Vol. 10, No. 2, Oktober 2025, Page. 599-606
https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/instek
p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

Platform *Internet Of Things Multi-Agent Robot System* Berbasis Kecerdasan Buatan Untuk Pengawasan *Data Center*

Nur Afif[1], Mustikasari[*2], Asep Indra Syahyadi[3], Andi Khalil Gibran[4]
[1,2,3,4]Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar, Indonesia

Email: [1]nurafif@uin-alauddin.ac.id, [2]mustikasari@uin-alauddin.ac.id, [3]asepindrasyahyadi@uin-alauddin.ac.id, [4]60200121010@uin-alauddin.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan Multi-Agent Robot System (MARS) berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan pengawasan lingkungan pada data center. Sistem ini memanfaatkan agen robot bergerak yang dilengkapi dengan NodeMCU ESP32, Raspberry Pi, serta sensor suhu, gas, dan api guna mengatasi keterbatasan sistem pengawasan statis konvensional, khususnya pada penempatan sensor yang tetap dan cakupan area yang terbatas. Metodologi penelitian mencakup perancangan arsitektur multi-agen kolaboratif, integrasi komunikasi berbasis IoT, serta pengembangan algoritma navigasi dengan kemampuan penghindaran rintangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agen navigasi mencapai tingkat keberhasilan sebesar 80% dalam melakukan patroli area pemantauan, sementara agen deteksi suhu, gas, dan api menunjukkan tingkat keberhasilan fungsional sebesar 100%. Sistem mencatatkan waktu respons rata-rata sebesar 2,5 detik dalam pengiriman notifikasi anomali. Analisis kinerja sensor menunjukkan deviasi rata-rata pembacaan suhu sebesar 0,5°C serta variasi pembacaan relatif setara ±2 ppm pada skala internal sensor gas, yang mengindikasikan kemampuan sistem sebagai peringatan dini yang andal, bukan sebagai alat kuantifikasi gas absolut. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan MARS-IoT yang diusulkan mampu memberikan solusi pengawasan real-time yang lebih fleksibel, akurat, dan responsif dibandingkan dengan sistem pengawasan data center konvensional.

Kata kunci: IoT, Multi-Agent Robot System, Data Center, Monitoring, Sensor.

Abstract

This study proposes an Internet of Things (IoT)-based Multi-Agent Robot System (MARS) to enhance environmental monitoring in data centers. The system employs mobile robot agents equipped with NodeMCU ESP32, Raspberry Pi, and temperature, gas, and fire sensors to address the limitations of conventional static monitoring systems, particularly fixed sensor placement and limited spatial coverage. The research methodology involves the design of a collaborative multi-agent architecture, the integration of IoT-based communication, and the development of an obstacle-avoidance navigation algorithm. Experimental results indicate that the navigation agents achieve an 80% success rate in patrolling the monitored area, while the temperature, gas, and fire detection agents demonstrate 100% functional reliability. The system records an average response time of 2.5 seconds for anomaly notification delivery. Sensor performance analysis shows an average temperature deviation of 0.5°C and relative reading variations equivalent to ±2 ppm on the internal scale of the gas sensor, indicating reliable early warning capability rather than absolute gas quantification. Overall, these results demonstrate that the proposed MARS-IoT approach provides a more flexible, accurate, and responsive real-time monitoring solution compared to conventional data center monitoring systems.

Keywords: *IoT, Multi-Agent Robot System, Data Center, Monitoring, Sensors.*

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. PENDAHULUAN

Pusat data merupakan infrastruktur kritis yang mendukung operasional berbagai layanan teknologi informasi. Keandalan pusat data sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembaban, serta keamanan fisik terhadap potensi intrusi atau gangguan operasional. Peningkatan suhu di luar ambang batas atau keterlambatan deteksi aktivitas tidak sah yang seringkali menjadi kelemahan beberapa aplikasi monitoring[1] dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem hingga kegagalan layanan. Risiko korsleting listrik di ruang server misalnya, dapat menimbulkan kerugian yang besar, baik secara material maupun moral, jika tidak segera ditangani [2]. Di era transformasi digital, data

center telah menjadi infrastruktur kritikal yang menyimpan aset informasi dan perangkat keras vital bagi keberlangsungan organisasi. Namun, pengelolaan data center menghadapi tantangan besar terkait stabilitas lingkungan, terutama suhu ekstrem dan risiko kebakaran[4,8]. Pengawasan konvensional yang mengandalkan perangkat statis seperti CCTV atau sensor[12] tetap sering kali memiliki keterbatasan dalam menjangkau area "titik buta" (blind spots). Sebagaimana dikemukakan dalam[5, 7], implementasi IoT statis di lokasi yang tidak efektif menyebabkan pemantauan menjadi kurang optimal dan tidak mampu memberikan respons cepat terhadap anomali yang terjadi di area tersembunyi.

Permasalahan efektivitas dalam pengawasan juga disoroti[3,6,11], sistem monitoring tradisional juga sering kali hanya terbatas pada pemantauan lokal dan kurang memiliki fleksibilitas untuk bergerak menuju sumber gangguan secara otomatis. Hal ini menciptakan celah keamanan karena deteksi dini menjadi terhambat. Selain itu, integrasi teknologi dalam perspektif yang lebih luas tidak hanya mencakup aspek teknis, tetapi juga nilai kemanfaatan. Dalam konteks ini, pemanfaatan teknologi untuk menjaga keamanan aset sejalan dengan prinsip ḥifẓ al-māl (menjaga harta)[16], di mana teknologi AI dan robotika digunakan untuk mencegah kerusakan sebelum terjadi, selaras dengan nilai-nilai integrasi keilmuan yang dikembangkan di lingkungan.Untuk mengatasi kelemahan sistem statis tersebut, konsep Multi-Agent Robot System (MARS) menawarkan solusi melalui kolaborasi antar agen robot cerdas. Berbeda dengan robot tunggal, MARS memungkinkan pembagian tugas yang lebih spesifik dan peningkatan area cakupan secara dinamis. Dalam penelitian ini, kecerdasan buatan diimplementasikan dalam bentuk agen robot otonom berbasis aturan yang mampu mengambil keputusan navigasi dengan algoritma *rule-based reactive navigation* berbasis fuzzy threshold dan deteksi anomali diformulasikan sebagai fungsi logika Boolean dengan threshold yang ditetapkan secara mandiri oleh sistem berdasarkan karakteristik sensor dan kebutuhan operasional data center.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem multi-agen saja telah memiliki keunggulan dalam penyelesaian tugas yang kompleks melalui koordinasi yang sinkron, meskipun lemah dalam fleksibilitas. Oleh karena itu, penerapan MARS yang terintegrasi penuh dengan platform IoT untuk pengawasan spesifik suhu[10] dan api[9] di data center masih memerlukan pengembangan lebih lanjut, terutama dalam hal kecepatan respons notifikasi serta fleksibilitas dan keberhasilan fungsional navigasi di ruang terbatas. Selain daripada itu, prediksi pola suhu, gas, dan api dapat memberikan wawasan berharga untuk perencanaan jangka panjang, pemeliharaan proaktif, dan mitigasi risiko di pusat data[14].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan platform IoT berbasis MARS yang menggunakan NodeMCU ESP32[15] dan Raspberry Pi sebagai otak kendali utama. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi variabel suhu, gas, dan api secara real-time serta melakukan tindakan navigasi cerdas untuk menghindari rintangan. Dengan mengintegrasikan algoritma kecerdasan buatan pada agen robot, diharapkan sistem ini dapat memberikan tingkat keberhasilan fungsional deteksi hingga 100% dan waktu respons di bawah 3 detik, sehingga mampu memitigasi risiko kerusakan perangkat pada data center secara lebih efektif dibandingkan sistem konvensional.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Formulasi Deteksi Dini Anomali

Permasalahan utama dalam pengawasan data center adalah deteksi dini anomali lingkungan pada area yang tidak terjangkau oleh sensor statis. Kondisi abnormal (A) ditentukan berdasarkan variabel suhu (T), konsentrasi gas (G) dan keberadaan api (F). Secara matematis, status keamanan sistem dapat diformulasikan sebagai fungsi logika Boolean sebagai berikut:

$$A = (f(T) \vee f(G) \vee f(F)) \qquad (1)$$

Dimana fungsi ambang batas (threshold) ditetapkan sebagai berikut:

$f(T)=1$, jika $T > 30^{\circ}C$ (*Waspada*) atau $T > 40^{\circ}C$(*Bahaya*).

$f(G)=1$, jika $G > 100\ PPM$ Deteksi gas bocor

$f(F)=1$, jika sensor flame mendeteksi radiasi inframerah api

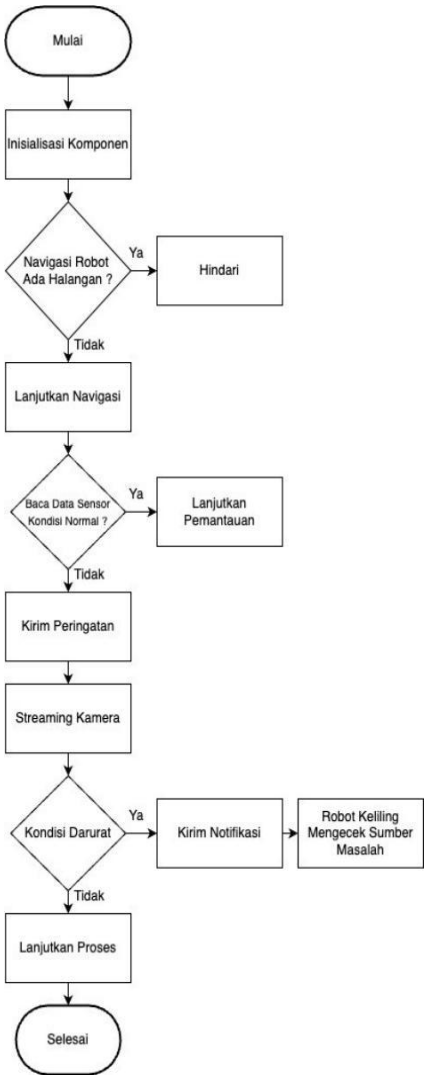
Sistem akan mengirimkan notifikasi ke platform IoT jika $A=1$.

2.2. Arsitektur Multi-Agent Robot System (MARS)

Vol. 10, No. 2, Oktober 2025, Page. 599-606
https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/instek
p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

Metode yang diusulkan menggunakan pendekatan kolaboratif antar agen robot untuk mengatasi keterbatasan blind spot yang dikritisi. Sistem ini terdiri dari dua komponen utama:

- Hardware Layer: Menggunakan NodeMCU ESP32 sebagai mikrokontroler utama untuk pemrosesan data sensor (DHT11, MQ-2, dan Flame Sensor) serta Raspberry Pi untuk kebutuhan monitoring visual dan streaming.
- Communication Layer: Menggunakan protokol Wi-Fi untuk transmisi data real-time dari robot ke database dan aplikasi pengguna.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Pengawasan Pusat Data Berbasis IoT

2.3. Lingkungan dan Skenario Pengujian

Pengujian sistem Multi-Agent Robot System (MARS) dilakukan pada lingkungan terkontrol yang dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasional data center. Area pengujian berupa ruangan tertutup dengan luas ±20 m² (±4 × 5 m) yang disimulasikan sebagai koridor rak server. Jalur pergerakan robot ditetapkan secara konsisten pada setiap pengujian, dengan lintasan lurus dan berbelok yang ditandai menggunakan kain berwarna putih sebagai penanda visual lintasan, tanpa digunakan sebagai masukan sensor navigasi.

Variabel pengujian dikendalikan untuk memastikan konsistensi hasil. Penghalang statis yang menyerupai rak server ditempatkan dengan tinggi 40–60 cm, sementara jarak awal robot terhadap penghalang divariasikan pada 20 cm, 30 cm, dan 50 cm untuk mengevaluasi respons sensor ultrasonik dalam skenario penghindaran rintangan. Kondisi pencahayaan ruangan dijaga pada kisaran 300–400 lux untuk meminimalkan interferensi terhadap sensor flame.

Vol. 10, No. 2, Oktober 2025, Page. 599-606
https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/instek
p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

Pengujian sensor lingkungan dilakukan pada suhu ruangan 26–32 °C dengan penggunaan asap buatan berintensitas rendah hingga sedang sebagai pemicu sensor gas. Permukaan lantai dijaga rata dan kering guna mengurangi pengaruh gesekan terhadap stabilitas pergerakan robot. Seluruh konfigurasi lingkungan dan lintasan dipertahankan tetap pada setiap pengulangan pengujian untuk memastikan keterulangan (reproducibility) dan keandalan evaluasi kinerja sistem.

2.4. Algoritma Navigasi dan Deteksi (Obstacle Avoidance)

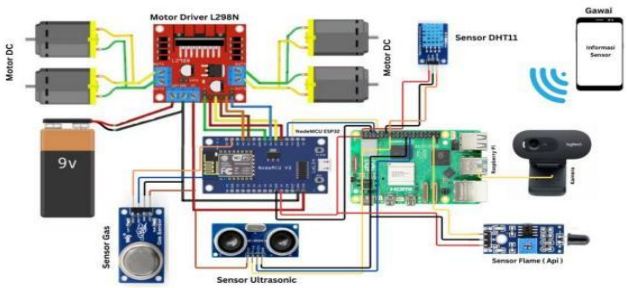
Algoritma penghindar rintangan menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk mendukung mobilitas agen dalam data center, diterapkan . Logika keputusan navigasi (V) dirumuskan sebagai:

$$V_{out} = \frac{\sum \mu_i(D_{obs}) \cdot v_i}{\sum \mu_i(D_{obs})} \qquad (2)$$

Keterangan:
μ_i = derajat keanggotaan fuzzy
v_i = aksi navigasi (berhenti, lambat, maju)
D_{obs} adalah jarak objek yang terdeteksi di depan robot.

Logika keputusan navigasi menggunakan pendekatan fuzzy threshold. Nilai jarak objek hasil pembacaan sensor ultrasonik dipetakan ke dalam himpunan fuzzy Near, Medium, dan Far. Keputusan navigasi ditentukan melalui aturan inferensi fuzzy yang memungkinkan transisi gerak robot berlangsung lebih halus dan adaptif terhadap variasi jarak rintangan, sehingga mengurangi perubahan gerak yang mendadak pada lingkungan data center. Algoritma *rule-based reactive navigation* berbasis fuzzy threshold ini memastikan robot dapat melakukan patroli secara mandiri tanpa menabrak infrastruktur rak server.

2.5. Prosedur Penelitian



Gambar 2. Skema Rangkaian Perangkat Keras Sistem

Penelitian ini memposisikan diri sebagai pengembangan dari konsep Multi-Agent Robot System (MARS), dengan menambahkan integrasi IoT[13] secara *real-time* oleh agen robot dengan sistem navigasi cerdas. Prosedur penelitian mengikuti tahapan berikut:

Gambar 2. menunjukkan skema integrasi perangkat keras sistem Multi-Agent Robot System (MARS) yang digunakan untuk navigasi otonom dan pemantauan lingkungan pada data center. Sistem ini menggabungkan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, motor DC dengan driver L298N sebagai aktuator pergerakan, serta sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mendeteksi rintangan di jalur robot. Selain itu, sensor lingkungan seperti sensor suhu, gas, dan api digunakan untuk memantau kondisi operasional data center secara real-time.

Skema ini menggambarkan keterpaduan antara fungsi mobilitas robot, pengambilan keputusan navigasi, dan pemantauan lingkungan dalam satu sistem terintegrasi. Dengan dukungan komunikasi nirkabel dan kamera, setiap agen robot tidak hanya mampu bergerak secara mandiri tanpa menabrak infrastruktur, tetapi juga berperan sebagai agen pengawasan aktif yang dapat mendeteksi dan melaporkan kondisi abnormal secara cepat dan berkelanjutan.

a) Analisis Kebutuhan: Mengidentifikasi parameter kritikal pada *data center*.

b) Perancangan Sistem: Mendesain skema rangkaian perangkat keras sistem sebagai alur koordinasi antar agen.

c) Implementasi: Perakitan prototipe robot menggunakan sasis akrilik dan pengkodean pada Arduino IDE (untuk ESP32) serta Python (untuk Raspberry Pi).

d) Pengujian (V-Model): Melakukan validasi fungsionalitas setiap sensor dan pengujian performa jaringan (latensi notifikasi).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menguraikan data yang diperoleh dari serangkaian pengujian terhadap prototipe *Multi-Agent Robot System* (MARS) yang telah diimplementasikan. Pengujian dibagi menjadi tiga tahap utama: fungsionalitas komponen, kinerja sistem (latensi), dan keberhasilan fungsional sensor.

3.1. Hasil Pengujian Sensor dan Sistem IoT

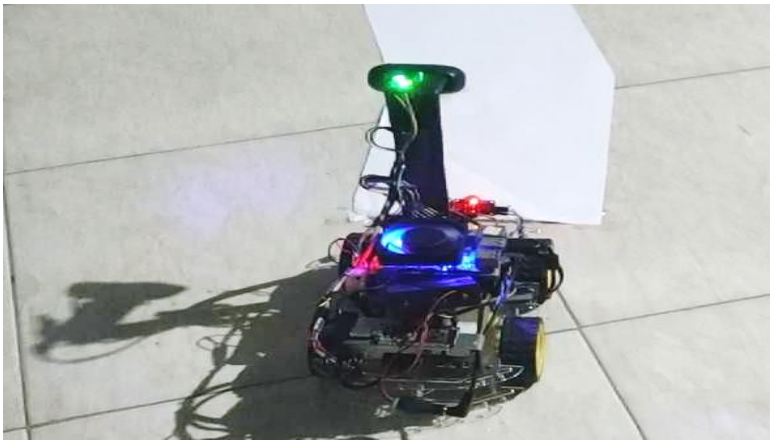
Pengujian dilakukan menggunakan metode Black-Box untuk memastikan seluruh modul perangkat keras dan perangkat lunak bekerja sesuai dengan rancangan sistem. Setiap agen diuji sebanyak 5 siklus operasional guna mengevaluasi konsistensi dan keandalan kinerjanya.

Agen Navigasi diuji pada replika lorong data center untuk menilai kemampuan penghindaran rintangan sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agen navigasi berhasil menghindari rintangan pada 4 dari 5 percobaan (80%). Kegagalan pada siklus ke-3 disebabkan oleh gangguan koneksi kabel jumper akibat getaran motor, yang menyebabkan sensor ultrasonik kehilangan data sesaat.

Agen Sensor mencakup pengujian sensor suhu, sensor api, dan sensor gas MQ-2. Sensor gas MQ-2 memiliki rentang sensitivitas 200–10.000 ppm untuk gas mudah terbakar dan dikonfigurasikan dengan ambang batas konsentrasi ≥ 200 ppm sebagai batas peringatan dini (early warning). Ketika nilai ambang batas terlampaui, sistem secara otomatis memicu alarm lokal dan mengirimkan data peringatan ke gateway IoT.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sensor berhasil beroperasi dengan tingkat keberhasilan 100% pada seluruh siklus pengujian. Sensor MQ-2 menunjukkan waktu respons yang cepat terhadap perubahan konsentrasi gas di lingkungan pengujian. Meskipun demikian, sensor ini tidak mampu membedakan jenis gas secara spesifik, melainkan hanya memberikan nilai keluaran berdasarkan total konsentrasi gas mudah terbakar yang terdeteksi di sekitarnya. Oleh karena itu, sensor difungsikan sebagai sistem peringatan dini, bukan sebagai alat identifikasi gas.

Sebelum proses pengambilan data, sensor gas MQ-2 menjalani proses kalibrasi setelah warm-up selama kurang lebih 20 detik pada kondisi udara normal untuk memperoleh pembacaan yang stabil. Prosedur ini dilakukan guna memastikan konsistensi hasil pengujian dan mengurangi fluktuasi pembacaan pada awal pengoperasian sensor.



Gambar 3. Agen Navigasi

Deteksi suhu, gas, dan api mencapai tingkat keberhasilan 100%. Agen berhasil memicu alarm lokal dan mengirimkan sinyal ke gateway setiap kali parameter ambang batas terpenuhi.

Tabel 1. Pengujian Fungsionalitas Agen

No	Agen	Parameter Uji	Status	Persentase
1	Navigasi	Penghindar Rintangan	Berhasil (4/5)	80%
2	Deteksi	Pembacaan Sensor Suhu	Berhasil (5/5)	100%
3	Deteksi	Sensor gas MQ-2 (≥ 200 ppm)	Berhasil (5/5)	100%
4	Deteksi	Pembacaan Sensor Api	Berhasil (5/5)	100%
5	Gateway	Transmisi Data IoT	Berhasil (5/5)	100%

Kinerja komunikasi IoT ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kinerja Sistem IoT

Parameter	**Nilai**
Latency komunikasi	2,1–2,9 detik
Packet loss	< 1,5%
Waktu respons total	< 3 detik
Uptime sistem	99%

Salah satu parameter yang juga krusial adalah kecepatan sistem dalam memberikan notifikasi. Pengujian dilakukan dengan memicu sensor secara tiba-tiba dan menghitung waktu hingga notifikasi muncul di *smartphone* pengguna.

Data menunjukkan bahwa waktu respons rata-rata adalah 2,5 detik. Latensi ini dipengaruhi oleh kestabilan sinyal Wi-Fi di area penelitian. Meskipun terdapat variasi waktu antara 2,1 hingga 2,9 detik, durasi ini masih jauh di bawah standar kritis kerusakan perangkat keras *data center* yang biasanya memiliki toleransi panas berbasis RTO (ISO 27001/20000) dalam hitungan 1–5 menit untuk sistem monitoring.

3.2. Validasi Keberhasilan Fungsional dan Presisi Sensor

Validasi keberhasilan fungsional dan presisi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor pada robot terhadap alat ukur standar yang telah dikalibrasi. Sensor suhu divalidasi menggunakan termometer digital industri, sedangkan sensor gas dan sensor flame divalidasi melalui pengujian kondisi lingkungan terkontrol untuk memastikan respons sensor sesuai dengan karakteristik fungsionalnya.

- Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor DHT11 memiliki rata-rata deviasi sebesar ±0,5°C dibandingkan dengan alat ukur standar. Sebagai contoh, ketika termometer digital menunjukkan suhu 28,0°C, sensor DHT11 pada robot membaca nilai 27,5°C hingga 28,5°C. Deviasi ini masih berada dalam batas toleransi spesifikasi sensor dan dapat diterima untuk aplikasi pemantauan lingkungan.
- Sensor Gas (MQ-2) menunjukkan perubahan pembacaan rata-rata setara ±2 ppm pada skala internal sensor terhadap nilai referensi hasil kalibrasi. Sensor ini terbukti memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap asap rokok dan uap panas, yang disimulasikan sebagai gas buang akibat hubungan arus pendek. Respons sensor terjadi dengan cepat ketika konsentrasi gas meningkat, menunjukkan karakteristik yang sesuai untuk fungsi peringatan dini.
- Sensor Flame divalidasi dengan membandingkan respons sensor terhadap keberadaan sumber api terbuka pada jarak dan intensitas cahaya yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor flame mampu mendeteksi keberadaan api secara konsisten dengan waktu respons kurang dari 1 detik dan tanpa terjadinya pembacaan palsu pada kondisi tanpa api. Presisi sensor ditunjukkan oleh kemampuan mendeteksi sumber api yang sama secara berulang dengan hasil yang konsisten, sehingga sensor dinilai andal untuk mendukung fungsi deteksi dini kebakaran.

Secara keseluruhan, hasil validasi menunjukkan bahwa sensor suhu, gas, dan flame yang digunakan pada sistem robot memiliki tingkat keberhasilan fungsional dan presisi yang memadai untuk aplikasi pemantauan lingkungan dan deteksi dini potensi bahaya pada area kritis seperti ruang data center.

p-ISSN: 2541-1179
e-ISSN: 2581-1711
JURNAL INSTEK
INFORMATIKA SAINS DAN TEKNOLOGI

3.3. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan agen robot bergerak mampu memberikan cakupan pengawasan yang lebih luas dibandingkan dengan sensor statis. Jika sensor statis hanya beroperasi pada satu titik tetap, agen robot dapat berpatroli secara aktif ke area-area kritis seperti sudut rak server yang memiliki potensi akumulasi panas tinggi dan tidak terjangkau oleh sistem CCTV. Hal ini memungkinkan deteksi kondisi lingkungan dilakukan secara lebih menyeluruh dan kontekstual.

Tingkat keberhasilan navigasi sebesar 80% menunjukkan bahwa algoritma obstacle avoidance yang diterapkan telah cukup andal untuk lingkungan statis seperti data center, di mana tata letak relatif tidak berubah. Kegagalan yang terjadi lebih disebabkan oleh faktor mekanis, khususnya gangguan koneksi kabel sensor akibat getaran motor, bukan oleh kelemahan algoritma navigasi itu sendiri. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya perlu difokuskan pada peningkatan desain mekanika dan manajemen kabel agar sistem dapat beroperasi secara lebih stabil dalam jangka panjang. Dari sisi sinkronisasi data dan perlindungan aset, hasil validasi sensor menunjukkan tingkat keberhasilan fungsional yang tinggi, dengan deviasi rata-rata sensor suhu sebesar ±0,5°C dan sensor gas MQ-2 sebesar ±2 ppm. Sensor gas MQ-2 dikonfigurasikan pada ambang batas 200 ppm sebagai peringatan dini terhadap keberadaan gas mudah terbakar. Meskipun sensor ini tidak mampu membedakan jenis gas secara spesifik dan hanya memberikan nilai berdasarkan total konsentrasi gas mudah terbakar, karakteristik ini tetap memadai untuk fungsi early warning system pada lingkungan data center. Kombinasi sensor suhu, gas, dan flame yang akurat secara signifikan mengurangi potensi false alarm, sehingga tidak mengganggu operasional pusat data.

Keberadaan sensor flame memperkuat sistem deteksi dini kebakaran dengan kemampuan mendeteksi nyala api secara cepat dan konsisten. Waktu respons sistem secara keseluruhan yang mencapai rata-rata 2,5 detik memberikan margin waktu yang sangat luas bagi teknisi untuk melakukan tindakan preventif, seperti pengecekan sistem pendingin atau pemadaman manual. Dalam konteks manajemen aset, kondisi ini secara langsung mendukung nilai ḥifẓ al-māl, di mana investasi perangkat keras bernilai tinggi pada data center dilindungi secara proaktif melalui pemanfaatan teknologi robotika dan IoT.

Meskipun demikian, sistem ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian menunjukkan bahwa pada suhu ekstrem di atas 50°C, komponen plastik pada sasis robot mulai menunjukkan tanda-tanda degradasi. Temuan ini mengindikasikan perlunya penggunaan material yang lebih tahan panas, seperti aluminium atau polimer tahan api, pada pengembangan robot generasi berikutnya. Selain itu, ketergantungan sistem pada koneksi Wi-Fi menuntut ketersediaan infrastruktur jaringan lokal yang andal dan memiliki redundansi, agar sistem pemantauan tetap berfungsi optimal saat terjadi gangguan jaringan.

Hasil pengujian dan pembahasan menunjukkan bahwa integrasi sensor IoT pada agen robot bergerak mampu memberikan solusi pengawasan real-time yang lebih fleksibel, akurat, dan responsif dibandingkan dengan sistem pengawasan data center konvensional. Pendekatan ini tidak hanya memberikan cakupan pengukuran yang lebih luas, tetapi juga memungkinkan analisis lingkungan yang lebih adaptif dan responsif dibandingkan dengan sistem pengawasan statis. Dengan pengembangan lebih lanjut pada aspek mekanika, material, dan jaringan, sistem ini memiliki potensi besar untuk diimplementasikan sebagai solusi pengawasan cerdas pada infrastruktur kritis.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, dapat disimpulkan bahwa:

1. Platform IoT berbasis Multi-Agent Robot System (MARS) berhasil diimplementasikan dan berfungsi sesuai dengan rancangan. Seluruh subsistem sensor lingkungan, yang meliputi sensor suhu (DHT11), sensor gas MQ-2 dengan ambang batas 200 ppm, dan sensor flame, menunjukkan tingkat keberhasilan fungsionalitas 100%, sedangkan subsistem navigasi mencapai tingkat keberhasilan fungsional 80%.

2. Sistem mampu memberikan perlindungan infrastruktur secara responsif melalui mekanisme deteksi dini dan pengiriman notifikasi, dengan waktu respons rata-rata sebesar 2,5 detik. Kinerja ini memberikan margin waktu yang memadai bagi teknisi untuk melakukan tindakan preventif sebelum terjadi kerusakan serius pada perangkat data center.

3. Hasil validasi menunjukkan bahwa data sensor memiliki tingkat keberhasilan fungsional dan presisi yang tinggi, dengan deviasi pembacaan suhu sebesar ±0,5°C dan deviasi sensor gas sebesar ±2 ppm, serta waktu respons cepat pada sensor flame. keberhasilan fungsional ini menjadikan sistem andal untuk aplikasi pengawasan data center yang memerlukan ketelitian tinggi dan minim peringatan palsu.

Secara keseluruhan, implementasi sistem MARS membuktikan bahwa kolaborasi agen robot bergerak mampu mengatasi keterbatasan sistem pengawasan statis dengan menyediakan cakupan pemantauan yang lebih luas dan adaptif. Integrasi teknologi robotika dan IoT dalam sistem ini tidak hanya menjadi solusi dalam meningkatkan efektivitas pengawasan lingkungan, tetapi juga mendukung prinsip perlindungan aset (ḥifẓ al-māl) melalui pendekatan teknologi digital yang proaktif dan berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] F. M. Rizki and S. R. Akbar, “Implementasi sistem monitoring ruang server dengan protokol interkoneksi Modbus,” J-PTIIK, vol. 6, no. 12, pp. 5632–5638, 2022.
[2] Alam, Md Morshed, et al. "An energy and leakage current monitoring system for abnormality detection in electrical appliances." Scientific Reports 12.1 (2022): 18520.
[3] D. Arifianto, A. Sulistyono, and A. Nilogiri, “Sistem monitoring suhu dan kelembaban ruangan server berbasis Arduino menggunakan metode fuzzy logic dengan buzzer dan Telegram Bot sebagai notifikasi,” JUSTINDO, vol. 7, no. 1, pp. 67–75, 2022.
[4] M. Assegaf, A. Soetedjo, and S. Sotyohadi, “Sistem monitoring ruang server berbasis IoT (Internet of Things) di PT. Radnet Digital Indonesia,” Institut Teknologi Nasional Malang, 2022.
[5] A. Budianto, M. Muhtadan, I. M. Y. Dipta, and A. N. Iman, “Development of Liquefied Petroleum Gas (LPG) leakage detection wheeled robot on horizontal pipes based on Arduino Uno,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 1511, no. 1, p. 012087, 2020.
[6] I. G. M. N. Desnanjaya and P. Sugiartawan, “Controlling and monitoring of temperature and humidity of oyster mushrooms in tropical climates,” IJEIS, vol. 12, no. 1, pp. 69–80, 2022.
[7] R. F. Maulana, M. A. Ramadhan, W. Maharani, and I. Maulana, “Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu dan Kelembapan Berbasis IOT Studi Kasus Ruang Server ITTelkom Surabaya,” IJMST, vol. 1, no. 3, pp. 224–231, 2023.
[8] J. A. Hassan and B. H. Jasim, “Design and implementation of internet of things-based electrical monitoring system,” Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 10, no. 6, pp. 3052–3063, 2021.
[9] G. Z. Islam et al., “IoT-based automatic gas leakage detection and fire protection system,” International Journal of Interactive Mobile Technologies, vol. 16, no. 21, 2022.
[10] I. G. Y. Putra, I. G. M. N. Desnanjaya, and I. G. Adnyana, “Temperature humidity control system and fire detection for room server based Internet of Things,” Jurnal Galaksi, vol. 1, no. 2, pp. 81–91, 2024.
[11] N. F. Khobariah, P. D. S. Hermawan, and R. S. Kusumadiarti, “Sistem monitoring suhu dan kelembapan ruang server berbasis Wemos D1,” JIPI, vol. 7, no. 1, pp. 32–42, 2022.
[12] O. A. Siddiqui et al., “Atmospheric environment monitoring system based on wireless sensor prototype to prevent data centers,” Pakistan Journal of Engineering and Technology, vol. 5, no. 2, pp. 79–86, 2022.
[13] L. Atzori, A. Iera, dan G. Morabito, “The Internet of Things: A survey,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, hlm. 2787–2805, Okt 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
[14] Okello, Wayne. *A smart environmental monitoring system for data centres using IOT and machine learning*. Diss. NM-AIST, 2023.
[15] BERIZKA, Ihor; ROMANYSHYN, R.; SAVITSKYY, O. Customizable IoT Solution Based on ESP32 MCU. Electronics and information technologies/Електроніка та інформаційні технології, 2022.
[16] Raquib, Amana, et al. "Islamic virtue-based ethics for artificial intelligence." *Discover Artificial Intelligence* 2.1 2022.