

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

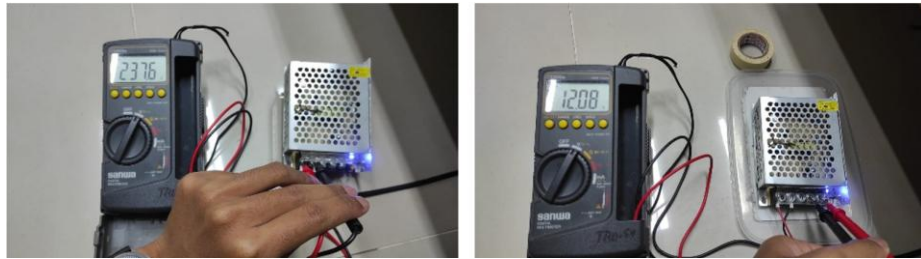
4.1 Hasil Pengujian Komponen

Telah dilakukan pengujian komponen dan telah diperoleh data karakteristik masing-masing komponen yang digunakan. Pengujian komponen dilakukan untuk memastikan apakah spesifikasi komponen yang digunakan sesuai dengan *datasheet*. Adapun komponen yang diuji adalah *power supply*, *buck converter*, sensor ultrasonik, motor servo, dan ESP32.

Parameter pengujian disesuaikan dengan fungsi masing-masing komponen, seperti kestabilan tegangan keluaran pada *power supply*, akurasi dan konsistensi pembacaan jarak pada sensor ultrasonik, serta ketelitian sudut putar pada motor servo. Hasil pengujian komponen selanjutnya menjadi dasar untuk melaksanakan pengujian sistem secara keseluruhan guna mengevaluasi implementasi metode *Finite State Machine* (FSM) pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

4.1.1 Power supply 12V 5A

Pengujian *power supply* bertujuan untuk memastikan bahwa catu daya mampu menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan spesifikasi serta tetap stabil ketika digunakan sebagai sumber daya sistem. Pengujian diawali dengan kondisi tanpa beban untuk mengetahui karakteristik tegangan keluaran *power supply*. Parameter yang diamati meliputi tegangan masukan (*input*) dan tegangan keluaran (*output*), serta persentase kesalahan (*error*) dari tegangan keluar (*output*) terhadap spesifikasi. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa beban dan dengan beban. Hasil pengujian ini digunakan sebagai dasar untuk memastikan bahwa catu daya mampu menyuplai seluruh komponen sistem secara andal selama proses pengoperasian. Dokumentasi pengujian ini dapat dilihat pada **Gambar 4.1** dan **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2 Besar tegangan masukan dan keluaran *power supply* tanpa beban



Gambar 4.3 Besar tegangan masukan dan keluaran *power supply* dengan beban

Kemudian data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**.

Tabel 4.1 Pengujian *power supply* tanpa beban

Pengujian	V Input (VAC)	V Output (VDC)	Arus (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error (%)
1	237.6	12.08	0.12	12	0.67
2	237.6	12.08	0.12	12	0.67
3	237.6	12.08	0.12	12	0.67
4	237.6	12.08	0.12	12	0.67
5	237.5	12.08	0.12	12	0.67
Rata-rata error (%)					0.67

Tabel 4.2 Pengujian *power supply* dengan beban

Pengujian	V Input (VAC)	V Output (VDC)	Arus (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error (%)
1	234.1	11.92	0.57	12	0.67
2	234.1	11.92	0.57	12	0.67

Pengujian	V Input (VAC)	V Output (VDC)	Arus (A)	V Spesifikasi (VDC)	Error (%)
3	234.1	11.92	0.57	12	0.67
4	234.1	11.92	0.57	12	0.67
5	234.1	11.92	0.57	12	0.67
Rata-rata <i>error</i> (%)					0.67

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, didapat hasil yang dapat dilihat pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**, pada **Tabel 4.1** diperoleh tegangan masukan (*input*) *power supply* sebesar 237,5–237,6 VAC. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tegangan sumber dari PLN berada di atas 220 VAC, namun masih berada dalam rentang tegangan kerja yang dapat diterima oleh *power supply* yaitu di bawah 10% [36].

Sedangkan hasil pengukuran tegangan keluaran (*output*) *power supply* menunjukkan nilai yang stabil sebesar 12,08 VDC pada lima kali pengujian. Dibandingkan dengan tegangan nominal sebesar 12 VDC, diperoleh selisih pengukuran sebesar 0,08 V atau rata-rata *error* sebesar 0,67%. Nilai *error* yang relatif kecil tersebut menunjukkan bahwa tegangan keluaran yang dihasilkan sangat mendekati spesifikasi yang ditetapkan, sehingga *power supply* mampu menyediakan suplai tegangan yang sesuai dengan kebutuhan sistem pada kondisi tanpa beban. Selain itu, arus keluaran yang terukur sebesar 0,12 A menunjukkan bahwa *power supply* dapat berfungsi dengan indikasi dapat mengeluarkan arus.

Pada **Tabel 4.2** diperoleh tegangan masukan (*input*) *power supply* sebesar 234,1 VAC. Nilai tersebut lebih rendah sekitar 3,5 VAC dibandingkan hasil pengujian pada kondisi *standby*. Meskipun demikian, tegangan masukan tersebut masih mampu menghasilkan tegangan keluaran yang mendekati nilai nominal sesuai spesifikasi *power supply*, sehingga sistem tetap dapat beroperasi dengan baik selama pengujian berbeban.

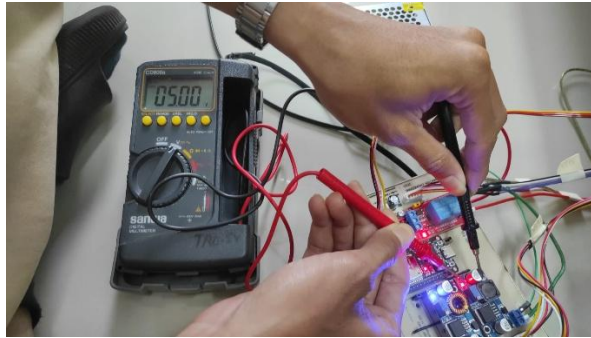
Pada kondisi dengan beban, tegangan keluaran *power supply* mengalami sedikit penurunan menjadi 11,92 VDC. Dibandingkan dengan spesifikasi

sebesar 12 VDC, terjadi penurunan tegangan sebesar 0,08 V atau sekitar 0.67%. Penurunan tegangan tersebut menunjukkan bahwa ketika sistem mulai mengonsumsi arus yang lebih besar, tegangan keluaran *power supply* mengalami perubahan yang relatif kecil. Meskipun demikian, tegangan keluaran masih berada sangat dekat dengan tegangan nominal 12 VDC sehingga *power supply* tetap mampu menyuplai kebutuhan daya sistem selama pengujian.

Arus keluaran pada kondisi dengan beban meningkat menjadi 0,57 A. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mulai mengonsumsi daya untuk mengoperasikan seluruh komponen yang terhubung, seperti ESP32, sensor ultrasonik, dan motor servo. Meskipun terjadi peningkatan arus dibandingkan kondisi *standby*, hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan keluaran hanya mengalami penurunan sebesar 0,16 V, yaitu dari 12,08 VDC menjadi 11,92 VDC. Nilai tersebut masih sangat mendekati tegangan nominal 12 VDC, sehingga menunjukkan bahwa *power supply* tetap mampu menyuplai kebutuhan daya sistem secara stabil selama kondisi berbeban.

4.1.2 Modul LM2596

Pengujian modul LM2596 bertujuan untuk mengetahui kemampuan modul dalam menurunkan tegangan keluaran *power supply* dari 12V menjadi 5V yang digunakan sebagai catu daya ESP32 dan tiga sensor ultrasonik HY-SRF05. Selain itu, pengujian ini dilakukan untuk memastikan tegangan keluaran modul tetap stabil sehingga seluruh komponen dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan sistem. Parameter yang diamati meliputi tegangan masukan (V_{in}) yaitu tegangan yang berasal dari *power supply*, dan tegangan keluaran yaitu tegangan hasil penurunan dari modul LM2596 yang akan digunakan sebagai sumber catu daya ESP32 dan sensor ultrasonik.



Gambar 4.4 Dokumentasi hasil pengukuran Vout

Berdasarkan **Gambar 4.4**, pengukuran tegangan keluaran (Vout) pada modul LM2596 diukur menggunakan multimeter digital. Pengukuran dilakukan dengan cara menghubungkan probe hitam ke Vout negatif dan probe merah ke Vout positif.

Tabel 4.3 Hasil tegangan modul LM2596

Pengujian	Vin (VDC)	Vout (VDC)
1	11.92	5
2	11.92	5
3	11.92	5
4	11.92	5
5	11.92	5

Berdasarkan **Tabel 4.3**, hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan masukan modul LM2596 berasal dari *power supply* sebesar 11,92 V pada seluruh percobaan. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan tegangan nominal 12V, namun masih berada dalam rentang kerja yang normal dan tidak memengaruhi kinerja modul.

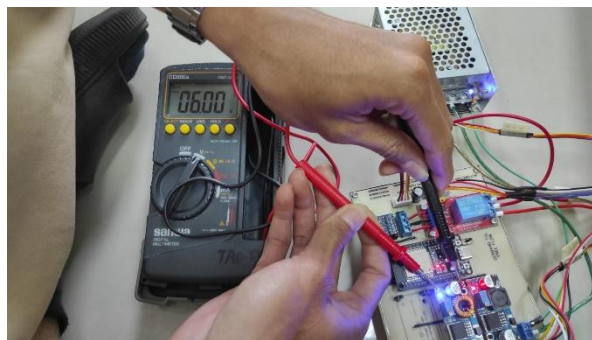
Selanjutnya, modul LM2596 berhasil menurunkan tegangan masukan menjadi 5V secara konsisten pada setiap pengujian. Tidak terdapat perubahan nilai tegangan keluaran selama lima kali pengukuran, sehingga menunjukkan bahwa modul mampu mempertahankan tegangan keluaran dengan stabil meskipun menerima tegangan masukan sebesar 11,92 V.

Berdasarkan hasil pengujian, modul Step-Down LM2596 mampu menyediakan catu daya yang stabil sehingga layak digunakan sebagai sumber

tegangan untuk ESP32 dan tiga sensor ultrasonik pada *prototype Automatic Line Barrier*.

4.1.3 Modul XL4005

Pengujian modul XL4005 bertujuan untuk mengetahui kemampuan modul dalam menurunkan tegangan keluaran *power supply* dari 12V menjadi 5V yang digunakan sebagai catu daya ESP32 dan tiga sensor ultrasonik HY-SRF05. Selain itu, pengujian ini dilakukan untuk memastikan tegangan keluaran modul tetap stabil sehingga seluruh komponen dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan sistem. Parameter yang diamati meliputi tegangan masukan (V_{in}) yaitu tegangan yang berasal dari *power supply*, dan tegangan keluaran yaitu tegangan hasil penurunan dari modul XL4005 yang akan digunakan sebagai sumber catu daya ESP32 dan sensor ultrasonik.



Gambar 4.5 Dokumentasi hasil pengukuran V_{out}

Berdasarkan **Gambar 4.5**, pengukuran tegangan keluaran (V_{out}) pada modul XL4005 diukur menggunakan multimeter digital. Pengukuran dilakukan dengan cara menghubungkan probe hitam ke V_{out} negatif dan probe merah ke V_{out} positif.

Tabel 4.4 Hasil tegangan modul XL4005

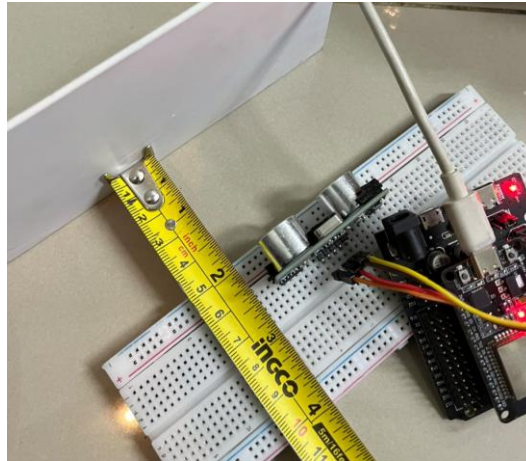
Pengujian	V_{in} (VDC)	V_{out} (VDC)
1	11.92	6
2	11.92	6
3	11.92	6
4	11.92	6
5	11.92	6

Berdasarkan **Tabel 4.4**, hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan masukan modul XL4005 berasal dari *power supply* sebesar 11,92 V pada seluruh percobaan. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan tegangan nominal 12V, namun masih berada dalam rentang kerja yang normal dan tidak memengaruhi kinerja modul.

Selanjutnya, modul XL4005 berhasil menurunkan tegangan masukan menjadi 6V secara konsisten pada setiap pengujian. Tidak terdapat perubahan nilai tegangan keluaran selama lima kali pengukuran, sehingga menunjukkan bahwa modul mampu mempertahankan tegangan keluaran dengan stabil meskipun menerima tegangan masukan sebesar 11,92 V. Berdasarkan hasil pengujian, modul XL4005 mampu menyediakan catu daya yang stabil sehingga layak digunakan sebagai sumber tegangan untuk motor servo.

4.1.4 Sensor ultrasonik HY-SRF05

Pengujian sensor ultrasonik HY-SRF05 ini bertujuan untuk mengetahui kinerja sensor dalam mendeteksi jarak objek berdasarkan tingkat akurasi dan konsistensi hasil pembacaan. Pengujian akurasi dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara jarak yang terbaca oleh sensor dengan jarak sebenarnya, sedangkan pengujian konsistensi bertujuan untuk mengetahui kestabilan hasil pembacaan ketika pengukuran dilakukan secara berulang pada kondisi yang sama. Kedua pengujian tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa sensor mampu memberikan data pengukuran yang akurat dan konsisten sebelum diimplementasikan. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis berdasarkan nilai selisih pengukuran dan persentase *error* untuk menilai kelayakan sensor sebagai perangkat pendeteksi kendaraan pada sistem yang dirancang. Dokumentasi pengujian ini dapat dilihat pada **Gambar 4.6** dan **Gambar 4.7**.



Gambar 4.6 Dokumentasi uji akurasi sensor ultrasonik

Pada **Gambar 4.6** menunjukkan pengujian akurasi sensor ultrasonik HY-SRF05. Pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor menghadap bidang datar sebagai objek pantul, kemudian jarak antara sensor dan objek diukur menggunakan meteran sebagai acuan jarak sebenarnya. Pengukuran dilakukan pada rentang jarak 5 cm hingga 50 cm dengan interval 5 cm. Pada setiap variasi jarak, posisi objek diatur sesuai nilai yang ditentukan sehingga hasil pembacaan sensor dapat dibandingkan secara langsung dengan jarak referensi.

```

22:55:10.123 -> =====
22:55:10.123 -> Pengujian Akurasi Sensor HY-SRF05 (Percobaan 1)
22:55:10.123 -> Jarak 5 cm - 50 cm (Interval 5 cm)
22:55:10.123 -> =====
22:55:10.123 -> Target : 5 cm | Terbaca : 5.04 cm
22:55:20.136 -> Target : 10 cm | Terbaca : 10.08 cm
22:55:30.150 -> Target : 15 cm | Terbaca : 15.09 cm
22:55:40.163 -> Target : 20 cm | Terbaca : 19.90 cm
22:55:50.176 -> Target : 25 cm | Terbaca : 24.70 cm
22:56:00.189 -> Target : 30 cm | Terbaca : 29.91 cm
22:56:10.203 -> Target : 35 cm | Terbaca : 35.10 cm
22:56:20.216 -> Target : 40 cm | Terbaca : 40.00 cm
22:56:30.229 -> Target : 45 cm | Terbaca : 45.07 cm
22:56:40.242 -> Target : 50 cm | Terbaca : 50.00 cm
22:56:40.242 -> =====

```

Gambar 4.7 Tampilan serial monitor uji akurasi sensor 1

Kemudian selama proses pengujian, hasil pembacaan sensor ditampilkan melalui serial monitor Arduino IDE seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7**. Informasi yang ditampilkan meliputi jarak target (jarak sebenarnya) dan hasil pembacaan sensor (jarak terukur) untuk setiap titik pengujian. Data yang diperoleh dari serial monitor selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan selisih pengukuran dan persentase *error* guna memeriksa tingkat akurasi sensor ultrasonik HY-SRF05 pada rentang pengukuran yang telah ditentukan.

Kemudian untuk data hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 4.5** hingga **Tabel 4.6** di bawah.

Tabel 4.5 Pengujian akurasi sensor ultrasonik 1

Pengujian	Jarak Sebenarnya (cm)	Jarak Terukur Sensor (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1	5	5.04	0.04	0.8
2	10	10.08	0.08	0.8
3	15	15.09	0.09	0.60
4	20	19.9	0.1	0.5
5	25	24.7	0.3	1.2
6	30	29.91	0.09	0.30
7	35	35.1	0.1	0.29
8	40	40	0	0.00
9	45	45.07	0.07	0.16
10	50	50	0	0.0
Rata-rata			0.09	0.5

Berdasarkan **Tabel 4.5**, sensor ultrasonik HY-SRF05 mampu mengukur jarak objek pada rentang 5 cm hingga 50 cm dengan hasil yang mendekati jarak sebenarnya. Selisih pengukuran berada pada kisaran 0,02 cm hingga 0,39 cm dengan rata-rata persentase *error* sebesar 0,83%. Nilai *error* yang relatif kecil menunjukkan bahwa sensor 1 mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat pada seluruh variasi jarak pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor 1 memiliki kemampuan yang baik dalam mendeteksi keberadaan kendaraan pada area masuk *prototype* gerbang tol *free flow*, sehingga proses identifikasi kendaraan dapat dilakukan secara tepat sebelum memasuki tahapan berikutnya pada sistem.

Sensor ultrasonik HY-SRF05 memiliki tingkat kesalahan pengukuran yang relatif kecil sehingga layak digunakan sebagai sensor pendeteksi jarak pada sistem otomasi. Pada penelitian ini pengujian dilakukan pada rentang 5–50 cm sehingga pantulan gelombang ultrasonik masih stabil dan menghasilkan

penyimpangan pengukuran yang lebih kecil dibandingkan pengujian pada jarak yang lebih jauh [37].

Tabel 4.6 Pengujian *threshold* sensor ultrasonik 1

No	Jarak Objek (cm)	Kondisi yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	5	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
2	10	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
3	15	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
4	20	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
5	25	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
6	30	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
7	35	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
8	40	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
9	45	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
10	50	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.6**, pengujian *threshold* dilakukan dengan menetapkan batas deteksi pada jarak ≤ 15 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa objek pada jarak 5 cm hingga 15 cm berhasil terdeteksi, sedangkan objek pada jarak > 15 cm hingga 50 cm tidak terdeteksi sesuai dengan kondisi yang diharapkan. Seluruh pengujian memperoleh status berhasil, sehingga nilai *threshold* yang ditetapkan mampu membedakan kondisi ada atau tidak adanya objek secara tepat. Pada *prototype*, sensor 1 berfungsi sebagai pendeteksi awal keberadaan kendaraan sebelum proses verifikasi RFID dilakukan. Oleh karena itu, keberhasilan pengujian *threshold* menunjukkan bahwa sensor 1 mampu memberikan sinyal deteksi secara tepat sehingga sistem tidak melakukan proses verifikasi RFID ketika tidak terdapat kendaraan pada area deteksi.

Tabel 4.7 Pengujian konsistensi sensor ultrasonik 1

No.	Jarak Sebenarnya (cm)	Jumlah Percobaan	Rata-rata (cm)	Error (cm)	Error (%)
1	5	10	5.09	0.09	1.80

No.	Jarak Sebenarnya (cm)	Jumlah Percobaan	Rata-rata (cm)	Error (cm)	Error (%)
2	10	10	10.07	0.07	0.70
3	15	10	15.14	0.14	0.93
4	20	10	20.24	0.24	1.20
5	25	10	25.14	0.14	0.56
6	30	10	30.24	0.24	0.80
7	35	10	35.17	0.17	0.49
8	40	10	40.39	0.39	0.98
9	45	10	45.36	0.36	0.80
10	50	10	50.02	0.02	0.04
Rata-rata				0.19	0.83

Berdasarkan **Tabel 4.7**, sensor ultrasonik HY-SRF05 menunjukkan hasil pembacaan yang stabil pada 10 kali pengukuran di setiap variasi jarak. Nilai rata-rata *error* sebesar 0,19 cm dengan rata-rata persentase *error* 0,83%, menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran relatif kecil. Dengan demikian, sensor 1 memiliki tingkat konsistensi yang baik sehingga mampu memberikan pembacaan yang stabil ketika digunakan secara berulang pada sistem.

Berdasarkan hasil pengujian akurasi, *threshold*, dan konsistensi, sensor ultrasonik HY-SRF05 pada sensor 1 mampu bekerja sesuai dengan kebutuhan sistem. Sensor memiliki rata-rata persentase *error* sebesar 0,5% pada pengujian akurasi dan 0,83% pada pengujian konsistensi. Selain itu, pengujian *threshold* dengan batas deteksi 10 cm berhasil membedakan kondisi objek terdeteksi dan tidak terdeteksi sesuai dengan skenario pengujian. Kestabilan pembacaan ini penting karena sensor 1 berperan sebagai pemicu awal perpindahan kondisi pada *Finite State Machine* (FSM). Dengan hasil pembacaan yang konsisten, kemungkinan terjadinya perpindahan state akibat pembacaan yang tidak stabil dapat diminimalkan sehingga proses identifikasi kendaraan berlangsung lebih andal. Dengan demikian, sensor 1 dinyatakan layak digunakan sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

```

22:58:10.321 -> =====
22:58:10.321 -> Pengujian Akurasi Sensor HY-SRF05 (Percobaan 2)
22:58:10.321 -> Jarak 5 cm - 50 cm (Interval 5 cm)
22:58:10.321 -> =====
22:58:10.321 -> Target : 5 cm | Terbaca : 5.20 cm
22:58:20.334 -> Target : 10 cm | Terbaca : 10.05 cm
22:58:30.347 -> Target : 15 cm | Terbaca : 15.08 cm
22:58:40.361 -> Target : 20 cm | Terbaca : 20.06 cm
22:58:50.374 -> Target : 25 cm | Terbaca : 24.80 cm
22:59:00.386 -> Target : 30 cm | Terbaca : 29.80 cm
22:59:10.399 -> Target : 35 cm | Terbaca : 35.10 cm
22:59:20.412 -> Target : 40 cm | Terbaca : 39.80 cm
22:59:30.425 -> Target : 45 cm | Terbaca : 45.20 cm
22:59:40.438 -> Target : 50 cm | Terbaca : 50.30 cm
22:59:40.438 -> =====

```

Gambar 4.8 Tampilan serial monitor uji akurasi sensor 2

Berdasarkan **Gambar 4.8**, serial monitor menampilkan hasil pembacaan jarak sensor ultrasonik HY-SRF05 pada setiap variasi jarak pengujian, yaitu 5 cm hingga 50 cm dengan interval 5 cm. Informasi yang ditampilkan meliputi nilai jarak target (jarak sebenarnya) dan hasil pembacaan sensor (jarak terukur) untuk setiap titik pengujian. Data yang diperoleh melalui serial monitor selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menghitung selisih pengukuran dan persentase *error* pada pengujian akurasi sensor 2. Hasil pembacaan menunjukkan sensor mampu merespons setiap perubahan jarak dengan baik, sehingga data yang diperoleh dapat digunakan sebagai acuan dalam analisis kinerja sensor.

Tabel 4.8 Pengujian akurasi sensor ultrasonik 2

Pengujian	Jarak Sebenarnya (cm)	Jarak Terukur Sensor (cm)	Error (cm)	Error (%)
1	5	5.2	0.2	4
2	10	10.05	0.05	0.5
3	15	15.08	0.08	0.53
4	20	20.06	0.06	0.3
5	25	24.8	0.2	0.8
6	30	29.8	0.2	0.67
7	35	35.1	0.1	0.29
8	40	39.8	0.2	0.5
9	45	45.2	0.2	0.4
10	50	50.3	0.3	0.6

Pengujian	Jarak Sebenarnya (cm)	Jarak Terukur Sensor (cm)	Error (cm)	Error (%)
	Rata-rata		0.16	0.9

Berdasarkan **Tabel 4.8**, sensor ultrasonik HY-SRF05 mampu mengukur jarak objek pada rentang 5 cm hingga 50 cm dengan hasil yang mendekati jarak sebenarnya. Selisih pengukuran berkisar antara 0,05 cm hingga 0,3 cm dengan rata-rata persentase *error* sebesar 0,9%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik karena rata-rata *error* selisih masih berada di bawah 2 cm. Pada *prototype*, sensor 2 digunakan untuk mendeteksi keberadaan kendaraan di area ALB. Oleh karena itu, tingkat akurasi yang baik diperlukan agar sistem dapat mengetahui posisi kendaraan apakah sudah melewati ALB agar tidak terjadi ALB menutup ketika kendaraan masih berada di bawahnya.

Tabel 4.9 Pengujian threshold sensor ultrasonik 2

No	Jarak Objek (cm)	Kondisi yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	5	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
2	10	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
3	15	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
4	20	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
5	25	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
6	30	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
7	35	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
8	40	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
9	45	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
10	50	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.9**, pengujian *threshold* dilakukan dengan menetapkan batas deteksi pada jarak ≤ 15 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa objek pada jarak 5 cm dan 15 cm berhasil terdeteksi, sedangkan objek pada jarak > 15 cm hingga 50 cm tidak terdeteksi sesuai dengan kondisi yang diharapkan.

Seluruh pengujian memperoleh status berhasil, sehingga nilai *threshold* yang digunakan mampu digunakan sebagai parameter pengambilan keputusan untuk ALB. Dengan demikian, sensor 2 mampu memberikan informasi keberadaan kendaraan secara tepat dan proses pengendalian ALB dapat berlangsung sesuai urutan kerja sistem.

Tabel 4.10 Pengujian konsistensi sensor ultrasonik 2

No.	Jarak Sebenarnya (cm)	Jumlah Percobaan	Rata-rata (cm)	Error (cm)	Error (%)
1	5	10	5.01	0.01	0.20
2	10	10	10.11	0.11	1.10
3	15	10	15.16	0.16	1.07
4	20	10	20.17	0.17	0.85
5	25	10	25.18	0.18	0.72
6	30	10	30.20	0.20	0.67
7	35	10	35.24	0.24	0.69
8	40	10	40.35	0.35	0.88
9	45	10	45.33	0.33	0.73
10	50	10	50.03	0.03	0.06
Rata-rata				0.18	0.7

Berdasarkan **Tabel 4.10**, sensor ultrasonik HY-SRF05 menunjukkan hasil pembacaan yang stabil pada 10 kali pengukuran di setiap variasi jarak. Nilai rata-rata selisih sebesar 0,18 cm dengan rata-rata persentase *error* 0,7%, menunjukkan bahwa *error* variasi hasil pengukuran relatif kecil. Dengan demikian, konsistensi sensor 2 sudah mampu memberikan pembacaan yang stabil ketika digunakan secara berulang pada sistem.

Berdasarkan hasil pengujian akurasi, *threshold*, dan konsistensi, sensor 2 menunjukkan kinerja yang baik dalam mendeteksi keberadaan objek. Sensor memiliki rata-rata persentase *error* sebesar 0,9%, sehingga pembacaan jarak masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Selain itu, pengujian *threshold* dengan batas deteksi 15 cm berhasil mengidentifikasi objek sesuai

skenario pengujian. Dengan demikian, sensor 2 dinyatakan layak digunakan sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

```

23:01:10.512 -> =====
23:01:10.512 -> Pengujian Akurasi Sensor HY-SRF05 (Percobaan 3)
23:01:10.512 -> Jarak 5 cm - 50 cm (Interval 5 cm)
23:01:10.512 -> =====
23:01:10.512 -> Target : 5 cm | Terbaca : 5.03 cm
23:01:20.525 -> Target : 10 cm | Terbaca : 10.10 cm
23:01:30.538 -> Target : 15 cm | Terbaca : 15.12 cm
23:01:40.551 -> Target : 20 cm | Terbaca : 20.08 cm
23:01:50.565 -> Target : 25 cm | Terbaca : 25.11 cm
23:02:00.577 -> Target : 30 cm | Terbaca : 30.15 cm
23:02:10.590 -> Target : 35 cm | Terbaca : 35.20 cm
23:02:20.603 -> Target : 40 cm | Terbaca : 40.12 cm
23:02:30.616 -> Target : 45 cm | Terbaca : 45.37 cm
23:02:40.629 -> Target : 50 cm | Terbaca : 50.23 cm
23:02:40.629 -> =====

```

Gambar 4.9 Tampilan serial monitor uji akurasi

Berdasarkan **Gambar 4.9**, serial monitor menampilkan hasil pembacaan jarak sensor ultrasonik HY-SRF05 pada setiap variasi jarak pengujian, yaitu 5 cm hingga 50 cm dengan interval 5 cm. Informasi yang ditampilkan meliputi nilai jarak target (jarak sebenarnya) dan hasil pembacaan sensor (jarak terukur) pada setiap titik pengujian. Data hasil pembacaan tersebut digunakan sebagai dasar dalam menghitung selisih pengukuran dan persentase *error* pada pengujian akurasi sensor ultrasonik 3. Hasil yang ditampilkan menunjukkan bahwa sensor mampu merespons perubahan jarak secara baik dengan nilai pembacaan yang mendekati jarak sebenarnya, sehingga data yang diperoleh dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sensor pada sistem yang dikembangkan.

Tabel 4.11 Pengujian akurasi sensor ultrasonik 3

Pengujian	Jarak Sebenarnya (cm)	Jarak Terukur Sensor (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1	5	5.03	0.03	0.6
2	10	10.1	0.1	1
3	15	15.12	0.12	0.8
4	20	20.08	0.08	0.4
5	25	25.11	0.11	0.4
6	30	30.15	0.15	0.5
7	35	35.2	0.2	0.57

Pengujian	Jarak Sebenarnya (cm)	Jarak Terukur Sensor (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
8	40	40.12	0.12	0.3
9	45	45.37	0.37	0.8
10	50	50.23	0.23	0.5
	Rata-rata		0.15	0.6

Berdasarkan **Tabel 4.11**, sensor ultrasonik HY-SRF05 mampu mengukur jarak objek pada rentang 5 cm hingga 50 cm dengan hasil yang mendekati jarak sebenarnya. Rata-rata selisih pengukuran 0,15 cm dengan rata-rata persentase *error* sebesar 0,6%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik karena rata-rata selisih berada di bawah 2 cm, sehingga pembacaan jarak yang dihasilkan dapat digunakan sebagai acuan pendeteksian kendaraan pada *prototype*.

Tabel 4.12 Pengujian threshold sensor ultrasonik 3

No	Jarak Objek (cm)	Kondisi yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	5	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
2	10	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
3	15	Objek terdeteksi	Objek terdeteksi	Berhasil
4	20	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
5	25	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
6	30	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
7	35	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
8	40	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
9	45	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil
10	50	Objek tidak terdeteksi	Objek tidak terdeteksi	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.12**, pengujian *threshold* dilakukan dengan menetapkan batas deteksi pada jarak ≤ 15 cm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa objek pada jarak 5 cm dan 15 cm berhasil terdeteksi, sedangkan objek pada jarak > 15 cm hingga 50 cm tidak terdeteksi sesuai dengan kondisi yang diharapkan.

Seluruh pengujian memperoleh status berhasil, sehingga nilai *threshold* yang digunakan mampu membedakan kondisi terdapat dan tidak terdapat objek secara tepat.

Tabel 4.13 Pengujian konsistensi sensor ultrasonik 3

No	Jarak Sebenarnya (cm)	Jumlah Percobaan	Rata-rata (cm)	Error (cm)	Error (%)
1	5	10	4.98	0.02	0.40
2	10	10	10.05	0.05	0.50
3	15	10	15.12	0.12	0.80
4	20	10	20.2	0.20	1.00
5	25	10	25.12	0.12	0.48
6	30	10	30.23	0.23	0.77
7	35	10	35.20	0.20	0.57
8	40	10	40.37	0.37	0.92
9	45	10	45.3	0.30	0.67
10	50	10	50.01	0.01	0.02
Rata-rata				0.16	0.61

Berdasarkan **Tabel 4.13**, sensor ultrasonik HY-SRF05 menunjukkan hasil pembacaan yang stabil pada 10 kali pengukuran di setiap variasi jarak. Nilai rata-rata selisih sebesar 0,16 cm dengan rata-rata persentase *error* 0,61%, menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran relatif kecil. Dengan demikian, sensor memiliki tingkat konsistensi yang baik sehingga mampu memberikan pembacaan yang stabil ketika digunakan secara berulang pada sistem.

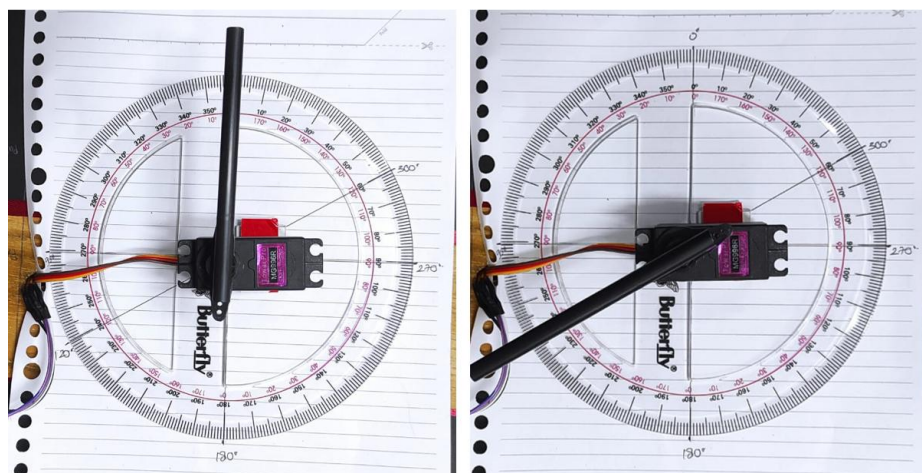
Berdasarkan hasil pengujian akurasi, *threshold*, dan konsistensi, sensor ultrasonik 3 mampu bekerja dengan baik sesuai kebutuhan sistem. Sensor memiliki rata-rata persentase *error* sebesar 0,6% pada pengujian akurasi dan 0,61% pada pengujian konsistensi, yang menunjukkan bahwa hasil pembacaan jarak memiliki tingkat ketelitian dan kestabilan yang baik. Selain itu, pengujian *threshold* dengan batas deteksi 15 cm berhasil membedakan kondisi objek terdeteksi dan tidak terdeteksi sesuai dengan skenario pengujian. Dengan

demikian, sensor ultrasonik 3 dinyatakan layak digunakan sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

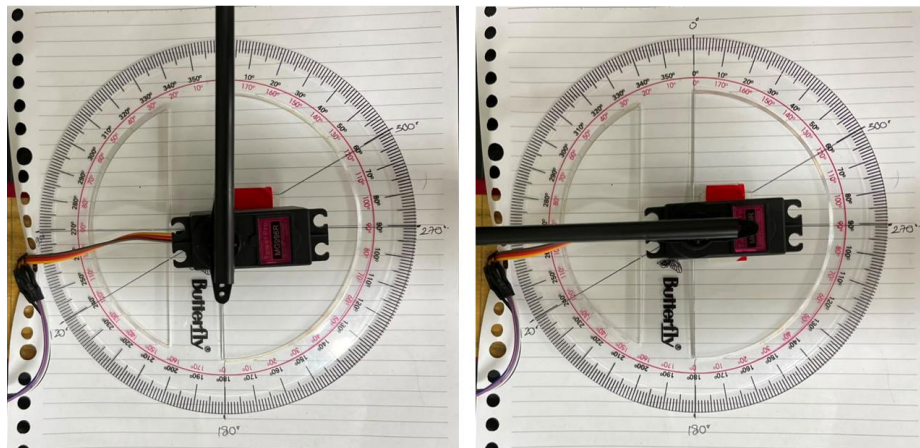
Dari hasil tersebut, seluruh sensor memiliki rata-rata persentase *error* di bawah 1% pada pengujian konsistensi dan tidak melebihi 0,9% pada pengujian akurasi. Selain itu, ketiga sensor juga berhasil menerapkan *threshold* 15 cm sesuai skenario pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh sensor ultrasonik memiliki tingkat akurasi, konsistensi, dan keandalan yang memadai untuk digunakan sebagai pendeteksi kendaraan pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

4.1.5 Motor Servo MG996R

Pengujian motor servo MG996R bertujuan untuk mengetahui kemampuan servo dalam mencapai sudut putar sesuai dengan perintah yang diberikan oleh mikrokontroler ESP32 sebelum diimplementasikan pada *prototype*. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik servo yang meliputi pengujian sudut minimum, sudut maksimum, dan akurasi sudut putar. Pengujian sudut minimum dan maksimum dilakukan untuk memastikan batas gerak servo yang dapat dicapai, sedangkan pengujian akurasi dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara sudut yang diperintahkan dengan sudut aktual yang dihasilkan. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis berdasarkan kesesuaian sudut perintah terhadap sudut aktual untuk mengetahui tingkat ketelitian servo dalam menggerakkan mekanisme palang pada sistem yang dirancang. Dokumentasi pengujian ini dapat dilihat pada **Gambar 4.10, dan 4.11**.



Gambar 4.10 Sudut minimum dan maksimum motor servo



Gambar 4.11 Pengujian akurasi sudut putar motor servo

```

23:24:34.951 -> =====
23:24:34.952 -> PENGUJIAN SUDUT MINIMUM DAN MAKSIMUM
23:24:34.952 -> =====
23:24:36.937 -> Servo menuju 0 derajat
23:24:41.938 -> Servo menuju 120 derajat
23:24:46.938 -> Pengujian selesai

23:19:02.662 -> =====
23:19:02.662 -> PENGUJIAN AKURASI SUDUT SERVO MG996R
23:19:02.697 -> Rentang : 0 - 120 derajat
23:19:02.697 -> Interval : 10 derajat
23:19:02.697 -> =====
23:19:02.697 -> Sudut Perintah : 0 derajat
23:19:05.716 -> Sudut Perintah : 10 derajat
23:19:08.670 -> Sudut Perintah : 20 derajat
23:19:11.717 -> Sudut Perintah : 30 derajat
23:19:14.695 -> Sudut Perintah : 40 derajat
23:19:17.670 -> Sudut Perintah : 50 derajat
23:19:20.703 -> Sudut Perintah : 60 derajat
23:19:23.670 -> Sudut Perintah : 70 derajat
23:19:26.699 -> Sudut Perintah : 80 derajat
23:19:29.696 -> Sudut Perintah : 90 derajat
23:19:32.671 -> Sudut Perintah : 100 derajat
23:19:35.711 -> Sudut Perintah : 110 derajat
23:19:38.687 -> Sudut Perintah : 120 derajat
23:19:41.720 -> =====
23:19:41.720 -> Pengujian Selesai
23:19:41.720 -> =====

```

Gambar 4.12 Tampilan serial monitor sudut servo

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada **Gambar 4.10 dan 4.11**, didapat data sudut minimum dan maksimum serta akurasi dari motor servo. Hasilnya, motor servo MG996R menunjukkan kemampuan yang baik dalam mencapai sudut putar sesuai dengan perintah yang diberikan oleh mikrokontroler ESP32. Pengujian meliputi pengujian sudut minimum, sudut maksimum, dan pengujian akurasi sudut untuk mengetahui kemampuan servo dalam menghasilkan posisi yang sesuai dengan nilai sudut yang telah diprogram.

Hasil pengujian sudut minimum dan sudut maksimum menunjukkan bahwa servo mampu mencapai posisi 0° dan 120° secara tepat pada lima kali pengujian. Seluruh hasil pengukuran menunjukkan bahwa sudut aktual yang dicapai sama dengan sudut perintah, sehingga diperoleh nilai *error* sebesar 0° pada kedua kondisi tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa servo mampu

mempertahankan posisi awal dan posisi maksimum yang digunakan pada sistem secara konsisten tanpa mengalami penyimpangan sudut.

Selanjutnya, pada pengujian akurasi sudut dengan rentang 0° hingga 120° menggunakan interval 10° , servo juga menunjukkan hasil yang sangat baik. Berdasarkan data pengujian, seluruh sudut aktual yang dihasilkan memiliki nilai yang sama dengan sudut perintah, sehingga tidak ditemukan selisih antara sudut yang diprogram dengan sudut yang dicapai servo. Dengan demikian, nilai *error* pada setiap titik pengujian adalah 0° . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa servo mampu melakukan perubahan sudut dan dapat diimplementasikan sebagai motor penggerak *automatic line barrier*.

Apabila dibandingkan hasil pengujian sudut minimum, sudut maksimum, dan akurasi sudut, seluruh pengujian menunjukkan hasil yang konsisten. Tidak ditemukannya penyimpangan sudut mengindikasikan bahwa servo memiliki tingkat akurasi dan *repeatability* yang baik pada rentang sudut operasi yang digunakan dalam sistem. Rentang sudut 0° - 120° dipilih karena merupakan spesifikasi teknis yang dicantumkan pada *datasheet*. Sedangkan sudut yang nantinya digunakan di dalam sistem sebesar 90° . Oleh karena itu, pengujian akurasi sudut dengan rentang 0-120 dengan interval 10 membuktikan bahwa servo dapat diimplementasikan ke dalam sistem.

4.2 Hasil Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memastikan dan mengevaluasi bahwa sistem yang telah dirancang serta diimplementasikan dapat beroperasi sesuai dengan kebutuhan dan spesifikasi yang telah ditetapkan. Proses pengujian mencakup beberapa aspek penting, yaitu implementasi *Finite State Machine* (FSM), waktu respons sistem, skenario operasi, keandalan sistem, durasi pelayanan, serta pengaruh variasi kecepatan dan jumlah mobil terhadap performa sistem. Setiap pengujian dilakukan menggunakan skenario yang telah ditentukan untuk memperoleh data mengenai perilaku sistem pada berbagai kondisi operasional. Hasil pengujian tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat keberhasilan implementasi, mengidentifikasi potensi kendala yang masih muncul, serta mengevaluasi apakah sistem telah memenuhi tujuan penelitian yang telah dirumuskan.

4.2.1 Pengujian transisi *state*

Pengujian transisi *state* dilakukan untuk memverifikasi bahwa setiap perpindahan *state* pada *Finite State Machine* (FSM) berlangsung sesuai dengan rancangan yang telah disusun. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu berpindah dari *current state* menuju *next state* berdasarkan *event* dan *condition* yang diterima selama proses pelayanan kendaraan.

Pengujian dilakukan dengan menjalankan beberapa skenario yang mewakili seluruh alur operasi sistem, mulai dari kondisi awal (IDLE), proses identifikasi kendaraan menggunakan sensor ultrasonik dan RFID, validasi data kendaraan, pengendalian *Automatic Line Barrier*, hingga penyelesaian transaksi. Selama pengujian, setiap perubahan *state* diamati melalui tampilan *Serial Monitor* dan dibandingkan dengan rancangan transisi *state* yang telah ditetapkan. Hasil pengujian transisi *state* ditunjukkan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14 Pengujian transisi FSM pada kendaraan memenuhi syarat

<i>State</i> Saat Ini	<i>Event</i>	<i>Condition</i>	<i>State</i> Berikutnya	<i>Output</i> Sistem	Hasil Pengujian
IDLE	Sensor Ultrasonik 1 mendeteksi kendaraan	Kendaraan berada pada area deteksi	WAIT_SEN SOR1	Sistem mulai melakukan identifikasi RFID	Sesuai
WAIT_SEN NSOR1	Sensor Ultrasonik 1 mendeteksi kendaraan	Fisik kendaraan berhasil terdeteksi	WAIT_RFI D	Sistem menunggu pembacaan RFID	Sesuai
WAIT_RF ID	RFID Reader berhasil membaca EPC	EPC RFID berhasil dibaca	WAIT_VAL IDATION	Pilot lampu hijau aktif	Sesuai

<i>State Saat Ini</i>	<i>Event</i>	<i>Condition</i>	<i>State Berikutnya</i>	<i>Output Sistem</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
		EPC RFID			
WAIT_VALIDATION	Konfirmasi RFID dan sensor ultrasonik 1 terpenuhi	berhasil diperoleh dan fisik kendaraan dikonfirmasi oleh sensor 1	RFID_DETECTED	Pilot lampu hijau aktif dan LCD menampilkan “Menunggu verifikasi”	Sesuai
RFID_DETECTED	Proses identifikasi selesai	Tag terdaftar, status aktif, dan saldo mencukupi	VALIDATING	LCD menampilkan proses verifikasi data	Sesuai
VALIDATING	Validasi dimulai	Firestore memproses	CHECK_BALANCE	Data RFID dikirim ke Firestore	Sesuai
OPEN_GATE	Validasi berhasil	Palang membuka	WAIT_SENSOR2	Servo membuka palang dan kendaraan dipersilakan melintas	Sesuai
WAIT_SENSOR2	Kendaraan melewati Sensor Ultrasonik 2	Terdapat kendaraan	CLOSE_GATE	Palang siap ditutup setelah kendaraan keluar	Sesuai
CLOSE_GATE	Palang telah menutup	Kendaraan telah melintas	TRANSACTION_DONE	Relay kembali merah, transaksi diselesaikan	Sesuai

<i>State</i> Saat Ini	<i>Event</i>	<i>Condition</i>	<i>State</i> Berikutnya	<i>Output</i> Sistem	Hasil Pengujian
TRANSA CTION_D ONE	Seluruh proses selesai	Area pembacaan kosong	IDLE	Reset variabel, RFID Inventory aktif kembali, LCD menampilkan "Terima Kasih"	Sesuai

Selain menguji transisi *Finite State Machine* (FSM) pada kendaraan yang memenuhi persyaratan, pengujian juga dilakukan pada skenario kendaraan yang tidak memenuhi persyaratan. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa sistem mampu mengidentifikasi kondisi kendaraan yang tidak memenuhi kriteria akses, seperti *tag* tidak terdaftar, status kartu tidak aktif, atau saldo yang tidak mencukupi. Pada kondisi tersebut, FSM diharapkan melakukan transisi *state* sesuai dengan rancangan sehingga kendaraan diarahkan menuju jalur keluar dan proses transaksi dibatalkan. Hasil pengujian transisi *state* pada skenario kendaraan tidak memenuhi persyaratan ditunjukkan pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4.15 Pengujian transisi FSM pada kendaraan tidak memenuhi syarat

<i>State</i> Saat Ini	<i>Event</i>	<i>Condition</i>	<i>State</i> Berikutnya	<i>Output</i> Sistem	Hasil Pengujian
IDLE	Sensor Ultrasonik 1 mendeteksi kendaraan	Kendaraan berada pada area deteksi	WAIT_RFID	Sistem mulai melakukan identifikasi RFID	Sesuai
WAIT_SE NSOR1	Sensor Ultrasonik 1 mendeteksi kendaraan	Fisik kendaraan berhasil terdeteksi	WAIT_RFI D	Sistem menunggu pembacaan RFID	Sesuai

<i>State Saat Ini</i>	<i>Event</i>	<i>Condition</i>	<i>State Berikutnya</i>	<i>Output Sistem</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
WAIT_RFID	RFID Reader berhasil membaca EPC	EPC RFID berhasil dibaca	WAIT_VALIDATION	Pilot lampu hijau aktif	Sesuai
WAIT_VALIDATION	RFID Reader berhasil membaca EPC	EPC RFID berhasil dikaitkan dengan Sensor 1	RFID_DETECTED	Pilot lamp hijau aktif dan LCD menampilkan kendaraan terdeteksi	Sesuai
RFID_DETECTED	Proses identifikasi selesai	Tag terdaftar, status aktif, dan saldo mencukupi	VALIDATING	LCD menampilkan proses verifikasi data	Sesuai
VALIDATING	Validasi dimulai	Firestore memproses	CHECK_BALANCE	Data RFID dikirim ke Firestore	Sesuai
GO_EXIT	Kendaraan diarahkan ke jalur keluar	Palang tertutup	WAIT_SENSOR3	Pilot lamp merah aktif dan LCD menampilkan “Silahkan menuju exit”	Sesuai

<i>State Saat Ini</i>	<i>Event</i>	<i>Condition</i>	<i>State Berikutnya</i>	<i>Output Sistem</i>	<i>Hasil Pengujian</i>
	Kendaraan			Sistem	
WAIT_SE	melewati	Palang	TRANSACT	memastikan	Sesuai
NSOR3	Sensor	tertutup	ION_DONE	kendaraan	
	Ultrasonik 3			keluar dari jalur exit	
TRANSA	Seluruh	Kendaraan		Relay kembali	Sesuai
CTION_D	proses	telah	IDLE	merah,	
ONE	selesai	melintas		transaksi diselesaikan	

4.2.1 Pengujian waktu respon sistem

Pengujian waktu respons sistem dilakukan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan sistem sejak kendaraan terdeteksi oleh sensor ultrasonik 1 hingga servo membuka palang. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali percobaan untuk mengetahui konsistensi respons sistem dalam menjalankan proses transaksi.

Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan, sensor ultrasonik 1 berhasil mendeteksi keberadaan kendaraan pada jarak 10,5 cm. Saat kendaraan berada di depan sensor 1, sistem memberikan status "*Kendaraan masuk*" sebagai indikasi bahwa objek telah berada dalam *threshold* sensor 1. Setelah kendaraan bergerak *threshold* area tersebut, status berubah menjadi "*Kendaraan keluar*" dan nilai jarak kembali menjadi CLEAR, yang menunjukkan bahwa tidak terdapat objek lagi pada area deteksi. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor ultrasonik mampu mendeteksi perubahan kondisi keberadaan kendaraan secara *real-time* dan memberikan sinyal yang stabil kepada sistem kendali.

Selanjutnya memperlihatkan *Finite State Machine* berpindah ke kondisi OPEN_GATE. Perubahan *state* tersebut menghasilkan perintah GATE OPEN, yang menandakan bahwa ALB menerima perintah pembukaan palang dari Firebase, yaitu identifikasi kendaraan berhasil, status transaksi valid, serta keberadaan kendaraan telah dikonfirmasi oleh sensor ultrasonik 1. Hal ini menunjukkan bahwa sistem menggunakan sensor ultrasonik sebagai

mekanisme verifikasi fisik untuk mencegah pembukaan palang ketika kendaraan belum benar-benar berada pada area masuk.

Setelah kendaraan melintasi palang, sistem berpindah ke kondisi CLOSE_GATE sehingga menghasilkan perintah GATE CLOSE. Perubahan *state* ini dipicu setelah kendaraan telah melewati sensor 2, sehingga palang dapat ditutup kembali secara otomatis. Mekanisme tersebut menunjukkan bahwa ALB bekerja secara berurutan berdasarkan transisi *state* pada FSM, yaitu dimulai dari proses deteksi kendaraan, pembukaan palang, hingga penutupan palang setelah kendaraan berhasil melintas. Dengan demikian, siklus operasi ALB berlangsung secara otomatis, terstruktur, dan sesuai dengan logika pengendalian yang telah dirancang, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem dalam mengatur akses kendaraan pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

Tabel 4.16 Hasil pengujian waktu respon sistem

Percobaan	Waktu Respon Sistem (ms)	Waktu Siklus Pelayanan (ms)	Status ALB
1	2161	3431	Berhasil
2	2032	3397	Berhasil
3	2137	3259	Berhasil
4	2110	3522	Berhasil
5	2100	3285	Berhasil
6	2160	3501	Berhasil
7	2021	3396	Berhasil
8	2120	3286	Berhasil
9	2246	3333	Berhasil
10	2499	3476	Berhasil
Rata-rata	2158.6	3388.6	

Berdasarkan **Tabel 4.16**, waktu respon sistem yang diperoleh dari sepuluh kali percobaan berada pada rentang 2021 ms hingga 2499 ms, dengan rata-rata waktu respon sebesar 2158.6 ms. Waktu respon sistem merupakan durasi yang

dibutuhkan sejak kendaraan terdeteksi oleh sensor 1 hingga *Automatic Line Barrier* (ALB) membuka. Perbedaan waktu respons pada setiap percobaan menunjukkan bahwa proses pelayanan sistem tidak berlangsung dengan durasi yang sepenuhnya konstan. Selisih antara waktu respons minimum dan maksimum adalah 478 ms. Variasi tersebut berkaitan dengan tahapan pemrosesan yang mencakup pendeteksian kendaraan, pembacaan identitas RFID, validasi data kendaraan, serta pengambilan keputusan berdasarkan *Finite State Machine* (FSM).

Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan penelitian pada Gerbang Tol Ngurah Rai. Penelitian tersebut memperoleh rata-rata waktu pelayanan sebesar 0,6 detik per kendaraan pada sistem SLFF, sedangkan sistem *tapping card* memiliki rata-rata waktu pelayanan sebesar 7,6 detik per kendaraan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa waktu pelayanan SLFF yang lebih singkat menghasilkan kapasitas sebesar 6.000 kendaraan per jam, sedangkan sistem *tapping card* sebesar 474 kendaraan per jam [38].

Jika dibandingkan berdasarkan durasi, rata-rata waktu respons sistem pada penelitian ini sebesar 2,1586 detik masih lebih panjang dibandingkan waktu pelayanan SLFF pada penelitian sebelumnya yaitu 0,6 detik [38]. Perbedaan ini tidak dapat secara langsung digunakan untuk menyatakan bahwa kinerja sistem penelitian ini lebih rendah, karena batas pengukuran kedua penelitian berbeda. Pada penelitian sebelumnya mengukur waktu pelayanan SLFF pada gerbang tol, sedangkan penelitian ini mengukur waktu respons sistem kendali sejak kendaraan terdeteksi oleh sensor ultrasonik hingga ALB membuka, yang mencakup proses identifikasi RFID, validasi data, komunikasi dengan Firebase, dan eksekusi FSM.

Meskipun waktu respons penelitian ini belum mencapai waktu pelayanan 0,6 detik pada penelitian SLFF pembanding, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu respons yang lebih singkat dibandingkan waktu pelayanan *tapping card* sebesar 7,6 detik. Rata-rata waktu respons sebesar 2,1586 detik menunjukkan pengurangan durasi sekitar 5,4414 detik atau sekitar 71,6% dibandingkan waktu pelayanan *tapping card* pada penelitian sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang telah memiliki

karakteristik pelayanan yang lebih cepat dibandingkan mekanisme transaksi yang mengharuskan kendaraan melakukan *tapping*.

Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali ALB pada *prototype* telah mampu memberikan respons secara konsisten dengan rata-rata waktu respons 2,1586 detik. Walaupun waktu respons masih lebih panjang dibandingkan waktu pelayanan SLFF sebesar 0,6 detik pada penelitian pembandingan, sistem telah menunjukkan peningkatan kecepatan pelayanan dibandingkan mekanisme *tapping card*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa optimasi lebih lanjut masih dapat dilakukan, khususnya pada proses komunikasi dan validasi data, untuk mengurangi waktu pemrosesan sistem.

Selain waktu respons, **Tabel 4.16** menunjukkan rata-rata waktu siklus pelayanan sebesar 3388,6 ms atau 3,3886 detik, dengan rentang 3259 – 3522 ms. Waktu siklus pelayanan dihitung sejak kendaraan terdeteksi oleh sensor ultrasonik 1 hingga ALB kembali menutup, sehingga durasinya lebih panjang daripada waktu respons karena mencakup keseluruhan proses pembukaan hingga penutupan ALB.

4.2.2 Pengujian deteksi kendaraan

Pengujian deteksi kendaraan bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sensor ultrasonik dalam mendeteksi keberadaan kendaraan sesuai dengan fungsi masing-masing sensor. Selain itu, pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa hasil deteksi sensor diterima oleh ESP32 sebagai masukan dalam pengambilan keputusan sistem *Automatic Line Barrier*.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa terdapat kendaraan yang terdeteksi oleh sensor ultrasonik 1 dengan jarak 13.9 cm. sensor ultrasonik 1 ini berfungsi sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan yang akan memasuki area *free flow*.

Tabel 4.17 Hasil deteksi kendaraan sensor ultrasonik 1

No	Kondisi Pengujian	Jarak Terbaca (cm)	Status Deteksi	Respon Sistem	Hasil
----	----------------------	--------------------------	-------------------	---------------	-------

	Kendaraan			Mengaktifkan	
1	memasuki area identifikasi	13.96	Terdeteksi	proses verifikasi kendaraan	Berhasil
2	Tidak terdapat kendaraan	-	Tidak terdeteksi	Tidak ada proses verifikasi	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.17**, sensor ultrasonik 1 mampu mendeteksi keberadaan kendaraan secara konsisten ketika kendaraan memasuki area identifikasi. Pada saat kendaraan berada dalam jangkauan sensor, ESP32 menerima sinyal deteksi sebagai syarat untuk melanjutkan proses verifikasi data *sticker tag* UHF RFID. Ketika kendaraan keluar dari area pembacaan, sensor kembali berada pada kondisi tidak mendeteksi objek sehingga sistem kembali ke kondisi siaga. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor ultrasonik 1 berfungsi sebagai konfirmasi fisik kendaraan dan mampu bekerja sesuai dengan rancangan sistem.

Kemudian ketika kendaraan keluar melalui ALB terdeteksi oleh sensor ultrasonik 2 dengan jarak 13.8 cm. sensor ultrasonik 2 ini berfungsi sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan yang melintas di bawah ALB.

Tabel 4.18 Hasil deteksi kendaraan sensor ultrasonik 2

No	Kondisi Pengujian	Jarak Terbaca (cm)	Status Deteksi	Respon Sistem	Hasil
1	Kendaraan melintas di bawah palang	13.8	Terdeteksi	Palang tetap terbuka	Berhasil
2	Area palang kosong	-	Tidak terdeteksi	Palang tertutup	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.18**, sensor ultrasonik 2 berhasil mempertahankan kondisi palang tetap terbuka selama kendaraan masih berada di bawah lintasan palang. Ketika kendaraan masih terdeteksi, FSM tetap berada pada *state* WAIT_SENSOR2, sehingga tidak terjadi penutupan palang. Setelah kendaraan

meninggalkan area deteksi, sensor tidak lagi mendeteksi objek dan sistem berpindah ke *state* CLOSE_GATE untuk menutup palang secara otomatis. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor ultrasonik 2 berfungsi sebagai mekanisme pengaman yang memastikan penutupan palang hanya dilakukan setelah kendaraan benar-benar melewati gerbang.

Kemudian ketika kendaraan keluar melalui jalur *exit* terdeteksi oleh sensor ultrasonik 3 dengan jarak 10.6 cm. sensor ultrasonik 3 ini berfungsi sebagai pendeteksi keberadaan kendaraan yang akan keluar area *free flow*.

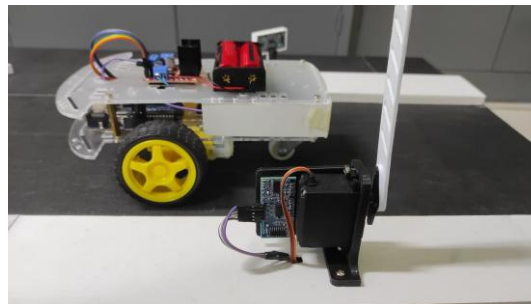
Tabel 4.19 Hasil deteksi kendaraan sensor ultrasonik 3

No	Kondisi Pengujian	Jarak Terbaca (cm)	Status Deteksi	Respon Sistem	Hasil
1	Kendaraan memasuki jalur keluar	10.6	Terdeteksi	FSM menjalankan <i>state</i> GO_EXIT	Berhasil
				<i>Standby</i>	
2	Area jalur keluar kosong	-	Tidak terdeteksi	menunggu kendaraan berikutnya	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.19**, sensor ultrasonik 3 mampu mendeteksi keberadaan kendaraan pada jalur keluar sesuai dengan fungsi yang telah dirancang. Ketika kendaraan memasuki area deteksi, sensor berhasil mengirimkan sinyal kepada ESP32 sehingga sistem menjalankan *state* GO_EXIT sesuai dengan hasil identifikasi kendaraan. Setelah kendaraan meninggalkan area deteksi, sensor tidak lagi mendeteksi objek sehingga sistem kembali ke kondisi *standby* dan siap melayani kendaraan berikutnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor ultrasonik 3 berfungsi dengan baik sebagai pendeteksi kendaraan pada jalur keluar dan mendukung proses pengalihan kendaraan yang tidak memenuhi persyaratan untuk memasuki jalur utama.

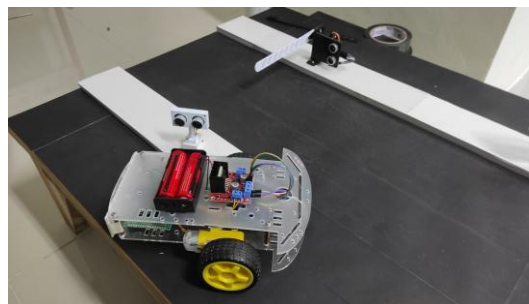
4.2.3 Pengujian Automatic Line Barrier (ALB)

Pengujian operasi dilakukan untuk memastikan sistem mampu menghasilkan keluaran sesuai dengan kondisi yang diberikan serta menjalankan transisi *Finite State Machine* (FSM) sesuai dengan rancangan. Pengujian dilakukan menggunakan empat skenario yang mewakili kondisi operasi normal maupun kondisi kegagalan, yaitu kendaraan valid memasuki area gerbang, kendaraan melintas melewati palang, kendaraan berhenti di bawah palang, kendaraan meninggalkan area gerbang, dan kendaraan tidak valid.



Gambar 4.13 ALB membuka ketika kendaraan berhasil terverifikasi

Berdasarkan **Gambar 4.19**, ALB berhasil membuka setelah kendaraan dinyatakan terverifikasi oleh sistem. Kondisi ini terjadi ketika *sticker tag* UHF RFID berhasil dikenali, data EPC sesuai dengan *database*, serta status transaksi dinyatakan valid. Setelah seluruh proses verifikasi terpenuhi, FSM mengirimkan perintah OPEN_GATE kepada motor servo sehingga palang bergerak dari posisi tertutup menuju posisi terbuka dan memberikan akses kepada kendaraan untuk melintas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme pembukaan palang berlangsung sesuai dengan logika sistem yang telah dirancang, sehingga tidak terjadi pembukaan tanpa adanya proses verifikasi sebelumnya.



Gambar 4.14 ALB menutup ketika kendaraan gagal terverifikasi

Sebaliknya, **Gambar 4.20** memperlihatkan kondisi ketika kendaraan gagal terverifikasi. Kegagalan tersebut dapat disebabkan oleh *sticker tag* UHF RFID yang tidak terdaftar, saldo transaksi tidak mencukupi, atau proses identifikasi tidak memenuhi kriteria yang telah ditentukan oleh sistem. Pada kondisi tersebut, FSM tidak mengirimkan perintah pembukaan palang sehingga motor servo tetap mempertahankan posisi tertutup. Dengan demikian, kendaraan tidak memperoleh akses untuk melintasi gerbang. Hasil ini menunjukkan bahwa ALB mampu menerapkan mekanisme kontrol akses secara selektif berdasarkan hasil identifikasi yang diterima, sehingga hanya kendaraan yang memenuhi persyaratan yang dapat melewati *prototype* gerbang tol *free flow*.

Tabel 4.20 Hasil pengujian skenario operasi

Skenario Operasi	Kondisi Sistem	Respon Palang	State FSM	Status
Kendaraan valid memasuki area gerbang	Firebase memvalidasi	Palang membuka	OPEN_GATE	Berhasil
Kendaraan melintas melewati palang	Sensor 2 masih mendeteksi kendaraan	Palang tetap terbuka	WAIT_SENSOR2	Berhasil
Kendaraan meninggalkan area gerbang	Sensor 2 tidak lagi mendeteksi kendaraan	Palang menutup	CLOSE_GATE	Berhasil
Kendaraan tidak valid	RFID tidak valid atau saldo tidak mencukupi	Palang tetap tertutup	GO_EXIT	Berhasil

Berdasarkan **Tabel 4.20**, pengujian skenario operasi dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *Automatic Line Barrier* pada berbagai kondisi operasional

mulai dari proses validasi kendaraan hingga kendaraan meninggalkan area ALB. Parameter yang diamati meliputi kondisi sistem, respons palang, transisi FSM, dan status keberhasilan sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh skenario berhasil dijalankan sesuai dengan logika pengendalian yang telah dirancang.

Pada kondisi pertama, kendaraan yang berhasil diidentifikasi oleh *sticker tag* UHF RFID dan dinyatakan valid melalui proses verifikasi Firebase menyebabkan sistem berpindah ke *state* OPEN_GATE. Perubahan *state* tersebut menghasilkan perintah kepada motor servo untuk membuka palang sehingga kendaraan memperoleh akses memasuki area gerbang. Hasil ini menunjukkan bahwa pembukaan palang hanya dilakukan setelah seluruh proses identifikasi dan validasi selesai, sehingga akses kendaraan dikendalikan berdasarkan data yang telah diverifikasi.

Selanjutnya, ketika kendaraan melintasi area gerbang, sensor ultrasonik 2 masih mendeteksi keberadaan kendaraan sehingga FSM tetap berada pada *state* WAIT_SENSOR2. Pada kondisi ini palang dipertahankan dalam keadaan terbuka hingga kendaraan benar-benar melewati area gerbang. Mekanisme tersebut berfungsi sebagai sistem pengaman (*safety mechanism*) untuk mencegah palang menutup sebelum kendaraan sepenuhnya meninggalkan lintasan, sehingga risiko terjadinya benturan antara palang dan kendaraan dapat diminimalkan.

Setelah kendaraan keluar dari area deteksi, sensor ultrasonik 2 tidak lagi mendeteksi objek sehingga FSM berpindah ke *state* CLOSE_GATE. Perubahan *state* ini menghasilkan perintah penutupan palang secara otomatis sehingga sistem kembali ke kondisi awal dan siap melayani kendaraan berikutnya. Hal ini menunjukkan bahwa proses penutupan palang tidak bergantung pada waktu tunda (*delay*), melainkan berdasarkan kondisi aktual keberadaan kendaraan yang dideteksi oleh sensor. Pendekatan tersebut membuat sistem lebih adaptif terhadap variasi kecepatan kendaraan saat melintas.

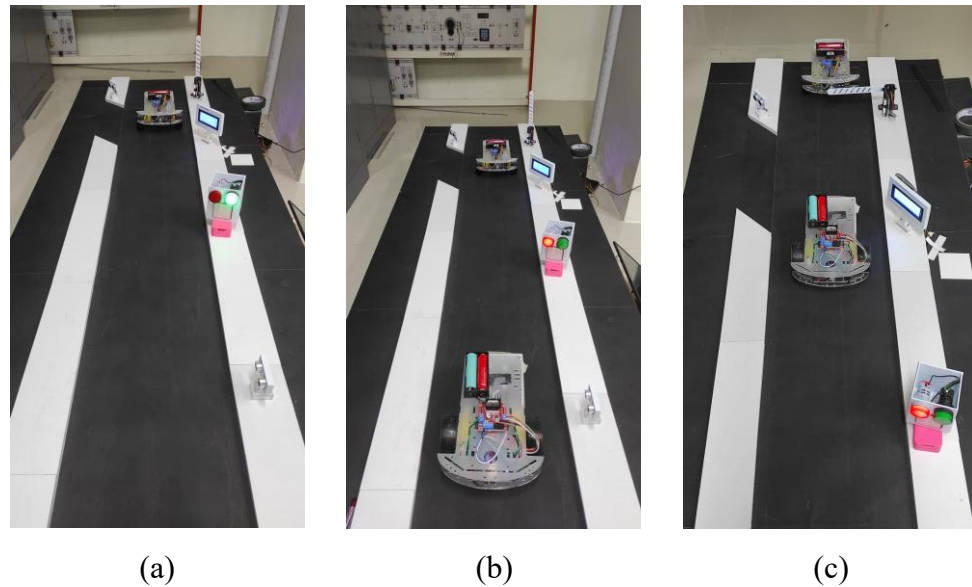
Pengujian juga dilakukan pada kondisi kendaraan tidak valid, yaitu ketika data RFID tidak terdaftar atau saldo transaksi tidak mencukupi. Pada kondisi ini sistem berpindah ke *state* GO_EXIT dan palang tetap berada pada posisi

tertutup sehingga kendaraan tidak memperoleh akses memasuki jalur utama. Hasil tersebut membuktikan bahwa keputusan sistem sepenuhnya ditentukan oleh hasil identifikasi dan validasi data kendaraan, sehingga hanya kendaraan yang memenuhi persyaratan yang diberikan izin untuk melintas.

Secara keseluruhan, hasil pengujian pada **Tabel 4.20** menunjukkan bahwa integrasi antara pembacaan *sticker tag* UHF RFID, proses validasi Firebase, sensor ultrasonik, algoritma *Finite State Machine* (FSM), dan mekanisme *Automatic Line Barrier* (ALB) telah bekerja secara sinkron. Setiap perubahan kondisi kendaraan menghasilkan transisi state yang sesuai, sehingga respons pembukaan maupun penutupan palang berlangsung secara otomatis, konsisten, dan sesuai dengan urutan operasi yang telah dirancang. Berdasarkan seluruh skenario yang diuji, sistem mampu menjalankan setiap kondisi operasi sesuai dengan logika kendali yang telah dirancang. Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan 100% pada rangkaian pengujian yang dilakukan pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

4.2.4 Pengujian *Automatic Line Barrier* (ALB) terhadap variasi jumlah kendaraan

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem kendali ALB berbasis FSM dalam menangani variasi jumlah kendaraan yang melintas pada *prototype* gerbang tol *free flow*. Variasi pengujian meliputi satu kendaraan, dua kendaraan dengan jarak normal, serta dua kendaraan dengan jarak yang sangat dekat (*tailgating*). Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem tetap mampu memproses setiap kendaraan sesuai urutan tanpa terjadi kesalahan pengendalian palang. Skenario pengujian yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 4.21**.



Gambar 4.15 Skenario (a) 1 kendaraan (b) 2 kendaraan (*tailgating* terverifikasi) (c) 2 kendaraan (*tailgating* tidak terverifikasi)

Tabel 4.21 Pengujian variasi jumlah kendaraan

No	Skenario	Kondisi
1	1 kendaraan	Kendaraan tunggal melewati gerbang
2	2 kendaraan	Dua kendaraan melintas dengan jarak normal
3	2 kendaraan (<i>tailgating</i>)	Dua kendaraan melintas dengan jarak sangat dekat

Setiap skenario pengujian dilakukan dengan menggunakan kombinasi kendaraan yang memiliki status validasi berbeda untuk mengetahui respons sistem kendali terhadap setiap kondisi. Parameter yang diamati meliputi hasil validasi kendaraan, respons servo sebagai penggerak palang, deteksi kendaraan oleh sensor ultrasonik, serta status akhir sistem.

Tabel 4.22 Hasil pengujian variasi jumlah kendaraan

No	Skenario	Kendaraan	Hasil Validasi	Servo	Status Sistem
1	1 kendaraan	MOBIL1	Valid	Terbuka	Berhasil

2	2 kendaraan	MOBIL 1	Valid – Valid	Terbuka	Berhasil
		– MOBIL 2			
3	2 kendaraan (<i>tailgating</i>)	MOBIL 1	Valid – Valid	Terbuka	Berhasil
		– MOBIL 2			
4	2 kendaraan	MOBIL 1	Valid – Tidak valid	Terbuka – tidak terbuka	Berhasil
		– MOBIL 3			
5	2 kendaraan (<i>tailgating</i>)	MOBIL 1	Valid – Tidak valid	Terbuka – tidak terbuka	Berhasil
		– MOBIL 3			
6	2 kendaraan	MOBIL 3	Tidak valid – Valid	Tidak terbuka – Terbuka	Berhasil
		– MOBIL 1			
7	2 kendaraan (<i>tailgating</i>)	MOBIL 3	Tidak valid – Valid	Tidak terbuka – Terbuka	Berhasil
		– MOBIL 1			

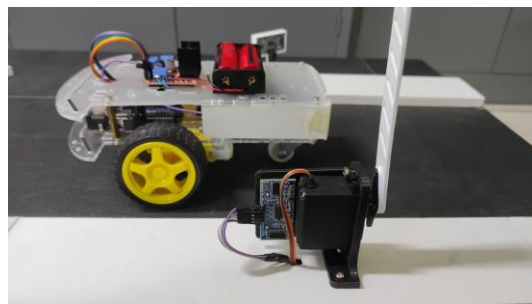
Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.22**, sistem berhasil memproses seluruh skenario yang diujikan sesuai dengan logika FSM yang telah dirancang. Pada skenario satu kendaraan, sistem mampu melakukan proses identifikasi, validasi, pembukaan palang, dan penutupan palang secara normal setelah kendaraan melewati sensor ultrasonik 2. Pada skenario dua kendaraan dengan jarak normal, kedua kendaraan berhasil diproses secara berurutan tanpa terjadi konflik pada proses validasi maupun pengendalian palang.

Pengujian pada kondisi dua kendaraan dengan jarak sangat dekat (*tailgating*) menunjukkan bahwa sistem tetap mampu mempertahankan urutan proses setiap kendaraan. Apabila kedua kendaraan memenuhi persyaratan akses, palang tetap berada pada kondisi terbuka hingga kendaraan terakhir melewati sensor ultrasonik 2. Sebaliknya, apabila kendaraan kedua tidak memenuhi persyaratan akses, sistem menutup palang setelah kendaraan

pertama selesai melintas, kemudian mengarahkan kendaraan kedua menuju jalur keluar hingga melewati sensor ultrasonik 3 sebelum sistem kembali ke kondisi awal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali ALB berbasis FSM mampu menangani variasi jumlah kendaraan tanpa mengganggu urutan proses maupun mekanisme pengendalian palang pada *prototype* gerbang tol *free flow*.

4.2.5 Pengujian mekanisme pengaman *Automatic Line Barrier* (ALB)

Setelah dilakukan pengujian terhadap implementasi *Finite State Machine* (FSM), waktu respons sistem, skenario operasi, serta variasi jumlah kendaraan, tahap selanjutnya adalah menguji fungsi keselamatan (*safety*) pada *Automatic Line Barrier* (ALB). Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa sistem mampu mempertahankan kondisi palang tetap terbuka selama masih terdapat kendaraan pada area gerbang yang dideteksi oleh sensor 2, sehingga mencegah terjadinya penutupan palang yang berpotensi mengganggu atau membahayakan kendaraan. Selain itu, pengujian ini juga memastikan bahwa palang akan menutup secara otomatis setelah area gerbang dinyatakan kosong sesuai dengan logika transisi *Finite State Machine* (FSM) yang telah dirancang. Hasil pengujian kontrol keselamatan *Automatic Line Barrier* (ALB) ditunjukkan pada **Tabel 4.23**.



Gambar 4.16 Dokumentasi kontrol *safety* ALB

Tabel 4.23 Hasil uji kontrol keselamatan *Automatic Line Barrier* (ALB)

No	Skenario Pengujian	Kondisi		State FSM	Status
		Sensor Ultrasonik	Respon Servo		
		2			
1	Kendaraan melintas normal	Kendaraan terdeteksi kemudian area kosong	Membuka kemudian menutup	WAIT_SENSOR2 → CLOSE_GATE	Berhasil
2	Kendaraan berhenti di bawah palang	Kendaraan tetap terdeteksi	Tetap terbuka	WAIT_SENSOR2	Berhasil
3	Kendaraan berhenti selama 5 detik	Kendaraan masih terdeteksi	Tetap terbuka	WAIT_SENSOR2	Berhasil
4	Kendaraan bergerak kembali	Area kembali kosong	Servo menutup	CLOSE_GATE	Berhasil
5	Dua kendaraan berurutan (tailgating valid-valid)	Area selalu terdeteksi hingga kendaraan terakhir	Servo tetap terbuka	WAIT_SENSOR2	Berhasil

sebanyak 10 kali percobaan dengan prosedur dan kondisi operasi yang sama (menggunakan kendaraan pendukung pengujian dan identitas *sticker tag* UHF RFID yang sama seperti demonstrasi), dengan parameter pengamatan berupa waktu respons sistem, waktu siklus pelayanan, dan status keberhasilan ALB. Keberhasilan di sini diartikan ketika kendaraan berhasil melintas tanpa menabrak ALB (ALB tidak terlambat membuka).

Tabel 4.24 Hasil pengujian verifikasi ulang waktu respon sistem

Percobaan	Waktu Respon Sistem (ms)	Waktu Siklus Pelayanan (ms)	Status ALB
1	2130	3243	Berhasil
2	2498	3298	Berhasil
3	2192	3210	Berhasil
4	2072	3387	Berhasil
5	2221	3630	Berhasil
6	2402	3267	Berhasil
7	2046	3464	Berhasil
8	2183	3324	Berhasil
9	2280	3234	Berhasil
10	2162	3272	Berhasil
Rata-rata	2218.6	3332.9	

Berdasarkan **Tabel 4.24**, seluruh 10 percobaan verifikasi ulang menghasilkan status ALB berhasil. Dengan demikian, tingkat keberhasilan pengujian verifikasi ulang sebanyak 10 kali dapat dikatakan 100% berhasil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi dan prosedur pengujian yang dilakukan, ALB mampu menjalankan proses pembukaan dan pelayanan kendaraan sesuai dengan kriteria keberhasilan yang telah ditentukan.

Waktu respons sistem pada pengujian verifikasi ulang berada pada rentang 2046 ms hingga 2498 ms dengan rata-rata sebesar 2218.6 ms. Sementara itu, waktu siklus pelayanan berada pada rentang 3210 ms hingga 3630 ms dengan rata-rata sebesar 3332.9 ms. Perbedaan nilai waktu pada setiap percobaan

menunjukkan bahwa waktu pemrosesan sistem tidak sepenuhnya konstan. Meskipun terdapat variasi tersebut, seluruh percobaan tetap menghasilkan status ALB berhasil.

Pengujian verifikasi ulang ini dilakukan karena pada demonstrasi sistem sebelumnya ditemukan satu kejadian keterlambatan pembukaan ALB ketika kendaraan melintas. Kondisi tersebut kemudian menjadi dasar dilakukannya pengujian verifikasi ulang menggunakan prosedur dan kondisi operasi yang sama. Namun, pada sistem ini tidak terdapat pencatatan waktu pada setiap tahapan proses, seperti waktu deteksi sensor 1, waktu pembacaan RFID, waktu validasi data, dan waktu pemberian perintah pembukaan ALB. Oleh karena itu, penyebab spesifik keterlambatan pembukaan ALB pada saat demonstrasi tidak dapat ditentukan secara kuantitatif berdasarkan data yang tersedia. Namun, kejadian tersebut digunakan sebagai dasar untuk melakukan verifikasi ulang terhadap kinerja ALB dengan prosedur pengujian yang sama.

Namun jika dibandingkan dengan hasil pengujian waktu respons sistem pada **Tabel 4.16**, pengujian utama menghasilkan rata - rata waktu respons sebesar 2158,6 ms dan rata-rata waktu siklus pelayanan sebesar 3388,6 ms. Sementara itu, pengujian verifikasi ulang menghasilkan rata - rata waktu respons sebesar 2218,6 ms dan rata-rata waktu siklus pelayanan sebesar 3332,9 ms. Dengan demikian, terdapat selisih rata-rata waktu respons sebesar 60 ms dan selisih rata - rata waktu siklus pelayanan sebesar 55,7 ms. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi waktu pemrosesan antar rangkaian pengujian, tetapi tidak menunjukkan perubahan kinerja yang besar berdasarkan parameter waktu rata - rata.

Keterbatasan pengujian pada kejadian demonstrasi adalah tidak tersedianya data pencatatan waktu pada setiap tahapan proses sistem. Oleh karena itu, pengujian verifikasi ulang dapat digunakan untuk mengevaluasi apakah sistem kembali memenuhi kriteria keberhasilan pada kondisi pengujian yang sama, tetapi tidak dapat digunakan untuk menentukan penyebab spesifik keterlambatan yang terjadi pada demonstrasi sebelumnya. Identifikasi penyebab secara lebih detail memerlukan pencatatan waktu pada setiap tahapan

proses, mulai dari deteksi kendaraan, pembacaan RFID, validasi data, pemrosesan transaksi, hingga perintah pembukaan ALB.