

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM *SMART ALARM MULTI-SENSOR* BERBASIS ESP32 DENGAN INTEGRASI IoT UNTUK DETEKSI DINI KEBAKARAN DI TERMINAL BANDAR UDARA

Lia Namira Hasibuan¹, Muh Wildan², Febria Roza³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Navigasi Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Jl. Raya PLP Curug, Desa Serdang Wetan, Kecamatan Legok, Kabupaten Tangerang, Banten 15820, Indonesia.

Keywords:

ESP32;
Internet of Things;
ThingsBoard;
Smart Alarm;
Multi-Sensor;
R&D.

Corresponding Author

Email:

lianamira06@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *smart alarm multi-sensor* berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk deteksi dini kebakaran di lingkungan terminal bandar udara. Sistem dikembangkan menggunakan pendekatan perancangan teknik dan eksperimen dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor MQ-2, DHT22, *flame sensor*, dan PIR. Data dikirim secara real-time menggunakan protokol MQTT ke *platform ThingsBoard* serta dilengkapi notifikasi melalui Telegram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu respon kurang dari 3 detik dengan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 96,9%. Selain itu, sistem tetap berfungsi secara optimal melalui mekanisme *fail-safe* saat koneksi jaringan terputus. Dengan demikian, sistem ini menunjukkan potensi sebagai solusi monitoring keselamatan berbasis IoT yang andal di lingkungan bandar udara.



Copyright © [JITET](http://jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. This study aims to design and implement a multi-sensor smart alarm system based on the Internet of Things (IoT) for early fire detection in airport terminal environments. The system is developed using an engineering design and experimental approach, utilizing an ESP32 microcontroller integrated with MQ-2, DHT22, flame, and PIR sensors. Data are transmitted in real-time using the MQTT protocol to the ThingsBoard platform and integrated with Telegram notifications. The results show that the system achieves a response time of less than 3 seconds and data transmission reliability of 96.9%. Furthermore, the system maintains functionality through a fail-safe mechanism during network disruptions. Therefore, this system demonstrates strong potential as a reliable IoT-based safety monitoring solution.

1. PENDAHULUAN

Keselamatan di terminal bandar udara menghadapi risiko kebakaran yang signifikan akibat tingginya aktivitas operasional,

penggunaan peralatan listrik, serta kepadatan penumpang. Keterlambatan dalam mendeteksi indikasi bahaya seperti asap, suhu tinggi, dan

api dapat berdampak serius terhadap keselamatan dan operasional penerbangan [1].

Pada 18 Oktober 2025, kebakaran besar terjadi di area kargo *Hazrat Shahjalal International Airport* yang mengakibatkan penangguhan seluruh jadwal penerbangan sementara dan pemadaman api oleh ratusan unit pemadam kebakaran sebelum operasi dapat dilanjutkan pada malam harinya. Insiden ini menimbulkan gangguan besar pada jaringan penerbangan regional dan kerusakan material yang signifikan pada inventaris kargo [2]. Terbaru, pada Februari 2026, sebuah pesawat *Turkish Airlines* melakukan pendaratan darurat di *Netaji Subhash Chandra Bose International Airport* setelah dilaporkan adanya api pada mesin pesawat, meskipun tidak menimbulkan korban, hal ini menunjukkan potensi ancaman kebakaran yang masih relevan bagi keselamatan dan kesiapsiagaan bandar udara *modern* [3].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem deteksi kebakaran berbasis *Internet of Things* (IoT), namun sebagian besar masih memiliki keterbatasan, seperti belum terintegrasinya *multi-sensor* secara optimal, tidak adanya *dashboard* monitoring terpusat, serta belum mendukung mekanisme *fail-safe* [4].

Namun, penelitian sebelumnya belum mampu mengintegrasikan *multi-sensor*, sistem monitoring berbasis *dashboard* terpusat, serta mekanisme *fail-safe* dalam satu sistem yang berjalan secara simultan. Keterbatasan ini menyebabkan sistem deteksi dini kebakaran belum optimal dalam mendukung keandalan monitoring pada lingkungan bandar udara yang bersifat *safety-critical* [5].

Sementara itu, penelitian [6] dan [7] telah mengembangkan sistem berbasis IoT dengan berbagai sensor dan fitur alarm otomatis, tetapi masih memiliki keterbatasan dalam aspek skalabilitas, serta notifikasi yang belum terintegrasi dengan *dashboard* terpusat. Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian masih memiliki keterbatasan dalam integrasi *multi-sensor*, visualisasi data berbasis *dashboard*, serta sistem notifikasi yang terpusat dan andal.

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sistem *smart alarm multi-sensor* berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan *platform ThingsBoard*, dilengkapi *dashboard* berbasis

web, notifikasi Telegram, serta mekanisme *fail-safe* lokal.

Kontribusi utama penelitian ini adalah:

1. Integrasi *multi-sensor* dalam satu sistem terpadu
2. Monitoring *real-time* berbasis *dashboard* IoT
3. Implementasi mekanisme *fail-safe* untuk meningkatkan keandalan sistem

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *chip module* yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dirancang untuk mendukung aplikasi *Internet of Things* (IoT). Chip ESP32 ini sangat komprehensif karena memiliki prosesor, penyimpanan, dan akses GPIO (*General Purpose Input Output*) [8].

2.2 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) atau dikenal juga dengan singkatan IoT merupakan sebuah konsep yang bertujuan untuk memperluas manfaat dari konektivitas internet yang tersambung secara terus-menerus [9]. Dalam konteks sistem keselamatan dan operasional bandar udara, IoT berperan sebagai teknologi pendukung (*enabler*) untuk fungsi deteksi dini, pemantauan berkelanjutan, dan penyampaian informasi keadaan darurat secara cepat dan akurat. Penerapan IoT pada lingkungan bandar udara perlu memperhatikan karakteristik *safety-critical system*, yaitu sistem yang menuntut keandalan tinggi, latensi rendah, dan ketersediaan layanan yang konsisten guna mendukung kesinambungan operasi bandar udara [10]. Arsitektur IoT secara umum terdiri atas *perception layer* (sensor dan aktuator), *network layer* (media komunikasi data), dan *application layer* (*platform* pengolahan dan visualisasi data). Arsitektur ini menjadi dasar pengembangan sistem IoT yang terstruktur dan dapat diandalkan untuk mendukung aplikasi keselamatan dan monitoring pada lingkungan kompleks seperti terminal bandar udara [11].

2.3 ThingsBoard

ThingsBoard merupakan platform *Internet of Things* (IoT) berbasis *open-source* yang digunakan untuk pengumpulan, pemrosesan, dan visualisasi data dari perangkat IoT melalui jaringan komunikasi. Platform ini berperan pada lapisan aplikasi (*application layer*) dalam arsitektur IoT dan mendukung protokol komunikasi standar seperti MQTT dan HTTP [12].

2.4 Arduino IDE

Arduino IDE merupakan lingkungan pengembangan terintegrasi (*Integrated Development Environment*) yang digunakan untuk menulis, mengompilasi, dan mengunggah program ke mikrokontroler. Bahasa pemrograman yang digunakan pada Arduino IDE berbasis C/C++, dengan dukungan *library* dan fungsi khusus yang disederhanakan untuk memudahkan pengembangan sistem tertanam [13].

2.5 Sensor MQ-2 (Asap/Gas)

Sensor MQ-2 merupakan sensor gas dan asap berbasis material semikonduktor (SnO_2) yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas mudah terbakar dan asap, seperti LPG, *propana*, *i-butana*, *methana*, asap rokok, hidrogen, dan uap alkohol. Proses kalibrasi dilakukan dengan cara menentukan nilai resistansi referensi (R_0) pada kondisi udara bersih, kemudian membandingkannya dengan resistansi sensor saat terpapar asap atau gas. Nilai *circuit voltage* dan *heating voltage* sebesar $5\text{V} \pm 0.1$ AC/DC dengan *heater resistance* sebesar $33\Omega \pm 5\%$ pada suhu ruangan [14].

2.6 Sensor DHT22 (Suhu dan Kelembaban)

Berdasarkan *datasheet*, sensor DHT22 memiliki rentang pengukuran suhu dari -40°C hingga 80°C dengan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$, serta rentang pengukuran kelembapan dari 0–100% RH dengan akurasi $\pm 2\text{--}5\%$ RH. Data suhu dan kelembapan dikirimkan melalui komunikasi digital satu jalur (*single-wire digital interface*), sehingga relatif stabil terhadap gangguan noise [15].

2.7 Infrared Flame Sensor

Sensor api adalah sensor yang dapat mendeteksi kebakaran dengan panjang gelombang mulai dari 760nm hingga 1100nm. Status nyala dideteksi menggunakan inframerah sebagai transduser oleh sensor ini [16].

2.8 Sensor PIR (Passive Infrared Sensor)

Sensor PIR adalah sebuah sensor yang menangkap pancaran sinyal inframerah yang dikeluarkan oleh tubuh manusia [17]. Berdasarkan *datasheet* modul PIR yang umum digunakan (misalnya HC-SR501), sensor ini memiliki tegangan kerja 5 V, jangkauan deteksi sekitar 3–7 meter, serta sudut deteksi $\pm 120^\circ$. Waktu tunda (*delay time*) dan sensitivitas sensor dapat diatur melalui potensiometer yang tersedia pada modul. Sensor PIR digunakan pada sistem ini sebagai pendukung deteksi aktivitas atau pergerakan di area terminal bandar udara saat kondisi darurat [18].

2.9 LED (Light Emitting Diode)

LED merupakan komponen semikonduktor yang berfungsi sebagai indikator visual pada sistem elektronik. LED bekerja dengan tegangan maju (*forward voltage*) sekitar 2–3 V dan arus kerja berkisar 10–20 mA, tergantung pada jenis dan warna LED yang digunakan [18].

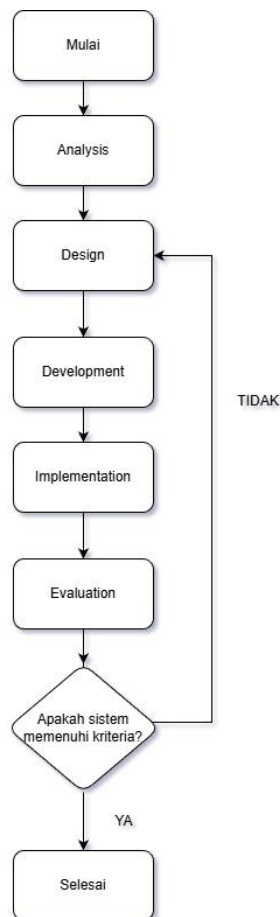
2.10 Buzzer/Sirine

Buzzer adalah suatu alat yang dapat mengubah sinyal listrik menjadi sinyal suara [19]. *Buzzer* Aktif terdiri dari *buzzer piezoelektrik* dengan osilator internal. Modul ini menghasilkan suara sekitar 2,5 kHz saat diaktifkan. *Buzzer* yang digunakan umumnya bertipe *active buzzer* dengan tegangan kerja 3,5 V–5,5 V, sehingga dapat langsung diaktifkan oleh mikrokontroler tanpa memerlukan rangkaian osilator tambahan [20].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *engineering design* dan *eksperimen* untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem *smart alarm multi-sensor* berbasis IoT.

Tahapan penelitian mengacu pada model ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*), yang digunakan untuk memastikan proses pengembangan sistem berjalan secara sistematis dan terstruktur [21].



Gambar 1 Flowchart Penelitian

3.1. Identifikasi Kebutuhan Sistem

Tahap Identifikasi kebutuhan sistem dilakukan untuk menentukan spesifikasi fungsional dan *non-fungsional* dari sistem *smart alarm multi-sensor* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dikembangkan. Proses ini bertujuan memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan deteksi dini kondisi darurat pada lingkungan terminal bandar udara.

3.1.1 Kebutuhan fungsional

Sistem harus mampu:

1. Mendeteksi asap, suhu, api, dan gerakan menggunakan sensor MQ-2, DHT22, *flame*, dan PIR.

2. Memproses data menggunakan ESP32 untuk menentukan kondisi normal atau bahaya.
3. Memberikan alarm lokal melalui *buzzer* dan LED.
4. Mengirim data secara *real-time* ke *ThingsBoard* melalui MQTT.
5. Menampilkan monitoring pada *dashboard*.
6. Mengirim notifikasi otomatis melalui Telegram.
7. Tetap berfungsi saat internet terputus (*fail-safe*).

3.1.2 Kebutuhan Non-Fungsional

Sistem harus memiliki:

1. Waktu respon cepat (<3 detik)
2. Keandalan dan stabilitas tinggi
3. Efisiensi komunikasi data
4. Kemudahan monitoring
5. Skalabilitas untuk pengembangan

3.2 Dasar Perhitungan dan Parameter Kinerja Sistem

3.2.1 Waktu respon sistem

Waktu respon sistem didefinisikan sebagai selang waktu sejak sensor mendeteksi kondisi bahaya hingga sistem memberikan keluaran berupa alarm lokal atau notifikasi. Secara matematis, waktu respon sistem dirumuskan sebagai:

$$T_r = T_2 - T_1 \quad (1)$$

Keterangan :

T_r = Waktu Respon

T_1 = Waktu paparan bahaya pada sensor

T_2 = Waktu Alarm Aktif

3.2.2 Rata-rata waktu respon

Rumus untuk menghitung rata-rata waktu respon sistem dengan menambahkan keseluruhan waktu respon.

$$\overline{T_r} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_n}{n} \quad (2)$$

Keterangan :

$\overline{T_r}$ = rata-rata waktu respon sistem

$T_1, T_2, \dots, T_n$ = waktu respon pada setiap pengujian

n = jumlah pengujian

3.2.3 Pengiriman data

Rumus pengujian pengiriman data ke *ThingsBoard* sebagai berikut:

$$N_t = \frac{Tu}{I} \quad (3)$$

Keterangan :

N_t = Pengiriman data

Tu = Durasi uji 1 menit = 60 detik

I = Interval kirim 0,5 detik ($delay(500)$)

3.2.4 Data yang hilang

Rumus mencari data yang hilang pada pengiriman ke *ThingsBoard* sebagai berikut:

$$N_g = N_t - N_d \quad (4)$$

Keterangan :

N_t = Data terkirim

N_d = Data diterima

N_g = Data hilang

3.2.5 Persentase Keberhasilan Pengiriman Data

Rumus persentase keberhasilan pengiriman data ke *ThingsBoard* sebagai berikut:

$$P = \frac{N_d}{N_t} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan :

P = Persentase Keberhasilan

N_d = Data diterima

N_t = Data terkirim

3.2.6 Persentase Data Hilang

Rumus untuk mencari persentase data hilang pada saat pengiriman ke *ThingsBoard* sebagai berikut:

$$P = \frac{N_g}{N_t} \times 100\% \quad (6)$$

Keterangan :

P = Persentase Keberhasilan

N_g = Data hilang

N_t = Data terkirim

3.2.7 Nilai rata-rata persentase keberhasilan

Rumus nilai rata-rata persentase keberhasilan pada sistem peralatan sebagai berikut:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (7)$$

Keterangan :

$\bar{P}$ = Rata-Rata Persentase Keberhasilan

$\sum_{i=1}^n P_i$ = keseluruhan data persentase

N = Jumlah data

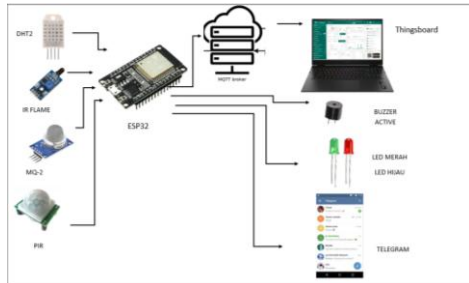
Berdasarkan perhitungan waktu respons rata-rata sistem dalam satuan detik, pengukuran tingkat akurasi sensor berdasarkan nilai *error rate*, serta perhitungan stabilitas koneksi *Internet of Things* yang dinyatakan dalam persentase keberhasilan pengiriman data melalui protokol MQTT. Selain itu, hasil pengujian yang diperoleh dibandingkan dengan standar ideal yang telah ditetapkan pada Tabel 1 untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan.

Tabel 1 Standar Ideal

Parameter	Standar Ideal	Dasar Acuan
Waktu Respon Sistem	< 3 detik	NFPA 72
Akurasi Deteksi Sensor	$\geq 90\%$	IEEE
Keandalan Alarm Lokal	Alarm aktif meskipun jaringan terputus	Prinsip <i>fail-safe</i>
Stabilitas koneksi IoT	$\geq 95\%$ keberhasilan pengiriman data	IEEE

Selanjutnya, Standar ideal yang digunakan bersifat referensial dan digunakan sebagai pembanding kinerja prototipe penelitian, bukan sebagai acuan sertifikasi sistem keselamatan

penerbangan. Adapun desain awal perancangan sistem *smart alarm multi-sensor* dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini



Gambar 2 Desain *smart alarm multi-sensor*

3.3 Simulasi

Simulasi dilakukan untuk menguji kinerja sistem dalam mendeteksi kondisi bahaya dan mengirimkan data secara *real-time*. Pengujian dilakukan melalui beberapa skenario, yaitu deteksi asap, suhu, api, dan gerakan.

Sensor MQ-2 menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap konsentrasi asap, yang ditunjukkan oleh peningkatan signifikan nilai ADC seiring meningkatnya intensitas asap.

Sensor DHT22 menunjukkan respons yang stabil terhadap perubahan suhu, dengan aktivasi alarm ketika melewati ambang batas yang ditentukan.

Flame sensor mampu mendeteksi keberadaan api dengan waktu respon cepat (<2 detik) pada berbagai variasi jarak.

Sensor PIR menunjukkan tingkat deteksi yang konsisten pada jarak tertentu, terutama pada rentang optimal ≤ 2 m.

Pengujian *fail-safe* dilakukan dengan memutus koneksi internet. Hasil menunjukkan bahwa sistem tetap dapat mengaktifkan alarm lokal, sehingga meningkatkan keandalan sistem dalam kondisi darurat.

Tabel 2 Rekapitulasi Hasil Pengujian Sistem

Parameter	Hasil Pengujian	Standar	Kategori
Waktu respon sistem	2–3 detik	< 3 detik	Sangat Baik

Akurasi Sensor	Akurat	Akurat	Akurat
Stabilitas MQTT	96,9%	$\geq 95\%$	Stabil
Fail-safe lokal	Berfungsi	Wajib Aktif	Berhasil

Gambar diatas merupakan tabel Rekapitulasi Hasil Pengujian *Sistem smart alarm multi-sensor*. Dapat disimpulkan bahwa simulasi pengujian berhasil mencapai standar dan kategori yang telah ditentukan.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Risiko kebakaran di terminal bandar udara tidak hanya berasal dari satu parameter, tetapi dapat dipicu oleh asap akibat korsleting listrik, peningkatan suhu ruang, nyala api terbuka, maupun aktivitas pergerakan yang tidak semestinya. Oleh karena itu, diperlukan sistem peringatan dini yang mampu mendeteksi *multi-parameter* bahaya secara simultan dan tetap berfungsi meskipun terjadi gangguan konektivitas jaringan melalui dukungan alarm lokal (*fail-safe*). Parameter awal perancangan sistem dirangkum pada Tabel 3 dan digunakan sebagai acuan pada tahap desain dan implementasi.

Tabel 3 Tabel Parameter Awal Perancangan

Parameter	Nilai/Kriteria Awal
Sensor asap (MQ-2)	≥ 400 ppm
Sensor suhu (DHT22)	$\geq 40^{\circ}\text{C}$
Sensor api (<i>Flame</i>)	Deteksi nyala api ≤ 60 cm
Sensor gerak (PIR)	Jarak deteksi ≤ 2 m
Waktu Respon Sistem	≤ 3 detik

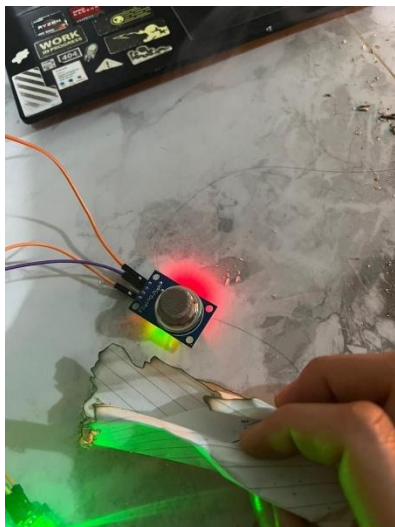
Interval Pengiriman Data	1–2 detik
--------------------------	-----------

Sistem diuji dalam kondisi nyata untuk memastikan seluruh komponen bekerja secara terintegrasi. Pada tahap ini tidak hanya sensor yang diuji, tetapi juga konektivitas IoT, alarm lokal, dan *sistem fail-safe*.

4.1 Simulasi Asap Menggunakan Kertas Dibakar / Lilin yang padam

Kertas dibakar atau lilin yang padam pada jarak tertentu untuk menghasilkan asap guna menguji sensor MQ-2.

Parameter yang diamati dalam pengujian ini meliputi kenaikan nilai gas atau asap yang terdeteksi oleh sensor, waktu respons ESP32 dalam memproses data, aktivasi LED merah dan *buzzer* sebagai indikator peringatan, pengiriman data sensor ke *platform ThingsBoard*, serta pengiriman notifikasi peringatan melalui Telegram.



Gambar 3 Percobaan Sensor MQ-2

Tabel 4 Hasil Pengujian Sensor MQ-2 (Asap/Gas)

Kondisi Uji	Nilai Sensor (AD C)	Status Sistem	Alarm Lokal	Waktu Respon (Detik)
-------------	---------------------	---------------	-------------	----------------------

Tanpa Asap	325	Normal	Tidak Aktif	-
Asap Ringan	525	Bahaya	Aktif	2,28
Asap Pekat	943	Bahaya	Aktif	2,36

4.2 Pengujian Suhu Tinggi untuk Sensor DHT22

Proses pengujian bertujuan untuk memastikan bahwa pembacaan suhu meningkat secara bertahap sesuai perubahan kondisi lingkungan, sistem alarm dapat aktif ketika suhu melampaui batas yang ditetapkan, yaitu $\geq 40^{\circ}\text{C}$, serta data suhu dapat ditampilkan pada *platform ThingsBoard* secara *real-time*.



Gambar 4 Pengujian Pada Sensor DHT22

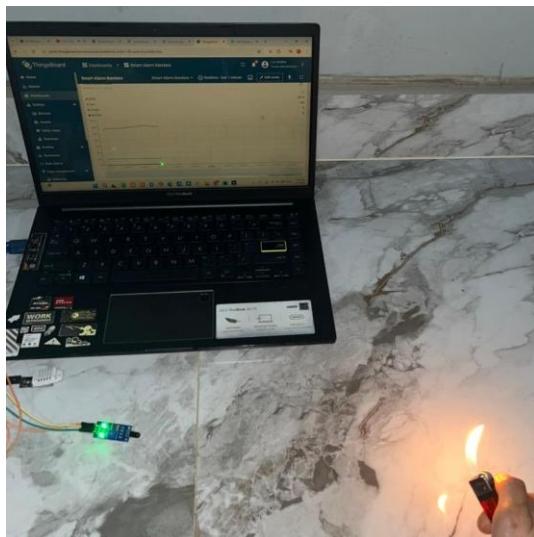
Tabel 5 Hasil Pengujian Sensor DHT22 (Suhu)

Kondisi Uji	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Status Sistem	Alarm Lokal	Waktu Respon (Detik)
Suhu Normal	31°C	Normal	Tidak Aktif	-
Suhu Meningkat	37°C	Normal	Tidak Aktif	-
Suhu Tinggi	40°C	Bahaya	Aktif	2,63

Suhu				
Sangat Tinggi	48°C	Bahaya	Aktif	2,36

4.3 Pengujian *Flame Sensor* Menggunakan Api Kecil

Pengujian *flame sensor* dilakukan dengan menggunakan sumber api kecil, seperti lilin, untuk menguji kemampuan sensor dalam mendeteksi sinar inframerah. Ketika sensor berhasil mendeteksi adanya api, nilai keluaran digital akan mengalami perubahan dari kondisi *LOW* ke *HIGH* atau sebaliknya sesuai dengan karakteristik sensor.



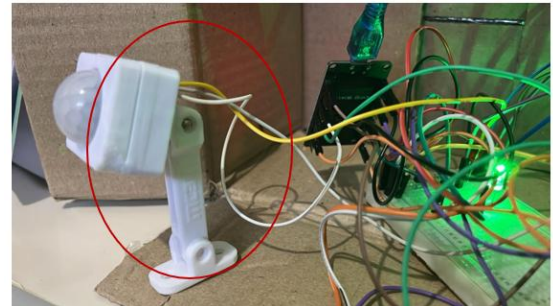
Gambar 5 Percobaan *Flame Sensor*

Tabel 6 Hasil Pengujian *Infrared Flame Sensor*

Kondisi Uji	Jarak Api (cm)	Deteksi Api	Alarm Lokal	Nilai di <i>ThingsBoard</i>	Waktu Respon (detik)
Tanpa Api	-	Tidak Terdeteksi	Tidak Aktif	0	-
Api Kecil	60	Terdeteksi	Aktif	1	1,57
Api Sedang	30	Terdeteksi	Aktif	1	1,12
Api Besar	15	Terdeteksi	Aktif	1	1,06

4.4 Pengujian Gerakan untuk Sensor PIR

Pengujian gerakan pada sensor PIR dilakukan dengan menggerakkan objek atau manusia di depan sensor pada jarak antara 1 hingga 5 meter.



Gambar 6 Percobaan sensor PIR

Tabel 7 Hasil Pengujian Sensor PIR (Gerakan)

Kondisi Uji	Jarak Gerakan (m)	Deteksi Gerakan	Status Sistem	Nilai di <i>ThingsBoard</i>	Waktu Respon (detik)
Tidak ada gerakan	-	Tidak Terdeteksi	Normal	0	-
Gerakan normal	2	Terdeteksi	Bahaya	1	2,75
Gerakan cepat	1	Terdeteksi	Bahaya	1	1,32

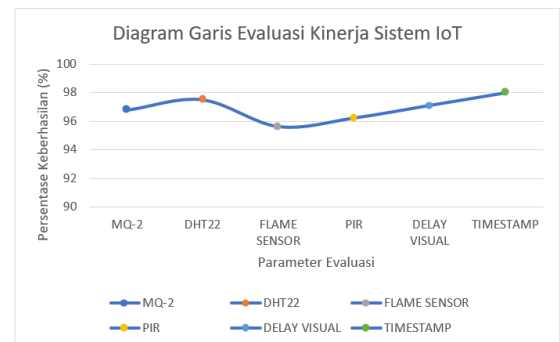
Penilaian kinerja prototipe sistem berdasarkan indikator yang telah ditetapkan, meliputi waktu respon sistem, akurasi deteksi sensor, keandalan alarm lokal, dan stabilitas koneksi IoT. Hasil evaluasi disajikan dalam bentuk tabel 8 untuk memudahkan analisis dan penarikan kesimpulan terhadap kelayakan sistem secara keseluruhan.

Tabel 8 Tabel Evaluasi Kinerja Sistem 9

No.	Aspek Evaluasi	Parameter	Hasil Pengujian	Standar /Kriteria	Hasil Evaluasi
1	Kinerja Sensor Gas	Kontinuitas data MQ-2	96,8 %	$\geq 95 \%$	Memenuhi standar
2	Kinerja Sensor Suhu	Kontinuitas data DHT22	97,5 %	$\geq 95 \%$	Memenuhi standar
3	Deteksi Kebakaran	Deteksi api (<i>Flame Sensor</i>)	95,6 %	$\geq 95 \%$	Memenuhi standar
4	Deteksi Keamanan	Deteksi gerakan (PIR)	96,2 %	$\geq 95 \%$	Memenuhi standar
5	Stabilitas IoT	Keterlambatan data (<i>delay visual</i>)	97,1 %	$\geq 95 \%$	Memenuhi standar
6	Sinkronisasi Sistem	Kesesuaian <i>timestamp</i>	98,0 %	$\geq 95 \%$	Memenuhi standar
7	Kinerja Sistem Keseluruhan	Rata-rata keberhasilan sistem	96,9 %	$\geq 95 \%$	Sangat baik / Layak
8	Waktu Respon Sistem	Respon alarm lokal & dashboard	± 1 detik	≤ 2 detik	Memenuhi standar

Keandalan Sistem Alarm lokal saat koneksi terputus (*fail-safe*) Aktif Alarm Tetap Berbunyi Memenuhi standar

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian kuantitatif sistem terhadap kriteria kinerja yang ditetapkan. Sistem dinyatakan memenuhi standar apabila nilai keberhasilan pengiriman data berada di atas 95% dan waktu respon sistem kurang dari atau sama dengan 2 detik. Berdasarkan pada tabel diatas, dibawah merupakan tampilan grafik evaluasi kinerja sistem IoT.



Gambar 7 Diagram Garis Evaluasi Kinerja Sistem IoT

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya [9][12], sistem yang dikembangkan menunjukkan peningkatan pada aspek integrasi multi-sensor dan keandalan sistem, terutama dengan adanya mekanisme fail-safe yang tidak selalu tersedia pada penelitian terdahulu.

Sistem memenuhi standar karena penggunaan protokol MQTT yang ringan dan efisien dalam pengiriman data, serta pemrosesan lokal pada ESP32 yang memungkinkan respon cepat tanpa ketergantungan penuh pada jaringan internet.

4.5 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu pengujian sistem masih dilakukan pada lingkungan simulasi dan belum

diimplementasikan secara langsung pada kondisi operasional terminal bandar udara yang sesungguhnya. Selain itu, pengujian belum mempertimbangkan gangguan eksternal seperti interferensi sinyal, variasi suhu ekstrem, dan skala implementasi yang lebih luas. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk pengujian lapangan secara *real-time* dalam skenario operasional yang lebih kompleks.

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem *smart alarm multi-sensor* berbasis ESP32 berhasil dirancang dan diimplementasikan sebagai solusi deteksi dini kebakaran berbasis IoT pada lingkungan terminal bandar udara. Sistem mampu mengintegrasikan berbagai sensor dalam satu *platform* monitoring *real-time* yang andal serta didukung mekanisme *fail-safe* untuk menjaga operasional tetap berjalan saat terjadi gangguan jaringan.

Secara keseluruhan, sistem menunjukkan potensi sebagai solusi monitoring keselamatan berbasis IoT yang efektif, stabil, dan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk implementasi pada lingkungan operasional bandar udara.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Manajemen Transportasi Udara and S. Yogyakarta, "Tingkat Pemahaman dan Kendala Penumpang Menggunakan Mesin Self Check-In di Bandara Adi Soemarmo," vol. 2, no. 9, pp. 1205–1212, 2024.
- [2] H. S. International, "Hazrat Shahjalal International Airport expansion, Dhaka," Airport Technology, pp. 1–17, 1981. [Online]. Available: <https://www.airport-technology.com/>
- [3] *The Economic Times*, "Turkish Airlines flight makes emergency landing at Kolkata airport due to a possible engine fire," Feb. 2026. [Online]. Available: <https://m.economictimes.com>
- [4] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 14 — Aerodromes, Volume I: Aerodrome design and operations*, 8th ed. Montreal, QC, Canada: ICAO, 2018.
- [5] J. Pedagogos *et al.*, "Sistem alarm kebakaran berbasis Arduino menggunakan flame detector dan sensor MQ-2," *Gema Teknologi*, vol. 3, no. 2, 2021, doi: 10.33627/gg.v3i2.509.
- [6] M. R. Fasya *et al.*, "Implementasi sistem peringatan dini kebakaran rumah berbasis Internet of Things (IoT)," *Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 369–378, 2024, doi: 10.70248/jcsit.v1i4.1286.
- [7] Z. Zulkifli, M. Muhallim, and H. Hasnahwati, "Pengembangan sistem alarm dan pemadam kebakaran otomatis menggunakan Internet of Things," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4774.
- [8] M. F. Azhar and L. Nurpulaela, "Implementasi penggunaan ESP32 sebagai IoT pada project smart charger di PT Pasifik Satelit Nusantara Bekasi," vol. 8, no. 4, pp. 7248–7253, 2024.
- [9] B. Eryawan, A. E. Jayati, and S. Heranurweni, "Rancang bangun prototype smart home dengan konsep Internet of Things (IoT) menggunakan Raspberry Pi berbasis web," *Elektrika*, vol. 11, no. 2, 2019, doi: 10.26623/elektrika.v11i2.1691.
- [10] S. Sicari, A. Rizzardi, L. A. Grieco, and A. Coen-Porisini, "Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead," *Computer Networks*, vol. 76, pp. 146–164, 2015, doi: 10.1016/j.comnet.2014.11.008.
- [11] ISO/IEC, *ISO/IEC 30141: Internet of Things (IoT) — Reference architecture*, Geneva, Switzerland, 2024.
- [12] ThingsBoard, "What is ThingsBoard Cloud?," 2024. [Online]. Available: <https://thingsboard.io/docs/>
- [13] Arduino, "What is Arduino? Why Arduino?," 2022. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>
- [14] Hanwei Electronics Co., *MQ-2 gas sensor datasheet*. [Online]. Available: <http://www.hwsensor.com>
- [15] Aosong Electronics, *Digital-output relative humidity & temperature sensor DHT22 datasheet*, 2015. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/>
- [16] A. Ramadhan, J. Jamaaluddin, and S. D.

- Ayuni, “Alat pendeteksi dini kebakaran dan pemadam otomatis dilengkapi dengan video streaming berbasis Internet of Things,” *SinarFe7*, vol. 4, no. 1, pp. 645–649, 2021.
- [17] H. Tempingbuka *et al.*, “Rancang bangun sistem keamanan rumah menggunakan sensor PIR (Passive Infrared) dan SMS sebagai notifikasi,” *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 4, no. 6, pp. 10–15, 2015. [Online]. Available: <https://ejournal.unsrat.ac.id>
- [18] Epitran.IT, *HC-SR501 passive infrared (PIR) motion sensor datasheet*, 2020. [Online]. Available: <https://www.epitran.it>
- [19] A. Septryanti *et al.*, “Sistem pendeteksi banjir dengan sensor ultrasonic berbasis mikrokontroler di Kota Pangkalpinang,” *Jurnal Transformasi*, vol. 20, no. 1, pp. 22–31, 2022, doi: 10.26623/transformatika.v20i1.3672.
- [20] R. Rittenberry, “Hands-on technology,” *Occupational Health & Safety*, vol. 74, no. 2, p. 24, 2005.
- [21] Sugiyono, *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Bandung, Indonesia: Alfabeta, 2016.