

ROBOT EDUKASI *OBJECT DETECTION* DENGAN PLATFORM *EDGE IMPULSE*

EDUCATIONAL ROBOT WITH OBJECT DETECTION USING THE EDGE IMPULSE PLATFORM

1st Inda Lely Nurita
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom Bandung
Bandung, Indonesia
indalely@student.telkomuniversity.
ac.id

2nd Sony Sumaryo
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom Bandung
Bandung, Indonesia
sonysumaryo@telkomuniversity.ac.id

3rd Erwin Susanto
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom Bandung
Bandung, Indonesia
erwinelektro@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Era revolusi industri 4.0 menuntut transformasi paradigma pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi artificial intelligence (AI) untuk mempersiapkan generasi yang kompeten menghadapi tantangan masa depan. Penelitian ini mengembangkan robot edukasi berbasis AI object detection menggunakan platform Edge Impulse dengan algoritma FOMO (Faster Objects, More Objects) yang diimplementasikan pada ESP32-CAM untuk pembelajaran STEM interaktif. Sistem menggunakan arsitektur terdistribusi dengan ESP32-CAM sebagai unit pemrosesan AI vision dan ESP32 sebagai kontroler utama untuk navigasi robot. Model deteksi objek dilatih menggunakan dataset 3.000 gambar rambu lalu lintas dan mencapai akurasi training 99,8% dengan ukuran model 82,3 KB yang memungkinkan deployment pada microcontroller dengan resource terbatas. Hasil pengujian menunjukkan sistem mencapai success rate 100% pada kondisi pencahayaan optimal (912 lux) namun mengalami penurunan menjadi 80% pada kondisi suboptimal (750-853 lux). Robot berhasil mengintegrasikan konsep AI dengan pembelajaran STEM melalui three-phase action execution framework yang memungkinkan siswa mengobservasi proses pengambilan keputusan AI secara real-time, menunjukkan potensi sebagai platform pembelajaran yang affordable untuk memperkenalkan konsep edge AI dalam konteks pendidikan menengah.

Kata Kunci — Robot edukasi, deteksi objek, Edge Impulse, algoritma FOMO, ESP32-CAM

I. PENDAHULUAN

Era revolusi industri 4.0 menuntut transformasi paradigma pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi artificial intelligence (AI) sebagai respons terhadap kebutuhan generasi yang kompeten menghadapi tantangan masa depan. Perkembangan AI yang pesat telah menciptakan urgensi bagi sistem pendidikan untuk mempersiapkan siswa menghadapi masa depan yang sarat dengan teknologi AI, namun integrasi AI dalam pendidikan K-12 masih menghadapi tantangan signifikan, terutama dalam hal ketersediaan media pembelajaran yang sesuai dengan perkembangan teknologi mutakhir [1,2].

Systematic literature review yang dilakukan Casal-Otero et al. mengidentifikasi bahwa pendekatan AI literacy di tingkat K-12 memerlukan pengembangan kemampuan

fundamental AI melalui tiga sumbu prioritas: learning about AI, learning about how AI works, dan learning for life with AI [2]. Penelitian tersebut menekankan bahwa pembelajaran AI tidak hanya fokus pada penggunaan aplikasi AI, tetapi juga pemahaman konsep dasar, cara kerja AI, dan dampak AI terhadap kehidupan. Dalam konteks ini, pembelajaran berbasis hands-on experience menjadi krusial untuk memberikan pemahaman yang komprehensif kepada siswa mengenai teknologi AI.

Robotika edukasi telah terbukti efektif sebagai media pembelajaran yang dapat mengintegrasikan konsep AI dengan pendekatan Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM). Bellas et al. mendemonstrasikan bahwa implementasi intelligent robotics dalam pendidikan mampu memberikan pengalaman pembelajaran AI yang autentik melalui pendekatan intelligent agent [3]. Platform robotika edukasi memungkinkan siswa memahami konsep perception, representation, reasoning, learning, dan collective AI melalui interaksi langsung dengan sistem fisik yang dapat merespons lingkungan secara otonom. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa robot edukasi memberikan effect size positif mencapai 0.60 untuk peningkatan pengetahuan dan 0.287 untuk pengembangan sikap positif terhadap STEM [9]. Nugraha & Gutami juga mengembangkan kit robot edukasi STEM dengan pendekatan systems thinking untuk meningkatkan kemampuan computational thinking siswa [4].

Namun, implementasi pembelajaran AI melalui robotika masih menghadapi kendala teknis dan metodologis yang signifikan. Kompleksitas programming dan keterbatasan platform yang user-friendly menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi ini di tingkat pendidikan dasar dan menengah [5]. Penelitian Latip menunjukkan bahwa meskipun robot edukasi mampu meningkatkan engagement siswa hingga 73,4%, implementasinya memerlukan investasi tinggi dan expertise teknis yang tidak mudah diakses oleh institusi dengan anggaran terbatas [6]. Sebagian besar platform robotika edukasi yang ada belum dilengkapi dengan kemampuan AI yang memadai untuk pembelajaran object detection dan computer vision yang merupakan aspek fundamental dalam AI modern.

Perkembangan teknologi edge computing dan TinyML telah membuka peluang baru untuk mengimplementasikan AI pada perangkat dengan keterbatasan sumber daya. Platform Edge Impulse menawarkan solusi machine learning operations (MLOps) yang memungkinkan pengembangan model TinyML dengan workflow yang sederhana dan intuitif [1]. Kemudahan akses platform ini memungkinkan integrasi teknologi AI ke dalam pembelajaran tanpa memerlukan expertise teknis yang mendalam, menciptakan peluang besar untuk penerapan teknologi machine learning pada sistem edukasi tingkat dasar. ESP32-CAM sebagai microcontroller dengan kemampuan pemrosesan gambar telah menjadi pilihan utama dalam pengembangan aplikasi computer vision skala kecil [7]. Kombinasi antara affordability, functionality, dan ease of use menjadikan perangkat ini ideal untuk implementasi sistem pembelajaran berbasis AI.

Penelitian Firdaus et al. menunjukkan keunggulan algoritma FOMO (Faster Objects, More Objects) dibandingkan YOLO untuk perangkat dengan sumber daya terbatas, di mana FOMO memiliki waktu inferensi lima kali lebih cepat dengan F1 Score mencapai 99,2% pada ESP32-CAM [7]. Implementasi CNN pada ESP32-CAM untuk klasifikasi objek telah menunjukkan hasil signifikan dalam berbagai aplikasi praktis, dengan sistem otomatis pemilahan sampah infeksius mencapai tingkat akurasi klasifikasi 97,3% dan success rate 100% pada pengujian keseluruhan sistem [8].

Berdasarkan analisis gap penelitian, terdapat kebutuhan untuk mengembangkan platform robot edukasi yang mengintegrasikan teknologi object detection dengan biaya terjangkau dan mudah diimplementasikan. Sistem yang ada umumnya menggunakan sensor konvensional atau memerlukan expertise teknis tinggi, sehingga sulit dipahami oleh pemula dan anak-anak. Keterbatasan ini menciptakan gap antara kebutuhan pembelajaran AI yang praktis dengan ketersediaan tools yang accessible untuk tingkat pendidikan K-12.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan robot edukasi object detection yang memanfaatkan algoritma FOMO pada platform Edge Impulse dan ESP32-CAM. Sistem dirancang untuk menciptakan ecosystem pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi AI dengan pendekatan STEM melalui alat peraga robot yang affordable dan user-friendly. Pengembangan meliputi sistem navigasi otomatis robot berdasarkan deteksi objek secara real-time, serta implementasi educational display yang memfasilitasi transfer knowledge yang efektif kepada pendidik dan siswa. Kontribusi utama penelitian ini adalah menyediakan solusi pembelajaran AI yang praktis, ekonomis, dan mudah direplikasi untuk meningkatkan AI literacy di tingkat pendidikan dasar dan menengah, sehingga dapat diadaptasi sesuai kebutuhan spesifik institusi pendidikan dengan anggaran terbatas.

II. KAJIAN TEORI

A. Robot Edukasi dan Pembelajaran STEM

1. Teori Pembelajaran Konstruktivisme

Robot edukasi sebagai sistem pembelajaran berbasis teknologi robotika menerapkan prinsip konstruktivisme untuk memfasilitasi pengalaman belajar langsung (*hands-on learning experience*), sehingga siswa dapat membangun pemahaman melalui interaksi aktif

dengan sistem fisik yang responsif terhadap lingkungan [10]. Perkembangan teori konstruktivisme dalam konteks robot edukasi dapat dipahami melalui tiga tahap evolusi yang saling berkaitan. [11].

2. STEM Integration dalam Robotika

Kajian systematic review menunjukkan bahwa robotika memiliki peran strategis dalam desain pembelajaran STEM, dengan fokus penelitian utama pada persepsi peserta didik (learner) dan pendidik (teacher) [13]. Robot edukasi terbukti efektif dalam meningkatkan STEM competence, khususnya dalam mengubah self-efficacy negatif menjadi positif. Integrasi STEM melalui robotika mencakup empat domain utama yang saling terkait. [12].

3. State of The Art Robot Edukasi

Tinjauan komprehensif menunjukkan bahwa LEGO Mindstorms masih mendominasi kategori *humanoid robot*, sementara BeeBot dan KIBO populer pada kategori *floor robot* [13]. Konfigurasi robot edukasi yang optimal untuk pembelajaran AI/ML melibatkan penggunaan *microcontroller* dengan dukungan *computer vision*, sensor navigasi, dan *user-friendly programming interface*. [13].

B. Sistem Kontrol Robot

1. Arsitektur Robot Mobile

Arsitektur robot mobile untuk aplikasi edukasi memerlukan desain sistem yang mengintegrasikan komponen sensor, aktuator, dan processing unit dalam konfigurasi yang optimal untuk pembelajaran STEM. [10]. Konfigurasi robot edukasi yang optimal melibatkan penggunaan *microcontroller* dengan kemampuan pemrosesan yang memadai, sensor navigasi untuk obstacle detection, sistem kamera untuk computer vision, dan interface user yang mudah dipahami oleh siswa. [10].

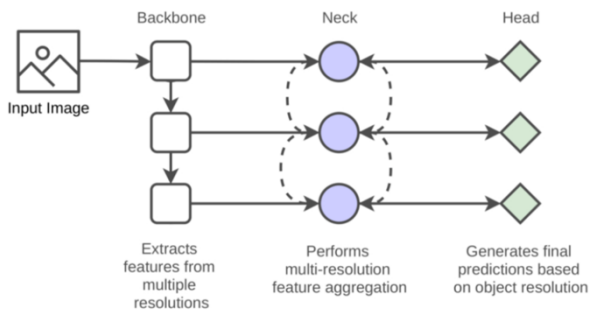
C. Artificial Intelligence (AI) dalam Pendidikan

1. AI Literacy untuk K-12

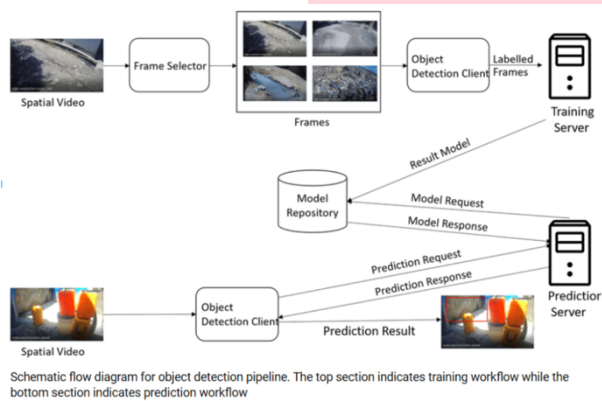
Era revolusi industri 4.0 menuntut transformasi paradigma pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi artificial intelligence sebagai respons terhadap kebutuhan generasi yang kompeten menghadapi tantangan masa depan. [14]. Evolusi AI mengalami transformasi signifikan dari sistem pakar berbasis aturan (rule-based) pada tahun 1970-1980an hingga pembelajaran mendalam (deep learning) di era modern. Sistem pakar awal menggunakan pernyataan if-then dan representasi berbasis teori himpunan untuk mengurangi persyaratan komputasi, seperti yang terlihat pada pemeriksa ejaan dan tata bahasa yang masih digunakan hingga saat ini [14].

2. Computer Vision dan Object Detection

Computer vision merupakan cabang dari artificial intelligence yang bertujuan untuk memungkinkan komputer dapat melihat dan memahami konten visual seperti yang dilakukan manusia. [17]. Secara fundamental, computer vision menggabungkan konsep dari berbagai disiplin ilmu termasuk image processing, pattern recognition, dan machine learning untuk menciptakan sistem yang dapat menginterpretasikan dunia visual melalui tahapan preprocessing citra, ekstraksi fitur, analisis pola, dan klasifikasi objek.



Algoritma CNN untuk object detection telah berkembang dari pendekatan two-stage seperti R-CNN menuju one-stage detectors yang lebih efisien seperti YOLO (You Only Look Once) dan SSD (Single Shot MultiBox Detector). Arsitektur CNN dalam object detection memanfaatkan convolutional layers untuk ekstraksi fitur hierarkis, pooling layers untuk reduksi dimensi, dan fully connected layers untuk klasifikasi akhir[19].



Proses object detection secara operasional melibatkan enam tahapan utama:

- 1) Input Preprocessing untuk normalisasi dan resize gambar sesuai requirement model CNN.
- 2) Feature Extraction melalui backbone CNN untuk mengekstraksi fitur hierarkis.
- 3) Region Proposal (untuk two-stage) yang menghasilkan kandidat region.
- 4) Classification & Regression pada detection head untuk klasifikasi objek dan regresi koordinat bounding box.
- 5) Post-processing melalui non-maximum suppression untuk menghilangkan deteksi duplikat.
- 6) Output Generation yang menghasilkan final detections dengan class labels, confidence scores, dan bounding box coordinates.

D. Edge Computing dan TinyML

A. Konsep Edge AI

Edge computing merupakan paradigma komputasi terdistribusi yang memindahkan pemrosesan data dari pusat data cloud ke perangkat tepi (edge devices) untuk meningkatkan efisiensi dan responsivitas sistem. Teknologi ini semakin berkembang karena kebutuhan akan data yang lebih cepat dan andal, terutama dalam aplikasi yang melibatkan AI dan Machine Learning untuk pengambilan

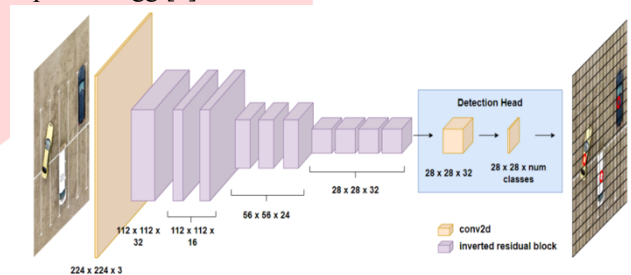
keputusan otomatis[20].

B. Platform Edge Impulse

Edge Impulse merupakan platform Machine Learning Operations (MLOps) berbasis cloud yang dirancang khusus untuk pengembangan embedded dan edge ML (TinyML) systems yang dapat di-deploy ke berbagai target hardware. Platform ini mengatasi tantangan fragmentasi software stack dan heterogenitas deployment hardware dalam ekosistem TinyML dengan menyediakan solusi terintegrasi yang mencakup seluruh siklus pengembangan ML[1].

C. Algoritma FOMO

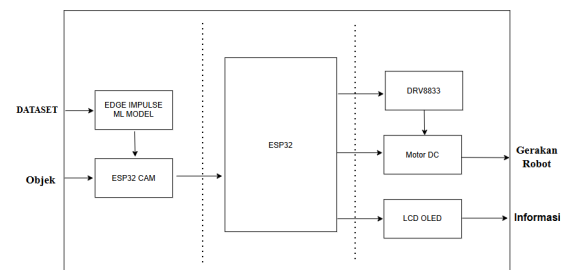
FOMO (Faster Objects, More Objects) merupakan algoritma deteksi objek yang dirancang khusus untuk perangkat dengan keterbatasan sumber daya komputasi, khususnya microcontroller. Algoritma ini dikembangkan sebagai alternatif ringan dari arsitektur object detection tradisional seperti YOLO yang membutuhkan daya komputasi tinggi[7].



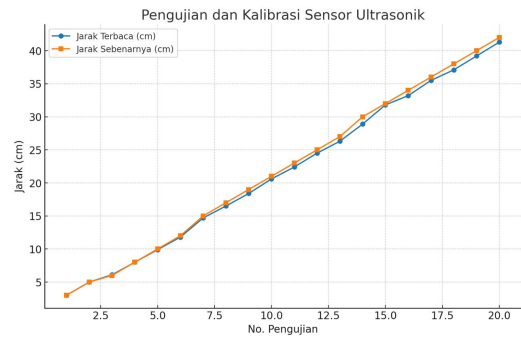
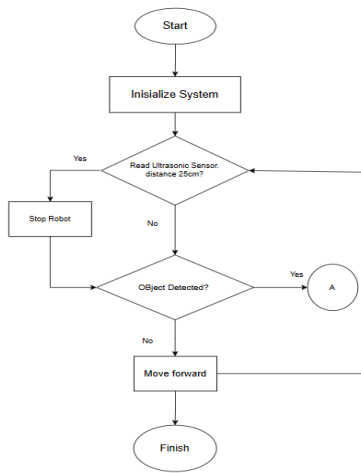
Pada Gambar di atas Arsitektur FOMO menunjukkan alur pemrosesan dari input gambar $224 \times 224 \times 3$ melalui feature extractor yang menghasilkan feature grid 28×28 , kemudian diproses oleh detection head untuk klasifikasi setiap grid cell. Output akhir berupa prediksi centroid objek setelah tahap clustering, dengan contoh filter sizes dan dimensi feature map pada setiap tahap pemrosesan. Penelitian komparatif menunjukkan keunggulan algoritma FOMO dibandingkan YOLO untuk perangkat dengan sumber daya terbatas, di mana FOMO memiliki waktu inferensi lima kali lebih cepat dengan F1 Score mencapai 99,2% pada ESP32-CAM[7]. Pipeline processing FOMO mengikuti alur: input preprocessing → feature extraction → classification → clustering → output generation.

III. PERANCANGAN SISTEM

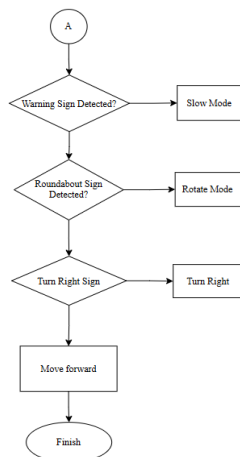
1. Blok Diagram



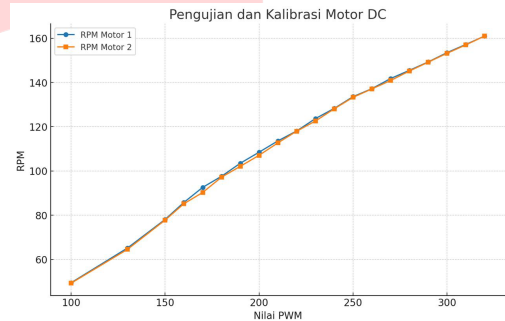
2. Flowchart Sistem



Pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 dilakukan dengan menggunakan penggaris sebagai alat ukur referensi untuk mengukur jarak pada 20 titik berbeda dalam rentang 3-42 cm. Pengujian dilakukan dengan menempatkan objek pada jarak yang telah ditentukan menggunakan penggaris, kemudian membandingkan hasil pembacaan sensor dengan jarak aktual yang diukur.



C. Pengujian dan Kalibrasi Motor DC



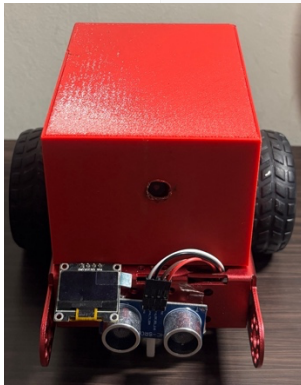
Pengujian motor DC dilakukan dengan menggunakan tachometer digital sebagai alat ukur untuk mengukur RPM aktual pada 20 titik nilai PWM berbeda dari 100-320. Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal PWM pada driver DRV8833 dan mengukur RPM yang dihasilkan oleh masing-masing motor menggunakan tachometer. Setiap pengukuran dalam kondisi motor tanpa beban untuk mendapatkan karakteristik dasar motor.

D. Hasil Model pada Edge Impulse

Pada bagian ini menjadi proses awal pengambilan gambar sesuai dengan objek yang telah diklasifikasikan menjadi tiga yaitu turn right sign, roundabout sign dan warning sign. Dataset akan digunakan untuk melakukan pelatihan model yang bertujuan untuk melatih model agar dapat mendeteksi sesuai dengan kelas yang sudah ditentukan. Pembuatan dataset ini dilakukan secara bertahap yaitu pengambilan gambar menggunakan ESP32-CAM, pengolahan gambar menjadi dataset dengan melakukan labeling untuk menentukan lokasi bounding box dalam suatu gambar, split dataset menjadi dua yaitu training dan testing, dan melakukan augmentasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

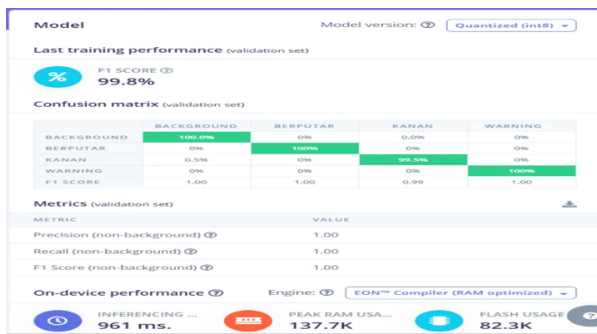
A. Hasil Pengujian Sistem



Gambar Keseluruhan Sistem

Pada bab ini akan dibahas hasil pengujian dari sistem robot edukasi AI object detection yang telah dirancang. Pengujian dilakukan secara bertahap mulai dari kalibrasi komponen, deteksi objek pada ESP32-CAM, hingga pengujian sistem keseluruhan untuk memastikan kinerja robot secara optimal dan konsistensi sistem.

B. Pengujian dan Kalibrasi Sensor Ultrasonik



Komposisi Dataset:

- Total dataset: 3.000 gambar
 - Turn right sign: 1.000 gambar
 - Roundabout sign: 1.000 gambar
 - Warning sign: 1.000 gambar
 - Resolusi pengambilan: 360x240 pixels (ESP32-CAM)
 - Split dataset: 80% training, 20% testing
- Split dataset 80% training dan 20% testing merupakan praktik standar dalam machine learning yang bertujuan untuk:
- Training set (80%): Digunakan untuk melatih model agar dapat mempelajari pola dan karakteristik dari setiap kelas rambu lalu lintas. Model akan mengoptimalkan parameter-parameternya berdasarkan data training ini.
 - Testing set (20%): Digunakan untuk mengevaluasi performa model pada data yang belum pernah dilihat sebelumnya. Hal ini penting untuk mengukur kemampuan generalisasi model dan mencegah overfitting.

Analisis

A. Analisis Kalibrasi Komponen Hardware

1. Analisis Sensor Ultrasonik HC-SR04

Hasil pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 menunjukkan performa yang sangat baik dengan akurasi rata-rata 98,11% dan error rata-rata 1,89%. Sensor menunjukkan konsistensi tinggi pada rentang pengukuran 3-42 cm dengan variasi error terbesar 3,67% pada jarak 30 cm. Hal ini sejalan dengan spesifikasi teknis HC-SR04 yang memiliki resolusi 0,3 cm dan akurasi ± 2 cm.

Variasi error yang semakin besar pada jarak yang lebih jauh disebabkan oleh karakteristik gelombang ultrasonik yang mengalami dispersi dan reduksi amplitudo seiring bertambahnya jarak tempuh. Fenomena ini sesuai dengan prinsip fisika gelombang dimana intensitas gelombang berbanding terbalik dengan kuadrat jarak. Meskipun demikian, performa sensor tetap memadai untuk aplikasi obstacle avoidance pada robot edukasi dengan threshold deteksi 30 cm.

2. Analisis Motor DC

Pengujian motor DC dengan driver DRV8833 menghasilkan error rata-rata 0,62% dengan selisih RPM rata-rata 0,53. Konsistensi performa motor sangat baik pada rentang PWM 100-320, dengan error terbesar 2,51% pada PWM 170. Driver DRV8833 menunjukkan karakteristik respons linear terhadap sinyal PWM, memvalidasi pilihan komponen yang tepat untuk aplikasi differential drive robot. Karakteristik motor

menunjukkan slight inconsistency pada PWM 170 yang dapat disebabkan oleh transisi dari torque starting ke running torque pada motor DC. Hal ini normal dalam karakteristik motor brushed DC dan tidak signifikan mempengaruhi performa navigasi robot. Kalibrasi motor kiri (89 PWM) dan motor kanan (90 PWM) berhasil menciptakan gerakan lurus yang stabil, memvalidasi implementasi differential drive control.

B. Analisis Deteksi Objek ESP32-CAM

1. Validasi Model Edge Impulse dan Algoritma FOMO

Model FOMO yang dilatih pada platform Edge Impulse menunjukkan performa excellent dengan F1 Score 99,8% pada validation set, memvalidasi keunggulan algoritma FOMO untuk perangkat dengan resource terbatas sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Confusion matrix menunjukkan akurasi sempurna (100%) untuk turn right sign dan warning sign, serta 99,5% untuk roundabout sign.

Feature explorer memvisualisasikan separabilitas yang baik antar kelas dalam feature space, mengkonfirmasi bahwa backbone MobileNetV2 berhasil mengekstrak fitur distinktif untuk setiap jenis rambu. Clustering pattern yang terpisah jelas antar kelas mengindikasikan model telah mempelajari representasi feature yang optimal, mendukung performa tinggi pada validation set.

2. Pengaruh Kondisi Pencahayaan terhadap Performa AI

Analisis pengaruh pencahayaan menunjukkan korelasi kuat antara kondisi lighting dengan performa deteksi. Pada kondisi optimal (912 lux), turn right sign mencapai success rate 100% dengan confidence rata-rata 79,4%. Sebaliknya, pada kondisi suboptimal (750-853 lux), warning sign dan roundabout sign mengalami penurunan performa dengan success rate 80% dan beberapa frame tidak terdeteksi.

Fenomena ini sesuai dengan teori computer vision yang dijelaskan pada Bab 2, dimana kualitas input image secara signifikan mempengaruhi performa CNN. Kondisi pencahayaan rendah menyebabkan noise dalam image yang mengurangi signal-to-noise ratio, sehingga feature extraction menjadi kurang optimal. ESP32-CAM dengan sensor OV2640 memiliki keterbatasan dalam low-light performance, menciptakan gap antara training environment dan real-world deployment.

C. Analisis Integrasi Sistem Robot Edukasi

1. Validasi Phased Action Execution dan Decision Making Algorithm

Pengujian sistem keseluruhan memvalidasi keberhasilan implementasi prioritized decision making algorithm dengan success rate 100% untuk semua jenis objek. Arsitektur terdistribusi antara ESP32-CAM dan ESP32 controller berhasil mengintegrasikan AI detection dengan robot control melalui komunikasi UDP yang stabil.

Three-phase action execution menunjukkan konsistensi temporal yang baik: fase informasi (3,0-3,1 detik), fase pergerakan maju (2,0-2,1 detik), dan fase aksi dengan durasi bervariasi sesuai kompleksitas (2-5 detik). Konsistensi ini memvalidasi reliability communication system dan robustness control algorithm, sejalan dengan teori sistem kontrol robot yang memerlukan sensor fusion dan real-time processing capability.

2. Validasi Integrasi STEM melalui Experiential Learning Framework

Implementasi sistem berhasil memvalidasi integrasi STEM yang dirancang, mengintegrasikan Science (prinsip fisika gelombang ultrasonik dan computer vision), Technology (Edge AI dan microcontroller programming), Engineering (systematic design approach), dan Mathematics (statistical analysis dan geometric computation).

Sistem educational display berhasil menyajikan informasi AI secara real-time dengan format yang accessible untuk siswa tingkat menengah. Display menampilkan:

- AI Process Transparency: "Neural network mengenali rambu ROUNDABOUT"
- Confidence Visualization: Real-time confidence score dengan visual bar indicator
- Educational Context: "CNN mengenali fitur visual rambu KANAN!"
- System Status: AI mode (ON/OFF), camera connection, dan WiFi status

Sistem educational display berhasil menyajikan informasi AI secara real-time dengan format yang accessible untuk siswa tingkat menengah. Display menampilkan:

Three-phase execution framework memungkinkan pembelajaran sistematis dimana siswa dapat mengamati proses AI secara bertahap: information display phase memberikan educational window untuk memahami AI decision process, forward movement phase memungkinkan antisipasi robot behavior, dan action execution phase mendemonstrasikan implementasi AI decision menjadi physical robot action.

Pendekatan ini mengkonfirmasi teori konstruktivisme Piaget yang dijelaskan sebelumnya, dimana siswa membangun pemahaman melalui hands-on experience dengan sistem AI yang nyata. Robot edukasi berhasil menciptakan authentic learning environment yang memfasilitasi transfer knowledge teknologi AI kompleks menjadi pembelajaran yang accessible melalui experiential learning.

Eksperimen Pembelajaran Interaktif

Desain sistem memungkinkan serangkaian eksperimen pembelajaran yang terstruktur:

Percobaan 1: Pattern Recognition Analysis "Letakkan WARNING SIGN di depan robot dan amati respons"

- Observasi: Robot berhenti → menampilkan penjelasan AI → bergerak maju → mode lambat
- Pembelajaran: Siswa memahami bagaimana AI mengenali pola visual dan menjelaskan proses keputusan

Percobaan 2: Computer Vision Navigation "Posisikan RIGHT SIGN dan perhatikan navigasi berbasis visi"

- Observasi: Penjelasan AI → pergerakan maju → belok kanan dengan indikator visual
- Pembelajaran: Implementasi computer vision untuk guided navigation dengan feedback edukatif real-time

Percobaan 3: Confidence Threshold Understanding "Coba ROUNDABOUT SIGN dari berbagai jarak dan sudut"

- Observasi: Variasi confidence score → penjelasan edukatif → behavior yang berbeda
- Pembelajaran: Analisis threshold confidence dan environmental factors dalam AI reliability

Pendekatan eksperimental ini memvalidasi bahwa robot edukasi dapat berfungsi sebagai effective pedagogical tool

untuk memperkenalkan complex AI concepts melalui structured experiential learning framework yang supported dengan comprehensive real-time feedback system.

E. KESIMPULAN

Penelitian ini menjawab kebutuhan platform robot edukasi berbasis AI object detection yang terjangkau untuk pembelajaran STEM tingkat menengah. Sistem menggunakan Edge Impulse dengan algoritma FOMO pada arsitektur terdistribusi ESP32-CAM untuk AI vision processing dan ESP32 untuk robot control. Model mencapai akurasi training 99,8% dengan F1 Score excellent, namun performa di dunia nyata menurun dari 100% (912 lux) menjadi 80% (750–853 lux), mengonfirmasi tantangan ketergantungan lingkungan. Meski ada keterbatasan teknis, sistem memenuhi tujuan sebagai media pembelajaran AI melalui three-phase action execution framework, yang memvalidasi pendekatan konstruktivisme. Integrasi STEM terlihat dari penerapan computer vision, Edge AI, system integration, dan analisis statistik. Robot ini menawarkan solusi pembelajaran AI yang praktis, ekonomis, dan mudah direplikasi untuk institusi pendidikan dengan anggaran terbatas, menjembatani gap antara kebutuhan pembelajaran AI dan ketersediaan tools yang accessible bagi tingkat K-12.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Hymel *et al.*, "Edge Impulse: An MLOps Platform for Tiny Machine Learning," 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2212.03332>
- [2] L. Casal-Otero, A. Catala, C. Fernández-Morante, M. Taboada, B. Cebreiro, and S. Barro, "AI literacy in K-12: a systematic literature review," *Int J STEM Educ*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40594-023-00418-7.
- [3] F. Bellas, M. Naya-Varela, A. Mallo, and A. Paz-Lopez, "Education in the AI era: a long-term classroom technology based on intelligent robotics," *Humanit Soc Sci Commun*, vol. 11, no. 1, pp. 1–20, 2024, doi: 10.1057/s41599-024-03953-y.
- [4] B. E. Nugraha and R. S. Gutami, *LOGARITHMUS: KIT ROBOT EDUKASI SCIENCE, TECHNOLOGY, ENGINEERING AND MATHEMATICS (STEM) UNTUK MENYONGSONG "MERDEKA BELAJAR."* 2020.
- [5] E. Z. Astuti, F. Agustina, E. Dolphina, and N. K. Ningrum, "Pengenalan Algoritma Komputasi pada Kelas Robotik pada Siswa SD Islam Bintang Juara dengan Metode Computational Thinking," vol. 8, no. 1, pp. 470–474, 2025.
- [6] A. Latip, "Minat Belajar Peserta Didik SMP Pada Pembelajaran STEM dengan Media Robot Edukasi," *Jurnal Literasi Pendidikan Fisika*, vol. 1, no. 02, pp. 90–96, 2020, doi: 10.30872/jlpf.v1i2.353.
- [7] F. Firdaus, M. Wibowo, R. Tullah, and W. Ricesa, "Studi Perbandingan Algoritma YOLO dan FOMO untuk Object Detection pada Perangkat ESP32-CAM," *Insect (Informatics and Security): Jurnal Teknik Informatika*, vol. 11, no. 1, pp. 44–54, 2025, doi: 10.33506/insect.v11i1.4289.
- [8] R. I. Firdaus, W. H. Sugiharto, and M. I. Ghozali, "Implementasi Convolutional Neural Network Dalam Sistem Otomatis Pemilahan Sampah Infeksius Berbasis Citra Digital," *SisInfo*, vol. 7, no. 1, pp. 11–22, 2025, doi: 10.37278/sisinfo.v7i1.1052.
- [9] T. Sapounidis and Dimitris. Alimisis, "a R Eview of T Hermal M Anagement T Echnologies in," *Educational robotics for STEM: A review of technologies and some educational considerations.*, no. October, pp. 1–19, 2020.
- [10] H. J. Saputra, W. Kurniawan, N. Lestari, and C. Riantoni, "Development of Straight Motion Kinematics Learning Module Based on Educational Robotics and Guided Inquiry," vol. 09, no. 02, pp. 225–235, 2025.
- [11] S. Prakash Chand, "Constructivism in Education: Exploring the Contributions of Piaget, Vygotsky, and Bruner," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 12, no. 7, pp. 274–278, 2023, doi: 10.21275/sr23630021800.
- [12] A. V. Pou, X. Canaleta, and D. Fonseca, "Computational Thinking and Educational Robotics Integrated into Project-Based Learning," *Sensors*, vol. 22, no. 10, 2022, doi: 10.3390/s22103746.
- [13] A. D. la Hoz, L. Melo, F. Cañada, and J. Cubero, "Educational robotics for science and mathematics teaching: Analysis of pre-service teachers' perceptions and self-confidence," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40032.
- [14] H. Jaya *et al.*, *Kecerdasan Buatan*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [15] G. Karalekas, S. Vologiannidis, and J. Kalomiros, "Teaching Machine Learning in K–12 Using Robotics," *Educ Sci (Basel)*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.3390/educsci13010067.
- [16] M. Nasihuddin, "Peran Kecerdasan Buatan Terhadap Transformasi Pendidikan Di Era Digital," *Salimiya: Jurnal Studi Ilmu Keagamaan Islam*, vol. 5, no. 4, pp. 410–418, 2024, doi: 10.58401/salimiya.v5i4.1919.
- [17] C. Juliandy and D. Darwin, "Pengenalan Computer Vision Berbasis Convolutional Neural Network melalui DewataTalks," *Sarwahita*, vol. 21, no. 01, pp. 45–52, 2024, doi: 10.21009/sarwahita.211.4.
- [18] T. A. Dompeipen and S. R. U. A. Sompie, "Penerapan computer vision untuk pendeteksian dan penghitungan jumlah manusia," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 15, no. 4, pp. 1–12, 2020.
- [19] R. A. Tilasefana and R. E. Putra, "Penerapan Metode Deep Learning Menggunakan Algoritma CNN Dengan Arsitektur VGG Net Untuk Pengenalan Cuaca," *Journal of Informatics and Computer Science*

(JINACS), vol. 5, no. 01, pp. 48–57, 2023, [Online]. Available:

<https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jinacs/article/view/54515>

- [20] N. Tjahyadi, F. Direktorat, K. Surabaya, H. Widyantara, and H. Briantoro, “Penerapan Edge Computing pada Pertanian untuk Efisiensi Jaringan dan Optimalisasi Komputasi,” vol. 12, no. 2, p. 2346, 2025.

- [21] Anushree Nagvekar, “Edge AI: Revolutionizing Embedded Systems through On-Device Processing,” *International Journal of Scientific Research* [6]

Computer Science, Engineering and Information Technology, vol. 11, no. 1, pp. 2871–2880, 2025, doi: 10.32628/cseit251112289.

- [22] L. Boyle, N. Baumann, S. Heo, and M. Magno, “Enhancing Lightweight Neural Networks for Small Object Detection in IoT Applications,” *Proceedings of IEEE Sensors*, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1109/SENSORS56945.2023.10325126.