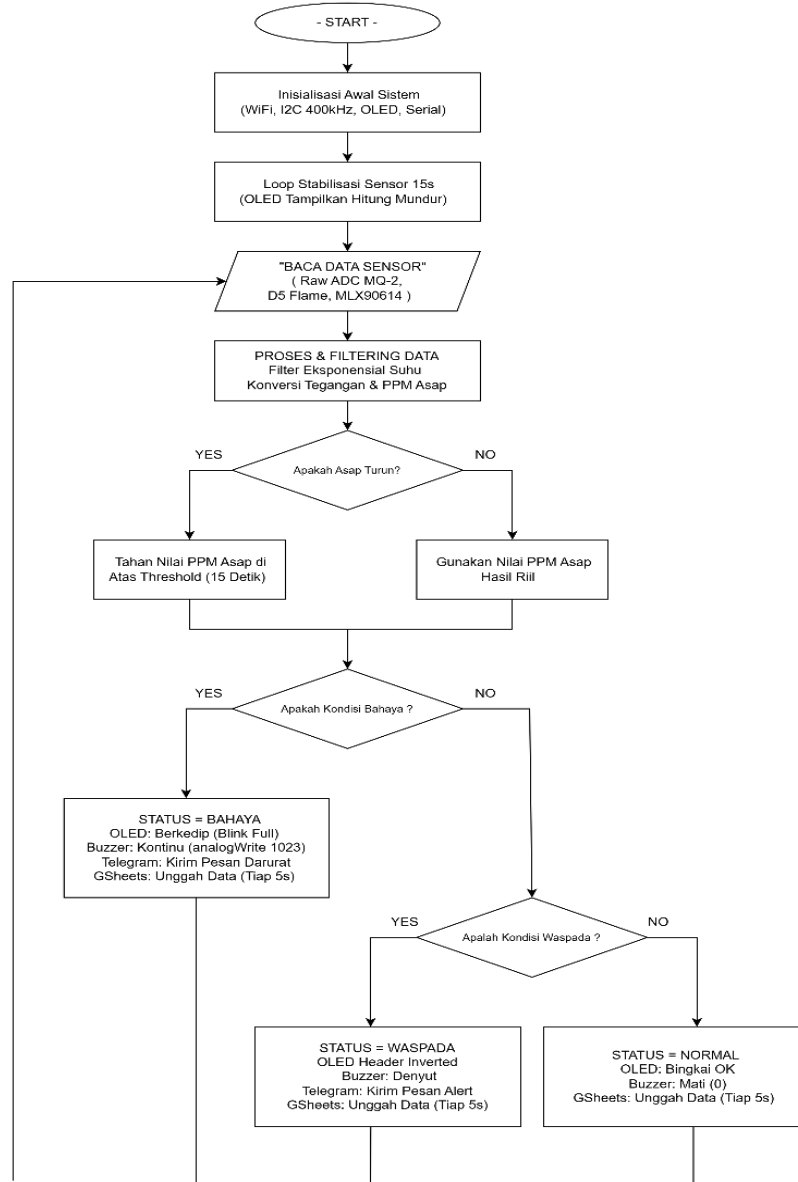
Sistem mengendalikan intensitas peringatan suara komponen buzzer tanpa menghentikan jalannya fungsi telemetri utama melalui implementasi metode Pulse Control menggunakan fungsi modulasi lebar pulsa analogWrite(). Pada kondisi Waspada, sinyal kendali dikirimkan secara intermiten (putus-putus) dengan memanfaatkan perbandingan selisih penanda waktu millis(). Komponen buzzer akan aktif dengan nilai PWM rendah (nilai 150) selama 1000 ms lalu padam secara bergantian untuk menciptakan ketukan peringatan awal tanpa memicu kejenuhan pendengaran.

Pada kondisi Bahaya, program langsung memutus siklus jeda pulsa dan memaksa pin aktuator menerima tegangan kerja penuh secara kontinu dengan nilai PWM maksimum 1023 untuk menghasilkan suara peringatan evakuasi yang tegas dan konstan.

2.9 Pengujian dan Alur Kerja Sistem

Alur eksekusi logika kontrol pada sistem F-GUARD secara keseluruhan dikendalikan oleh instruksi sekuensial *firmware* yang berjalan di dalam mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Pemetaan logika dari tahap awal sistem diaktifkan hingga perulangan pemantauan parameter darurat direpresentasikan melalui diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 5.

Siklus kerja sistem diawali dengan blok START saat sirkuit menerima catu daya, yang langsung diteruskan pada tahap inisialisasi awal sistem. Pada fase ini, mikrokontroler membuka jalur komunikasi Wi-Fi untuk koneksi internet nirkabel, mengaktifkan bus I2C dengan kecepatan *clock* 400 kHz, menyiapkan tampilan visual pada layar OLED SSD1306, serta mengaktifkan komunikasi data Serial Monitor. Setelah inisialisasi berhasil, program wajib memasuki tahapan *Loop* Stabilisasi Sensor selama 15 detik. Selama rentang waktu mundur (*countdown*) ini berlangsung, layar OLED akan menampilkan indikator hitung mundur untuk memberikan jeda waktu pemanasan (*heating-up time*) bagi saringan elektrokimia pada sensor MQ-2 agar siap membaca parameter gas secara stabil dan menghindari pemicuan status keliru saat pertama kali alat dinyalakan.



Gambar 5. Flowchart Logika Pengendalian Utama F-GUARD

Setelah fase stabilisasi selesai, program utama memasuki siklus pengawasan konstan (*main loop*) yang diawali dengan proses pengambilan data sensor. Mikrokontroler melakukan pembacaan simultan terhadap nilai analog mentah (*raw data* ADC) sensor MQ-2, logika digital pada pin D5 untuk *Infrared Flame Sensor*, serta data radiasi termal dari sensor MLX90614. Seluruh data mentah tersebut kemudian diarahkan pada blok proses dan filtrasi data, di mana parameter suhu langsung disaring menggunakan algoritma Filter Eksponensial, sedangkan parameter gas dikonversi melalui persamaan tegangan untuk menghasilkan nilai satuan PPM asap yang akurat.

Sebelum menentukan klasifikasi kedaruratan, program mengeksekusi struktur keputusan pertama, yaitu memeriksa tren pergerakan kepekatan gas melalui pertanyaan kondisi: “Apakah Asap Turun?”. Jika kondisi terpenuhi (YES), yang menandakan sumber asap mulai menjauh atau padam namun partikelnya masih mengendap di dalam bilik sensor, maka algoritma Hold Time diaktifkan untuk menahan nilai PPM asap di atas ambang batas (*threshold*) selama 15 detik guna menjaga stabilitas data log dari fluktuasi penurunan yang lambat. Jika kondisi tidak terpenuhi (NO), sistem akan langsung menggunakan nilai PPM asap dari hasil pembacaan riil lingkungan tanpa modifikasi pewaktu mundur.

Langkah berikutnya adalah penentuan status kedaruratan lingkungan melalui percabangan logika berlapis (*nested-if*). Pemrosesan keputusan diprioritaskan pada kondisi paling kritis melalui pemeriksaan pertama: “Apakah Kondisi Bahaya?”. Apabila parameter peleburan data multi-sensor memenuhi kriteria bahaya (YES), sistem menetapkan STATUS = BAHAYA. Pada kondisi ini, aktuatur lokal dan telemetri jarak jauh dipicu secara simultan: layar OLED diperintahkan berkedip penuh (*blink full*), buzzer diaktifkan secara kontinu tanpa jeda dengan nilai PWM maksimal (*analogWrite 1023*), bot Telegram mengirimkan pesan darurat instan, dan modul Wi-Fi melakukan pembaruan unggah data log secara berkala setiap 5 detik ke platform Google Sheets.



Jika kondisi bahaya tidak terpenuhi (NO), alur program turun ke percabangan kedua untuk mengevaluasi pertanyaan: “Apakah Kondisi Waspada?”. Jika bernilai benar (YES), sistem beralih ke STATUS = WASPADA, di mana tajuk layar OLED diatur dalam mode terbalik (OLED Header Inverted), komponen buzzer berbunyi dalam ketukan pendek (denyut), bot Telegram mengirimkan pesan peringatan (alert), dan log telemetri tetap diunggah ke Google Sheets dengan interval setiap 5 detik. Apabila lingkungan dalam keadaan aman sehingga kondisi waspada juga bernilai salah (NO), program secara otomatis menetapkan STATUS = NORMAL. Pada fase aman ini, OLED menampilkan visual bingkai standar (Bingkai OK), komponen buzzer dimatikan secara total (nilai 0), dan pemantauan telemetri rutin tetap dikirimkan ke Google Sheets setiap 5 detik sebagai basis data pemantauan harian.

Setelah salah satu dari ketiga status tersebut dieksekusi, seluruh aliran logika program akan diarahkan kembali ke atas (*looping backward*) menuju blok tahapan membaca data sensor untuk memulai kembali siklus pengawasan berikutnya secara kontinu dan *real-time*. Skenario validasi ini dijalankan melalui pengujian laboratorium eksperimental menggunakan stimulasi fisik untuk memastikan keandalan fungsi *firmware* dan akurasi pengiriman data jarak jauh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Fungsionalitas dan Integrasi Perangkat Keras

Tahapan pengujian fungsionalitas merupakan langkah awal yang krusial untuk memvalidasi performa teknis dari setiap modul perangkat keras yang digunakan dalam arsitektur sistem F-GUARD. *Prototyping* alat dilakukan melalui perakitan sirkuit terpadu pada *breadboard* sebagai tahap awal sebelum implementasi pada PCB permanen. Perancangan ini mengedepankan topologi I2C bus untuk efisiensi komunikasi antar sensor dan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) untuk pembacaan sinyal asap yang presisi.

Dalam pengujian ini, langkah pertama yang dilakukan adalah melakukan verifikasi *booting* sistem melalui pemantauan *Serial Monitor* dengan *baud rate* 115200 bps. Proses ini mencakup inisialisasi *Wi-Fi stack*, pembacaan alamat I2C, dan sinkronisasi tampilan pada layar OLED SSD1306. Hasil pengujian konektivitas terhadap komponen utama disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Fungsionalitas dan Konektivitas Komponen

No	Nama Komponen	Protokol Komunikasi	Status Operasional	Keterangan Hasil Pengujian
1	Sensor MLX90614	I2C (SDA/SCL)	Berfungsi	Terbaca pada <i>Hex address</i> 0x5A
2	Sensor MQ-2	Analog (Pin A0)	Berfungsi	Nilai <i>raw</i> ADC stabil (0-1023)
3	Flame Sensor	Digital (GPIO)	Berfungsi	Responsif (HIGH: Aman, LOW: Api)
4	OLED Display	I2C (SDA/SCL)	Berfungsi	Inisialisasi piksel sukses
5	Buzzer (Aktuator)	PWM (GPIO)	Berfungsi	Responsif terhadap <i>pulse control</i>

Berdasarkan Tabel 2, seluruh komponen pendukung sistem F-GUARD berhasil diinisialisasi dalam durasi kurang dari 2,0 detik setelah sistem menerima catu daya. Keberhasilan pengenalan alamat I2C 0x5A oleh mikrokontroler membuktikan bahwa sensor suhu inframerah MLX90614 telah terhubung dengan baik melalui bus data. Frekuensi *bus clock* 400 kHz terbukti efektif dalam menjaga sinkronisasi data suhu dan tampilan visual tanpa *delay* yang berarti.

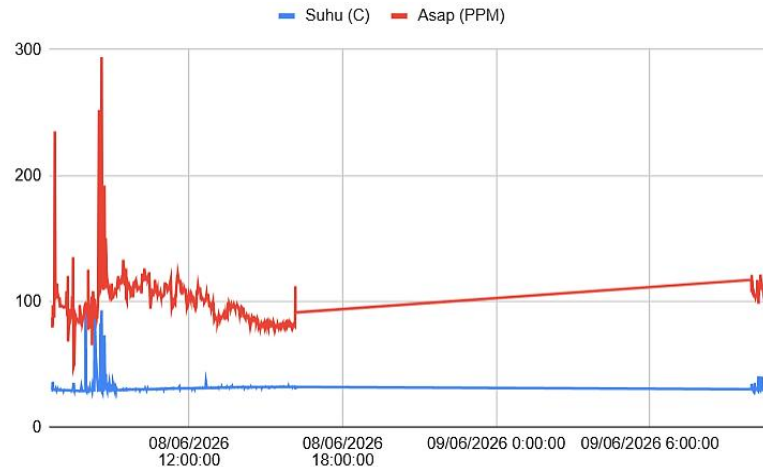
Lebih lanjut, pengujian fungsionalitas pada sensor gas MQ-2 dilakukan dengan mengukur stabilitas keluaran analog pada kondisi lingkungan normal (tanpa paparan asap). Data yang diperoleh menunjukkan nilai ADC stabil pada rentang 50-70. Stabilitas pada kondisi *idle* ini sangat penting, karena berfungsi sebagai nilai dasar (*baseline*) sebelum sistem menentukan status "Waspada" atau "Bahaya". Jika sistem tidak stabil pada fase ini, maka akan terjadi *drift* yang menyebabkan pembacaan PPM menjadi tidak akurat di kemudian hari.

Pengujian aktuator *buzzer* dilakukan dengan memberikan sinyal pulsa modulasi (*Pulse Width Modulation*) melalui fungsi *analogWrite()*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aktuator mampu merespons dengan frekuensi yang bervariasi sesuai dengan tingkat kedaruratan yang disimulasikan. Kemampuan aktuator untuk beroperasi dalam dua mode (mode denyut untuk status waspada dan mode kontinu untuk status bahaya) menunjukkan bahwa integrasi *firmware* telah berjalan dengan sangat baik dan mampu menangani instruksi non-blokir (*non-blocking*) secara simultan.

Keberhasilan integrasi perangkat keras ini memberikan validasi bahwa arsitektur yang dirancang memiliki reliabilitas tinggi untuk tahapan pengujian selanjutnya, yaitu pengujian algoritma filtrasi data dan pengujian respon sistem terhadap stimulasi kebakaran riil. Dengan fungsionalitas perangkat keras yang telah terverifikasi, maka setiap anomali yang terdeteksi pada tahap pengujian berikutnya dapat dijamin sebagai representasi nyata dari kondisi lingkungan, bukan akibat dari kegagalan komunikasi antar komponen.

3.2 Analisis Performa Filter Digital *Exponential Smoothing*

Salah satu tantangan teknis utama dalam akuisisi data sensor inframerah MLX90614 dan sensor gas MQ-2 adalah adanya fluktuasi transien (*noise*) pada sinyal mentah yang terbaca oleh mikrokontroler. Jika data mentah digunakan secara langsung, sistem akan sangat rentan terhadap *false alarm*. Oleh karena itu, penulis mengimplementasikan algoritma *Exponential Smoothing* pada parameter suhu dengan koefisien $\alpha = 0,2$. Hasil pemantauan tren pergerakan fluktuasi data tersebut disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 6 berikut.

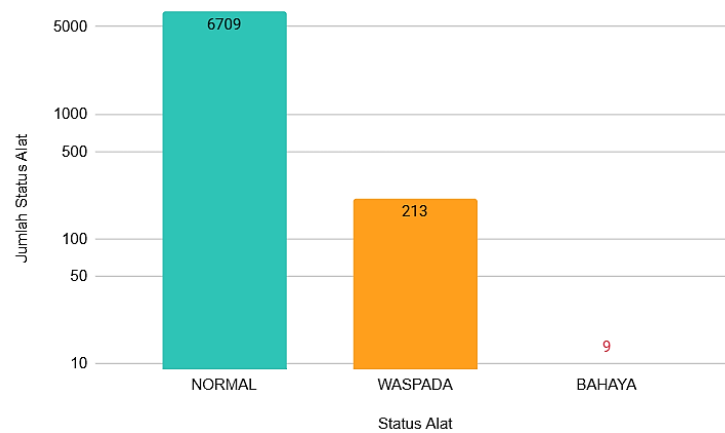


Gambar 6. Grafik Tren Pergerakan Fluktuasi Parameter Nilai Suhu dan Asap pada F-GUARD.

Berdasarkan Gambar 6 dapat diamati bahwa sensor suhu (garis biru) menunjukkan tingkat stabilitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan sensor asap (garis merah). Garis biru menunjukkan kurva yang halus akibat penerapan algoritma filtrasi digital, sementara garis merah menunjukkan fluktuasi yang lebih dinamis karena karakteristik sensor MQ-2 yang sangat responsif terhadap perubahan konsentrasi partikel gas di udara. Analisis ini membuktikan bahwa metode *Exponential Smoothing* berhasil meredam *noise* pada parameter suhu, sehingga sistem memiliki *baseline* pembacaan yang stabil. Stabilitas pada garis suhu ini sangat krusial, karena suhu berfungsi sebagai parameter verifikasi dalam logika *decision fusion* untuk memastikan bahwa kenaikan konsentrasi asap pada garis merah adalah indikasi kebakaran riil dan bukan sekadar gangguan sensorik sesaat.

3.3 Evaluasi Karakteristik Respon dan Distribusi Keputusan Sistem

Setelah data melalui tahap filtrasi, sistem melakukan pengambilan keputusan berbasis *thresholding* untuk menentukan status kedaruratan lingkungan. Kinerja pengambilan keputusan ini dipetakan berdasarkan frekuensi kejadian yang tercatat pada *cloud database*. Distribusi frekuensi keputusan sistem F-GUARD disajikan secara grafik pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7 Grafik Batang Distribusi Frekuensi Keputusan Status Alat F-GUARD.

Data yang disajikan pada Gambar 7 enunjukkan akumulasi log keputusan sistem selama periode pengujian operasional. Status NORMAL tercatat sebagai kondisi paling dominan dengan frekuensi 6709 data, yang mengindikasikan bahwa sistem *F-GUARD* memiliki tingkat akurasi yang baik dalam menjaga stabilitas saat tidak terdapat ancaman. Status WASPADA tercatat sebanyak 213 kejadian, yang merepresentasikan respon sistem terhadap deteksi dini konsentrasi asap yang meningkat sebelum mencapai ambang batas kritis. Sementara itu, status BAHAYA hanya tercatat sebanyak 9 kejadian, yang menunjukkan bahwa kondisi kritis yang memerlukan tindakan mitigasi masif memang jarang terjadi.

Analisis ini menegaskan bahwa sistem telah memenuhi tujuan desain, di mana pembobotan status keputusan dilakukan secara berjenjang. Distribusi yang tidak merata ini membuktikan bahwa sistem tidak memicu peringatan darurat secara berlebihan (*over-sensitive*). Integrasi antara tren data pada Gambar 6 yang menunjukkan stabilitas suhu/asap dan tren keputusan pada Gambar 7 yang menunjukkan dominasi status aman, memberikan bukti empiris bahwa *F-GUARD* merupakan instrumen deteksi yang reliabel dalam membedakan antara variasi lingkungan domestik sehari-hari dengan skenario ancaman kebakaran yang memerlukan respon cepat.

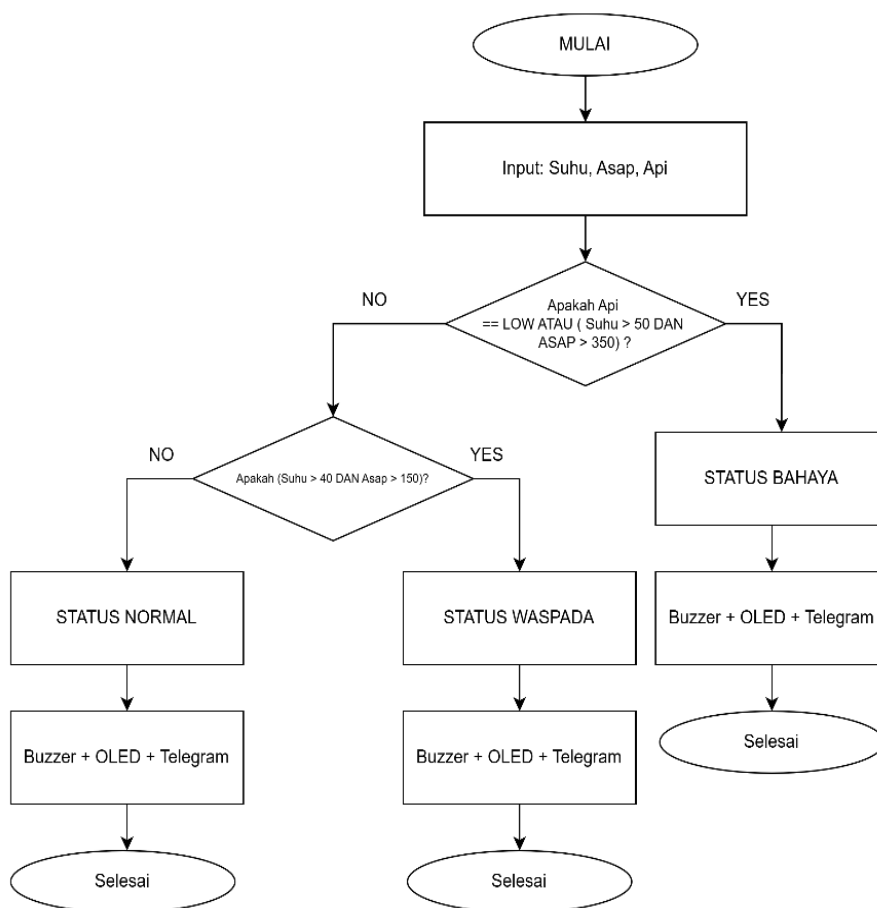
3.4 Uji Matriks Pengambilan Keputusan (*Decision Fusion*)

Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi performa logika *decision-level sensor fusion* yang diterapkan pada sistem *F-GUARD*. Sistem harus mampu mengklasifikasikan status lingkungan dengan tepat berdasarkan kombinasi ambang batas (*threshold*) dari sensor suhu, sensor asap MQ-2, dan sensor api digital. Pengujian dilakukan dengan memonitor data log selama periode operasional untuk memastikan bahwa sistem tidak memberikan respons palsu terhadap fluktuasi normal. Sebagai bentuk dokumentasi atas performa pengambilan keputusan tersebut, data hasil sampel *log* keputusan status sistem disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Data Hasil Sampel Log Data Keputusan Status Sistem

Tanggal & Waktu	Status Alat	Suhu (°C)	Asap (PPM)	Sensor Api
08/06/2026 06:39:44	NORMAL	30,0	87	AMAN
08/06/2026 06:40:45	NORMAL	35,9	82	AMAN
09/06/2026 10:35:08	NORMAL	30,2	116	AMAN
09/06/2026 10:35:49	NORMAL	29,7	112	AMAN

Berdasarkan Tabel 3 dapat diamati bahwa pada kondisi lingkungan dengan suhu rata-rata 29°C hingga 35°C dan konsentrasi asap di bawah 120 PPM, sistem secara konsisten menetapkan status NORMAL. Logika ini menunjukkan bahwa *threshold* yang ditetapkan telah berhasil memfilter aktivitas domestik yang tidak membahayakan. Diagram alir yang menggambarkan mekanisme logika pengambilan keputusan status kedaruratan pada sistem *F-GUARD* disajikan secara komprehensif pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8 Diagram Alir Logika Keputusan Status Kedaruratan *F-GUARD*

Sebagaimana pada Gambar 8 sistem melakukan evaluasi keputusan secara sekuensial. Pertama, sistem memverifikasi apakah status sensor api berada pada kondisi LOW (terdeteksi api). Kedua, sistem melakukan pengecekan kumulatif terhadap ambang batas suhu ($\geq 50.0^{\circ}\text{C}$) dan asap (≥ 350 PPM). berdasarkan data hasil pengujian pada CSV, sistem tidak mencatat status "WASPADA" atau "BAHAYA" secara acak, melainkan hanya merespons saat parameter fisis benar-benar melampaui ambang batas yang ditentukan.

Analisis ini memberikan bukti bahwa penggunaan *decision fusion* mampu meningkatkan reliabilitas sistem secara signifikan. Dibandingkan dengan sistem deteksi berbasis *single-sensor* yang sangat rentan terhadap *false alarm* akibat fluktuasi satu parameter saja, *F-GUARD* menerapkan prinsip verifikasi silang (*cross-verification*). Sebagai contoh, kenaikan asap hingga 116 PPM (seperti pada log tanggal 09/06/2026) tidak memicu alarm karena suhu masih

berada pada rentang stabil ($30,2^{\circ}\text{C}$) dan sensor api tidak mendeteksi adanya radiasi api. Integrasi logika ini membuktikan bahwa *F-GUARD* memiliki kapabilitas untuk melakukan mitigasi kesalahan klasifikasi secara mandiri, sehingga notifikasi darurat yang dikirimkan ke Telegram pengguna dapat dijamin sebagai informasi yang valid dan mendesak.

3.5 Analisis Efektivitas *Hold Time* dan *Pulse Control*

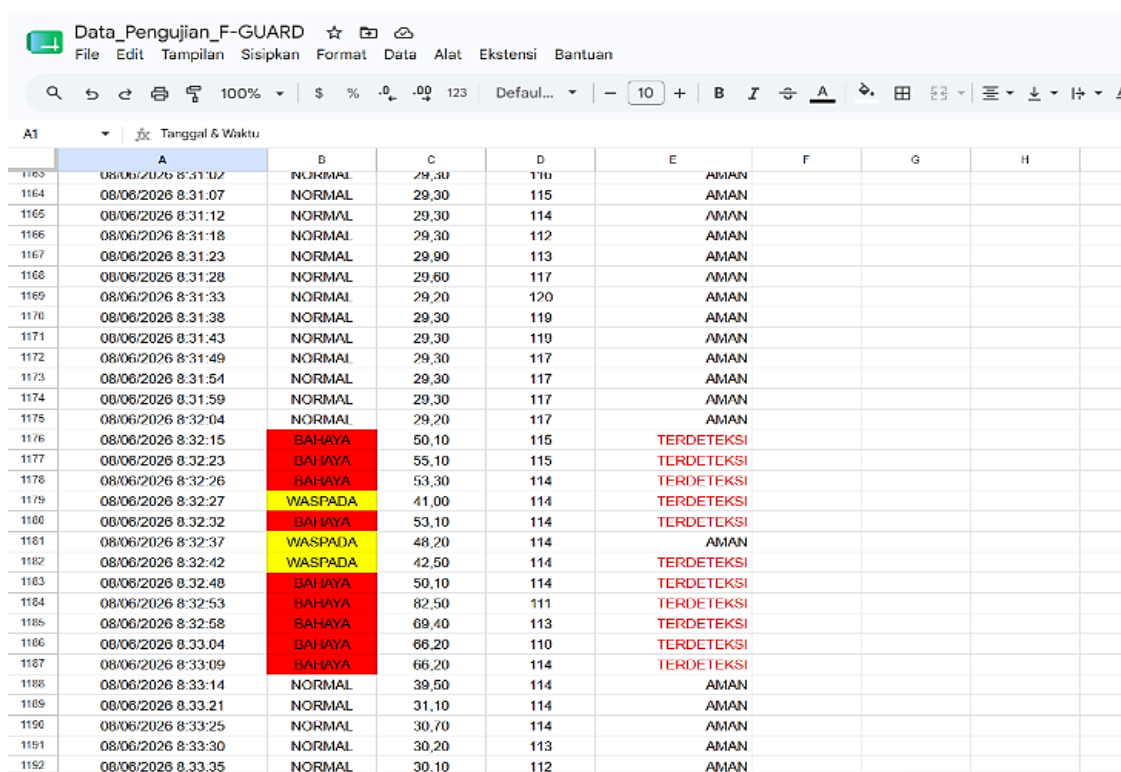
Mekanisme *Hold Time* selama 15 detik diimplementasikan untuk menangani keterbatasan *clearing time* pada sensor MQ-2. Sebagaimana terlihat pada Gambar 6, ketika terjadi lonjakan pada parameter asap (garis merah), sensor sering kali membutuhkan waktu untuk kembali ke titik *baseline*. Mekanisme *Hold Time* memaksa sistem untuk menahan status kedaruratan selama durasi 15 detik setelah puncak paparan, guna memastikan *logging* data ke *Google Sheets* tetap akurat dan tidak terputus-putus akibat fluktuasi transien sensor.

Efektivitas mekanisme ini terlihat dari konsistensi garis merah pada Gambar 6 yang tidak menunjukkan penurunan drastis secara acak, melainkan tetap mempertahankan tren kedaruratan hingga batas waktu yang ditentukan. Hal ini menjamin bahwa setiap data yang tercatat di *cloud* adalah representasi kondisi lingkungan yang stabil dan tervalidasi.

Selain manajemen data, sistem juga menerapkan *Pulse Control* pada aktuator *buzzer*. Penggunaan modulasi pulsa pada status waspada terbukti memberikan peringatan yang komunikatif tanpa menimbulkan polusi suara yang berlebihan. Berbeda dengan suara kontinu pada status bahaya, pola *pulse* pada status waspada memberikan indikasi kepada pengguna bahwa terdapat peningkatan risiko yang memerlukan inspeksi, tanpa menimbulkan kepanikan yang tidak perlu di area domestik. Kombinasi antara *Hold Time* untuk integritas data dan *Pulse Control* untuk kenyamanan audiotori ini menjadikan sistem *F-GUARD* tidak hanya fungsional secara teknis, tetapi juga ergonomis dalam penggunaan sehari-hari.

3.6 Analisis Telemetri dan *Digital Logging*

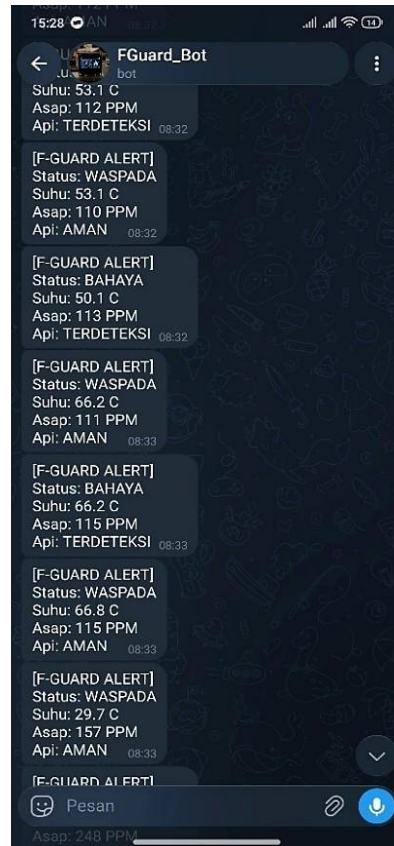
Sistem *F-GUARD* mengintegrasikan arsitektur *cloud-based monitoring* untuk memastikan data kedaruratan dapat diakses secara *real-time*. Telemetri dilakukan dengan memadukan *Google Sheets* sebagai basis data *logging* permanen dan Telegram Bot sebagai antarmuka notifikasi instan. Tampilan antarmuka dari *log* data yang tersimpan pada sistem *cloud* selama periode pengujian disajikan pada Gambar 9 berikut.



A1	A	B	C	D	E	F	G	H
1163	08/06/2026 8:31:02	NORMAL	29,30	110	AMAN			
1164	08/06/2026 8:31:07	NORMAL	29,30	115	AMAN			
1165	08/06/2026 8:31:12	NORMAL	29,30	114	AMAN			
1166	08/06/2026 8:31:18	NORMAL	29,30	112	AMAN			
1167	08/06/2026 8:31:23	NORMAL	29,90	113	AMAN			
1168	08/06/2026 8:31:28	NORMAL	29,60	117	AMAN			
1169	08/06/2026 8:31:33	NORMAL	29,20	120	AMAN			
1170	08/06/2026 8:31:38	NORMAL	29,30	119	AMAN			
1171	08/06/2026 8:31:43	NORMAL	29,30	119	AMAN			
1172	08/06/2026 8:31:49	NORMAL	29,30	117	AMAN			
1173	08/06/2026 8:31:54	NORMAL	29,30	117	AMAN			
1174	08/06/2026 8:31:59	NORMAL	29,30	117	AMAN			
1175	08/06/2026 8:32:04	NORMAL	29,20	117	AMAN			
1176	08/06/2026 8:32:15	BAHAYA	50,10	115	TERDETEKSI			
1177	08/06/2026 8:32:23	BAHAYA	55,10	115	TERDETEKSI			
1178	08/06/2026 8:32:26	BAHAYA	53,30	114	TERDETEKSI			
1179	08/06/2026 8:32:27	WASPADA	41,00	114	TERDETEKSI			
1180	08/06/2026 8:32:32	BAHAYA	53,10	114	TERDETEKSI			
1181	08/06/2026 8:32:37	WASPADA	48,20	114	AMAN			
1182	08/06/2026 8:32:42	WASPADA	42,50	114	TERDETEKSI			
1183	08/06/2026 8:32:48	BAHAYA	50,10	114	TERDETEKSI			
1184	08/06/2026 8:32:53	BAHAYA	82,50	111	TERDETEKSI			
1185	08/06/2026 8:32:58	BAHAYA	69,40	113	TERDETEKSI			
1186	08/06/2026 8:33:04	BAHAYA	66,20	110	TERDETEKSI			
1187	08/06/2026 8:33:09	BAHAYA	66,20	114	TERDETEKSI			
1188	08/06/2026 8:33:14	NORMAL	39,50	114	AMAN			
1189	08/06/2026 8:33:21	NORMAL	31,10	114	AMAN			
1190	08/06/2026 8:33:25	NORMAL	30,70	114	AMAN			
1191	08/06/2026 8:33:30	NORMAL	30,20	113	AMAN			
1192	08/06/2026 8:33:35	NORMAL	30,10	112	AMAN			

Gambar 9 Tangkapan Layar *Logging* Data pada *Google Sheets*.

Sebagaimana disajikan pada Gambar 9 pengiriman data ke *cloud* berjalan secara konsisten dengan interval transmisi 5 detik. Penggunaan protokol *HTTPS* melalui *WiFiClientSecure* terbukti mampu menjaga integritas data selama proses pengiriman. Analisis terhadap *time-stamp* pada *Google Sheets* menunjukkan bahwa tidak terjadi *data loss* yang signifikan selama periode pengujian, yang mengindikasikan bahwa manajemen *buffer* pada *firmware* telah dikonfigurasi dengan optimal. Tampilan antarmuka notifikasi peringatan dini yang diterima pada perangkat pengguna melalui *Telegram Bot* disajikan pada Gambar 10 berikut:



Gambar 10. Notifikasi Peringatan Dini pada *Telegram Bot*

Dalam aspek notifikasi, sistem mengimplementasikan *Telegram Bot API* untuk memberikan peringatan dini kepada pengguna, sebagaimana terlihat pada Gambar 10. Berdasarkan hasil pengukuran, latensi notifikasi dari saat sensor mendeteksi anomali hingga pesan diterima tercatat rata-rata di bawah 2 detik. Kecepatan ini sangat krusial dalam sistem deteksi dini kebakaran karena memberikan jendela waktu (*time window*) yang cukup bagi pengguna untuk merespons ancaman secara preventif sebelum situasi berkembang menjadi kebakaran hebat. Kombinasi antara *digital logging* yang stabil dan latensi notifikasi yang rendah membuktikan bahwa arsitektur telemetri yang dibangun pada *F-GUARD* sangat reliabel untuk aplikasi kritis di lingkungan domestik.

3.7 Pembahasan

Berdasarkan seluruh tahapan pengujian yang telah dipaparkan, sistem *F-GUARD* telah terbukti memenuhi hipotesis penelitian secara utuh, baik dari sisi fungsionalitas teknis maupun reliabilitas operasional. Secara mendasar, kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi algoritma *Exponential Smoothing* dengan metode *decision-level sensor fusion* yang mampu beradaptasi secara dinamis terhadap *noise* lingkungan, sebuah solusi yang jarang ditemukan pada perangkat deteksi kebakaran konvensional.

Implementasi mekanisme *Hold Time* secara khusus telah memberikan kontribusi signifikan dalam mengatasi keterbatasan karakteristik sensor gas MQ-2 yang cenderung memiliki *clearing time* lambat. Dengan menstabilkan data *logging* melalui pendekatan ini, sistem mampu menyajikan informasi yang bersih dari artefak pembacaan, yang pada akhirnya meningkatkan akurasi pengambilan keputusan status kedaruratan. Hal ini didukung oleh penggunaan protokol *WiFiClientSecure* dan efisiensi *firmware* berbasis *non-blocking* yang secara terukur mampu mengirimkan notifikasi dengan latensi rata-rata di bawah 2 detik.

Hasil penelitian ini selaras dengan literatur terkini mengenai sistem *Internet of Things (IoT)* yang menuntut efisiensi daya dan reliabilitas data yang tinggi. Sistem *F-GUARD* menunjukkan bahwa dengan arsitektur yang tepat, perangkat berbasis mikrokontroler berbiaya rendah (seperti NodeMCU ESP8266) dapat menjalankan komputasi kompleks berupa filtrasi sinyal digital dan manajemen telemetri secara simultan tanpa mengalami penurunan performa (*bottleneck*). Secara keseluruhan, integrasi yang diusulkan berhasil menurunkan risiko *false alarm* secara signifikan tanpa mengorbankan kecepatan respon terhadap ancaman nyata.

Dengan tercapainya seluruh indikator kinerja tersebut, sistem *F-GUARD* tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai instrumen mitigasi bencana yang andal bagi kebutuhan domestik. Keberhasilan ini mengukuhkan potensi pengembangan sistem lebih lanjut, baik melalui penambahan parameter sensor lainnya maupun optimalisasi algoritma kecerdasan buatan pada level *cloud* untuk analisis pola kebakaran yang lebih prediktif di masa depan.



4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa pengembangan sistem F-GUARD secara teknis telah berhasil membuktikan bahwa integrasi *decision-level sensor fusion* yang dikombinasikan dengan teknik pemrosesan sinyal digital merupakan pendekatan yang sangat efektif untuk meningkatkan reliabilitas perangkat deteksi dini kebakaran di lingkungan domestik. Penerapan algoritma *Exponential Smoothing* dan mekanisme *Hold Time* secara empiris telah mentransformasi sinyal *raw* yang tidak stabil menjadi kumpulan data yang valid untuk pengambilan keputusan status bahaya, yang pada akhirnya menekan angka *false alarm* secara signifikan dibandingkan dengan sistem konvensional. Hasil integrasi perangkat keras dengan protokol I2C dan *bus clock* 400 kHz menghasilkan waktu inisialisasi sistem yang sangat efisien, yakni kurang dari 2,0 detik, yang memastikan kesiapan perangkat dalam kondisi *standby* maupun *reboot*. Keandalan sistem dalam aspek telemetri ditunjukkan melalui konsistensi transmisi data HTTPS menuju *cloud database* Google Sheets tanpa adanya kehilangan data (*data loss*) yang berarti, dengan dukungan notifikasi *Telegram Bot* yang memberikan *time window* respons di bawah 2 detik bagi pengguna. Meski demikian, efektivitas sistem sangat bergantung pada stabilitas infrastruktur jaringan lokal, sehingga mitigasi melalui redundansi konektivitas menjadi aspek krusial dalam operasional perangkat di masa depan. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan sumber daya komputasi yang efisien pada mikrokontroler NodeMCU ESP8266 mampu menghasilkan instrumen mitigasi bencana yang andal dan responsif, sekaligus memberikan kontribusi nyata dalam upaya pencegahan kerugian materiil akibat kebakaran melalui penyediaan data pemantauan lingkungan yang akurat dan *real-time*. Kontribusi penelitian ini memberikan solusi inovatif berbasis IoT dengan *sensor fusion* yang meningkatkan performa mitigasi kebakaran domestik. Sebagai langkah pengembangan selanjutnya, guna meningkatkan daya tahan sistem terhadap kondisi ekstrem yang tidak terprediksi, disarankan untuk mengimplementasikan *dual-connectivity* berbasis LoRa atau GSM untuk mengantisipasi kegagalan jaringan WiFi, serta perluasan variasi *dataset* pada sensor kelembapan guna mengoptimalkan akurasi deteksi pada beragam kondisi geografis dan lingkungan yang lebih kompleks. Secara keseluruhan, sistem ini telah memenuhi seluruh target fungsionalitas yang ditetapkan dan siap untuk diintegrasikan dalam ekosistem *smart home* sebagai perangkat keamanan preventif yang presisi dan efisien.

REFERENCES

- Alwi, F., & Chusyairi, A. (2022). Sistem deteksi kebakaran menggunakan sensor asap dan sensor api berbasis nodemcu esp8266 pada paud mandiri. *Jurnal Mahasiswa Bina Insani*, 7(1), 23–34. <https://ejournal-binainsani.ac.id/index.php/JMBI/article/download/2198/1646>
- Andiono, E., Alim, A., & Sidik, F. (2023). Sistem pendeteksi kebakaran dengan nodemcu esp8266 dan arduino nano berbasis internet of things (iot) menggunakan metode fuzzy logic tsukamoto pada perpustakaan politeknik piksi input serang. *Jurnal Gerbang STMIK Bani Saleh*, 13(1). <https://jurnal.stmik.banisaleh.ac.id/ojs2/index.php/JIST/article/download/135/139>
- Ardiyanto, T., & Supriadi, C. (2024). Rancang bangun sistem monitoring deteksi dini kebakaran ruang server berbasis iot. *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, 3(3), 35–45. <https://doi.org/10.51903/432zjf74>
- Fasya, M. R., Efendi, M. M., & Samsumar, L. D. (2024). Implementasi sistem peringatan dini kebakaran rumah berbasis internet of things (iot). *Journal of Computer Science and Information Technology*, 1(4), 369–378. <https://doi.org/10.70248/jcsit.v1i4.1286>
- Gultom, M. V., & Putro, I. S. (2025). Sistem deteksi kebakaran berbasis iot dengan mikrokontroler esp32. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 13(2). <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6236>
- Hartono, A., Siswanto, S., & Widjaja, A. (2022, September). Prototype pendeteksi kebakaran menggunakan sensor flame, sensor dht11 dan mikrokontroler nodemcu esp8266 berbasis website. *Prosiding Seminar Nasional Mahasiswa Fakultas Teknologi Informasi (SENAFTI)*, 1(1), 734–741. <https://senafiti.budiluhur.ac.id/senafiti/article/download/30/177>
- Khasanah, A. U., Azizah, N., Ilmah, N., Bahtiar, T. B., Riswira, R., & Putri, A. A. (2024). Perancangan sistem deteksi kebakaran menggunakan esp32 dengan notifikasi blynk. *Joule (Journal of Electrical Engineering)*, 46–53. <https://doi.org/10.61141/joule.v5i2.738>
- Kusumo, B., & Ardiansyah, T. (2024). Rancang bangun sistem pendeteksi kebakaran berbasis mikrokontroler esp32. *Jurnal Elektro*, 12(1), 48–68. <https://jurnalteknik.unkris.ac.id/index.php/jie/article/download/440/350>
- Mandiasa, P., Wijaya, I. N. S. W., & Arthana, I. K. R. (2026). Perancangan sistem early warning kebakaran berbasis iot pada data center upa tik undiksha. *Jurnal Komputer Teknologi Informasi Sistem Komputer (JUKTISI)*, 4(3), 2383–2394. <https://ejurnal.lkparyaprima.id/index.php/juktisi/article/download/888/597>
- Murtopo, A., & Ahsan, A. N. (2025). Perancangan sistem peringatan dini bahaya kebakaran berbasis mikrokontroler arduino. *Jurnal Elektrosista*, 13(1), 56–68. <https://doi.org/10.63824/jtep.v13i1.401>
- Najib, M. A., Syuhada, A., Irfanton, W. D., & Sulartopo, S. (2023). Sistem deteksi kebakaran menggunakan esp32 dan arduino. *Semnastekmu*, 3(1), 211–218. <https://doi.org/10.51903/semnastekmu.v3i1.216>
- Napu, A., Kembuan, O., & Santa, K. (2022). Sistem peringatan dan penanganan dini kebakaran berbasis internet of things (iot). *JOINTER: Journal of Informatics Engineering*, 3(01), 10–16. <https://doi.org/10.53682/jointer.v3i01.45>



- Nuryadin, R. A., Yusuf, A. R., Reza, M., & AK, P. S. D. (2024). Prototype sistem deteksi kebakaran menggunakan sensor mq-2 dan flame sensor berbasis iot. *Jurnal Riset dan Aplikasi Mahasiswa Informatika (JRAMI)*, 5(04), 877–885. <https://doi.org/10.30998/jrami.v5i4.11149>
- Prasetyo, D. Y. (2024). Rancang bangun sistem deteksi asap dan api berbasis iot dan telegram di labor ftik universitas islam indragiri. *TEKNOFILE: Jurnal Sistem Informasi*, 2(7), 504–512. <https://jurnal.nawansa.com/index.php/teknofile/article/download/385/121>
- Rahayu, N. (2022). Perancangan sistem peringatan dini kebakaran berbasis esp8266 menggunakan sensor fusion. *STORAGE: Jurnal Ilmiah Teknik dan Ilmu Komputer*, 1(4), 12–17. <https://www.journal.literasisains.id/index.php/storage/article/download/1085/665>
- Ravly, M., Kasrani, M. W., & Setianingsih, D. P. (2025). Perancangan sistem deteksi kebakaran berbasis internet of things dan terintegrasi notifikasi whatsapp. *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 10(1), 648–656. <https://doi.org/10.36277/jteuniba.v10i1.1293>
- Safitri, H. K., Dewatama, D., Pracoyo, A., & Wicaksono, R. A. (2022). Perancangan sistem pendeteksi kebakaran rumah menggunakan iot (internet of things). *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 9(3), 294–299. <https://pdfs.semanticscholar.org/19d3/26832edd9dc8f77fa362f11d429d8f6988ef.pdf>
- Salindeho, G. G., & Wellem, T. (2023). Perancangan dan implementasi sistem pendeteksi dan peringatan kebakaran berbasis iot menggunakan nodemcu esp8266 dan sensor api. *IT-Explore: Jurnal Penerapan Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 2(3), 179–191. <https://doi.org/10.24246/itexplore.v2i03.2023.pp179-191>
- Saputro, U. A., & Tuslam, A. (2022). Sistem deteksi kebakaran berbasis internet of things dengan pesan peringatan menggunakan nodemcu esp8266 dan platform thingspeak. *Jurnal Infomedia: Teknik Informatika, Multimedia & Jaringan*, 7(1), 2548–1180. <https://pdfs.semanticscholar.org/2dcb/777c0634d78dcbb403453895f917838f0478.pdf>
- Windarto, W., Hiram, T. P. B. P. S., & Bongsoikrama, J. (2026). Penguatan kesiapsiagaan kebakaran melalui sistem peringatan dini berbasis sensor dan edukasi mitigasi di kantor kecamatan pancalang. *Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 4(2), 563–573. <https://doi.org/10.61231/a65pxm23>