

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**ALAT DETEKSI *TACTILE PAVING* BERBASIS PENGOLAHAN
CITRA DIGITAL SECARA *REAL-TIME* UNTUK
TONGKAT TUNA NETRA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada Prodi Teknik
Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh:

HAQQI AKBAR YUFA

NIM. 12050512082

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM
PEKANBARU**

2025

LEMBAR PERSETUJUAN

ALAT DETEKSI *TACTILE PAVING* BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL SECARA *REAL-TIME* UNTUK TONGKAT TUNA NETRA

TUGAS AKHIR

Oleh:

HAQQI AKBAR YUFA
12050512082

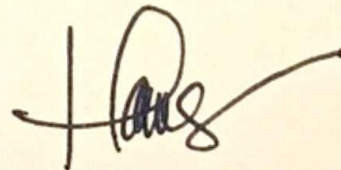
Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 9 Juli 2025

Ketua Prodi Teknik Elektro



Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T.
NIP. 19721021 200604 2 001

Pembimbing



Dr. Harris Simaremare S.T., M.T.
NIP. 19830625 200801 1 008

LEMBAR PENGESAHAN

ALAT DETEKSI *TACTILE PAVING* BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL SECARA *REAL-TIME* UNTUK TONGKAT TUNA NETRA

TUGAS AKHIR

Oleh:

HAQQI AKBAR YUFA
12050512082

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 9 Juli 2025

Pekanbaru, 9 Juli 2025

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

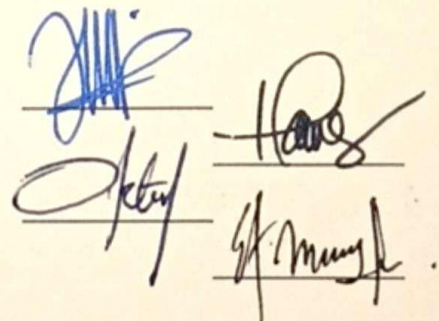

Dr. Yuslenita Muda, M.Sc.
NIP. 19770103 200710 2 001

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T.
NIP. 19721021 200604 2 001

DEWAN PENGUJI

Ketua : Jufrizel, S.T., M.T.
Sekretaris : Dr. Harris Simaremare, S.T., M.T.
Anggota 1 : Oktaf Brilliant Kharisma, S.T., M.T.
Anggota 2 : Ewi Ismaredah, S.Kom., M. Kom.



LEMBAR ATAS HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan dengan mengikuti kaidah pengutipan yang berlaku.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman, dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Haqqi Akbar Yufa

NIM : 12050512082

Tempat/Tgl. Lahir : Pulau Burung, 11 Desember 2002

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Tugas Akhir :

ALAT DETEKSI *TACTILE PAVING* BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL SECARA *REAL-TIME* UNTUK TONGKAT TUNA NETRA

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulis Artikel dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
2. Semua kutipan pada Karya Tulis saya ini sudah disebutkan sumbernya.
3. Oleh karena itu Artikel saya ini sah, saya nyatakan bebas dari plagiasi.
4. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam Artikel saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga

Pekanbaru, 9 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,



HAQQI AKBAR YUFA

NIM.12050512082

LEMBAR PERSEMBAHAN

Puncak dari upaya perenungan yang tekun dan kerja keras telah dilakukan, membuahkan hasil dalam perwujudan sebuah dokumen ilmiah yang sekarang menjadi bukti dari upaya akademis penulis. Dengan ini penulis persembahkan pencapaian ini dengan sepenuh hati kepada :

"Allah tiada Tuhan melainkan Dia, Yang Maha Hidup, Maha Berdiri Sendiri, yang karena-Nya segala sesuatu ada" (QS. Ali Imran : 2)

Ridho-Mu menjadi katalisator bagi hasil usaha-ku. Dengan bimbinganmu kini aku dapat mewujudkan Tugas Akhir-ku. Ya Allah, Yang Maha Kuasa dan Maha Penyayang, semoga Engkau senantiasa membentengi dasar-dasar keimananku, meluruskan kemurnian niatku, dan menundukkan wadahkanku secara eksklusif kepada kekuasaan-Mu sebagai Penguasa Tertinggi Alam Semesta.

"Dan taatlah kepada Rasul supaya kamu diberi rahmat" (QS. An-Nuur : 56)

Nabi Muhammad saw, perwujudan dari perilaku yang patut diteladani. Berilah aku hak istimewa untuk menjadi seorang pengikut yang setia, yang tak henti-hentinya menyebut nama-Mu dan mengakui kedaulatan ilahi-Mu. Semoga aku selalu meniru sikap mulia yang Engkau tunjukkan, bercita-cita untuk termasuk dalam golongan orang-orang yang dianugerahi sifat-sifat agung pada Hari Kiamat yang akan datang.

"....Wahai Tuhanku, kasihilah mereka keduanya, sebagaimana mereka berdua telah mendidik aku ketika kecil" (QS. Al Israa' : 24)

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua penulis atas dukungan mereka yang tak tergoyahkan. Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya terkhusus kepada mama saya, yang telah berdedikasi dalam memenuhi kebutuhan saya selama proses penyelesaian tugas akhir ini. Selain itu, saya juga sangat menghargai ayah saya, yang berfungsi sebagai semangat pemandu saya, membayangkan masa depan di mana pencapaian gelar sarjana ini meringankan beban di pundak mereka.

Dan teman yang dengan sungguh-sungguh berusaha untuk memberikan inspirasi, hiburan, kegemabiraan, dan bantuan dalam mengatasi tantangan saat melakukan tugas akhir ini.

ALAT DETEKSI *TACTILE PAVING* BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL SECARA *REAL-TIME* UNTUK TONGKAT TUNA NETRA

HAQQI AKBAR YUFA

NIM : 12050516482

Tanggal Sidang : 9 Juli 2025

Tanggal Wisuda :

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim

Jl. Soebrantas KM 15 No.155 Pekanbaru

ABSTRAK

Penyandang tunanetra menghadapi tantangan mobilitas yang signifikan akibat keterbatasan tongkat putih dan inkonsistensi *tactile paving* di ruang publik, yang sering kali menyebabkan kebingungan dan risiko keselamatan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan alat deteksi *tactile paving* secara *real-time* berbasis pengolahan citra digital untuk meningkatkan kemandirian dan keamanan navigasi tunanetra. Sistem ini menggunakan kamera ESP32-CAM yang terintegrasi dengan model *deep learning* MobileNetV2-FOMO, dioptimalkan melalui *Edge Impulse Studio* untuk performa efisien pada perangkat *embedded*. Dataset yang terdiri dari 100 gambar *tactile paving* (*line type* dan *spot type*) dikumpulkan di lingkungan nyata dan dilatih untuk mendeteksi pola dengan akurasi tinggi. Hasil pengujian menunjukkan performa unggul dengan F1 Score 0,90 dan *latency* rata-rata 324 ms, memungkinkan umpan balik *real-time* melalui vibrator untuk *line type* (penunjuk arah) dan *buzzer* untuk *spot type* (peringatan). Alat ini terbukti efektif dalam berbagai kondisi pencahayaan dan permukaan, meskipun terdapat sedikit keterbatasan pada deteksi *spot type* di lingkungan redup dengan oklusi.

Kata Kunci: ESP32-CAM, FOMO, *Object Detection*, *Tactile Paving*, Tunanetra.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

REAL-TIME DIGITAL IMAGE PROCESSING-BASED TACTILE PAVING DETECTION TOOL FOR VISUALLY IMPAIRED CANES

HAQQI AKBAR YUFA

NIM : 12050516482

Date of Final Exam : 9 July 2025

Date of Graduation :

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science and Technology

State Islamic University Sultan Syarif Kasim

Jl. Soebrantas KM 15 No.155 Pekanbaru

ABSTRACT

Visually impaired individuals face significant mobility challenges due to the limitations of white canes and inconsistent tactile paving in public spaces, often leading to confusion and safety risks. This research aims to develop a real-time tactile paving detection device based on digital image processing to enhance navigation independence and safety for the visually impaired. The system integrates an ESP32-CAM camera with a MobileNetV2-FOMO deep learning model, optimized via Edge Impulse Studio for efficient performance on embedded devices. A dataset consisting of 100 tactile paving images (line type and spot type) was collected from real-world environments and trained to detect patterns with high accuracy. Testing results demonstrate excellent performance with an F1 Score of 0.90 and an average latency of 324 ms, enabling real-time feedback through a vibrator for line type (guidance path) and a buzzer for spot type (warning). The device proved effective across various lighting and surface conditions, although it exhibited minor limitations in detecting spot type in low light, occluded environments.

Keywords: *ESP32-CAM, FOMO, Object Detection, Tactile Paving, Visually Impaired.*

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Pujian dan rasa syukur disampaikan kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan petunjuk-Nya kepada saya sebagai penulis. Doa dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sebagai pemimpin dan teladan bagi seluruh umat di seluruh dunia, yang patut dijadikan contoh dan diikuti oleh kita semua. Dengan izin Allah SWT, saya berhasil menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul "**Alat Deteksi Tactile Paving Berbasis Pengolahan Citra Digital Secara Real-Time Untuk Tongkat Tuna Netra**".

Melalui bantuan dan arahan yang diberikan oleh individu yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga doa dari orang-orang di sekitar penulis, penyelesaian Tugas Akhir ini dapat tercapai dengan kesederhanaan. Menyelesaikan tugas akhir merupakan syarat yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau untuk meraih gelar sarjana.

Oleh karena itu, adalah tepat bagi penulis untuk menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada mama tercinta Yuli Erwati, papa tercinta Ifan Bahri, abang tercinta Agung Nugraha Yufa, dan adik tercinta Nikita Raihana Yufa, yang selalu memberikan kontribusi istimewa, serta motivasi dan doa yang tiada henti hentinya.
2. Ibu Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
3. Bapak Sutoyo, S.T., M.T. selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
4. Bapak Ahmad Faizal, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro.
5. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng., selaku dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan saran untuk Tugas Akhir dari penulis.
6. Bapak Dr. Harris Simaremare, S.T., M.T., sebagai pembimbing Tugas Akhir, telah dengan penuh dedikasi menyisihkan waktu, energi, dan pemikirannya untuk memberikan panduan serta motivasi kepada penulis selama pelaksanaan tugas akhir, sehingga penulis berhasil menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Bapak Oktaf Brilliant Kharisma, S.T., M.T., selaku dosen penguji satu yang telah memberikan kritik dan saran untuk Tugas Akhir dari penulis.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

8. Ibu Ewi Ismaredah, S.Kom., M. Kom., Selaku dosen penguji dua yang telah memberikan kritik dan saran untuk Tugas Akhir dari penulis.
9. Dosen dari Program Studi Fakultas Sains dan Teknologi di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau yang telah memberikan panduan serta bimbingan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Putri Khairunnisa, yang telah membantu serta memberikan dukungan kepada penulis selama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Seluruh teman-teman, saudara, kerabat, yang telah memberikan dukungan, semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. memberikan dukungan, semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Semoga balasan pahala dari Allah SWT menyertai segala bantuan yang telah diberikan, baik dalam bentuk dukungan moril maupun materil. Penulis berharap agar Tugas Akhir ini memberikan manfaat bagi penulis sendiri serta seluruh pembaca..

Semua kekurangan berasal dari penulis, sedangkan kesempurnaan sepenuhnya adalah hak prerogatif Allah SWT. Pemahaman ini membawa kesadaran kepada penulis bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan dalam kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran yang bersifat konstruktif dari semua pihak, demi meningkatkan kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 9 Juli 2025

Yang membuat pernyataan,

HAQOI AKBAR YUFA
NIM.12050512082

DAFTAR ISI

Halaman

LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR HAK ATAS KELAYAKAN INTELEKTUAL	iv
LEMBAR PERNYATAAN	v
LEMBAR PERSEMBAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-3
1.3 Tujuan Penelitian	I-3
1.4 Batasan Masalah	I-3
1.5 Manfaat Masalah	I-3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Teori	II-3
2.2.1 Tunanetra	II-3
2.2.2 <i>Tactile Paving</i>	II-3
2.2.3 <i>Deep Learning</i>	II-4
2.2.4 Pengolahan Citra Digital	II-4
2.2.5 <i>Object detection</i>	II-4
2.2.6 Edge Impulse	II-5
2.2.7 FOMO (Faster Objects, More Objects)	II-7
2.2.8 Arsitektur MobileNetV2	II-7

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.2.9	ESP32-CAM	II-7
2.2.10	Vibrator	II-8
2.2.11	Buzzer	II-8

BAB III METODE PENELITIAN III-1

3.1	Jenis Penelitian	III-1
3.2	Metodologi Penelitian	III-1
3.2.1	Studi Literatur dan Analisis Kebutuhan	III-2
3.2.2	Desain dan Perancangan Alat	III-3
3.2.2.1	Perancangan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	III-3
3.2.2.2	Perancangan Perangkat Lunak (<i>Software</i>).....	III-4
3.3	Pengumpulan Data.....	III-5
3.4	Pelatihan Model.....	III-6
3.5	Pengujian Alat	III-8
3.5.1	Metode Pengujian	III-9

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN IV-1

4.1	Hasil Pelatihan dan Evaluasi Model Deteksi Objek.....	IV-1
4.1.1	Konfigurasi Model.....	IV-2
4.1.2	Arsitektur Jaringan.....	IV-2
4.1.3	Evaluasi Performa Model	IV-2
4.2	Implementasi Sistem (Prototipe Alat)	IV-4
4.3	Hasil Pengujian Alat.....	IV-5
4.3.1	Detail Uji Coba Deteksi di Lapangan.....	IV-6
4.3.2	Performa <i>On-device</i> (Efisiensi Sumber Daya)	IV-9
4.4	Pembahasan	IV-11

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... V-1

5.1	Kesimpulan.....	V-1
5.2	Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

1. Diarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

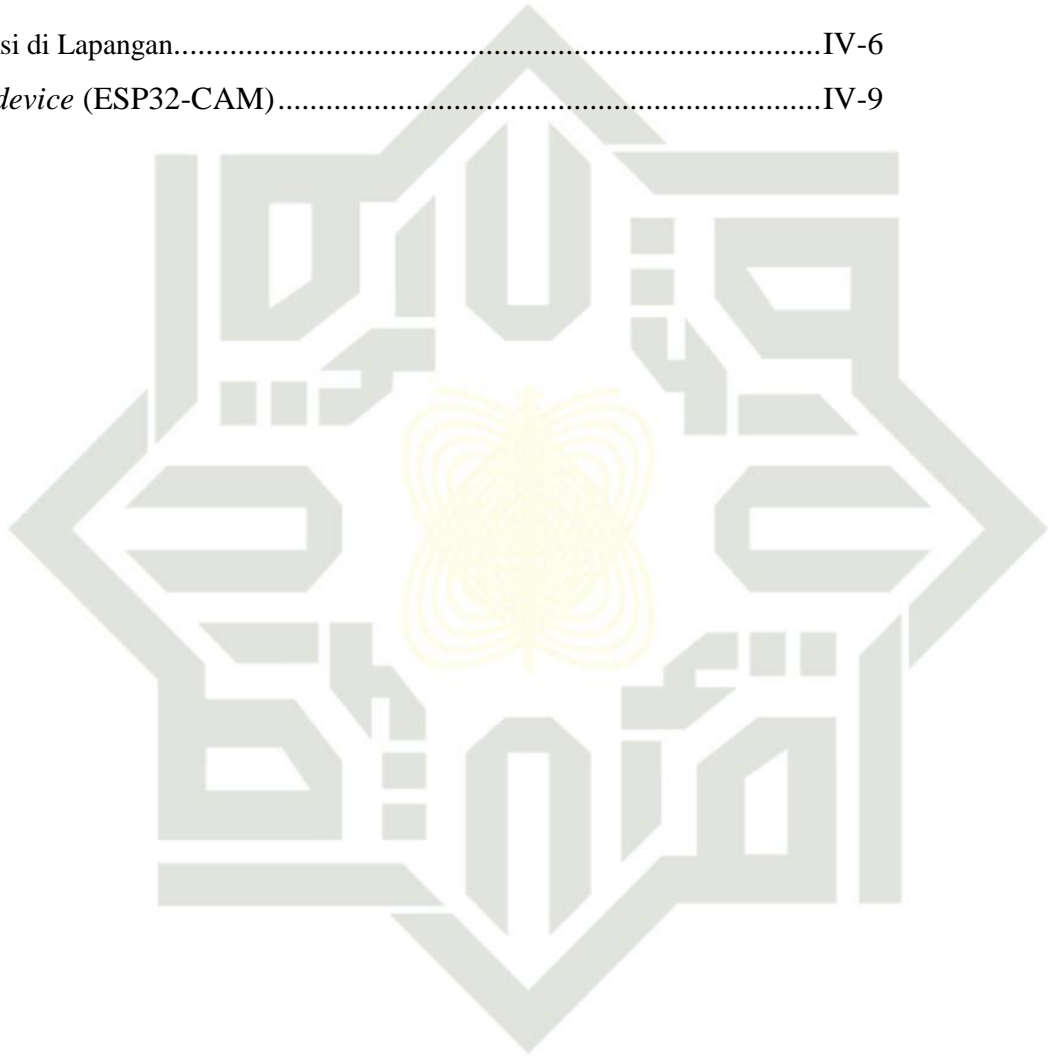
2. Diarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Tactile Paving	II-4
3.1 Alur Penelitian	III-1
3.2 Diagram Blok Alat	III-2
3.4 Rangkaian Alat	III-3
3.5 Blok Diagram Rancangan Alat	III-4
3.6 Flowchart Perancangan Perangkat Lunak	III-5
3.7 Tactile Paving	III-6
3.8 Pelabelan data	III-7
4.1 Confusion Matrix Model	IV-3
4.2 Prototipe Alat	IV-5
4.3 Dokumentasi Pengujian Alat	IV-6
4.4 Performa <i>On-device</i> (ESP32-CAM)	IV-10

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Rangkaian Atau Jalur Pengkabelan Alat	III-4
4.1 Konfigurasi Pelatihan Model.....	IV-2
4.2 Confusion Matrix Model	IV-3
4.3 Uji Coba Deteksi di Lapangan.....	IV-6
4.4 Performa <i>On-device</i> (ESP32-CAM).....	IV-9



DAFTAR SINGKATAN

: Artificial Intelligence
: Batch Size
: Convolutional Neural Network
: Digital Signal Processing
: Faster Objects, More Objects
: Frames Per Second
: General Purpose Input/Output
: Integrated Development Environment
: Research and Development
: Random Access Memory
: Red, Green, Blue
: Read-Only Memory
: World Health Organization

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan untuk meningkatkan kualitas hidup penyandang disabilitas, khususnya tunanetra, menjadi salah satu prioritas utama dalam mewujudkan masyarakat yang inklusif dan berkeadilan. Tunanetra, yang didefinisikan sebagai individu dengan gangguan penglihatan baik sebagian (low vision) maupun total (buta total), menghadapi tantangan signifikan dalam menjalani aktivitas sehari-hari, terutama dalam hal mobilitas dan aksesibilitas di ruang publik. Menurut *World Report on Vision* yang diterbitkan oleh World Health Organization (WHO) pada tahun 2019, sekitar 2,2 miliar orang di seluruh dunia mengalami gangguan penglihatan, dengan 1 miliar di antaranya merupakan kasus yang dapat dicegah atau belum tertangani secara optimal [1]. Di Indonesia, data dari Kementerian Kesehatan tahun 2017 menunjukkan bahwa sekitar 8 juta penduduk mengalami gangguan penglihatan, menjadikan isu ini sebagai salah satu permasalahan kesehatan masyarakat yang mendesak [2].

Tantangan mobilitas bagi penyandang tunanetra tidak hanya berdampak pada aspek fisik, tetapi juga memengaruhi kemandirian, kepercayaan diri, dan partisipasi sosial mereka. Aktivitas sederhana seperti berjalan di trotoar, menyeberang jalan, atau menggunakan transportasi umum sering kali menjadi sulit karena keterbatasan alat bantu yang tersedia dan kurangnya infrastruktur yang ramah disabilitas. Salah satu alat bantu yang paling umum digunakan oleh penyandang tunanetra adalah tongkat putih, yang berfungsi untuk mendeteksi rintangan melalui kontak fisik langsung. Namun, tongkat putih memiliki keterbatasan signifikan, seperti jangkauan deteksi yang terbatas hanya pada permukaan yang terseleh, ketidakmampuan mendeteksi rintangan di ketinggian atau jarak yang lebih jauh, serta ketergantungan pada umpan balik taktil yang kurang efektif pada permukaan tertentu [3][4].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, infrastruktur seperti *tactile paving* telah diterapkan di banyak ruang publik untuk membantu navigasi tunanetra. *Tactile paving* dirancang dengan pola khusus, seperti *line type* untuk menunjukkan arah jalan dan *spot type* untuk memberikan peringatan tentang perubahan situasi, seperti persimpangan atau pengalihan. Meski demikian, implementasi *tactile paving* di banyak wilayah, termasuk

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Indonesia, sering kali tidak konsisten. Banyak *tactile paving* mengalami kerusakan, tertutup kotoran atau benda asing, atau dipasang dengan pola yang tidak standar, sehingga menyulitkan penyandang tunanetra untuk mengandalkannya sebagai panduan navigasi yang andal [5][6]. Ketidakkonsistenan ini tidak hanya mengurangi efektivitas *tactile paving*, tetapi juga dapat meningkatkan risiko kecelakaan, seperti tersandung atau salah arah, yang membahayakan keselamatan pengguna.

Perkembangan teknologi berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) dan pengolahan citra digital menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi keterbatasan alat bantu tradisional dan infrastruktur yang ada. Teknologi pengolahan citra digital secara *real-time* memungkinkan deteksi pola *tactile paving* secara akurat tanpa memerlukan kontak fisik, sehingga memperluas jangkauan deteksi dan meningkatkan responsivitas sistem. Dengan mengintegrasikan kamera berukuran kecil, seperti ESP32-CAM, dan model *deep learning* yang dioptimasi untuk perangkat *embedded*, seperti MobileNetV2 dengan pendekatan FOMO (*Faster Objects, More Objects*), alat bantu navigasi dapat memberikan umpan balik yang cepat dan akurat kepada pengguna tunanetra. Teknologi ini memungkinkan deteksi *tactile paving* dalam berbagai kondisi lingkungan, termasuk pencahayaan yang bervariasi atau permukaan yang kotor, yang sering menjadi tantangan dalam penggunaan tongkat putih konvensional.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan alat deteksi *tactile paving* berbasis pengolahan citra digital secara *real-time* yang terintegrasi pada tongkat tunanetra. Dengan memanfaatkan kamera ESP32-CAM dan model *deep learning* MobileNetV2-FOMO yang dioptimasi melalui *Edge Impulse Studio*, alat ini dirancang untuk mendeteksi dua jenis *tactile paving* (*line type* dan *spot type*) dengan akurasi tinggi dan *latency* rendah. Sistem ini memberikan umpan balik taktil melalui vibrator untuk *line type* (penunjuk arah) dan audio melalui *buzzer* untuk *spot type* (peringatan), sehingga meningkatkan kemandirian dan keamanan penyandang tunanetra dalam menavigasi ruang publik. Pendekatan ini tidak hanya mengatasi keterbatasan tongkat putih dan ketidakkonsistenan *tactile paving*, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan teknologi *embedded* berbasis pengolahan citra yang hemat sumber daya, menjadikannya solusi yang terjangkau dan skalabel untuk mendukung inkludivitas. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dampak positif bagi penyandang tunanetra dan menjadi referensi untuk pengembangan teknologi bantu navigasi di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang alat deteksi *tactile paving* berbasis pengolahan citra digital secara *real-time* untuk membantu navigasi tunanetra?
2. Bagaimana mengimplementasikan model MobileNetV2 agar dapat berjalan secara efektif pada perangkat ESP32-CAM?
3. Bagaimana mengevaluasi kinerja alat deteksi dalam mengidentifikasi tipe *tactile paving*?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Merancang dan mengembangkan alat deteksi *tactile paving* berbasis pengolahan citra digital secara *real-time* untuk tongkat tunanetra
2. Menerapkan model MobileNetV2 yang dapat berjalan di perangkat ESP32-CAM.
3. Menguji dan mengevaluasi kinerja alat dalam mendeteksi tipe *tactile paving* pada berbagai kondisi pencahayaan dan lingkungan.

1.4 Batasan Masalah

1. Sistem hanya mendeteksi dua tipe *tactile paving*, yaitu *line type* dan *spot type*.
2. Model deteksi menggunakan MobileNetV2 dengan pendekatan FOMO (*Faster Objects, More Objects*).
3. Permukaan datar dengan kontras warna memadai.
4. Perangkat keras yang digunakan adalah kamera dengan resolusi standar dan mikroprosesor ESP32-CAM. Penelitian ini tidak mengeksplorasi penggunaan perangkat keras dengan spesifikasi lebih tinggi.
5. Alat ini hanya memberikan umpan balik sederhana berupa getaran atau sinyal audio.
6. Fokus penelitian hanya pada deteksi keberadaan dan tipe *tactile paving*, tanpa memperhitungkan analisis jalur navigasi secara penuh.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan alat bantu navigasi bagi penyandang tunanetra.
2. Meningkatkan kemandirian dan keamanan tunanetra dalam beraktivitas sehari-hari.

3. Menjadi referensi untuk penelitian lanjutan dalam pengembangan sistem navigasi berbasis pengolahan citra digital.
4. Memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi real-time object detection berbasis embedded system, khususnya dalam implementasi pada perangkat berdaya rendah seperti ESP32-CAM.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Tinjauan literatur ini disusun untuk memperoleh pemahaman yang mendalam tentang studi yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan memberikan referensi yang berharga untuk membantu dalam merancang dan menyelesaikan penelitian ini.

Menurut V. Gutti dan R. Karthi pada penelitiannya “Real Time Classification of Fruits and Vegetables on Low Power Embedded Devices Using TinyML” [7]. Pada penelitiannya pengklasifikasian pada buah dan sayuran menggunakan model MobileNetV1 dan ESP32-CAM dengan kumpulan data gambar 360. Dari kedua model yang digunakan, hasil akhir klasifikasi buah dan sayuran pada model MobileNetV1 mencapai akurasi pengujian 94% dari 17 kelas data uji dan hasil akhir dengan model ESP32-CAM adalah 77% dengan kecepatan inferensi 51 ms dan penggunaan memori 66,1 kb. Hasil percobaan pada penelitian ini menunjukan bahwa mikrokontroller ESP32-CAM berbiaya rendah dapat digunakan untuk klasifikasi produk pertanian.

Menurut Hanung Pangestu Rahman, Rahmat dan Jamaludin Indra pada penelitiannya “Penerapan Convolution Neural Network pada Timbangan Pintar Menggunakan ESP32-CAM”[8]. Pada penelitiannya ini membahas tentang penggunaa ESP32-CAM yang relatif lebih murah dari pada teknologi Raspberry Pi pada timbangan pintar untuk mendapatkan nilai berat pada suatu benda menggunakan metode Convolutional Neural Network (CNN) dan loadcell yang dilengkapi dengan modul HX711. Dalam penelitian ini dataset dikumpulkan 600 data, jenis sayuran 150 data dan pada kelas data training terdiri dari tomat, kubis, wortel, dan kentang. Dari penelitian ini setelah dilakukan pengujian, hasil akhir akurasi klasifikasi dari penggunaan ESP32-CAM pada timbangan pintar dari data sebesar 90% dan selisih rata-rata alat dibangun sebesar 0.8 gram dibandingkan timbangan digital merek SF-400.

Penelitian yang dilakukan Yanri Bili Eliezer, Naikson F Saragih, Arina Prima Silalahi, Surianto Sitepu, Asaziduhu Gea, pada penitianya “Perancangan Alat Pendekteksi Kematangan Buah Nanas Dengan Menggunakan Mikrokontroller Dengan Metode Convolutional Neural Network (CNN)”[9]. Pada penelitian ini membahas tentang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

mendeteksi kulit buah nanas menggunakan ESP32-CAM sebagai teknologi untuk mengambil gambar objek buah nanas dan menggunakan metode CNN. Hasil akhir dari penelitian ini pendeteksi kematangan buah nanas menggunakan mikrokontroller metode CNN yaitu hasil akhir nilai akurasi tertinggi 86%, akurasi terendah 80% dan total semua rata-rata akurasi 83,33%.

Penelitian yang dilakukan Associative professor, Arulmurugan L Raghav, Nikhil V Kumar P, Bharath S, penelitian “Animal Intrusion Detection Using ESP32 Cam and Open CV” [10]. Pada penelitian ini membahas tentang penggunaan ESP32 Cam dan Open CV dalam mendeteksi intrusi hewan dalam jarak jauh. Penelitian ini menggunakan algoritma terlatih berbasis yolov5 untuk deteksi objek. Hasil akhir mencapai akurasi maksimum algoritma dilatih dengan ribuan foto binatang berganda kali hingga akurasi yang diinginkan (~98%).

Penelitian yang dilakukan Hendrick, Hanifa Fitri, dan Ivan Finiel Hotmartua Bagaring pada penelitian “Pemanfaatan ESP32-CAM Untuk Mengukur Ketinggian Air Menggunakan Metode Image Processing” [11]. Penelitian ini membahas pemanfaatan ESP32-CAM untuk mengukur ketinggian air menggunakan metode image processing. Dalam pemrosesan gambar, hasil didapatkan dari perubahan pixel, yaitu diakibatkan karena naik turunnya objek perubahan tinggi air sungai dan menggunakan rumus regresi polinomial. Hasil akhir dari pemanfaatan ESP32-CAM mengukur ketinggian air menggunakan metode image processing ada 2 hasil akhir yaitu pengukuran akurat dan pengukuran tidak akurat. Pada ketinggian 1 cm sampai 7 cm nilai pengukuran keakuratan kesalahan relatif sebesar 1,26% dan pada ketinggian 8 cm nilai pengukuran tidak akurat kesalahan relatif sebesar 250,00%.

Humam dan Triawan (2024) mengembangkan alat keamanan ruangan menggunakan ESP32-CAM dan sensor gerak berbasis IoT. alat ini dirancang untuk mendeteksi gerakan dalam ruangan dan mengirim notifikasi *real-time* kepada pengguna melalui aplikasi *mobile*. Data dari sensor gerak dan gambar dari ESP32CAM dikirim ke *server cloud* untuk pemrosesan dan penyimpanan. [12]

Meskipun penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi penggunaan teknologi seperti sensor ultrasonik, *deep learning*, dan ESP32-CAM dalam membantu penyandang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN SUSKA RIAU.

tunanetra, masih terdapat kebutuhan untuk mengembangkan alat yang secara khusus berfokus pada deteksi *tactile paving* secara *real-time* dan akurat.

2.2 Teori

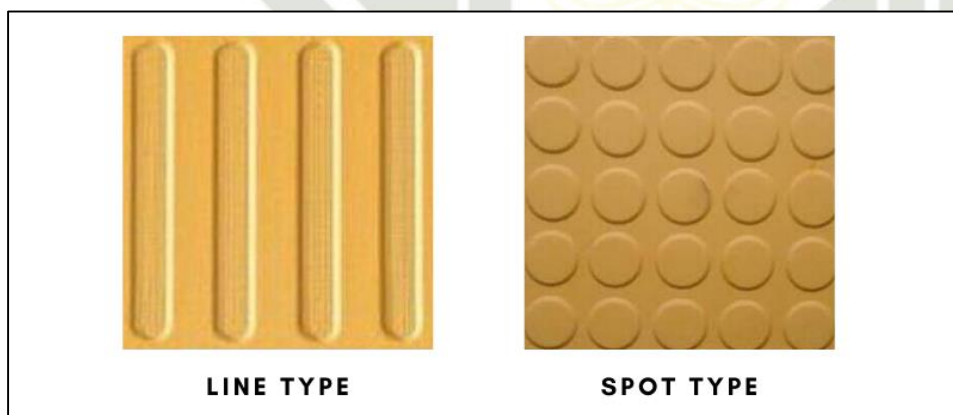
Pengembangan alat deteksi *tactile paving* berbasis pengolahan citra digital untuk membantu tunanetra memerlukan pemahaman mendalam tentang beberapa konsep dan teknologi dasar.

2.2.1 Tunanetra

Tunanetra adalah individu yang memiliki gangguan atau hambatan pada indera penglihatannya. Ketunanetraan ini dibagi menjadi dua kategori: individu yang masih mempunyai sisa penglihatan yang disebut dengan *low vision*, dan individu yang tidak mempunyai sisa penglihatan sama sekali yang disebut buta total.

2.2.2 Tactile Paving

Tactile paving adalah ubin pengarah disabilitas yang umumnya digunakan pada jalan raya atau trotoar. Umumnya terdapat dua jenis *tactile paving* yaitu *line type* dan *spot type*, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda. [13]



Gambar 2.1 *Tactile Paving*

Tactile paving spot type memiliki permukaan dengan tonjolan berupa titik-titik (*dot*) yang berfungsi untuk menandakan indikasi berhenti atau memberi peringatan akan adanya perubahan situasi di sekitarnya. Sedangkan, *tactile paving line type* memiliki permukaan berupa sekat-sekat bergaris (*stripes*) yang berfungsi sebagai penanda 'GO Indication' atau menunjukkan arah jalan.[13]

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.2.3 Deep Learning

Deep learning adalah teknik dalam *artificial intelligence* (AI) yang mengajarkan komputer untuk memproses data dengan cara yang mirip dengan otak manusia. Model *deep learning* dapat mengidentifikasi pola yang rumit dalam citra, teks, suara, dan data lainnya untuk menghasilkan pengetahuan dan prediksi yang akurat. Teknik *deep learning* dapat digunakan untuk mengotomatiskan tugas yang membutuhkan kecerdasan manusia, seperti deskripsi citra atau kendaraan otonom [14].

Cara kerja *deep learning* meniru cara kerja otak manusia, yaitu dengan menggunakan jaringan saraf tiruan. Jaringan saraf tiruan pada *deep learning* terdiri dari banyak lapisan neuron buatan yang saling bekerja sama di dalam komputer. Jaringan ini merupakan algoritma *deep learning* yang memanfaatkan neuron untuk memecahkan masalah kompleks [14].

2.2.4 Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital adalah bidang ilmu yang berfokus pada manipulasi dan analisis citra menggunakan komputer. Citra digital merupakan representasi numerik dari sebuah gambar, biasanya dalam bentuk matriks dua dimensi, yang setiap elemennya (piksel) menyimpan informasi tentang intensitas cahaya dan warna pada titik tertentu. Proses pengolahan citra digital meliputi beberapa tahapan: akuisisi citra (mendapatkan citra digital dari sumbernya), representasi dan deskripsi citra (dalam format yang sesuai untuk pemrosesan komputer), analisis citra (mengeksrak informasi atau fitur penting), dan manipulasi citra (mengubah atau memperbaiki citra) [15].

Dalam konteks penelitian ini, pengolahan citra digital digunakan untuk mendeteksi pola *tactile paving* pada permukaan jalan atau trotoar.

2.2.5 Object Detection

Pada saat manusia melihat sebuah objek dalam gambar maka otak manusia akan dapat langsung mengenali objek, letak, beserta kondisi interaksi yang terjadi. Dengan sistem visual manusia yang cepat dan akurat, memungkinkan manusia untuk dapat melakukan tugas-tugas kompleks. Namun bagaimana jika tugas-tugas kompleks tersebut dilakukan oleh sebuah komputer. Untuk itu dibutuhkan sebuah algoritma yang cepat dan akurat yang akan memungkinkan komputer dapat melakukan hal serupa hingga berpotensi untuk

menyelesaikan tugas secara umum. Deteksi objek adalah suatu proses yang digunakan untuk menentukan keberadaan objek tertentu di dalam suatu citra digital.

Proses deteksi tersebut dapat dilakukan dengan berbagai macam metode yang umumnya melakukan pembacaan fitur-fitur dari seluruh objek pada citra *input*. Fitur dari objek pada citra *input* tersebut akan dibandingkan dengan fitur dari model yang digunakan atau *template*. Hasil perbandingan tersebut dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu objek terdeteksi sebagai *template* yang dimaksud atau tidak. Sistem deteksi objek perlu melatih dan menguji *dataset* dengan *bounding box* dan diberi label untuk kelas per setiap objek untuk proses pengenalan. Demi mencapai tujuan ini, ada banyak *dataset* untuk menghasilkan model *Deep Learning* seperti Pascal-VOC, MS COCO, atau bahkan dapat menggunakan *dataset* yang dibuat sendiri.

2.2.6 Edge Impulse

Edge Impulse merupakan platform machine learning yang dirancang khusus untuk pengembangan model AI pada perangkat edge (berdaya rendah). Dengan menggunakan Edge Impulse, pengguna dapat dengan mudah mengumpulkan data, melatih model machine learning, dan mengoptimalkannya untuk dijalankan pada perangkat seperti ESP32-CAM. Edge Impulse juga mendukung model-model ringan yang cocok untuk real-time object detection dengan keterbatasan sumber daya.[19]

Edge Impulse Studio adalah *platform* berbasis *cloud* yang tersedia secara *online* di edgeimpulse.com. Platform ini menyediakan alur kerja terintegrasi dari awal hingga akhir untuk pengembangan solusi *machine learning* pada perangkat *embedded*. Cara kerjanya dapat dijelaskan melalui tahapan-tahapan utama:

1. Pengumpulan Data (*Data Acquisition*): Pengguna dapat mengumpulkan data langsung dari perangkat *embedded* yang terhubung (misalnya ESP32-CAM dalam penelitian ini) atau mengunggah *dataset* yang sudah ada.
2. Pra-pemrosesan Data (*Processing Blocks*): Data yang terkumpul akan diproses melalui blok pemrosesan data (seperti *image preprocessing*). Dalam penelitian ini, gambar akan di-*resize* ke resolusi 48x48 piksel.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

3. Pelabelan Data: Untuk tugas *object detection*, setiap objek dalam gambar perlu dilabeli secara manual dengan *bounding box* dan nama kelasnya. Edge Impulse menyediakan *tool* pelabelan yang intuitif.
4. Desain Impulse (*Impulses*): Pengguna mendefinisikan alur kerja *machine learning* dari data mentah hingga hasil inferensi. *Impulse* mendefinisikan blok pemrosesan data dan blok pembelajaran (*learning blocks*) yang akan digunakan.
5. Pelatihan Model (*Training*): Model dilatih menggunakan *dataset* yang telah diproses dan dilabeli. Pengguna dapat mengonfigurasi *hyperparameter* pelatihan seperti *epochs*, *learning rate*, dan *batch size*. Edge Impulse menyediakan metrik evaluasi seperti *confusion matrix*, *precision*, *recall*, dan *F1 score*.
6. Optimasi dan Deployment (*Optimization & Deployment*): Model dioptimalkan agar dapat berjalan efisien pada perangkat *embedded* dengan sumber daya terbatas. Ini seringkali melibatkan kuantisasi model dan penggunaan EON Compiler yang secara signifikan mengurangi ukuran model dan mempercepat inferensi tanpa kehilangan akurasi yang berarti. Model dapat di-*deploy* sebagai *library* C++ dan diunggah ke mikrokontroler.

Keunggulan Edge Impulse:

1. Fokus pada Perangkat Terbatas: Edge Impulse dirancang untuk membawa *object detection* ke perangkat dengan keterbatasan tinggi.
2. Efisiensi Sumber Daya: Algoritma seperti FOMO yang dikembangkan oleh Edge Impulse dapat menggunakan hingga 30x lebih sedikit daya pemrosesan dan memori dibandingkan MobileNet SSD atau YOLOv5.
3. Fleksibilitas: Model FOMO bersifat *fully convolutional*, memungkinkan *input* gambar dengan resolusi bervariasi (misalnya 96x96 hingga 1024x1024 piksel) setelah dilatih, dan kompatibel dengan berbagai model MobileNetV2.
4. Optimasi untuk *Edge*: EON Compiler secara signifikan mengurangi ukuran model dan mempercepat waktu inferensi. Contohnya, model FOMO MobileNetV2 0.1 *alpha* (96x96 *grayscale*) dapat berjalan di bawah 100KB RAM dan 10 *fps* pada Cortex-M4F 80MHz.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

5 Dukungan Komprehensif: Menyediakan alur kerja lengkap dari pengumpulan data hingga *deployment*, serta kompatibel dengan berbagai *development board* dan *framework*.

2.2.7 FOMO (Faster Objects, More Objects)

FOMO adalah pendekatan inovatif dalam object detection yang dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan perangkat edge dalam mendeteksi banyak objek secara real-time, algoritma FOMO dikembangkan oleh Edge Impulse. FOMO merupakan algoritma deteksi objek yang ringan dan cepat karena tidak menggunakan anchor boxes seperti pada metode YOLO. FOMO bekerja dengan membagi gambar ke dalam grid sederhana dan memprediksi posisi objek dalam sel grid tersebut. Keunggulan FOMO adalah kemampuannya mendeteksi banyak objek kecil secara simultan dengan konsumsi memori dan daya rendah, menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi pada perangkat mikro seperti ESP32-CAM. Dalam konteks penelitian ini, FOMO digunakan untuk mendeteksi jenis tactile paving dalam citra yang ditangkap oleh kamera.[20]

2.2.8 Arsitektur MobileNetV2

Arsitektur MobileNetV2 adalah sebuah arsitektur dari CNN yang didesain untuk dapat dijalankan pada perangkat mobile. Arsitektur ini memiliki kelebihan MobileNetV2 pada efisiensi dan kecepatan, karena menggunakan depthwise separable convolutions yang mengurangi jumlah parameter dan operasi komputasi dibandingkan dengan convolutions standar, sehingga memungkinkan model untuk berjalan lebih cepat dan menggunakan lebih sedikit memori. Namun, MobileNetV2 juga memiliki beberapa kekurangan. Meskipun lebih efisien daripada model CNN tradisional, MobileNetV2 masih kurang dalam hal akurasi jika dibandingkan dengan model-model yang lebih kompleks dan berat seperti ResNet atau Inception. Pengurangan pada bagian jumlah parameter dan komputasi dapat menyebabkan penurunan performa dalam tugas-tugas yang membutuhkan akurasi tinggi. Kekurangan lainnya adalah, meskipun lebih ringan, implementasi MobileNetV2 pada perangkat dengan keterbatasan sangat ekstrem masih bisa menjadi tantangan, terutama jika perangkat tersebut memiliki keterbatasan dalam hal daya pemrosesan dan memori. [21]

2.2.9 ESP32-CAM

ESP32-CAM adalah modul yang mengintegrasikan Wi-Fi, Bluetooth, kamera, dan mikrokontroler ESP32. Modul ini bersifat *open-source*, sehingga dapat digunakan oleh siapa

saja. Salah satu keunggulan ESP32-CAM adalah kemampuannya untuk memotret dan melakukan pengenalan wajah. [17]

ESP32-CAM dapat digunakan dalam berbagai proyek karena merupakan modul lengkap dengan mikrokontroler yang dapat beroperasi sendiri. Modul ini dapat diprogram menggunakan Arduino IDE untuk memanfaatkan berbagai fitur dan pustaka yang tersedia. Selain Wi-Fi dan Bluetooth, modul ini juga dilengkapi dengan kamera dan slot microSD untuk penyimpanan data. [17]

ESP32-CAM umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi IoT, seperti perangkat rumah pintar, kendali jarak jauh, pemantauan jarak jauh, pembaca QR jarak jauh, dan alat peringatan jarak jauh. ESP32-CAM dapat langsung dipasangkan ke *backplane* berkat paket DIP-nya, yang memungkinkan produksi produk secara cepat.[17]

2.2.10 Vibrator

Vibrator, atau motor getar, adalah perangkat elektromekanis yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi gerakan mekanis berupa getaran. Dalam konteks sistem umpan balik pada perangkat elektronik, *vibrator* digunakan untuk memberikan sinyal taktil atau *haptic feedback* kepada pengguna. Intensitas dan pola getaran dapat diatur untuk menyampaikan berbagai jenis informasi tanpa memerlukan *output* visual atau audio. Penerapan *vibrator* sangat umum pada perangkat *mobile*, *wearable devices*, dan alat bantu disabilitas untuk memberikan notifikasi yang diskrit dan efektif.

2.2.11 Buzzer

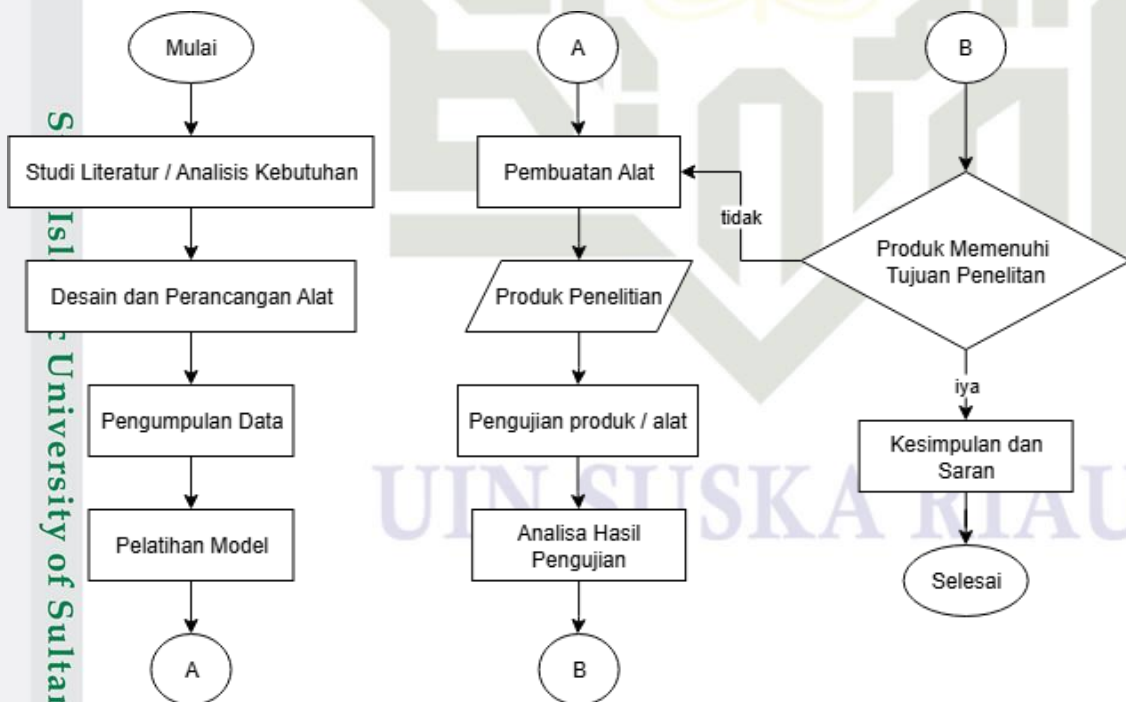
Buzzer adalah perangkat elektronik yang berfungsi menghasilkan suara atau bunyi ketika dialiri arus listrik. *Buzzer* mengubah sinyal listrik menjadi getaran suara, biasanya dalam bentuk nada tunggal atau serangkaian *bip*. Dalam aplikasi elektronik, *buzzer* sering digunakan sebagai indikator peringatan, alarm, atau perangkat umpan balik audio sederhana. Keunggulan *buzzer* terletak pada ukurannya yang kecil, konsumsi daya yang rendah, dan kemampuannya untuk menghasilkan suara yang jelas sebagai pemberi sinyal cepat kepada pengguna.

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan penelitian eksperimental yang berfokus pada pengembangan produk melalui metode Research and Development (R&D). Tujuan utama dari metode R&D adalah menghasilkan suatu prototipe produk baru yang inovatif, dalam hal ini adalah alat bantu navigasi bagi penyandang tunanetra. Pendekatan eksperimental dipilih untuk memungkinkan pengujian kinerja alat secara sistematis dalam kondisi terkontrol maupun kondisi lapangan, sehingga dapat diukur efektivitasnya secara kuantitatif.

Selain itu, penelitian ini juga mengaplikasikan pendekatan kuantitatif dalam evaluasi kinerja alat. Parameter kuantitatif seperti akurasi deteksi (Precision, Recall, F1 Score), kecepatan inferensi model, dan respons umpan balik (waktu aktivasi motor getar atau *buzzer*) akan diukur dan dianalisis. Pendekatan ini memastikan bahwa hasil pengembangan dapat diukur secara objektif dan dibandingkan dengan standar kinerja yang telah ditetapkan.

3.2 Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 Alur Penelitian

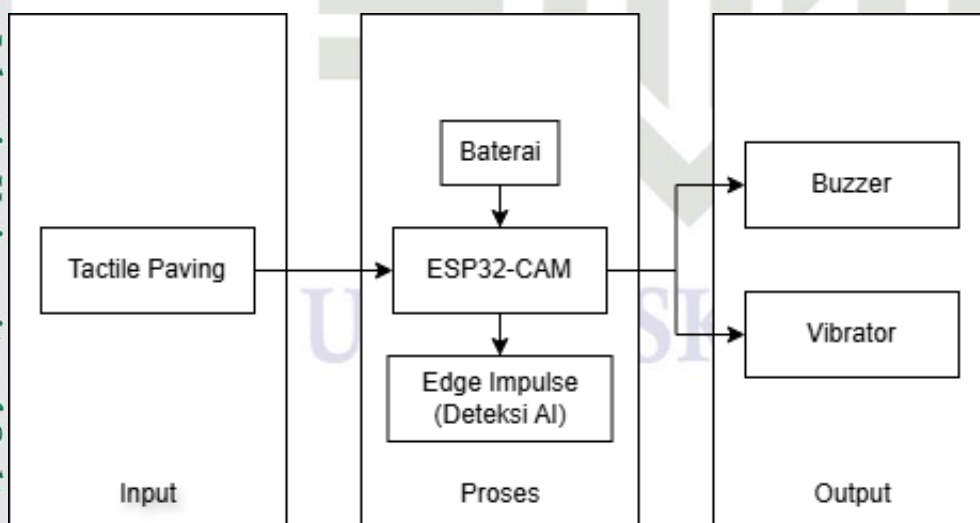
3.2.1 Studi Literatur dan Analisis Kebutuhan

Tahapan ini merupakan langkah awal dalam penelitian, yaitu peneliti melakukan studi literatur atau riset pada penelitian terdahulu untuk mendapatkan informasi dan teori pendukung. Dengan mengumpulkan berbagai informasi dan teori pendukung dari penelitian terdahulu, peneliti dapat merumuskan kebutuhan sistem yang akan dikembangkan. Berikut adalah hal-hal yang menjadi kebutuhan dalam penelitian ini:

1. Platform pengembangan AI atau Kecerdasan Buatan. Dalam hal ini, *platform* yang digunakan adalah Edge Impulse Studio yang tersedia secara *online* di edgeimpulse.com.
2. Mikrokontroler ESP32-CAM sebagai modul kamera sekaligus mikrokontroler untuk akuisisi dan pemrosesan gambar.
3. Arduino IDE sebagai lingkungan pemrograman untuk ESP32-CAM.
4. *Dataset* gambar *tactile paving* (*line type* dan *spot type*).

3.2.2 Desain dan Perancangan Alat

Tahap ini berfokus pada perancangan detail dari komponen perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang akan membentuk sistem deteksi. Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan aspek fungsionalitas, efisiensi, dan ergonomi untuk kenyamanan pengguna.

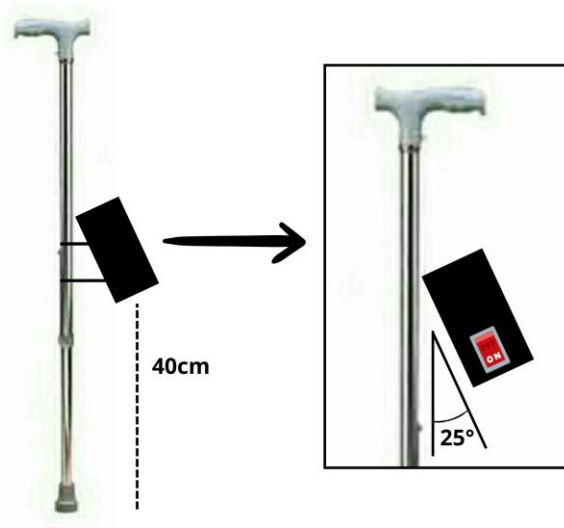


Gambar 3.2 Diagram Blok Alat

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

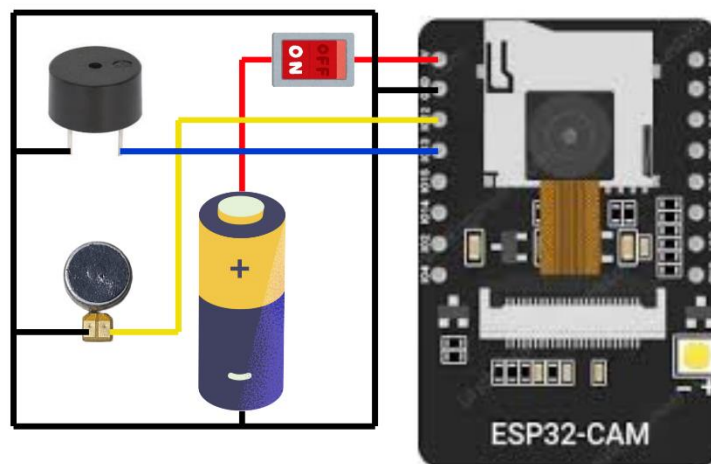
3.2.2.1 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Alat deteksi *tactile paving* ini dirancang dengan menggabungkan berbagai komponen elektronik dalam sebuah *box* untuk mencapai fungsi deteksi dan pemberian umpan balik yang optimal bagi pengguna tunanetra.



Gambar 3.3 Desain Alat

Tongkat tunanetra ini memiliki sebuah *box* vital yang menampung komponen-komponen. *Box* tersebut diletakkan di tongkat dengan jarak sekitar 40 cm dari permukaan, dan dengan kemiringan 25°. Komponen-komponen yang terdapat di dalam *box* antara lain *buzzer*, vibrator, baterai, dan ESP32-CAM, dan di bagian luarnya terdapat saklar yang diletakkan disamping *box* dan kamera diletakkan di bawah *box*.

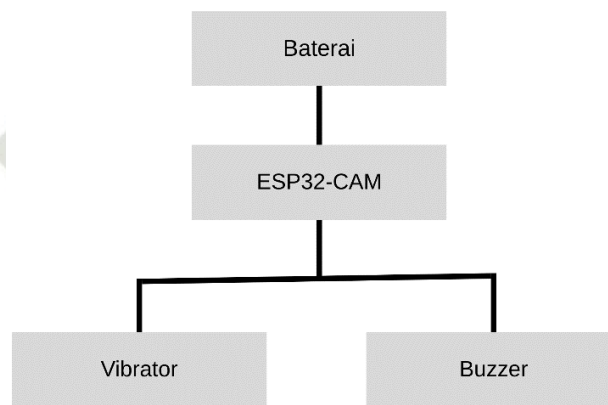


Gambar 3.4 Rangkaian Atau Jalur Pengkabelan Alat

Tabel 3.1 Rangkaian Atau Jalur Pengkabelan Alat

Komponen	Terhubung ke Pin GPIO ESP32-CAM
Buzzer	GPIO 13
Vibrator	GPIO 12
Baterai	Pin 5V
Sakelar	Kabel Baterai

Gambar 3.5 menyajikan rangkaian alat atau jalur pengkabelan alat yang mana terdapat di dalam sebuah *box*, pada rangkaian tersebut *buzzer* dihubungkan ke pin GPIO 13 pada ESP32-CAM, vibrator dihubungkan ke pin GPIO 12, baterai dihubungkan pada pin 5v ESP32-CAM, dan saklar di hubungkan pada kabel baterai.



Gambar 3.5 Blok Diagram Rancangan Alat

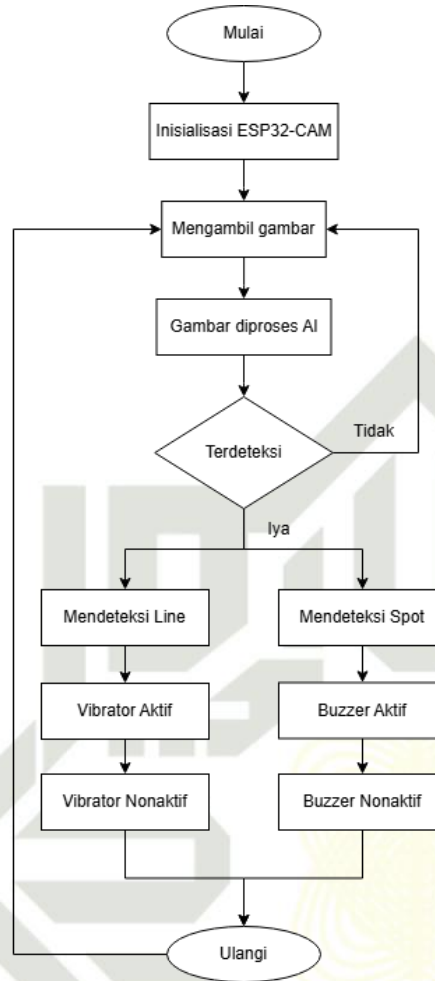
Gambar 3.5 menyajikan blok diagram fungsional dari alat deteksi *tactile paving*. Sistem ini dirancang untuk memproses citra yang ditangkap oleh kamera ESP32-CAM, menganalisisnya menggunakan model *deep learning* yang tertanam dari Edge Impulse, dan memberikan umpan balik taktil atau audio kepada pengguna berdasarkan jenis *tactile paving* yang terdeteksi. Baterai menyediakan daya untuk seluruh sistem, memastikan operasional alat secara mandiri. Kontrol aktuator (*vibrator* dan *buzzer*) dilakukan melalui pin GPIO spesifik pada ESP32-CAM untuk memastikan respons yang tepat.

3.2.2 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Perancangan perangkat lunak merupakan tahap perancangan yang penting dalam proses jalannya sistem pada alat.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.6 Flowchart Perancangan Perangkat Lunak

3.3 Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data merupakan tahap krusial yang secara langsung memengaruhi akurasi dan *robustness* model *deep learning* yang akan dilatih. Dalam penelitian ini, data dikumpulkan berupa 100 gambar *tactile paving* yang diambil langsung dari lingkungan nyata, khususnya di area trotoar dengan kondisi pencahayaan alami di siang hari. *Dataset* ini terdiri dari dua kelas utama, yaitu *line type* dan *spot type*, yang mewakili fungsi penunjuk arah dan penanda berhenti/peringatan. Setiap gambar dalam *dataset* dipastikan memiliki objek *line type* atau *spot type* yang jelas terlihat untuk memfasilitasi proses pelabelan dan pelatihan model yang efektif.

Spesifikasi teknis pengambilan gambar diatur secara cermat untuk mereplikasi skenario penggunaan alat yang realistis dan mengoptimalkan kualitas data untuk pelatihan model.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Resolusi Gambar: Setiap gambar diambil dengan resolusi 96x96 piksel dalam format warna RGB (Red, Green, Blue). Resolusi ini dipilih karena merupakan ukuran yang efisien untuk pemrosesan pada perangkat *embedded* seperti ESP32-CAM, sekaligus sesuai dengan kebutuhan *input* model FOMO.
2. Sudut Pengambilan: Gambar diambil dengan sudut kemiringan kamera sekitar 25° dari permukaan tanah. Sudut ini didapatkan dari simulasi posisi kamera saat dipasang pada tongkat tunanetra yang digunakan secara normal, memungkinkan kamera untuk menangkap *frame tactile paving* yang relevan di depan pengguna.
3. Jarak Pengambilan: Jarak rata-rata antara lensa kamera dan permukaan *tactile paving* dijaga sekitar 40 cm. Jarak ini dianggap optimal untuk memastikan *tactile paving* terlihat jelas dalam *frame* gambar, dengan ukuran objek yang cukup besar untuk dideteksi oleh model, sekaligus memberikan waktu respons yang memadai bagi pengguna untuk bereaksi terhadap umpan balik.



Gambar 3.7 Tactile Paving

3.4 Pelatihan Model

Model kecerdasan buatan untuk deteksi *tactile paving* dilatih menggunakan *platform* Edge Impulse Studio. Algoritma yang digunakan adalah FOMO (Faster Objects, More Objects) dengan arsitektur *backbone* MobileNetV2 0.1. Pemilihan arsitektur ini didasari oleh kebutuhan akan model yang ringan dan efisien untuk berjalan pada perangkat *edge* seperti ESP32-CAM yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi dan memori. MobileNetV2, khususnya versi 0.1 *alpha*, dikenal karena penggunaan *depthwise separable convolutions* yang secara signifikan mengurangi jumlah parameter dan operasi komputasi

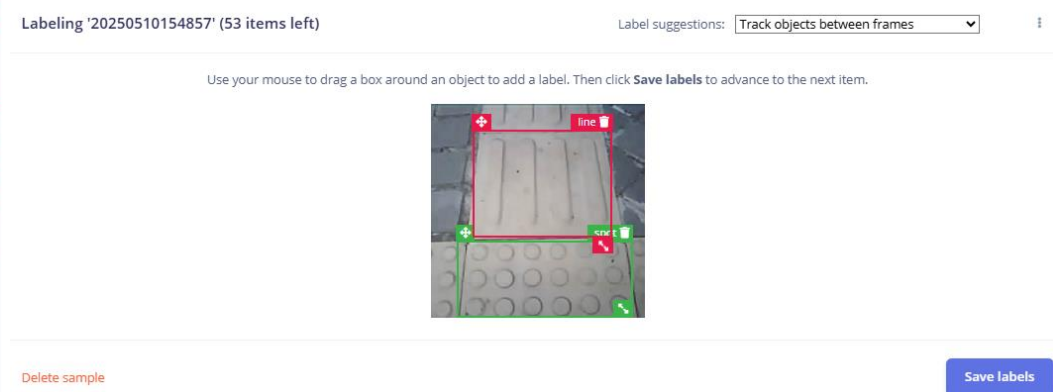
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

dibandingkan dengan *convolution* standar, memungkinkan kecepatan inferensi yang tinggi dengan konsumsi daya rendah.

Tahapan pelatihan data yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan dan Pelabelan Data: Data gambar *tactile paving* telah dikumpulkan sesuai spesifikasi diunggah ke *platform* Edge Impulse Studio. dan setiap objek dilabeli secara manual dengan *bounding box* dan kelasnya (*line type* atau *spot type*).



Gambar 3.8 Pelabelan data

2. Pembagian *Dataset*: *Dataset* kemudian dibagi menjadi data pelatihan dan validasi. Sebesar 20% dari total *dataset* dialokasikan sebagai data validasi, dan sisa 80% data digunakan sebagai *dataset* pelatihan.
3. Konfigurasi Model: Parameter pelatihan dikonfigurasi di Edge Impulse Studio untuk mengoptimalkan proses pembelajaran model.
Konfigurasi pelatihan model di Edge Impulse adalah sebagai berikut:
 1. Ukuran *Input* Citra: Meskipun gambar asli diambil pada resolusi 96x96 piksel, model FOMO secara internal memproses citra pada resolusi 48x48 piksel. Gambar *input* akan di-*resize* ke resolusi ini menggunakan mode *squash*, yang mengabaikan *aspect ratio* namun efektif untuk FOMO dalam mendeteksi lokasi objek.
 2. Warna Gambar: Model dilatih dengan gambar dalam format RGB (Red, Green, Blue), memungkinkan model untuk memanfaatkan informasi warna selain intensitas piksel untuk deteksi.
 3. Mode *Resize*: Mode *squash* digunakan untuk menyesuaikan ukuran gambar *input* ke dimensi yang diperlukan oleh model FOMO.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

4. *Epochs*: Jumlah *epoch* ditetapkan sebanyak 100. Jumlah ini dipilih melalui eksperimen awal untuk memastikan model memiliki kesempatan yang cukup untuk belajar dari seluruh *dataset* dan melakukan *fine-tuning* bobotnya, sekaligus mencegah *overfitting* yang berlebihan pada data pelatihan.
5. *Learning Rate*: 0.005 digunakan sebagai laju pembelajaran. Nilai ini ditentukan untuk memungkinkan model mencapai konvergensi yang optimal selama proses pelatihan, menyeimbangkan antara kecepatan belajar dan risiko *overshooting* titik minimum kerugian.
6. *Batch Size*: Setiap *batch* pelatihan terdiri dari 32 sampel gambar. *Batch size* ini memengaruhi stabilitas proses pelatihan dan efisiensi penggunaan memori selama pelatihan.
7. Model Optimisasi: Setelah pelatihan, model dioptimasi menggunakan Quantized (int8) dan EON Compiler. Kuantisasi mengubah bobot model dari presisi *floating-point* (32-bit) menjadi *integer* 8-bit. Proses ini secara signifikan mengurangi ukuran model dan mempercepat waktu inferensi tanpa kehilangan akurasi yang berarti. EON Compiler dari Edge Impulse lebih lanjut mengoptimalkan kode model untuk *microcontroller*, menghasilkan efisiensi memori yang lebih tinggi (mengurangi penggunaan RAM sebesar 18% dan ROM sebesar 34% dibandingkan versi non-optimasi).

Model yang dilatih menerima *input* berupa citra berukuran 96x96 piksel RGB yang kemudian di-*preprocessing* menjadi 48x48 piksel untuk diumpankan ke lapisan *input* model. Lapisan *output* model dikonfigurasi untuk memprediksi tiga kelas: *background* (area tanpa *paving*), *line type*, dan *spot type*.

3.5 Pengujian Alat

Pengujian alat merupakan fase krusial untuk mengevaluasi kinerja sistem deteksi *tactile paving* dalam kondisi operasional nyata. Pengujian dilakukan secara langsung di lapangan, yaitu pada lintasan *tactile paving* yang terpasang di trotoar umum. Kondisi pengujian diatur menyerupai skenario penggunaan sehari-hari, dengan fokus pada lingkungan siang hari dan memanfaatkan pencahayaan alami. Untuk memastikan keandalan hasil setiap skenario pengujian diulang beberapa kali, dan data dicatat dengan cermat.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

3.5.1 Metode Pengujian:

Pengujian difokuskan pada beberapa aspek kunci untuk mengukur efektivitas dan efisiensi sistem:

1. Akurasi Deteksi Model (*On-Device*):

- a. Prosedur: Sistem dioperasikan pada tongkat tunanetra di lintasan *tactile paving* yang telah diketahui jenisnya. Setiap kali sistem mendeteksi *paving*, hasil deteksi (jenis *paving* dan *confidence score*) akan dicatat. Data ini kemudian dibandingkan dengan jenis *paving* yang sebenarnya di lokasi tersebut.
- b. Parameter Evaluasi:
 - 1) Precision: Mengukur proporsi deteksi positif yang benar dari seluruh deteksi positif yang dilakukan oleh model.
 - 2) Recall: Mengukur proporsi *tactile paving* yang sebenarnya terdeteksi dari seluruh *tactile paving* yang ada di jalur pengujian.
 - 3) F1 Score: Merupakan rata-rata harmonik dari Precision dan Recall. Metrik ini memberikan ukuran keseimbangan antara kemampuan model dalam menghindari deteksi palsu (Precision) dan kemampuan model dalam menemukan semua objek yang relevan (Recall), sangat penting untuk aplikasi keselamatan.

2. Respons Output Aktuator:

- a. Prosedur: Pengujian ini dilakukan bersamaan dengan pengujian akurasi deteksi. Dicatat apakah aktuator (vibrator atau *buzzer*) merespons dengan benar sesuai dengan jenis *tactile paving* yang terdeteksi oleh sistem.
- b. Kriteria Keberhasilan:
 - 1) Motor getar harus aktif dan memberikan umpan balik getaran yang jelas saat sistem mendeteksi *line type paving*.
 - 2) *Buzzer* harus berbunyi dan menghasilkan suara peringatan yang jelas saat sistem mendeteksi *spot type paving*.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Konsistensi Deteksi:

- a. Prosedur: Sistem diuji secara berulang pada berbagai segmen *tactile paving* dengan variasi kecil pada sudut dan jarak pengambilan. Misalnya, pengguna berjalan lurus di atas *paving*, berbelok, atau melewati area dengan sedikit gangguan.
- b. Kriteria Keberhasilan: Sistem harus mampu mendeteksi objek (*tactile paving*) secara konsisten dan stabil pada sudut pengambilan 25° dan jarak 40 cm, serta mampu mempertahankan performa yang baik meskipun ada sedikit variasi pada kondisi lingkungan atau pergerakan pengguna.

4. Performa *On-Device* (Efisiensi Sumber Daya):

- a. Prosedur: Saat sistem berjalan di ESP32-CAM, data kinerja internal dicatat melalui *debugging* atau *console output* yang disediakan oleh Edge Impulse dan Arduino IDE.
- b. Parameter Evaluasi:
 - 1) Waktu Inferensi (*Neural Network*): Waktu yang dibutuhkan oleh model AI untuk memproses satu *frame* gambar dan menghasilkan hasil deteksi. Waktu inferensi yang rendah (<350 ms) sangat penting untuk aplikasi *real-time*.
 - 2) Penggunaan RAM Puncak: Jumlah memori RAM maksimum yang dikonsumsi oleh model dan *firmware* selama proses inferensi. Ini menunjukkan efisiensi penggunaan memori yang terbatas pada ESP32-CAM.
 - 3) Penggunaan Memori Flash: Total ruang memori *flash* yang dibutuhkan untuk menyimpan seluruh *firmware* dan model yang telah dikompilasi pada perangkat ESP32-CAM.

Hasil dari pengujian ini akan menjadi dasar untuk analisis dan pembahasan di Bab IV, memberikan gambaran yang jelas mengenai kinerja sistem deteksi *tactile paving* yang telah dikembangkan, serta validasi bahwa model yang dibuat cukup akurat, efisien, dan layak ditanamkan pada perangkat *low-power* seperti ESP32-CAM.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Alat deteksi *tactile paving* berbasis pengolahan citra digital secara *real-time* untuk membantu navigasi tunanetra telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sesuai tujuan penelitian .
2. Penerapan model MobileNetV2 yang dioptimasi dengan pendekatan FOMO pada perangkat mikrokontroler ESP32-CAM berjalan secara efektif dan efisien. Perangkat menunjukkan kemampuan untuk memproses citra dan menghasilkan deteksi dengan penggunaan sumber daya yang rendah.
3. Kinerja alat deteksi dalam mengidentifikasi tipe *tactile paving* (yaitu *line type* dan *spot type*) menunjukkan hasil yang memuaskan pada kondisi pengujian aktual. Akurasi keseluruhan model (*non-background*) mencapai *F1 Score* 0.90, dengan *recall* 100% untuk *line type* dan 85.7% untuk *spot type*. Waktu *latency* total sistem (termasuk akuisisi dan inferensi) adalah 324 ms, memungkinkan umpan balik *real-time* kepada pengguna.
4. Sistem umpan balik melalui vibrator (untuk *line type*) dan *buzzer* (untuk *spot type*) berfungsi dengan baik dan konsisten sesuai dengan deteksi *tactile paving*, secara signifikan dapat meningkatkan kemandirian dan keamanan penyandang tunanetra dalam mobilitas sehari-hari.

5.2 Saran

Beberapa saran untuk pengembangan dan penelitian lebih lanjut berdasarkan hasil dan batasan penelitian ini adalah:

1. Mengoptimalkan model lebih lanjut untuk meningkatkan *recall* pada deteksi *spot type*, khususnya pada kondisi lingkungan yang redup atau permukaan yang kotor/teroklusi, di mana saat ini masih terjadi kegagalan deteksi. Hal ini dapat

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

melibatkan penambahan *dataset* yang lebih bervariasi atau penggunaan teknik pra-pemrosesan gambar yang lebih canggih.

2. Mengeksplorasi metode umpan balik yang lebih informatif dan nuansa, selain getaran dan suara sederhana. Misalnya, umpan balik arah spesifik, informasi verbal mengenai rintangan, atau integrasi dengan *earphone* konduksi tulang.
3. Mengembangkan alat menjadi sistem navigasi yang lebih komprehensif, tidak hanya mendeteksi *tactile paving* tetapi juga menganalisis jalur navigasi secara penuh, termasuk pemetaan lingkungan, deteksi hambatan dinamis, dan panduan arah yang lebih kompleks.
4. Meneliti implementasi pada perangkat keras dengan spesifikasi lebih tinggi (misalnya, mikroprosesor dengan akselerator AI terdedikasi) untuk potensi peningkatan akurasi dan kecepatan inferensi yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] World Health Organization et al., "World report on vision," World Health Organization Report, Geneva, 2019. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-vision>
- [2] Rokom, "Katarak Penyebab Terbanyak Gangguan Penglihatan di Indonesia," Sehat Negeriku, 19 Oktober 2021. [Online]. Tersedia: <https://sehatnegeriku.kemkes.go.id/baca/umum/20211012/5738714/katarak-penyebab-terbanyak-gangguan-penglihatan-di-indonesia/>
- [3] A. O. Yaptan and S. W. Teh, "Menciptakan arsitektur fungsionalis pada penyandang tunanetra," *J. Stupa*, vol. 6, no. 1, pp. 415–426, Apr. 2024, doi: 10.24912/stupa.v6i1.27487.
- [4] D. P. Istiqfariandi, Gunawan, A. Azzahra, Krisna, and M. Rahmawan, "Pengembangan visibel yang mampu membantu penyandang tunanetra melaksanakan kegiatan," *J. Syntax Admiration*, vol. 2, no. 10, pp. 1398–1410, Oct. 2021.
- [5] R. Solekha, M. Zaki, L. A. Fatimah, dan R. Hidayat, "TOKCER BANTALAN: Tingkat Cerdas Alat Bantu Jalan Penyandang Tunanetra Menggunakan Arduino Mega 2560 dengan Sensor Ultrasonic HC SR-04 dan Water Level," *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, vol. 1, no. 2, pp. 35-39, Aug. 2023, doi: 10.58291/komets.v1i2.109.
- [6] E. Khoirunisa and D. A. Himawanto, "Perbandingan ketersediaan ubin tekstur pemandu untuk tunanetra di tempat umum antara Kota Surakarta dan Kota Nagoya," *J. Kaj. Wil.*, vol. 9, no. 1, pp. 34–44, 2018.
- [7] V. Gutti and R. Karthi, "Real Time Classification of Fruits and Vegetables Deployed on Low Power Embedded Devices Using Tiny ML," 2022, pp. 347–359. doi: 10.1007/978-3-031-12413-6_27.
- [8] R. F. Hanung Pangestu Rahman, Jamaludin Indra, "Penerapan Convolutional Neural Network pada Timbangan Pintar Menggunakan ESP32-CAM," *J. Media Inform. Budidarma*, vol. 7, no. 2, pp. 1–9, 2023, doi: 10.30865/mib.v7i1.5469.
- [9] Y. B. E. Purba, N. F. Saragih, A. P. Silalahi, and ..., "Perancangan Alat Pendeteksi Kematangan Buah Nanas Dengan Menggunakan Mikrokontroler Dengan Metode

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [10] Convolutional Neural Network (CNN)," J. Ilm. Tek. ..., vol. 2, no. 1, pp. 13–21, 2022.
- [11] A. L. Associative professor, N. V Raghav, and B. S. Kumar P, "Animal Intrusion Detection Using ESP32 Cam and Open CV," Int. J. Innov. Sci. Res. Technol., vol. 8, no. 10, pp. 913– 916, 2023.
- [12] H. Fitri and D. Ivan Finiel Hotmartua Bagariang, "Pemanfaatan Esp32-Cam Untuk Mengukur Ketinggian Air Menggunakan Metode Image Processing," Semin. Nas. Terap. Ris. Inov. Ke-6 ISAS Publ. Ser. Eng. Sci., vol. 6, no. 1, pp. 762–769, 2020.
- [13] F. Humam and M. A. Triawan, "Sistem Keamanan Ruangan Menggunakan ESP32CAM dan Sensor Gerak Berbasis IoT," *Infotek: Jurnal Informatika dan Teknologi*, vol. 7, no. 2, pp. 575–584, Jul. 2024. e-ISSN: 2614-8773. DOI: 10.29408/jit.v7i2.26109.
- [14] Adminjba, "Tactile Paving", Stone Depot, 6 Maret 2020. [online], tersedia: <https://jualbatualam.com/jenis-batu-alam/tactile-paving/>.
- [15] J. Nurhakiki dan Y. Yahfizham, "Studi Kepustakaan: Pengenalan 4 Algoritma Pada Pembelajaran Deep Learning Beserta Implikasinya," *Pendekar*, Vol. 2, No. 1, Feb. 2024, doi: 10.51903/pendekar.v2i1.598.
- [16] R. Dijaya and H. Setiawan, "Buku Ajar Pengolahan Citra Digital", *umsidapress*, pp. 1- 85, Jul. 2023.
- [17] I. P. Sari, F. Ramadhani, A. Satria, and D. Apdilah, "Implementasi Pengolahan Citra Digital dalam Pengenalan Wajah menggunakan Algoritma PCA dan Viola Jones," *Hello World Jurnal Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 3, pp. 147–156, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.56211/helloworld.v2i3.346>
- [18] Mahendra W. Wardana, I. Maskuri, and M. S. Zaim, "Pengolahan Citra Digital pada Perhitungan Ikan Hias Menggunakan Metode Blob," *Jurnal Rekayasa Komputer dan Teknologi Lingkungan (JRKTL)*, vol. 6, no. 2, pp. 108–116, Dec. 2023.
- [19] F. Jalled, "Object Detection using Image Processing," vol. 1, pp. 1– 6, 2016, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1611.07791>.
- [20] D. A. N. Gookyi, F. A. Wulnye, M. Wilson, P. Danquah, S. A. Danso, and A. A. Gariba, "Enabling Intelligence on the Edge: Leveraging Edge Impulse to Deploy Deep Learning Models on Edge Devices for Tomato Leaf Disease Detection," *AgriEngineering*, vol. 6, no. 4, pp. 3563–3585, Sep. 2024, doi: [10.3390/agriengineering6040203](https://doi.org/10.3390/agriengineering6040203).

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [20] L. Boyle, N. Baumann, S. Heo, and M. Magno, "Enhancing lightweight neural networks for small object detection in IoT applications," in *Proc. IEEE Sensors 2023*, Vienna, Austria, Oct. 2023, doi: 10.1109/SENSOR56945.2023.10324904, arXiv:2311.07163.
- [21] Alsajri, A. K. S., & Hacimahmud, A. V. (2023). Review of deep learning: Convolutional neural network algorithm. Babylonian Journal of Machine Learning, 2023, 19–25. <https://doi.org/10.58496/BJML/2023/004>
- [22] A. Suyitno, "Perancangan Keamanan Rumah dengan ESP32-CAM dan Notifikasi Alarm Berbasis IoT Menggunakan Aplikasi Telegram," Skripsi, Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Buddhi Dharma, Tangerang, Indonesia, 2023.

LAMPIRAN

```
#include <Barr-project-1_inferencing.h> // Menyertakan library inferensi model Edge Impulse
#include "edge-impulse-sdk/dsp/image/image.hpp" // Menyertakan library pemrosesan gambar dari
Edge Impulse SDK
#include "esp_camera.h" // Menyertakan library untuk mengontrol modul kamera ESP32

// Pin definitions
#define BUZZER_PIN 13 // Mendefinisikan pin untuk buzzer
#define VIBRATOR_PIN 12 // Mendefinisikan pin untuk motor vibrator

// Camera model (AI Thinker)
#define CAMERA_MODEL_AI_THINKER // Mendefinisikan model kamera yang digunakan (AI
Thinker)

// Camera pin configuration
// Konfigurasi pin kamera berdasarkan model AI Thinker
#if defined(CAMERA_MODEL_AI_THINKER)
#define PWDN_GPIO_NUM 32
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM 0
#define SIOD_GPIO_NUM 26
#define SIOC_GPIO_NUM 27
#define Y9_GPIO_NUM 35
#define Y8_GPIO_NUM 34
#define Y7_GPIO_NUM 39
#define Y6_GPIO_NUM 36
#define Y5_GPIO_NUM 21
#define Y4_GPIO_NUM 19
#define Y3_GPIO_NUM 18
#define Y2_GPIO_NUM 5
#define VSYNC_GPIO_NUM 25
#define HREF_GPIO_NUM 23
#define PCLK_GPIO_NUM 22
#endif
```

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```
// Model configuration
// Konfigurasi untuk model inferensi
#define EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH 48 // Lebar input yang diharapkan oleh model
#define EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT 48 // Tinggi input yang diharapkan oleh model
#define EI_CAMERA_RAW_WIDTH 240 // Lebar gambar mentah yang ditangkap kamera
#define EI_CAMERA_RAW_HEIGHT 240 // Tinggi gambar mentah yang ditangkap kamera
#define EI_CAMERA_FRAME_BYTE_SIZE 3 // Jumlah byte per piksel (3 untuk RGB888)

// Detection thresholds
// Ambang batas kepercayaan (confidence) dan ukuran untuk deteksi objek
#define SPOT_CONFIDENCE_THRESHOLD 0.98 // Ambang batas kepercayaan untuk objek
'spot'
#define LINE_CONFIDENCE_THRESHOLD 0.85 // Ambang batas kepercayaan untuk objek
'line'
#define MIN_OBJECT_SIZE_PCT 0.15 // Ukuran minimum objek sebagai persentase dari
lebar/tinggi frame (15%)
#define MIN_OBJECT_PIXELS (int)(EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH *
MIN_OBJECT_SIZE_PCT) // Ukuran minimum objek dalam piksel

static bool debug_nn = false; // Flag untuk mengaktifkan debug neural network
static bool is_initialised = false; // Flag untuk memeriksa apakah kamera sudah diinisialisasi
uint8_t *snapshot_buf; // Buffer untuk menyimpan gambar mentah ukuran 240x240
uint8_t *resized_buf; // Buffer untuk menyimpan gambar yang sudah diubah ukurannya ke 48x48

// Struktur konfigurasi kamera
camera_config_t camera_config = {
    .pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM,
    .pin_reset = RESET_GPIO_NUM,
    .pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM,
    .pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM,
    .pin_d7 = Y9_GPIO_NUM,
    .pin_d6 = Y8_GPIO_NUM,
    .pin_d5 = Y7_GPIO_NUM,
    .pin_d4 = Y6_GPIO_NUM,
    .pin_d3 = Y5_GPIO_NUM,
```


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```
.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM,
.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM,
.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM,
.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM,
.pin_href = HREF_GPIO_NUM,
.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM,
.xclk_freq_hz = 20000000, // Frekuensi XCLK kamera
.ledc_timer = LEDC_TIMER_0,
.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0,
.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG, // Format piksel JPEG
.frame_size = FRAMESIZE_240X240, // Ukuran frame yang ditangkap kamera
.jpeg_quality = 12, // Kualitas JPEG (0-63)
.fb_count = 1, // Jumlah frame buffer
.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM, // Lokasi frame buffer (PSRAM)
.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY, // Mode pengambilan gambar
};

// Fungsi untuk mengubah ukuran gambar dari sumber (240x240) ke tujuan (48x48)
void resize_image(uint8_t *src, uint8_t *dst) {
    const int src_width = 240; // Lebar gambar sumber
    const int src_height = 240; // Tinggi gambar sumber
    const int dst_width = 48; // Lebar gambar tujuan
    const int dst_height = 48; // Tinggi gambar tujuan

    const float x_ratio = src_width / (float)dst_width; // Rasio skala lebar
    const float y_ratio = src_height / (float)dst_height; // Rasio skala tinggi

    // Iterasi melalui setiap piksel gambar tujuan
    for (int y = 0; y < dst_height; y++) {
        for (int x = 0; x < dst_width; x++) {
            int src_x = (int)(x * x_ratio); // Hitung koordinat X di gambar sumber
            int src_y = (int)(y * y_ratio); // Hitung koordinat Y di gambar sumber

            int src_idx = (src_y * src_width + src_x) * 3; // Indeks piksel di gambar sumber (RGB)
            int dst_idx = (y * dst_width + x) * 3; // Indeks piksel di gambar tujuan (RGB)
```

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```

dst[dst_idx] = src[src_idx]; // Salin komponen Merah
dst[dst_idx + 1] = src[src_idx + 1]; // Salin komponen Hijau
dst[dst_idx + 2] = src[src_idx + 2]; // Salin komponen Biru
}

// Fungsi setup, dijalankan sekali saat boot
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Inisialisasi komunikasi serial
    while (!Serial); // Tunggu hingga serial siap
    Serial.println("ESP32-CAM 240x240->48x48 Object Detection"); // Cetak pesan awal

    pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT); // Atur pin buzzer sebagai output
    pinMode(VIBRATOR_PIN, OUTPUT); // Atur pin vibrator sebagai output

    // Alokasikan buffer memori untuk gambar
    snapshot_buf = (uint8_t*)heap_caps_malloc(240 * 240 * 3, MALLOC_CAP_SPIRAM); //
    Alokasi buffer snapshot di PSRAM
    resized_buf = (uint8_t*)heap_caps_malloc(48 * 48 * 3, MALLOC_CAP_SPIRAM); // Alokasi
    buffer resized di PSRAM

    if (!snapshot_buf || !resized_buf) {
        Serial.println("ERR: Failed to allocate image buffers!"); // Pesan error jika alokasi gagal
        return;
    }

    // Inisialisasi kamera
    if (!camera_init()) {
        Serial.println("Failed to initialize Camera!"); // Pesan error jika inisialisasi kamera gagal
    } else {
        Serial.println("Camera initialized"); // Pesan sukses inisialisasi kamera
    }

    // Cetak informasi model dan resolusi

```

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```
Serial.printf("\nModel input size: %dx%d\n", EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH,
EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT);

Serial.printf("Capture resolution: %dx%d\n", EI_CAMERA_RAW_WIDTH,
EI_CAMERA_RAW_HEIGHT);

Serial.printf("Minimum object size: %dpx\n", MIN_OBJECT_PIXELS);

// Fungsi loop, dijalankan berulang kali
void loop() {

    uint32_t total_start_time = millis(); // Catat waktu mulai total

    if (ei_sleep(5) != EI_IMPULSE_OK) return; // Jeda singkat jika diperlukan oleh Edge Impulse

    ei::signal_t signal; // Objek sinyal untuk input model
    signal.total_length = EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH * EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT;

    // Total panjang sinyal (piksel)
    signal.get_data = &ei_camera_get_data; // Pointer ke fungsi untuk mendapatkan data gambar

    // Tangkap gambar
    uint32_t capture_start = millis(); // Catat waktu mulai penangkapan
    if (!ei_camera_capture(EI_CLASSIFIER_INPUT_WIDTH,
EI_CLASSIFIER_INPUT_HEIGHT, resized_buf)) {
        Serial.println("Failed to capture image"); // Pesan error jika gagal menangkap gambar
        return;
    }

    uint32_t capture_time = millis() - capture_start; // Hitung waktu penangkapan

    // Jalankan inferensi (deteksi objek)
    uint32_t inference_start = millis(); // Catat waktu mulai inferensi
    ei_impulse_result_t result = {0}; // Struktur untuk menyimpan hasil inferensi
    EI_IMPULSE_ERROR err = run_classifier(&signal, &result, debug_nn); // Jalankan
klasifikasi/deteksi

    uint32_t inference_time = millis() - inference_start; // Hitung waktu inferensi
    uint32_t total_time = millis() - total_start_time; // Hitung waktu total

    if (err != EI_IMPULSE_OK) {
```


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```
Serial.printf("ERR: Failed to run classifier (%d)\n", err); // Pesan error jika klasifikasi gagal
return;
}

// Proses hasil deteksi
bool line_detected = false; // Flag untuk mendeteksi 'line'
bool spot_detected = false; // Flag untuk mendeteksi 'spot'

#if EL_CLASSIFIER_OBJECT_DETECTION == 1 // Hanya jika model adalah deteksi objek
Serial.printf("\nDetection timing - Total: %lums (Capture: %lums | Inference: %lums)\n",
    total_time, capture_time, inference_time); // Cetak waktu deteksi

// Iterasi melalui setiap bounding box yang terdeteksi
for (uint32_t i = 0; i < result.bounding_boxes_count; i++) {
    ei_impulse_result_bounding_box_t bb = result.bounding_boxes[i]; // Ambil bounding box

    // Terapkan ambang batas kepercayaan
    if (strcmp(bb.label, "spot") == 0 && bb.value < SPOT_CONFIDENCE_THRESHOLD)
        continue; // Lewati jika kepercayaan 'spot' terlalu rendah
    if (strcmp(bb.label, "line") == 0 && bb.value < LINE_CONFIDENCE_THRESHOLD)
        continue; // Lewati jika kepercayaan 'line' terlalu rendah

    // Terapkan filter ukuran objek
    if (bb.width < MIN_OBJECT_PIXELS || bb.height < MIN_OBJECT_PIXELS) {
        Serial.printf(" Filtered %s (too small: %dx%d)\n", bb.label, bb.width, bb.height); // Pesan
        filter_karena ukuran terlalu kecil
        continue;

        // Periksa batas objek (pastikan tidak keluar dari frame 48x48)
        if (bb.x + bb.width >= 48 || bb.y + bb.height >= 48) {
            Serial.printf(" Filtered %s (out of bounds)\n", bb.label); // Pesan filter karena di luar batas
            continue;

            Serial.printf(" %s (%.2f) [x: %u, y: %u, w: %u, h: %u]\n",
```

```
bb.label, bb.value, bb.x, bb.y, bb.width, bb.height); // Cetak detail objek terdeteksi
```

```
if (strcmp(bb.label, "line") == 0) line_detected = true; // Set flag jika 'line' terdeteksi
if (strcmp(bb.label, "spot") == 0) spot_detected = true; // Set flag jika 'spot' terdeteksi
}
#endif

// Kontrol output (buzzer dan vibrator) berdasarkan deteksi
digitalWrite(BUZZER_PIN, line_detected ? HIGH : LOW); // Nyalakan buzzer jika 'line'
terdeteksi
digitalWrite(VIBRATOR_PIN, spot_detected ? HIGH : LOW); // Nyalakan vibrator jika 'spot'
terdeteksi
}

// Fungsi untuk inisialisasi kamera Edge Impulse
bool ei_camera_init(void) {
    if (is_initialised) return true; // Jika sudah diinisialisasi, langsung kembali true

    esp_err_t err = esp_camera_init(&camera_config); // Inisialisasi kamera menggunakan
konfigurasi
    if (err != ESP_OK) {
        Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x\n", err); // Pesan error jika inisialisasi gagal
        return false;
    }

    sensor_t *s = esp_camera_sensor_get(); // Dapatkan pointer ke objek sensor kamera
    s->set_framesize(s, FRAMESIZE_240X240); // Atur ukuran frame kamera ke 240x240
    s->set_quality(s, 12); // Atur kualitas JPEG
    s->set_contrast(s, 1); // Atur kontras
    s->set_brightness(s, 0); // Atur kecerahan
    s->set_saturation(s, -1); // Atur saturasi
    s->set_vflip(s, 1); // Aktifkan flip vertikal

    is_initialised = true; // Set flag bahwa kamera sudah diinisialisasi
    return true;
}
```

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```
// Fungsi untuk menangkap gambar dari kamera
bool ei_camera_capture(uint32_t img_width, uint32_t img_height, uint8_t *out_buf) {
    if (!is_initialised) return false; // Jika kamera belum diinisialisasi, kembali false

    camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get(); // Dapatkan frame buffer dari kamera
    if (!fb) {
        Serial.println("Camera capture failed"); // Pesan error jika gagal menangkap
        return false;
    }

    // Konversi gambar JPEG ke format RGB888
    bool converted = fmt2rgb888(fb->buf, fb->len, PIXFORMAT_JPEG, snapshot_buf);
    esp_camera_fb_return(fb); // Kembalikan frame buffer

    if (!converted) {
        Serial.println("RGB conversion failed"); // Pesan error jika konversi RGB gagal
        return false;
    }

    // Ubah ukuran gambar ke ukuran input model
    resize_image(snapshot_buf, out_buf);
    return true;
}

// Fungsi callback untuk mendapatkan data gambar untuk inferensi
static int ei_camera_get_data(size_t offset, size_t length, float *out_ptr) {
    size_t pixel_ix = offset * 3; // Indeks piksel di buffer gambar
    size_t pixels_left = length; // Jumlah piksel yang tersisa untuk disalin
    size_t out_ptr_ix = 0; // Indeks di buffer output (float)

    while (pixels_left != 0) {
        // Gabungkan komponen RGB menjadi satu nilai float
        // Note: Penggabungan ini mungkin tidak umum dan tergantung pada bagaimana model Edge
        Impulse Anda mengharapkan data.
    }
}
```



```
// Biasanya, data akan dalam format R, G, B terpisah. Ini mungkin adalah cara untuk
memaketkan' piksel.
out_ptr[out_ptr_ix] = (resized_buf[pixel_ix + 2] << 16) + // Blue component shifted
(resized_buf[pixel_ix + 1] << 8) + // Green component shifted
resized_buf[pixel_ix]; // Red component
out_ptr_ix++;
pixel_ix += 3; // Lanjut ke piksel berikutnya (3 byte per piksel)
pixels_left--; // Kurangi jumlah piksel yang tersisa
}
return 0;
}

#ifdef EI_CLASSIFIER_SENSOR || EI_CLASSIFIER_SENSOR !=
EI_CLASSIFIER_SENSOR_CAMERA
#error "Invalid model for current sensor" // Error jika model tidak cocok dengan sensor kamera
#endif
```

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.