

LAPORAN TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI *AUTOMATIC LINE BARRIER*
(ALB) BERBASIS *FINITE STATE MACHINE* (FSM) MENGGUNAKAN
SENSOR ULTRASONIK PADA *PROTOTYPE* GERBANG TOL *FREE FLOW*

Diajukan oleh:
Muhammad Ceo Kautsar
NIM. 40040322650023

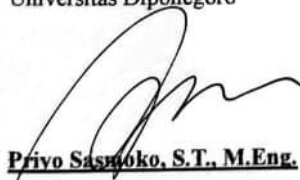
TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

DOSEN PEMBIMBING,



Jatmiko Endro Suseno S.Si., M.Si., Ph.D., F.Med. Semarang, 12 Agustus 2026
NIP. 197211211998021001

Mengetahui
Ketua
Program Studi S. Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro



Privo Sasmitoko, S.T., M.Eng.
NIP. 197009161998021001

Semarang, 12 Agustus 2026

HALAMAN PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI *AUTOMATIC LINE BARRIER*
(ALB) BERBASIS *FINITE STATE MACHINE* (FSM) MENGGUNAKAN
SENSOR ULTRASONIK PADA *PROTOTYPE* GERBANG TOL *FREE FLOW*

Disusun oleh:

Muhammad Ceo Kautsar

40040322650023

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji pada tanggal
12 Agustus 2026

Tim Penguji,
Pembimbing

Jatmiko Endro Suseno S.Si., M.Si., Ph.D., F.Med.

NIP. 197211211998021001

Penguji 1

Ari Bawono Putranto, S.Si., M.Si.

NIP. 19850125019031007

Penguji 2

Megarini Hersaputri, S.T., M.T.

NIP. 198902142020122012

Mengetahui,

Ketua Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri
Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro

Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng.

NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Ceo Kautsar
NIM : 40040322650023
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI
*AUTOMATIC LINE BARRIER (ALB) BERBASIS
FINITE STATE MACHINE (FSM)
MENGUNAKAN SENSOR ULTRASONIK
PADA PROTOTYPE GERBANG TOL FREE
FLOW*

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dirujuk dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar Pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No. 17 tahun 2010 dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 12 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Ceo Kautsar

NIM. 40040322650023

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat waktu. Tugas akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana teknik terapan (S.Tr.T.) dari Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Otomasi, Departemen Teknologi Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.

Terselesaikannya laporan ini tidak lepas dari berbagai dukungan, bantuan, serta motivasi yang penulis terima dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kekuatan, kesabaran, kemudahan dan kelancaran selama proses penyusunan Tugas Akhir Rancang Bangun Alat maupun dalam penyusunan laporan.
2. Prof Dr. Ir.Budiyono, M. Si, selaku Dekan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
3. Bapak Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku ketua Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Otomasi.
4. Bapak Jatmiko Endro Suseno S.Si., M.Si., Ph.D., F.Med., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan arahan, meluangkan waktu dan aktifitasnya selama penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Ibu Alfiah, Ayah Sofwan Arifin, Kakak Muhammad Harba Kautsar dan keluarga, Kakak Qudwah Hayati dan keluarga, yang selalu memberikan doa, dukungan, motivasi, serta kasih sayang yang tiada henti terhadap penulis.
6. Muhammad Dava Samudra dan Elhida Fauzia R., selaku partner Tugas Akhir Rancang Bangun ini yang selalu mengusahakan semuanya agar dapat berjalan lancar.
7. Indriani yang selalu percaya dan memberikan doa, dukungan, semangat, dan motivasinya terhadap penulis.
8. Seluruh Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi angkatan 2022 (SATNAYAKA) selaku teman seperjuangan yang selalu menemani

penulis berdiskusi dan bertukar pikiran dalam proses Rancang Bangun Alat maupun proses penyusunan laporan.

9. Seluruh anggota Jasuke's, FAMILY KONTRAKAN, Timses YMMA, PAS GASAL 2021/2022, Tellekkk Bukber Circle, Keluarga Besar Bp. Brilian, dan Kesma 23.
10. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam proses penyusunan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu, penulis memohon maaf atas segala kesalahan yang mungkin terjadi, baik dalam sikap maupun perkataan, baik yang disengaja maupun tidak disengaja. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan v manfaat bagi pembaca, terutama bagi penulis sendiri. Saran dan masukan dari pembaca sangat dihargai dan akan menjadi bahan perbaikan di masa mendatang.

Semarang, 12 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Ceo Kautsar

NIM. 40040322650023

DAFTAR ISI

LAPORAN TUGAS AKHIR	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
INTISARI.....	xiv
ABSTRACT	xv
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat	4
1.4.1 Manfaat Akademis	4
1.4.2 Manfaat Implementasi.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Sistematika Proposal Tugas Akhir	6
BAB II.....	8
DASAR TEORI	8
2.1 Tinjauan Pustaka	8
2.2 <i>Single Lane Free Flow</i> (SLFF)	10
2.3 <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB).....	11
2.4 <i>Finite State Machine</i> (FSM).....	13
2.5 Sensor Ultrasonik HY-SRF05	15
2.6 Mikrokontroler ESP32	18
2.7 Motor Servo	19
2.8 Arduino IDE.....	22
2.9 <i>Power Supply</i> 12V 5A.....	23

2.10	Modul LM2596	27
2.11	Modul XL4005.....	28
BAB III.....		30
METODE PENELITIAN.....		30
3.1	Blok Diagram dan Flowchart.....	30
3.1.1	Blok Diagram.....	30
3.1.2	Rangkaian Elektrikal Keseluruhan.....	33
3.1.3	<i>Flowchart</i> Sistem Keseluruhan.....	35
3.1.4	<i>Flowchart</i> Sistem <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB).....	38
3.2	Spesifikasi Alat dan Fitur Sistem Pendeteksian Kendaraan.....	41
3.3	Gambar 3D <i>Prototype</i>	42
3.4	Prinsip Kerja Sistem Pendeteksian Kendaraan	43
3.5	Perancangan deteksi kendaraan.....	44
3.5.1	Analisis Geometri Area Deteksi.....	45
3.5.2	Penentuan Nilai <i>Threshold</i>	46
3.5.3	Implementasi <i>Threshold</i> pada Sistem	47
3.6	Perancangan Kendali <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB)	49
3.6.1	Kendali <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB).....	50
3.6.2	Kendali <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB) (<i>Tailgating</i>).....	54
3.6.3	Kontrol Pengaman <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB)	57
3.7	Perancangan <i>Finite State Machine</i> (FSM)	60
3.7.1	Identifikasi <i>state</i>	60
3.7.2	Penentuan event dan condition.....	64
3.7.3	Perancangan transisi <i>state</i>	69
3.7.4	Implementasi <i>Finite State Machine</i> (FSM)	73
3.8	Teknik Fabrikasi.....	77
3.8.1	Kebutuhan motor penggerak.....	77
3.8.2	Perhitungan kebutuhan daya listrik sistem.....	79
3.8.3	Pembuatan PCB sistem	81
3.8.4	Perakitan mekanik.....	82
3.8.5	Perakitan wiring panel box.....	83
3.8.6	Pemasangan komponen pada kerangka.....	84
BAB IV		88
PENGUJIAN DAN ANALISA.....		88

4.1	Hasil Pengujian Komponen.....	88
4.1.1	Power supply 12V 5A	88
4.1.2	Modul LM2596	91
4.1.3	Modul XL4005.....	93
4.1.4	Sensor ultrasonik HY-SRF05	94
4.1.5	Motor Servo MG996R	105
4.2	Hasil Pengujian Sistem	107
4.2.1	Pengujian transisi <i>state</i>	108
4.2.2	Pengujian waktu respon sistem	112
4.2.3	Pengujian deteksi kendaraan	115
4.2.4	Pengujian Automatic Line Barrier (ALB).....	115
4.2.5	Pengujian <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB) terhadap variasi jumlah kendaraan	121
4.2.6	Pengujian mekanisme pengaman <i>Automatic Line Barrier</i> (ALB) 124	
BAB V.....		130
PENUTUP		130
5.1	Kesimpulan	130
5.2	Saran.....	131
DAFTAR PUSTAKA		133
LAMPIRAN		137

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan pustaka	8
Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor Ultrasonik HY-SRF05	17
Tabel 2.3 Spesifikasi ESP32	19
Tabel 2.4 Spesifikasi Motor Servo [20]	20
Tabel 2.5 Spesifikasi Power Supply 12V 5A [26]	24
Tabel 2.6 Spesifikasi modul LM2596 [29]	27
Tabel 2.7 Spesifikasi modul XL4005 [34]	29
Tabel 3.1 Penggunaan I/O pada ESP32	35
Tabel 3.2 Fungsi masing-masing sensor ultrasonik	44
Tabel 3.3 Parameter perancangan threshold sensor ultrasonik	45
Tabel 3.4 Logika sistem	47
Tabel 3.6 Identifikasi state	62
Tabel 3.7 Event pada state	67
Tabel 3.8 Condition pada state	68
Tabel 3.9 Transisi state FSM	71
Tabel 3.10 Transisi FSM (berhasil)	75
Tabel 3.11 Transisi FSM (gagal)	76
Tabel 3.12 Perhitungan kebutuhan motor penggerak	78
Tabel 3.13 Perhitungan kebutuhan daya buck converter 5V	80
Tabel 3.14 Perhitungan kebutuhan daya buck converter 6V	80
Tabel 4.1 Pengujian power supply tanpa beban	89
Tabel 4.2 Pengujian power supply dengan beban	89
Tabel 4.3 Hasil tegangan modul LM2596	92
Tabel 4.4 Hasil tegangan modul XL4005	93
Tabel 4.5 Pengujian akurasi sensor ultrasonik 1	96
Tabel 4.6 Pengujian treshhold sensor ultrasonik 1	97
Tabel 4.7 Pengujian konsistensi sensor ultrasonik 1	97
Tabel 4.8 Pengujian akurasi sensor ultrasonik 2	99
Tabel 4.9 Pengujian treshhold sensor ultrasonik 2	100
Tabel 4.10 Pengujian konsistensi sensor ultrasonik 2	101

Tabel 4.11 Pengujian akurasi sensor ultrasonik 3	102
Tabel 4.12 Pengujian treshold sensor ultrasonik 3	103
Tabel 4.13 Pengujian konsistensi sensor ultrasonik 3	104
Tabel 4.14 Pengujian transisi FSM pada kendaraan memenuhi syarat	108
Tabel 4.15 Pengujian transisi FSM pada kendaraan tidak memenuhi syarat	110
Tabel 4.16 Hasil pengujian waktu respon sistem	113
Tabel 4.17 Hasil deteksi kendaraan sensor ultrasonik 1	115
Tabel 4.18 Hasil deteksi kendaraan sensor ultrasonik 2	116
Tabel 4.19 Hasil deteksi kendaraan sensor ultrasonik 3	117
Tabel 4.20 Hasil pengujian skenario operasi	119
Tabel 4.21 Pengujian variasi jumlah kendaraan	122
Tabel 4.22 Hasil pengujian variasi jumlah kendaraan	122
Tabel 4.23 Hasil uji kontrol keselamatan Automatic Line Barrier (ALB)	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Single Lane Free Flow (SLFF) [6]	11
Gambar 2.2 Automatic Line Barrier (ALB) [10].....	12
Gambar 2.3 Komponen sensor ultrasonik HY-SRF05.....	16
Gambar 2.4 Mikrokontroler ESP32 DevKit V1 [18].....	18
Gambar 2.5 Motor servo MG996R [20]	20
Gambar 2.6 Arduino IDE [23].....	23
Gambar 2.7 Power Supply 12V 5A [26].....	24
Gambar 2.8 Buck converter XL4005 [34].....	28
Gambar 3.1 Blok diagram keseluruhan	31
Gambar 3.2 Rangkaian elektrikl keseluruhan.....	34
Gambar 3.3 Flowchart Sistem Keseluruhan	36
Gambar 3.4 Flowchart sistem Automatic Line Barrier (ALB).....	39
Gambar 3.5 Desain 3D Sistem	42
Gambar 3.6 Dimensi fisik prototype	45
Gambar 3.7 Nilai threshold deteksi kendaraan.....	47
Gambar 3.8 Pembacaan jarak sensor ultrasonik	48
Gambar 3.9 Deteksi kendaraan.....	49
Gambar 3.10 Masukan keputusan untuk membuka ALB.....	51
Gambar 3.11 Perintah membuka ALB.....	52
Gambar 3.12 Masukan untuk menutup ALB.....	53
Gambar 3.13 Perintah menutup ALB	53
Gambar 3.14 Indikasi tailgating	54
Gambar 3.15 Konfirmasi tailgating	55
Gambar 3.16 Validasi tailgating	56
Gambar 3.17 Tailgating tidak valid	56
Gambar 3.19 Noise filter sensor 2	57
Gambar 3.20 Konfirmasi ALB menutup (tailgating).....	58
Gambar 3.21 Kontrol pengaman ALB.....	59
Gambar 3.22 Definisi seluruh state	61
Gambar 3.23 Definisi event.....	64

Gambar 3.24 Syarat event	65
Gambar 3.25 Syarat transisi.....	66
Gambar 3.26 Transisi state	70
Gambar 3.27 Run FSM.....	74
Gambar 3.28 Penjadwalan FSM	74
Gambar 3.29 Desain PCB.....	81
Gambar 3.30 (a) Penentuan posisi komponen (b) Pengukuran dimensi dan jarak antar komponen (c) Penempelan kertas manila dan papan pvc.	83
Gambar 3.31 Wiring panel box.....	83
Gambar 3.32 Pemasangan komponen sensor ultrasonik 1	85
Gambar 3.33 Pemasangan komponen sensor ultrasonik 2	85
Gambar 3.34 Pemasangan komponen sensor ultrasonik 3	86
Gambar 3.35 Pemasangan komponen motor servo	86
Gambar 4.1 Buck converter LM2596 [29]	27
Gambar 4.2 Besar tegangan masukan dan keluaran <i>power supply</i> tanpa beban .	89
Gambar 4.3 Besar tegangan masukan dan keluaran power supply dengan beban	89
Gambar 4.4 Dokumentasi hasil pengukuran Vout	92
Gambar 4.5 Dokumentasi hasil pengukuran Vout	93
Gambar 4.6 Dokumentasi uji akurasi sensor ultrasonic	95
Gambar 4.7 Tampilan serial monitor uji akurasi sensor 1	95
Gambar 4.8 Tampilan serial monitor uji akurasi sensor 2	99
Gambar 4.9 Tampilan serial monitor uji akurasi	102
Gambar 4.10 Sudut minimum dan maksimum motor servo.....	105
Gambar 4.11 Pengujian akurasi sudut putar motor servo	106
Gambar 4.12 Tampilan serial monitor sudut servo	106
Gambar 4.19 ALB membuka ketika kendaraan berhasil terverifikasi.....	118
Gambar 4.20 ALB menutup ketika kendaraan gagal terverifikasi	118
Gambar 4.21 Skenario (a) 1 kendaraan (b) 2 kendaraan (tailgating terverifikasi) (c) 2 kendaraan (tailgating tidak terverifikasi).....	122
Gambar 4.22 Dokumentasi kontrol safety ALB	124

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Sensor Ultrasonik 1	137
Lampiran 2. Dokumentasi Pengujian Sensor Ultrasonik 2	137
Lampiran 3. Dokumentasi Pengujian Sensor Ultrasonik 3	137
Lampiran 4. Dokumentasi Pengujian Sudut Minimum dan Maksimum Motor Servo	137
Lampiran 5. Dokumentasi Pengujian Akurasi Motor Servo	138
Lampiran 6. Dokumentasi Pengujian Waktu Deteksi Kendaraan Sensor 1	138
Lampiran 7. Dokumentasi Pengujian Waktu ALB Menerima Input Verifikasi.	138
Lampiran 8. Dokumentasi Pengujian Waktu ALB Menerima Input Sensor 2 ..	138
Lampiran 9. Dokumentasi Pengujian Deteksi Kendaraan pada Sensor 1	138
Lampiran 10. Dokumentasi Pengujian Deteksi Kendaraan pada Sensor 2	138
Lampiran 11. Dokumentasi Pengujian Deteksi Kendaraan pada Sensor 3	138
Lampiran 12. Datasheet Motor Servo	139
Lampiran 13. Datasheet Sensor Ultrasonik HY-SRF05	141

INTISARI

RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI *AUTOMATIC LINE BARRIER* (ALB) BERBASIS *FINITE STATE MACHINE* (FSM) MENGGUNAKAN SENSOR ULTRASONIK PADA *PROTOTYPE* GERBANG TOL *FREE FLOW*

Muhammad Ceo Kautsar

Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Peningkatan volume kendaraan pada gerbang tol menuntut sistem pelayanan yang otomatis dan aman. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem kendali *Automatic Line Barrier* (ALB) berbasis *Finite State Machine* (FSM) menggunakan sensor ultrasonik pada *prototype* gerbang tol *Free Flow*. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pengendali, tiga sensor ultrasonik HY-SRF05 untuk mendeteksi kendaraan dan motor servo MG996R untuk menggerakkan palang. FSM digunakan untuk mengatur proses mulai dari deteksi kendaraan, identifikasi dan validasi, pembukaan palang, pemantauan kendaraan, hingga penutupan atau pengalihan kendaraan. Pengujian dilakukan terhadap sensor, transisi *state*, waktu respons, variasi jumlah kendaraan, dan kondisi *tailgating*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh skenario yang diuji dapat dijalankan sesuai dengan logika sistem yang telah dirancang. Pada pengujian verifikasi ulang ALB sebanyak 10 percobaan, seluruh percobaan memenuhi kriteria keberhasilan yang telah ditentukan sehingga diperoleh tingkat keberhasilan sebesar 100% pada kondisi pengujian yang dilakukan. Sensor ultrasonik memiliki *error* akurasi tidak lebih dari 0,9% dan konsistensi di bawah 1%. Sistem memiliki rata-rata waktu respons 2158,6 ms dan waktu siklus pelayanan 3388,6 ms. Pengujian variasi jumlah kendaraan dan kondisi *tailgating* juga berhasil sesuai dengan logika FSM. Dengan demikian, sistem yang dirancang mampu mengendalikan proses pelayanan kendaraan secara otomatis dan terstruktur pada *prototype* gerbang tol *Free Flow*.

Kata kunci: *Automatic Line Barrier*, *Finite State Machine*, sensor ultrasonik, ESP32, gerbang tol *Free Flow*.

ABSTRACT

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC LINE BARRIER (ALB) CONTROL SYSTEM BASED ON A FINITE STATE MACHINE (FSM) USING ULTRASONIC SENSORS FOR A FREE-FLOW TOLL GATE PROTOTYPE

Muhammad Ceo Kautsar

Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

The increasing number of vehicles at toll gates requires an automated and secure service system. This study aims to design and implement an Automatic Line Barrier (ALB) control system based on a Finite State Machine (FSM) using ultrasonic sensors on a Free Flow toll gate prototype. The system uses an ESP32 as the main controller, three HY-SRF05 ultrasonic sensors to detect vehicles, an MG996R servo motor to operate the barrier, and RFID and Firebase for vehicle identification and validation. The FSM is used to control the process from vehicle detection, identification and validation, barrier opening, vehicle monitoring, to barrier closing or vehicle diversion. Testing was conducted on sensor performance, state transitions, response time, variations in the number of vehicles, and tailgating conditions. The test results show that all tested scenarios could be executed according to the designed system logic. In the ALB verification test consisting of 10 trials, all trials met the predetermined success criteria, resulting in a 100% success rate under the tested conditions. The ultrasonic sensors achieved an accuracy error of no more than 0.9% and consistency below 1%. The system achieved an average response time of 2158.6 ms and an average service cycle time of 3388.6 ms. Testing with different numbers of vehicles and tailgating conditions also operated successfully according to the FSM logic. Therefore, the designed system is capable of controlling the vehicle service process automatically and systematically on the Free Flow toll gate prototype.

Keywords: Automatic Line Barrier, Finite State Machine, ultrasonic sensor, ESP32, Free Flow toll gate.

DAFTAR SINGKATAN DAN SATUAN

Singkatan	Keterangan
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ALB	<i>Automatic Line Barrier</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
ECHO	<i>Echo</i>
EPC	<i>Electronic Product Code</i>
FSM	<i>Finite State Machine</i>
GND	<i>Ground</i>
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
I2S	<i>Inter-IC Sound</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PSU	<i>Power Supply Unit</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RX	<i>Receive</i>
SF	<i>Safety Factor</i>
SLFF	<i>Single Lane Free Flow</i>
SMPS	<i>Switched-Mode Power Supply</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TRIG	<i>Trigger</i>
TX	<i>Transmit</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VCC	<i>Voltage at Common Collector</i>
VDC	<i>Volt Direct Current</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

Simbol	Keterangan
A	Ampere
bit	Bit
cm	Sentimeter
cm/ μ s	Sentimeter per mikrodetik
°	Derajat
°C	Derajat Celsius
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
kg	Kilogram
kg·cm	Kilogram sentimeter
KB	Kilobyte
m	Meter
m/s ²	Meter per sekon kuadrat
MB	Megabyte
mA	Miliampere
mm	Milimeter
ms	Milisekon
N	Newton
N·m	Newton meter
s	Sekon
μ s	Mikrosekon
V	Volt
W	Watt
%	Persen

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan tol merupakan salah satu infrastruktur transportasi yang memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas masyarakat serta distribusi barang dan jasa. Seiring meningkatnya jumlah kendaraan setiap tahun, kualitas pelayanan pada gerbang tol menjadi aspek yang harus terus ditingkatkan agar mampu memberikan pelayanan yang cepat, aman, dan efisien. Oleh karena itu, pengelolaan operasional gerbang tol perlu didukung oleh sistem yang andal sehingga mampu menjaga kelancaran arus kendaraan sekaligus meminimalkan terjadinya antrean pada saat proses transaksi [1].

Salah satu permasalahan yang masih dijumpai pada operasional gerbang tol adalah terbentuknya antrean kendaraan akibat meningkatnya waktu pelayanan. Panjang antrean dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya gangguan pada mesin pembaca kartu (*reader*), gangguan pada *Automatic Line Barrier* (ALB), serta saldo kartu elektronik yang tidak mencukupi ketika proses transaksi berlangsung. Kondisi tersebut menyebabkan kendaraan harus menunggu lebih lama sebelum dapat melanjutkan perjalanan sehingga menurunkan tingkat pelayanan gerbang tol. Penelitian tersebut juga merekomendasikan penerapan teknologi *Single Lane Free Flow* (SLFF) sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi pelayanan di gerbang tol [2].

Penerapan SLFF menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi waktu pelayanan dan antrean karena memungkinkan proses pembayaran tol dilakukan tanpa kendaraan harus berhenti di gerbang. Mengenai efektivitas pembayaran tol berbasis SLFF dibandingkan dengan *E-Toll* menunjukkan bahwa SLFF mampu mengurangi waktu tundaan sebesar 0,6 detik per kendaraan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa sistem SLFF memiliki proyeksi tingkat pelayanan hingga 6.000 kendaraan per jam, sedangkan sistem *E-Toll* memiliki tingkat pelayanan sekitar 957 kendaraan per jam [4]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa SLFF memiliki potensi untuk meningkatkan kapasitas pelayanan serta mengurangi tundaan kendaraan pada gerbang tol.

Hasil serupa ditunjukkan oleh Raharjo et al. (2023) melalui penelitian penerapan SLFF pada Gerbang Tol Ngurah Rai. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa gerbang yang menerapkan SLFF memiliki waktu pelayanan sebesar 0,6 detik, sedangkan sistem pembayaran konvensional pada gerbang pembanding membutuhkan waktu pelayanan yang lebih lama [5]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan SLFF dapat memberikan proses pelayanan yang lebih singkat dan mendukung kelancaran kendaraan pada gerbang tol. Dengan demikian, penerapan SLFF tidak hanya berkaitan dengan perubahan metode pembayaran, tetapi juga menuntut adanya mekanisme pengendalian pada area gerbang yang mampu mendukung kendaraan untuk tetap bergerak selama proses pelayanan berlangsung.

Di antara berbagai komponen yang memengaruhi kelancaran pelayanan gerbang tol, *Automatic Line Barrier* (ALB) memiliki peranan penting sebagai pengendali akses kendaraan. Gangguan pada sistem kendali ALB dapat menyebabkan palang tidak membuka meskipun proses identifikasi dan transaksi telah berhasil dilakukan, atau sebaliknya membuka pada kondisi yang tidak semestinya. Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali ALB harus mampu mengelola setiap kondisi operasi secara tepat, mulai dari pendeteksian kendaraan, proses identifikasi, validasi, hingga penentuan tindakan yang harus dilakukan berdasarkan hasil identifikasi. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode pengendalian yang mampu mengatur urutan proses secara sistematis agar setiap kondisi sistem dapat ditangani secara konsisten [3].

Pada sistem *embedded*, pengendalian yang melibatkan banyak sensor, aktuator, serta urutan proses yang saling berkaitan akan meningkatkan kompleksitas perangkat lunak apabila hanya dibangun menggunakan logika percabangan konvensional. *Finite State Machine* (FSM) merupakan salah satu metode formal yang memodelkan perilaku sistem berdasarkan perpindahan keadaan (*state*) yang dipicu oleh suatu kejadian (*event*). Pendekatan tersebut memungkinkan setiap kondisi operasi direpresentasikan secara terstruktur [1].

Selain memberikan struktur yang lebih jelas terhadap alur pengendalian, pendekatan berbasis FSM juga mampu meningkatkan kualitas pengembangan perangkat lunak *embedded*. Perancangan perangkat lunak menggunakan

pendekatan berbasis state menghasilkan modularitas yang lebih baik, meningkatkan kemudahan pengujian (*testability*), serta mengurangi jumlah kesalahan (*defects*) pada implementasi. Karakteristik tersebut menjadikan FSM sesuai untuk diterapkan pada sistem kendali yang memiliki beberapa kondisi operasi dan transisi yang harus dijalankan secara berurutan, seperti pada sistem kendali *Automatic Line Barrier* di gerbang tol [1].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengusulkan perancangan sistem kendali *Automatic Line Barrier* berbasis *Finite State Machine* (FSM) menggunakan ESP32 dan sensor ultrasonik pada *prototype* gerbang tol *Free Flow*. FSM digunakan untuk mengatur perpindahan keadaan sistem mulai dari kondisi *standby*, pendeteksian kendaraan, proses validasi identitas, pengambilan keputusan, hingga pembukaan dan penutupan palang secara terstruktur. Dengan pendekatan tersebut, diharapkan sistem kendali yang dikembangkan memiliki alur operasi yang lebih sistematis, mudah diuji, serta mampu meningkatkan keandalan operasional *prototype* gerbang tol [1], [6].

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah diuraikan, terdapat beberapa rumusan masalah yakni:

1. Bagaimana merancang sistem kendali *Automatic Line Barrier* (ALB) berbasis *Finite State Machine* (FSM) pada *prototype* gerbang tol *Free Flow*?
2. Bagaimana merancang sistem deteksi kendaraan menggunakan sensor ultrasonik HY-SRF05 sebagai masukan sistem kendali *Automatic Line Barrier* berbasis *Finite State Machine* (FSM)?
3. Bagaimana kinerja sistem kendali *Automatic Line Barrier* berbasis *Finite State Machine* (FSM) berdasarkan hasil pengujian implementasi dan skenario operasi pada *prototype* gerbang tol *Free Flow*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem kendali *Automatic Line Barrier* (ALB) berbasis *Finite State Machine* (FSM) pada *prototype* gerbang tol *Free Flow*.

2. Mengintegrasikan sensor ultrasonik sebagai masukan (*input*) pada sistem kendali *Automatic Line Barrier* berbasis *Finite State Machine* (FSM).
3. Mengimplementasikan metode *Finite State Machine* (FSM) dalam mengendalikan urutan operasi *Automatic Line Barrier* berdasarkan kondisi kendaraan pada prototype gerbang tol *Free Flow*.
4. Mengevaluasi kinerja sistem kendali *Automatic Line Barrier* berbasis *Finite State Machine* (FSM) berdasarkan hasil pengujian implementasi dan skenario operasi pada prototype gerbang tol *Free Flow*.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun secara implementatif sebagai berikut:

1.4.1 Manfaat Akademis

Secara akademis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya pada bidang sistem kendali berbasis mikrokontroler dan *Internet of Things* (IoT) dalam aplikasi gerbang tol otomatis.
2. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan penerapan metode *Finite State Machine* (FSM) dalam sistem kendali otomatis yang terstruktur.
3. Menambah kajian ilmiah mengenai integrasi sensor ultrasonik, mikrokontroler ESP32, dan metode FSM dalam perancangan sistem otomasi berbasis *embedded system*.

1.4.2 Manfaat Implementasi

Secara implementatif, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam bentuk:

1. Menghasilkan *prototype* sistem gerbang tol otomatis yang dapat membuka dan menutup palang secara responsif berdasarkan deteksi kendaraan.

2. Meningkatkan efisiensi sistem kendali gerbang tol, khususnya dalam hal kecepatan respon dan ketepatan pengambilan keputusan dibandingkan sistem berbasis logika sederhana.
3. Menjadi alternatif solusi pengembangan sistem gerbang tol menuju konsep *free flow*, meskipun masih menggunakan palang sebagai mekanisme kontrol akses.
4. Memberikan gambaran implementasi sistem kendali berbasis FSM yang dapat diterapkan pada berbagai sistem otomasi lainnya.

1.5 Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup penelitian agar lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Sistem yang dikembangkan berupa *prototype* gerbang tol otomatis, sehingga tidak diimplementasikan secara langsung pada kondisi lapangan sebenarnya.
2. Sistem yang dirancang berfokus pada pengendalian *Automatic Line Barrier* menggunakan metode FSM.
3. Sensor yang digunakan sebagai masukan sistem kendali adalah tiga sensor ultrasonik HY-SRF05 untuk mendeteksi keberadaan kendaraan pada titik-titik tertentu di *prototype*.
4. Sistem identifikasi kendaraan menggunakan UHF RFID sebagai pemicu proses validasi kendaraan. Penelitian ini tidak membahas karakteristik performa pembacaan RFID, seperti jarak baca, sudut baca, maupun analisis RSSI.
5. Sistem verifikasi berbasis Firebase hanya digunakan sebagai masukan (*input*) dalam proses pengambilan keputusan oleh FSM untuk sistem kendali *Automatic Line Barrier* dan bukan merupakan fokus utama penelitian.
6. Pengujian sistem dilakukan pada skala *prototype*, sehingga tidak mempertimbangkan faktor lingkungan nyata seperti kondisi cuaca ekstrem atau kepadatan lalu lintas tinggi.

7. Pengujian sistem difokuskan pada implementasi metode FSM dalam mengendalikan urutan operasi *Automatic Line Barrier* berdasarkan kondisi kendaraan.
8. Parameter pengujian meliputi keberhasilan implementasi setiap *state* dan transisi pada FSM, fungsi sensor ultrasonik sebagai masukan sistem, keberhasilan skenario operasi, serta waktu respons sistem.

1.6 Sistematika Proposal Tugas Akhir

Dalam penulisan laporan tugas akhir ini, terdapat sistematika penyusunan laporan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi tentang latar belakang penelitian mengenai seringnya terjadi masalah penumpukan kendaraan di gerbang tol. Di sini juga dijelaskan mulai dari seberapa banyak pertumbuhan kendaraan di Indonesia, dan kenapa penumpukan kendaraan itu bisa terjadi. Kemudian juga ada rumusan masalah mengenai bagaimana melakukan perancangan *finite state machine* pada sistem, pendeteksian kendaraan berbasis HY-SRF05, dan mengintegrasikan mikrokontroler dengan *database* untuk melakukan verifikasi data. Serta apa tujuan dari dilakukannya penelitian ini dan manfaat apa yang akan didapat dari hasil penelitian. Yang terakhir tentang bagaimana sistematika penulisan proposal penelitian yang menjelaskan sebagian besar dari isi proposal.

BAB II DASAR TEORI

Bagian ini berisikan dasar teori yang dapat digunakan untuk mendukung topik penelitian. Dasar teori ini mencakup mikrokontroler, sensor, aktuator, dan metode yang digunakan. Masing-masing komponen dijelaskan secara umum dan dituliskan spesifikasinya. Dasar teori ini akan menjadi landasan bagi peneliti dalam melakukan penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bagian ini berisi tentang metode yang dilakukan selama proses perancangan alat. Ini meliputi diagram blok pendistribusian daya, desain 3d sistem keseluruhan, alat dan bahan yang digunakan, serta perancangan perangkat keras dan lunak untuk alat yang akan dibuat.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Bagian ini berisikan hasil pengujian dan analisa data dari alat yang telah dibuat. Pengujian dilakukan terhadap setiap komponen yang digunakan dengan cara menguji kehandalan cara kerjanya apakah sesuai dengan spesifikasi yang ditawarkan. Catu daya diuji dengan keakuratannya dalam mengeluarkan tegangan dan arus berdasarkan spesifikasinya. ESP32 diuji dengan konektifitas pinnya. Sensor-sensor diuji dengan kehandalan kerjanya apakah sudah sesuai dengan spesifikasi dari *datasheet* sensor. Aktuator diuji dengan kehandalan kerjanya apakah sudah sesuai dengan spesifikasi kerjanya dari *datasheet* serta diuji juga tegangan masuk dan keluarnya, dan juga arus masuk dan keluarnya.

BAB V PENUTUP

Bagian ini berisikan kesimpulan dan saran dari hasil pengujian alat yang telah di buat.