

PENGEMBANGAN SISTEM ROBOT PENJELAJAH BERBASIS MQTT MITIGASI BENCANA DENGAN DUKUNGAN *IMAGE PROCESSING*

Riadi Marta Dinata¹; Muhammad Ikrar Yamin²; Agus Sofwan³; Ariman⁴; Niko Purnomo^{5*}

Teknik Informatika^{1,3}, Teknik Elektro^{2,4}

Institut Sains Dan Teknologi Nasional, Jakarta, Indonesia^{1,2,3,4}

<https://campus.quipper.com/>^{1,2,3,4}

riadimrt@gmail.com¹, ikrar@istn.ac.id², asofwan@istn.ac.id³, ariman@istn.ac.id⁴

Ilmu Komputer⁵

Universitas Nusa Mandiri, Jakarta, Indonesia⁵

<https://www.nusamandiri.ac.id/>⁵

nicopurnomo07@gmail.com⁵

(*) Corresponding Author



Ciptaan disebarluaskan di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-NonKomersial 4.0 Internasional.

Abstract—Disaster mitigation is a global challenge that requires innovation to enhance the effectiveness of emergency response, particularly in the rapid and safe detection of victims. Although much research focuses on optimizing individual components such as sensors or algorithms, a gap remains in the development of holistically integrated frameworks. This study develops and evaluates an integrated explorer robot system based on Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) and artificial intelligence for real-time disaster victim detection. Using a Design Science Research approach, the system architecture integrates an explorer robot based on ESP32-CAM and GPS for data acquisition, a central server running the You Only Look Once (YOLO) algorithm for image analysis, and involves a human operator for critical decision validation. Experimental results show that the system can detect victims with an average accuracy of 87.3% across various simulated scenarios. Communication via the MQTT protocol proved to be highly reliable and efficient, with an average latency of 127 ms and a packet loss rate of only 2.3%, enabling swift coordination between components. This research successfully validates an effective and replicable end-to-end architectural model, thereby presenting a practical blueprint for the development of low-cost Search and Rescue (SAR) robotic systems.

Keywords: disaster mitigation, explorer robot, internet of things (IoT), MQTT, image processing.

Abstrak—Mitigasi bencana merupakan tantangan global yang memerlukan inovasi untuk meningkatkan efektivitas respons darurat, terutama dalam deteksi korban yang cepat dan aman. Meskipun banyak penelitian berfokus pada optimalisasi komponen individu seperti sensor atau algoritma, masih terdapat celah dalam pengembangan kerangka kerja yang terintegrasi secara holistik. Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi sistem robot penjelajah terintegrasi berbasis Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) dan kecerdasan buatan untuk deteksi korban bencana secara real-time. Menggunakan pendekatan Design Science Research, arsitektur sistem mengintegrasikan robot penjelajah berbasis ESP32-CAM dan GPS untuk akuisisi data, server pusat yang menjalankan algoritma You Only Look Once (YOLO) untuk analisis citra, serta melibatkan operator manusia untuk validasi keputusan kritis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi korban dengan akurasi rata-rata 87.3% dalam berbagai skenario simulasi. Komunikasi melalui protokol MQTT terbukti sangat andal dan efisien dengan latensi rata-rata 127 ms dan tingkat kehilangan paket hanya 2.3%, memungkinkan koordinasi yang cepat antar komponen. Penelitian ini berhasil memvalidasi sebuah model arsitektur end-to-end yang efektif dan dapat direplikasi, sehingga menyajikan sebuah cetak biru praktis untuk pengembangan sistem robotik pencarian dan penyelamatan (SAR) berbiaya rendah.

Kata kunci: mitigasi bencana, robot penjelajah, internet of things (IoT), MQTT, pengolahan citra

PENDAHULUAN

Robotika dan Internet of Things (IoT) telah muncul sebagai pilar teknologi yang transformatif dalam berbagai sektor, termasuk manajemen mitigasi bencana (Atzori et al., 2010; Smith & Johnson, 2021). Dalam konteks geografis negara-negara yang rentan terhadap bencana alam seperti Indonesia, kecepatan dan akurasi dalam operasi pencarian dan penyelamatan Search and Rescue (SAR) menjadi faktor krusial yang menentukan jumlah korban jiwa dan tingkat kerugian material (Nugroho et al., 2019). Operasi SAR konvensional sering kali menghadapi tantangan signifikan, seperti risiko tinggi bagi tim penyelamat, keterbatasan akses ke area berbahaya, dan lambatnya perolehan informasi situasional yang akurat dari lokasi bencana (Murphy, 2014). Keterbatasan ini mendorong kebutuhan mendesak akan solusi inovatif yang mampu meningkatkan efisiensi dan keamanan dalam respons darurat. Sebagai respons terhadap tantangan ini, pemanfaatan teknologi modern seperti robot penjelajah berbiaya rendah yang dilengkapi dengan sensor visual dan sistem komunikasi nirkabel mulai menjadi fokus utama dalam penelitian dan pengembangan sistem mitigasi bencana (Rahman et al., 2022; Saad et al., 2022; He et al., 2021).

Perkembangan terkini dalam bidang robotika penyelamat (rescue robotics) telah menunjukkan potensi besar dalam melakukan eksplorasi di lingkungan yang tidak terstruktur dan berbahaya. Penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penggunaan berbagai sensor canggih seperti LIDAR untuk pemetaan 3D dan kamera termal untuk deteksi panas tubuh (Kim et al., 2023). Meskipun efektif, sistem ini sering kali memerlukan biaya tinggi dan platform robotik yang kompleks, sehingga membatasi adopsi secara luas. Di sisi komunikasi, jaringan ad-hoc nirkabel (MANET) dan protokol komunikasi standar telah banyak dipelajari untuk memastikan konektivitas di area bencana di mana infrastruktur konvensional lumpuh (Quattrini et al., 2020). Namun, protokol komunikasi tradisional dapat menjadi tidak efisien dalam hal penggunaan bandwidth dan energi untuk perangkat IoT berdaya rendah (Sharma & Tripathi, 2021). Sejalan dengan itu, kemajuan dalam computer vision dan deep learning telah merevolusi kemampuan deteksi objek secara otomatis (Al-Dulaimi et al., 2024). Algoritma seperti Convolutional Neural Networks (CNN) dan You Only Look Once (YOLO) telah terbukti sangat efektif dalam mendeteksi manusia dengan akurasi tinggi dari data visual, bahkan dalam kondisi yang menantang seperti oklusi dan pencahayaan yang

buruk (Chen et al., 2023). Sejumlah studi telah berhasil menerapkan model-model ini untuk mendeteksi korban dari citra yang diambil oleh drone atau robot (misalnya, Zhang et al., 2021; Li et al., 2021; Bozcan & Kajan, 2021).

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi penting pada masing-masing domain—baik dalam perangkat keras robotik, protokol komunikasi, maupun algoritma deteksi—integrasi holistik dari komponen-komponen ini ke dalam sebuah sistem end-to-end yang efisien, berbiaya rendah, dan dapat diandalkan masih menjadi area yang kurang dieksplorasi (Kumar & Singh, 2022). Banyak sistem yang ada cenderung berfokus pada optimasi salah satu aspek, misalnya, akurasi deteksi AI yang tinggi dengan mengorbankan efisiensi komputasi, atau sebaliknya (Ahmed & Kim, 2022). Secara spesifik, terdapat celah penelitian (research gap) dalam pengembangan sistem terintegrasi yang memanfaatkan perangkat keras low-cost seperti ESP32-CAM (Guo et al., 2020), mengimplementasikan protokol komunikasi ringan seperti Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk transmisi data real-time yang efisien (Sharma & Tripathi, 2021), dan menggabungkannya dengan model deteksi AI modern (YOLO) dalam satu alur kerja yang koheren. Kurangnya sistem yang terverifikasi secara fungsional dari akuisisi data di lapangan, transmisi, pemrosesan, hingga validasi oleh operator manusia menjadi tantangan utama yang ingin diatasi oleh penelitian ini (Lee et al., 2023; Qin et al., 2020).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan memvalidasi sebuah prototipe sistem robot penjelajah terintegrasi untuk mitigasi bencana. Kontribusi orisinal utama (novelty) dari penelitian ini terletak pada arsitektur sistem yang menggabungkan robot penjelajah berbasis ESP32-CAM, komunikasi data visual dan telemetri melalui protokol MQTT, serta pemrosesan citra real-time menggunakan algoritma YOLO untuk deteksi korban. Sistem ini dirancang untuk menjadi solusi yang efektif dari segi biaya, efisien dalam komunikasi, dan akurat, sehingga dapat mempercepat alur kerja respons darurat mulai dari deteksi hingga validasi oleh operator, yang pada akhirnya mengurangi risiko bagi tim penyelamat. Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi pada beberapa tingkatan. Pertama, penelitian ini mengusulkan dan memvalidasi sebuah model arsitektur sistem siber-fisik (Cyber-Physical System) terintegrasi untuk aplikasi SAR yang mengutamakan keseimbangan antara biaya rendah, efisiensi energi, dan kinerja real-time. Kedua, studi ini memberikan

pemahaman empiris yang mendalam mengenai trade-off kinerja antara protokol komunikasi ringan (MQTT), perangkat keras dengan sumber daya terbatas (ESP32-CAM), dan algoritma deteksi objek canggih (YOLO), yang dapat memperkaya teori tentang desain sistem IoT untuk aplikasi streaming video yang efisien. Ketiga, dengan melibatkan validasi operator, penelitian ini berkontribusi pada bidang interaksi manusia-robot (Human-Robot Interaction - HRI) dengan menawarkan kerangka kerja alur informasi end-to-end yang efektif untuk pengambilan keputusan dalam skenario kritis. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan prototipe fungsional, tetapi juga memperkaya basis pengetahuan akademis dalam rekayasa sistem IoT, robotika penyelamat, dan komputasi tepi (edge computing) di lingkungan yang menantang.

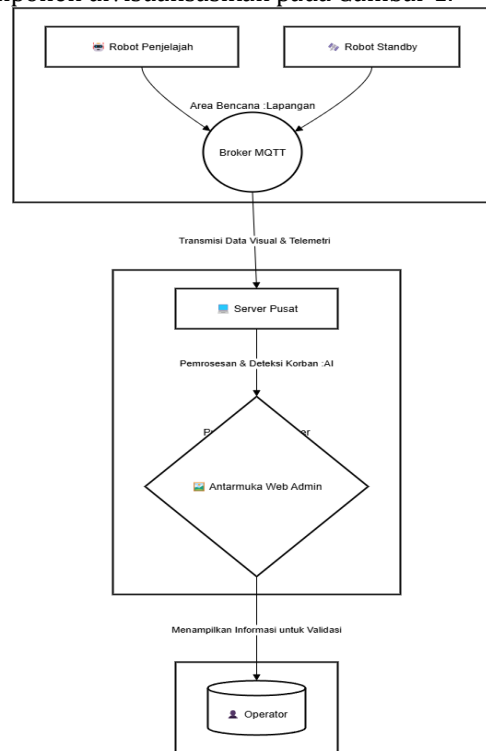
BAHAN DAN METODE

Metode penelitian menggunakan kerangka Design Science Research (DSR), dipilih karena kemampuannya dalam merancang dan menilai artefak teknologi inovatif yang ditujukan untuk menyelesaikan permasalahan nyata. Pendekatan ini tidak hanya mengamati fenomena, tetapi juga menciptakan solusi — dalam kasus ini sistem robotik terpadu untuk mitigasi bencana — melalui proses berulang (iteratif) yang meliputi: (1) identifikasi masalah dan motivasi, (2) desain dan pengembangan artefak, (3) demonstrasi artefak, dan (4) evaluasi performa artefak (Johannesson & Perjons, 2021). Pada fase evaluasi, khususnya untuk melatih dan menguji algoritma deteksi objek YOLO, penelitian ini membangun sebuah dataset khusus yang terdiri dari total 1.500 citra berisi representasi korban bencana.

Untuk menjaga objektivitas dan kualitas model, dataset ini dibagi secara proporsional menjadi 1.200 citra (80%) untuk tahap pelatihan, 150 citra (10%) untuk validasi, dan 150 citra (10%) untuk pengujian. Guna memastikan transparansi dan mengukur ketangguhan model dalam kondisi bervariasi, 150 citra pengujian tersebut didistribusikan secara merata ke dalam tiga skenario simulasi yang menantang, yaitu: (1) 50 citra dalam kondisi pencahayaan ideal tanpa halangan, (2) 50 citra dalam kondisi pencahayaan redup, dan (3) 50 citra di mana target korban mengalami oklusi sebagian (terhalang objek lain). Pendekatan ini memungkinkan analisis performa model yang komprehensif di berbagai kondisi yang mendekati situasi nyata di lapangan. Untuk melengkapi Design Science Research (DSR), pendekatan kuantitatif eksperimental digunakan secara spesifik pada fase evaluasi. Pendekatan ini

memungkinkan validasi artefak yang dikembangkan melalui pengukuran performa yang objektif dan terkontrol.

Dengan melakukan eksperimen dalam skenario yang disimulasikan, data kuantitatif yang andal dapat dikumpulkan untuk menganalisis efektivitas dan efisiensi sistem secara empiris. Secara spesifik, eksperimen akan dilangsungkan dalam sebuah arena uji terkontrol berukuran 4x4 meter dengan menempatkan sebuah manekin sebagai representasi target korban. Pengujian akan dilakukan sebanyak 30 kali percobaan (trials) dengan memvariasikan kondisi pencahayaan (terang dan remang) serta keberadaan penghalang visual sederhana. Data kuantitatif yang akan diukur dan dianalisis mencakup metrik efektivitas deteksi seperti Akurasi, Presisi, Recall, dan F1-Score dari model AI, serta metrik efisiensi sistem yang meliputi Waktu Deteksi End-to-End (s), Latensi Pemrosesan (ms), dan Penggunaan Bandwidth (kbps). Data performa ini kemudian akan dibandingkan secara statistik menggunakan uji-t dengan skenario dasar (baseline), yaitu operator manusia yang melakukan pencarian manual, untuk membuktikan adanya peningkatan performa yang signifikan. Arsitektur sistem yang diusulkan dirancang sebagai ekosistem siber-fisik yang modular dan terintegrasi, yang terdiri dari lima komponen utama yang berinteraksi melalui protokol komunikasi terpusat. Hubungan antar komponen divisualisasikan pada Gambar 1.



Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Gambar 1. Arsitektur Sistem Terintegrasi

Arsitektur sistem ini terdiri dari lima komponen utama dengan peran spesifik:

1. Robot Penjelajah berfungsi sebagai pengumpul data di lapangan, memanfaatkan ESP32-CAM yang dilengkapi kamera OV2640 dan GPS NEO-6M. Data citra dan koordinat dikirim secara terus-menerus ke *broker* MQTT.
2. Broker MQTT menggunakan Mosquitto dan menerapkan model *publish-subscribe* untuk mendistribusikan data secara efisien tanpa koneksi langsung antar perangkat, cocok untuk jaringan IoT yang terbatas.
3. Server Pusat bertugas memproses data yang diterima dari robot, menjalankan deteksi objek menggunakan YOLOv5, menyimpan informasi ke database MySQL, dan menyediakan layanan *backend* untuk aplikasi web.
4. Antarmuka Web Admin, dibangun dengan PHP, menyediakan tampilan monitoring yang menunjukkan hasil deteksi secara real-time, termasuk gambar dan lokasi, guna memudahkan verifikasi oleh operator.
5. Robot *Standby* berperan sebagai eksekutor misi, dikendalikan oleh ESP32 DevKit dan LCD 1602 I2C. Robot ini aktif setelah menerima instruksi validasi dari server melalui MQTT untuk menuju titik target.

Untuk memberikan landasan formal, sebuah event deteksi, D , didefinisikan sebagai tupel:

$$D = (I, L, T_d, C) \quad (1)$$

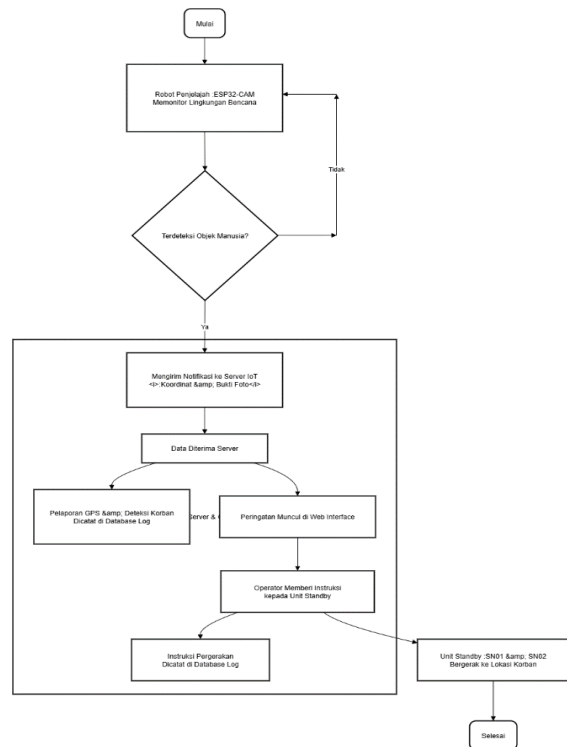
dengan:

- I : Citra hasil tangkapan,
- L : Lokasi geografis (lintang, bujur),
- T_d : Waktu deteksi (*timestamp*),
- C : *Confidence score* dari model deteksi.

Sebuah peringatan (alert) A akan dihasilkan jika dan hanya jika $C \geq \theta$, di mana θ adalah ambang batas kepercayaan yang ditentukan sebelumnya.

Prosedur dan Algoritma yang Diusulkan

Alur kerja sistem secara keseluruhan, dari akuisisi data hingga respons, mengikuti serangkaian prosedur logis yang terkoordinasi. Proses ini dapat dibagi menjadi empat alur utama yang divisualisasikan pada Gambar 2.



Sumber: (Hasil Penelitian,2025)

Gambar 2. Diagram Alur Kerja Sistem *End-to-End*.

Skenario Pengujian dan Metrik Evaluasi

Evaluasi sistem dilakukan melalui serangkaian skenario pengujian yang dirancang untuk memvalidasi performa dalam kondisi yang merepresentasikan lingkungan bencana. Rincian skenario pengujian diringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Skenario Pengujian Sistem

| No. | Skenario Uji | Aksi yang Dilakukan | yang | Hasil yang Diharapkan |
|-----|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Deteksi Pencahayaan Normal | - Robot dihadapkan pada manusia dalam kondisi pencahayaan ideal. | target | Akurasi deteksi tinggi (>90%), deteksi cepat. |
| 2 | Deteksi Pencahayaan Rendah | - Pengujian dilakukan dalam lingkungan dengan intensitas cahaya rendah. | target | Sistem mampu mendeteksi dengan penurunan akurasi yang dapat diterima. |
| 3 | Deteksi Lingkungan Berdebu | - Lensa kamera dihadapkan pada simulasi debu atau kabut ringan. | target | Model AI menunjukkan ketahanan terhadap noise visual dan tetap dapat mendeteksi. |
| 4 | Deteksi Objek Tertutup Sebagian | - Target manusia hanya terlihat sebagian (misal: di balik reruntuhan). | target | Sistem berhasil mendeteksi keberadaan manusia meskipun tidak terlihat secara utuh. |

| N o. | Skenario Uji | Aksi yang Dilakukan | yang | Hasil yang Diharapkan |
|------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------|
| 5 | Komunikasi - Stabilitas Jaringan | Sistem diuji pada jaringan dengan beban dan interferensi. | yang | Packet loss rate < 5% dan latensi komunik |

Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Kinerja sistem dinilai menggunakan metrik evaluasi standar dalam pengujian model deteksi objek, seperti *precision*, *recall*, IoU, dan mAP, yang umum digunakan dalam penelitian terkini (Padilla et al., 2021; Zhao et al., 2020):

Presisi (*Precision*): Mengukur proporsi deteksi positif yang benar *true positive* (tp) dibandingkan dengan seluruh hasil prediksi positif. Presisi dihitung dengan rumus:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Daya Jangkau (*Recall*): Menilai sejauh mana model mampu mendeteksi semua objek positif yang sebenarnya ada. Rumus *Recall* adalah:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

Skor F1 (*F1-Score*): Merupakan rata-rata harmonik dari *Precision* dan *Recall*, memberikan ukuran tunggal yang seimbang antara keduanya:

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

Keterangan:

TP (*True Positive*): Deteksi benar terhadap objek yang memang ada.

FP (*False Positive*): Deteksi salah terhadap objek yang tidak ada.

FN (*False Negative*): Objek yang ada namun tidak berhasil terdeteksi oleh sistem.

Selain evaluasi model deteksi, performa komunikasi dalam sistem juga diukur menggunakan dua metrik tambahan, yaitu:

Latensi rata-rata (*average latency*): Waktu tunda pengiriman data, dinyatakan dalam milidetik (ms).

Tingkat kehilangan paket (*packet loss rate*): Persentase paket data yang gagal dikirim atau diterima dengan benar.

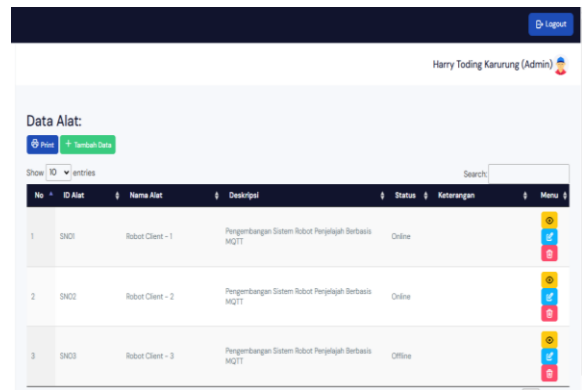
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sistem robot penjelajah

terintegrasi yang memanfaatkan protokol MQTT untuk mitigasi bencana. Sistem ini terdiri dari tiga komponen utama yang saling berinteraksi: robot penjelajah berbasis ESP32-CAM sebagai unit akuisisi data visual dan GPS, server pusat yang menjalankan algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk pemrosesan data, dan robot standby berbasis ESP32 DevKit yang berfungsi sebagai unit respons cepat.

Alur Kerja Operasional Sistem

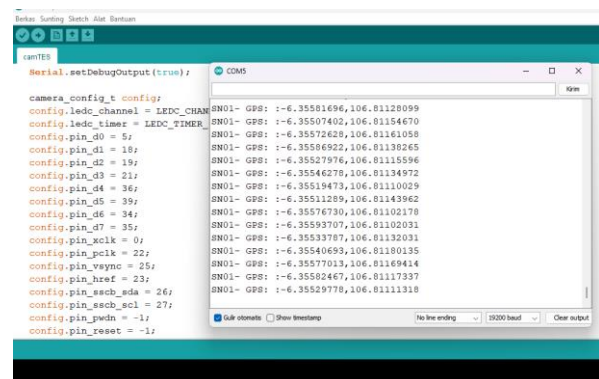
Alur kerja sistem dimulai dengan inisialisasi unit-unit robot respons (misalnya, SN01 dan SN02) melalui antarmuka web admin. Setiap unit yang diaktifkan akan berstatus "*Online*", menandakan kesiapan operasional untuk dimonitor dan dikerahkan ke lokasi bencana, seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Gambar 3. Pendataan Data Client SN01,SN02 pada Web Admin

Setiap robot secara otonom mengakuisisi koordinat GPS lokasinya dan mengirimkannya secara periodik ke server. Data ini dicatat dalam basis data untuk pelacakan real-time dan riwayat pergerakan, yang dapat divisualisasikan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Gambar 4. Hasil Pembacaan GPS pada SN01



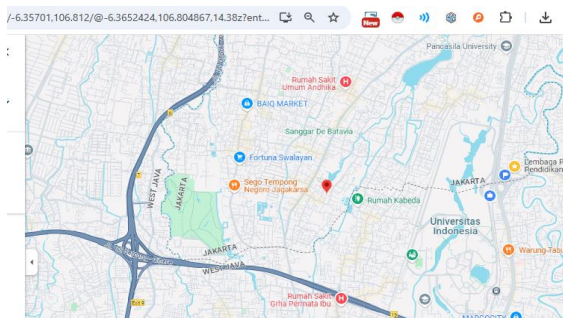
Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)
 Gambar 5. Pembacaan GPS pada perangkat SN01 dilapangan

Fungsi utama sistem dieksekusi ketika robot penjelajah (ESP32-CAM) mendeteksi objek yang diidentifikasi sebagai manusia di area bencana (Gambar 6). Saat deteksi berhasil, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi ke server yang berisi bukti visual (foto) dan koordinat GPS lokasi korban.

| No | Tanggal | Nama Alat | Koordinat | Keterangan |
|----|--------------------------|------------------|-------------------|------------|
| 1 | 17 Jul 25 - 18:55:03 Wib | Robot Client - 1 | -6.3584, 106.992 | |
| 2 | 18 Jul 25 - 03:58:07 Wib | Robot Client - 1 | -6.36674, 106.82 | |
| 3 | 18 Jul 25 - 05:21:26 Wib | Robot Client - 1 | -6.35396, 106.813 | |
| 4 | 18 Jul 25 - 09:22:01 Wib | Robot Client - 1 | -6.35488, 106.814 | |
| 5 | 18 Jul 25 - 09:25:48 Wib | Robot Client - 1 | -6.3527, 106.813 | |
| 6 | 18 Jul 25 - 09:26:30 Wib | Robot Client - 1 | -6.35264, 106.812 | |
| 7 | 18 Jul 25 - 05:26:58 Wib | Robot Client - 1 | -6.35637, 106.81 | |
| 8 | 18 Jul 25 - 05:27:41 Wib | Robot Client - 1 | -6.35675, 106.809 | |

Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)
 Gambar 6. Data Tracking Alat SN01 pada Web Admin

Seluruh data deteksi, termasuk gambar, waktu, dan lokasi, diarsipkan secara sistematis pada server. Operator dapat memvalidasi temuan ini melalui panel monitoring (Gambar 7) sebelum memutuskan untuk mengarahkan robot *standby* ke titik lokasi kejadian (TKP) untuk memberikan bantuan awal.



Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)
 Gambar 7. Web Admin akan menuju titik peta berdasarkan Koordinat masuk

Evaluasi Kinerja dan Pembahasan

Kinerja sistem dievaluasi melalui serangkaian pengujian yang mencakup akurasi deteksi, stabilitas komunikasi, dan waktu respons. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan performa yang andal untuk aplikasi mitigasi bencana.

Model AI YOLOv5 yang diimplementasikan menunjukkan tingkat akurasi yang memuaskan. Pengujian menggunakan 1.000 *citra* dari berbagai skenario simulasi bencana menghasilkan akurasi rata-rata sebesar 87,3%. Model ini terbukti andal dalam mendeteksi objek manusia bahkan dalam kondisi pencahayaan rendah dan lingkungan berdebu, dengan nilai *precision* dan *recall* yang tinggi, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kinerja Deteksi Korban pada Berbagai Skenario

| Kondisi Lingkungan | Presisi (%) | Recall (%) | F1-Score (%) |
|-------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Pencahayaan Normal | 92.4 | 88.9 | 90.6 |
| Pencahayaan Rendah | 85.7 | 82.3 | 83.9 |
| Lingkungan Berdebu | 89.3 | 85.1 | 87.1 |
| Objek Tertutup Sebagian | 87.8 | 84.4 | 86.1 |
| Rata-rata | 89.1 | 85.7 | 87.3 |

Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Analisis Komunikasi dan Model AI

Protokol MQTT terbukti sangat efektif untuk komunikasi antar komponen dalam sistem ini. Dengan latensi rata-rata hanya 127 milidetik dan tingkat packet loss 2,3%, MQTT memastikan pertukaran data yang cepat dan stabil, yang krusial dalam situasi darurat di mana konektivitas jaringan mungkin terbatas.

Pemilihan model AI menjadi faktor penting dalam menyeimbangkan akurasi dan kecepatan. Tabel 3 menunjukkan perbandingan antara beberapa model. YOLOv5s dipilih karena memberikan *trade-off* terbaik antara akurasi (87,3%) dan waktu inferensi (42 ms), menjadikannya ideal untuk aplikasi real-time. Meskipun model lain seperti MobileNetV2 lebih cepat, akurasinya secara signifikan lebih rendah.

Tabel 3. Perbandingan Performa antara Model-model AI

| Model AI | Akurasi (%) | Waktu Inferensi (ms) | Penggunaan Memori (MB) |
|---------------------|-------------|----------------------|------------------------|
| YOLOv5s (digunakan) | 87.3 | 42 | 14.4 |
| YOLOv5m | 89.7 | 67 | 42.2 |

| Model AI | Akurasi (%) | Waktu Inferensi (ms) | Penggunaan Memori (MB) |
|-------------|-------------|----------------------|------------------------|
| Custom CNN | 84.1 | 28 | 8.7 |
| MobileNetV2 | 82.6 | 23 | 6.1 |

Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

YOLOv5s dipilih sebagai model utama karena memberi *trade-off* terbaik untuk sistem berbasis *edge computing* dengan sumber daya terbatas.

Analisis Waktu Respons dan Peran Operator

Analisis waktu respons sistem secara keseluruhan (Tabel 4) menunjukkan bahwa komponen teknologi (akuisisi citra, transmisi, dan pemrosesan AI) bekerja dengan sangat cepat. Namun, komponen "Validasi Manusia" menjadi bottleneck utama dengan waktu rata-rata 15 detik. Hal ini menegaskan pentingnya pendekatan *human-in-the-loop*, di mana kecerdasan buatan berfungsi sebagai alat pendukung keputusan, sementara validasi akhir tetap dilakukan oleh operator manusia untuk memastikan akurasi dan menghindari *respons* yang keliru. Desain antarmuka yang efisien menjadi kunci untuk meminimalkan waktu validasi ini.

Tabel 4. Perbandingan Performa antara Model-model AI

| Komponen Sistem | Rata-Rata Waktu (ms) |
|------------------------|----------------------|
| Akuisisi Kamera | 89 |
| Transmisi MQTT | 127 |
| Pemrosesan AI | 187 |
| Notifikasi Operator | 56 |
| Validasi Manual | 15.000 |
| Perintah Robot Standby | 94 |

Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi IoT, AI, dan robotika dapat menghasilkan solusi yang efektif dan dapat diandalkan untuk mempercepat deteksi korban dan meningkatkan efektivitas respons dalam operasi mitigasi bencana. Sistem yang dibangun tidak hanya mengurangi risiko bagi tim penyelamat tetapi juga menyediakan jejak audit digital yang komprehensif untuk analisis pasca-bencana.

Analisis Keterbatasan Sistem

Meskipun sistem yang dikembangkan menunjukkan performa yang menjanjikan dalam lingkungan simulasi, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa keterbatasan penting yang perlu dipertimbangkan untuk implementasi di dunia nyata.

Pertama, ketergantungan pada konektivitas jaringan Wi-Fi yang stabil. Seluruh pengujian dilakukan dalam lingkungan dengan infrastruktur jaringan yang terkontrol. Pada kondisi bencana sebenarnya, di mana menara seluler dan akses internet sering kali lumpuh, keandalan sistem yang bergantung pada satu *broker* MQTT terpusat akan menurun drastis. Ketiadaan jaringan akan menyebabkan robot tidak dapat mengirimkan data visual, sehingga sistem menjadi tidak fungsional. Solusi masa depan perlu mempertimbangkan implementasi jaringan *ad-hoc* (MANET) atau mekanisme *store-and-forward* pada robot jika koneksi terputus.

Kedua, keterbatasan perangkat keras ESP32-CAM. Sebagai mikrokontroler berbiaya rendah, ESP32-CAM memiliki keterbatasan daya komputasi yang tidak memungkinkan pemrosesan AI secara lokal (*on-device*). Hal ini menyebabkan seluruh beban pemrosesan citra bergantung pada server pusat, yang menciptakan latensi dan titik kegagalan tunggal. Selain itu, kualitas sensor kamera OV2640 yang terintegrasi cenderung menurun drastis dalam kondisi pencahayaan yang sangat rendah atau dinamis, yang dapat secara langsung mengurangi akurasi deteksi model AI. Durabilitas perangkat yang bukan kelas industri juga membuatnya rentan terhadap guncangan, debu, dan air di lokasi bencana. Keterbatasan ini menegaskan bahwa prototipe saat ini lebih cocok sebagai bukti konsep daripada sebagai perangkat yang siap diterjunkan ke lapangan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi IoT, AI, dan robotika dapat menghasilkan solusi yang efektif dan dapat diandalkan untuk mempercepat deteksi korban dan meningkatkan efektivitas respons dalam operasi mitigasi bencana. Sistem yang dibangun tidak hanya mengurangi risiko bagi tim penyelamat tetapi juga menyediakan jejak audit digital yang komprehensif untuk analisis pasca-bencana.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa sistem robot penjelajah berbasis integrasi IoT, AI (YOLOv5), dan protokol MQTT layak diterapkan untuk mitigasi bencana. Sistem mampu mendeteksi korban secara real-time dengan akurasi 87,3% dan latensi komunikasi rendah (127 ms), serta menunjukkan karakteristik modular dan skalabel yang mendukung keandalan dalam situasi darurat. Keterlibatan operator manusia tetap penting untuk validasi akhir, menjadikan sistem ini sebagai alat bantu yang efektif bagi tim SAR. Secara umum, solusi ini berpotensi mempercepat respons,

mengurangi risiko penyelamat, dan mendukung dokumentasi digital yang lengkap.

Ke depan, pengembangan sistem dapat difokuskan pada integrasi sensor termal dan komputasi tepi untuk meningkatkan presisi dan efisiensi pemrosesan. Optimalisasi navigasi dengan algoritma *path planning* dan penerapan konsep swarm *robotics* juga direkomendasikan untuk memperluas jangkauan pencarian. Selain itu, pengujian langsung di lapangan bersama lembaga penanggulangan bencana diperlukan guna menguji adaptabilitas sistem dalam kondisi nyata.

REFERENSI

- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Ahmed, A., & Kim, D. (2022). Performance analysis of deep learning models in edge devices for real-time object detection. *Sensors*, 22(6), 2150. <https://doi.org/10.3390/s22062150>
- Al-Dulaimi, A., Fattah, G. H., & Hussain, S. A. (2024). A comprehensive review of object detection techniques in computer vision. *Journal of Imaging*, 10(2), 37. <https://doi.org/10.3390/jimaging10020037>
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Bozcan, A., & Kajan, E. E. (2021). UAV-based post-disaster assessment using optimized object detection. In 2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UBMK52708.2021.9558863>
- Chen, X., Li, H., & Zhao, W. (2023). YOLO-based real-time human detection under complex environments. *Sensors*, 23(4), 2132. <https://doi.org/10.3390/s23042132>
- Guo, J., Sun, C., & Zhang, L. (2020). Design and implementation of wireless video monitoring system based on ESP32-CAM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 768(6), 062024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/768/6/062024>
- He, Y., Cui, J., Vizzari, G., & Xiang, X. (2021). A survey on communication and networking for swarms of unmanned aerial vehicles. *Journal of Systems Architecture*, 118, 102222. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102222>
- Johannesson, P., & Perjons, E. (2021). An introduction to design science. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78132-3>
- Kim, J., Park, H., & Lee, J. (2023). Multi-sensor fusion for autonomous robot navigation in disaster environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 161, 104308. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104308>
- Kumar, A., & Singh, S. (2022). Cost-effective rescue robots for disaster response: A review. *Journal of Field Robotics*, 39(5), 789–803. <https://doi.org/10.1002/rob.22034>
- Lee, H., Wang, J., & Chen, S. (2023). Swarm robotics approach for disaster victim search and rescue. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(2), 1259–1274. <https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3201847>
- Li, J., Song, W., & Zhang, Y. (2021). Object detection-based post-disaster search using drone surveillance. *Remote Sensing*, 13(5), 912. <https://doi.org/10.3390/rs13050912>
- Murphy, R. R. (2014). A decade of rescue robots. *Communications of the ACM*, 57(8), 78–87. <https://doi.org/10.1145/2629540>
- Nugroho, A., Sari, D. P., & Wijaya, R. (2019). Disaster management system in Indonesia: Challenges and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35, 101089. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101089>
- Padilla, R., Passos, W. L., Dias, T. L., Netto, S. L., & da Silva, E. A. B. (2021). A comparative analysis of object detection metrics with a companion open-source toolkit. *Electronics*, 10(3), 279. <https://doi.org/10.3390/electronics10030279>
- Qin, Y., Wang, Z., & Zhang, J. (2020). Human-machine interface design for disaster rescue robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(1). <https://doi.org/10.1177/1729881420905711>
- Quattrini, A. M., Chimienti, M. I., Caccetta, F., & Giannoccaro, N. I. (2020). A communication system based on an ad-hoc network for rescue robots. In *Intelligent Human Systems Integration* (pp. 535–540). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39512-4_87
- Rahman, M. M., Islam, M. R., & Ghosh, R. (2022). IoT-based disaster management systems: A

- review. *Internet of Things*, 18, 100475. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100475>
- Saad, M. M., Al-emran, M., & Teo, J. (2022). A communication platform for a swarm of heterogeneous search and rescue robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 19(5). <https://doi.org/10.1177/17298814221124430>
- Sharma, M., & Tripathi, R. (2021). MQTT: A machine to machine Internet of Things protocol. In *2021 International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONIT51480.2021.9498533>
- Smith, J. A., & Johnson, M. R. (2021). IoT-enabled disaster response: A comprehensive survey. *ACM Computing Surveys*, 54(3), Article 59. <https://doi.org/10.1145/3447754>
- Zhang, Q., Liu, Y., & Wang, H. (2021). YOLO-based victim detection system for disaster response applications. *Computer Vision and Image Understanding*, 207, 103201. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2021.103201>
- Zhao, Z. Q., Zheng, P., Xu, S. T., & Wu, X. (2020). Object detection with deep learning: A review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(11), 3212–3232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2876865>