

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas mengenai evaluasi kinerja dan keandalan dari sistem *Smart Rotary Parking* yang telah dikembangkan. Melalui berbagai metode pengujian, diukur tingkat efektivitas dan efisiensi sistem ini dalam menjalankan setiap fungsinya secara sekuensial, serta mengidentifikasi parameter-parameter optimal pada tiap komponen. Tujuan utama dari bab ini adalah untuk melakukan pengukuran sistem kinerja alat agar mendapatkan hasil data yang akurat dan spesifik.

4.1 Prosedur Pengukuran dan Pengujian

Pada pengerjaan tugas akhir ini, prosedur pengukuran dan pengujian prototipe *Smart Rotary Parking* diawali dengan tahap persiapan teknis. Tahap persiapan ini meliputi perancangan skema kelistrikan, pengumpulan komponen yang diperlukan, serta pengecekan awal untuk memastikan bahwa setiap perangkat keras dalam kondisi baik dan beroperasi dengan semestinya. Setelah seluruh komponen dirakit menjadi satu kesatuan, prosedur pengujian dilakukan secara menyeluruh untuk menguji rangkaian alat yang telah dibangun tersebut. Data yang diperoleh dari hasil pengujian ini kemudian dicatat dan dianalisis berdasarkan nilai-nilai perhitungannya. Hasil pengukuran tersebut dievaluasi untuk melihat apakah kinerja alat sudah sesuai perencanaan, dan dinyatakan dalam bentuk rekomendasi perbaikan atau peningkatan apabila ditemukan kekurangan.

Untuk memudahkan pelacakan jika terjadi kendala (*troubleshooting*), proses pengukuran dan pengujian diimplementasikan secara berurutan pada masing-masing bagian. Pengujian ini dimulai dari rangkaian komponen secara individu yang paling simpel, lalu dilanjutkan secara bertahap hingga seluruh sistem Master dan Slave terintegrasi secara penuh. Pendekatan bertahap ini sangat penting diterapkan dengan tujuan untuk menghindari penumpukan kesalahan dan mencegah penyimpangan sejak proses pengukuran awal.

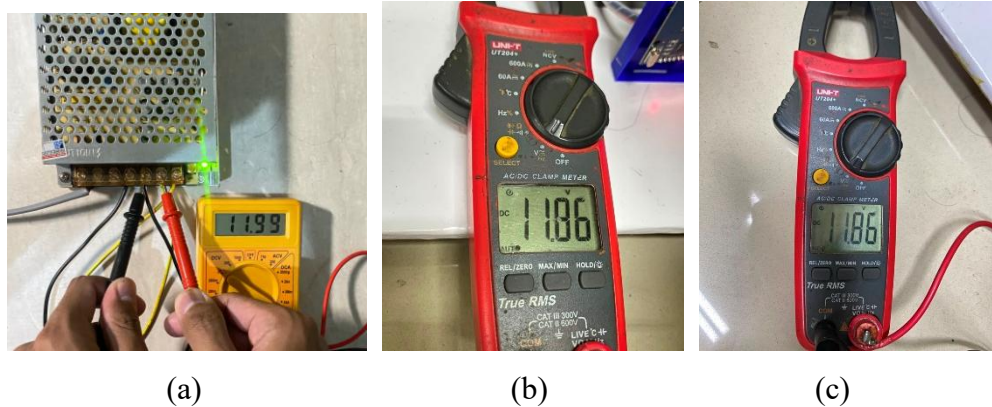
4.2 Pengujian Alat

Peneliti melakukan serangkaian pengujian terlebih dahulu untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam perancangan sistem ini. Dalam

pembahasan kali ini, pengujian dilaksanakan guna memastikan kinerja dan keandalan dari setiap komponen utama dalam sistem, baik pada sisi kendali cerdas (*Master*) maupun pada sisi aktuator mekanik (*Slave*). Sebelum melangkah lebih jauh, pengujian ini dilakukan secara bertahap untuk memvalidasi fungsi kelistrikan, pembacaan sensor, respon komunikasi antar mikrokontroler, hingga keandalan penggerak motor.

4.2.1 Pengujian Power Supply 12 VDC - 10A

Hasil pengujian dari komponen ini sangat penting untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan berfungsi dengan baik dan aman. Pada perancangan sistem ini, pengujian catu daya dilakukan untuk memvalidasi kestabilan tegangan dan arus yang disuplai ke seluruh perangkat keras, baik pada jalur daya utama (12 VDC) maupun pada jalur logika (5 VDC / 3,3 VDC). Pengujian dilakukan secara berkala sebanyak tiga kali untuk memastikan nilai keluaran stabil dan akurat. Berikut adalah hasil pengujiannya:



Gambar 4. 1 Pengujian tegangan power supply (a) tanpa beban, (b) *standby*, dan (c) dengan beban

Gambar 4. 1 memperlihatkan proses pengukuran tegangan keluaran catu daya (*switching power supply*) 12 VDC menggunakan multimeter digital pada tiga kondisi operasional berbeda. Pada Gambar 4. 1(a), pengujian kondisi tanpa beban menghasilkan nilai tegangan sebesar 11,99 VDC. Selanjutnya pada Gambar 4. 1(b), saat sistem berada dalam kondisi siaga (*standby*) dengan menyalakan modul mikrokontroler dan sensor, tegangan terukur stabil di angka 11,86 VDC. Ketika

sistem beroperasi penuh di bawah beban kerja motor DC penggerak pada Gambar 4. 1(c), nilai tegangan keluaran tetap bertahan kokoh di angka 11,86 VDC. Hasil dokumentasi visual ini membuktikan bahwa unit catu daya memiliki regulasi tegangan yang sangat stabil dengan penurunan tegangan (*voltage drop*) yang sangat kecil saat terjadi penarikan arus beban. Rekapitulasi hasil pengujian tegangan catu daya secara menyeluruh disajikan pada Tabel 4. 1.

Tabel 4. 1 Pengujian *V_{out} Power Supply* tanpa beban

Pengujian <i>V_{out}</i>	Nilai Aktual	Toleransi Maksimal	Percobaan Ke-1 (V)	Percobaan Ke-2 (V)	Percobaan Ke-3 (V)	Rata-rata (V)
Tegangan tanpa beban	12 VDC	$\pm 5\%$ (11,4 – 12,6 VDC)	11,99	11,99	11,99	11,99
Kondisi Standby	12 VDC	$\pm 5\%$ (11,4 – 12,6 VDC)	11,86	11,87	11,87	11,87
Dengan Ada Beban	12 VDC	$\pm 5\%$ (11,4 – 12,6 VDC)	11,86	11,86	11,86	11,86
Arus Output Tanpa Beban	-	-	0,12	0,12	0,14	0,12
Arus Output Tanpa Beban	-	-	0,35	0,32	0,37	0,34

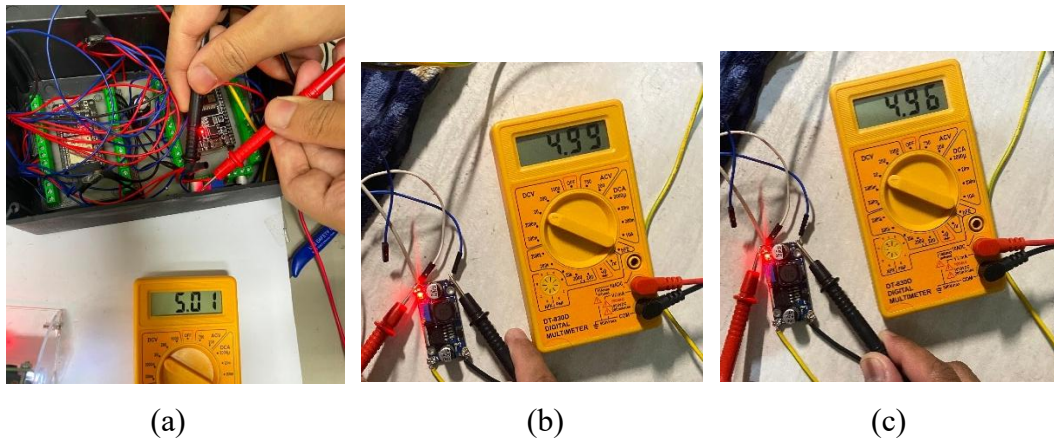
Berdasarkan hasil pengukuran parameter fisis yang disajikan pada Tabel 4. 1, unit catu daya switching 12 VDC dengan kapasitas arus 10 Ampere menunjukkan performa regulasi tegangan yang sangat stabil serta akurasi yang tinggi pada seluruh kondisi pengujian. Pada kondisi tanpa beban, tegangan keluaran yang dihasilkan terukur stabil di angka rata-rata 11,99 VDC. Saat sistem memasuki kondisi siaga standby yakni ketika modul ESP32 Master, ESP32 Slave, ESP32-CAM, serta sensor Hall Effect telah aktif dan menyerap arus rata-rata sebesar 0,12 A, tegangan

keluaran tercatat berada pada nilai rata-rata 11,87 VDC. Selanjutnya, ketika sistem beroperasi di bawah beban kerja penuh saat kedua aktuator motor DC gearbox JG25-370 aktif berputar menggerakkan struktur mekanik, konsumsi arus meningkat menjadi rata-rata 0,34 A dengan tegangan keluaran yang tetap bertahan kokoh di angka rata-rata 11,86 VDC.

Tegangan kerja rata-rata sebesar 11,86 VDC tersebut menunjukkan selisih sebesar -0,14 V atau hanya mengalami deviasi sebesar -1,17% terhadap nilai nominal 12,00 VDC. Nilai deviasi ini berada jauh di dalam batas rentang toleransi aman yang diizinkan, yaitu sebesar $\pm 5\%$ (rentang 11,40 VDC hingga 12,60 VDC). Ketidadaan lonjakan penurunan tegangan (*voltage drop*) yang berarti saat terjadi transisi penarikan arus beban motor membuktikan bahwa unit catu daya mampu meredam beban transien dengan sangat baik, sehingga mengeliminasi risiko kegagalan daya (*brownout*) yang dapat memicu restart otomatis pada mikrokontroler ESP32. Selain itu, modul buck converter LM2596 yang ditopang oleh kapasitor penyangga terbukti andal dalam meregulasi tegangan logika 5,00 VDC untuk menyuplai subsistem kendali dan modul visi tanpa terganggu oleh fluktuasi arus motor penggerak

4. 2. 2. Pengujian Step Down LM2596

Pengujian pada modul *step-down converter* LM2596 bertujuan untuk memastikan bahwa modul mampu menurunkan tegangan masukan 12 VDC dari *power supply* utama menjadi tegangan keluaran 5 VDC yang stabil dan aman untuk menyuplai rangkaian mikrokontroler (ESP32 Master, ESP32 Slave, modul ESP32-CAM, dan sensor *Hall Effect*). Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan keluaran (V_{out}) serta arus beban (I_{out}) menggunakan multimeter digital pada tiga kondisi, yaitu saat tanpa beban, kondisi siaga, dan kondisi saat sistem aktif beroperasi (motor bergerak dan ESP32-CAM memproses gambar). Masing-masing kondisi diuji sebanyak 3 kali percobaan untuk diambil nilai rata-ratanya. Data hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4. 2.



Gambar 4. 2 Pengujian V_{out} Modul Step-Down (a) tanpa beban, (b) Keadaan Standby, dan (c) dengan beban

Gambar 4. 2 memperlihatkan tahapan pengujian tegangan keluaran (V_{out}) modul *step-down converter* LM2596 menggunakan multimeter digital pada tiga kondisi operasional yang berbeda. Pada Gambar 4. 2(a), pengujian kondisi tanpa beban menghasilkan tegangan keluaran stabil sebesar 5,01 VDC. Pada Gambar 4. 2(b), saat sistem berada dalam kondisi siaga (*standby*) dengan menyuplai rangkaian mikrokontroler dan sensor, nilai tegangan terukur berada pada angka 4,99 VDC. Selanjutnya pada Gambar 4. 2(c), ketika sistem aktif bekerja di bawah beban penuh saat motor penggerak berputar dan kamera ESP32-CAM memproses citra, tegangan tetap terjaga stabil di angka 4,96 VDC. Pengukuran ini membuktikan bahwa modul LM2596 mampu meregulasi tegangan logika 5 VDC secara konsisten dalam batas toleransi aman standar mikrokontroler. Data hasil pengukuran tegangan secara terperinci disajikan pada Tabel 4. 2.

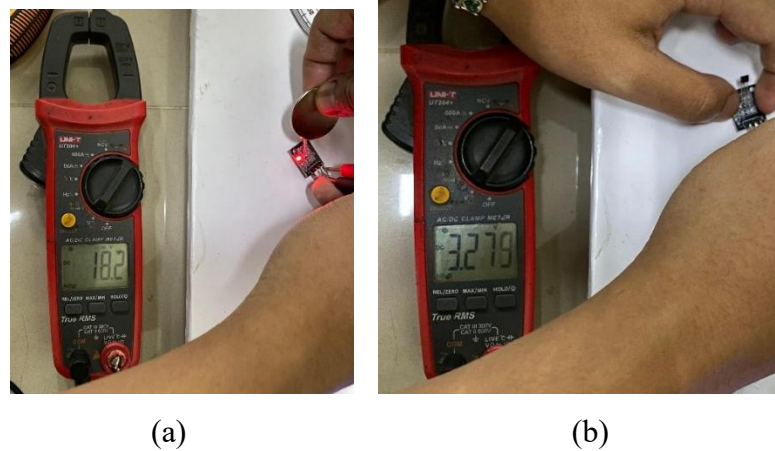
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Tegangan Modul Step-Down LM2596

Kondisi Pengujian Tegangan	Tegangan Input (V_{in}) (V)	Nilai Aktual	V_{out} (V) Percobaan Ke-1 (V)	V_{out} (V) Percobaan Ke-2 (V)	V_{out} (V) Percobaan Ke-3 (V)	Rata rata V_{out} (V)
Tanpa beban	11,88	5V	5,01	5,01	5,01	5,01
Kondisi Standby	11,88	5V	4,99	4,99	4,97	4,99
Dengan Ada Beban	11,88	5V	4,96	4,96	4,96	4,96

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4. 2, modul *step-down converter* LM2596 menunjukkan kinerja regulasi tegangan yang sangat stabil dalam menurunkan tegangan sumber 11.88 VDC menjadi tegangan kerja logika sistem. Pada pengujian kondisi tanpa beban, tegangan keluaran (V_{out}) terukur konstan pada nilai rata-rata 5.01 VDC di ketiga kali percobaan. Saat sistem memasuki kondisi siaga *standby* yakni ketika rangkaian ESP32 Master, ESP32 Slave, modul ESP32-CAM, dan sensor *Hall Effect* mulai aktif menerima suplai daya tegangan keluaran tercatat berada pada nilai rata-rata 4.99 VDC dengan sedikit koreksi sebesar 0.01 V. Selanjutnya, pada kondisi dengan ada beban saat sistem bekerja penuh menjalankan pemindaian kamera dan pergerakan aktuator, nilai rata-rata tegangan keluaran kembali berada pada angka 4.96 VDC. Tegangan kerja rata-rata sebesar 5.01 VDC hingga 4.96 VDC ini memiliki selisih sekitar $-0,05$ V atau deviasi sebesar -1% terhadap tegangan ideal 5,00 VDC. Nilai ini masih berada dalam batas toleransi aman standar tegangan suplai rangkaian mikrokontroler berbasis 5 VDC, yaitu toleransi $\pm 5\%$ (rentang 4.75 VDC hingga 5.52 VDC).

4. 2. 3. Pengujian Sensor Hall Effect

Dalam pengujian komponen sensor *Hall Effect* pada model *Smart Rotary Parking*, pengujian dilakukan untuk memastikan kemampuan sensor dalam mendeteksi putaran magnet neodmium yang terpasang pada keranjang secara akurat. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi apakah pulsa magnetik dapat diterjemahkan dengan baik oleh ESP32 *Master* sebagai acuan penghitungan posisi yang presisi slot parkir.



Gambar 4. 3 Pengujian jarak pada Hall Effect Sensor (a) magnet didekatkan dan (b) magnet dijauhkan

Gambar 4. 3 memperlihatkan respon transisi level tegangan keluaran (V_{out}) modul sensor *Hall Effect* IC A3144 terhadap paparan medan magnet pada antarmuka multimeter digital. Pada Gambar 4. 3(a), ketika magnet didekatkan tepat pada jarak deteksi efektif (≤ 5 mm), medan fluks magnetik memicu saturasi transistor internal sehingga lampu LED indikator merah menyala aktif dan tegangan keluaran anjlok ke level 18,2 mV (0,0182 V), yang terbaca sebagai sinyal logika rendah (LOW / Logika 0). Sebaliknya, pada Gambar 4. 3(b), ketika magnet dijauhkan melampaui batas jarak induksi (> 5 mm), transistor kembali memutus arus sehingga tegangan ditarik ke atas (*pull-up*) menuju 3,279 V yang terbaca sebagai sinyal logika tinggi (HIGH / Logika 1). Perubahan level tegangan digital yang tegas ini membuktikan sensor bekerja presisi tanpa pembacaan mengambang (*floating*) saat mendeteksi langkah keranjang parkir. Rincian hasil pengujian jarak deteksi sensor selengkapnya disajikan pada Tabel 4. 3.

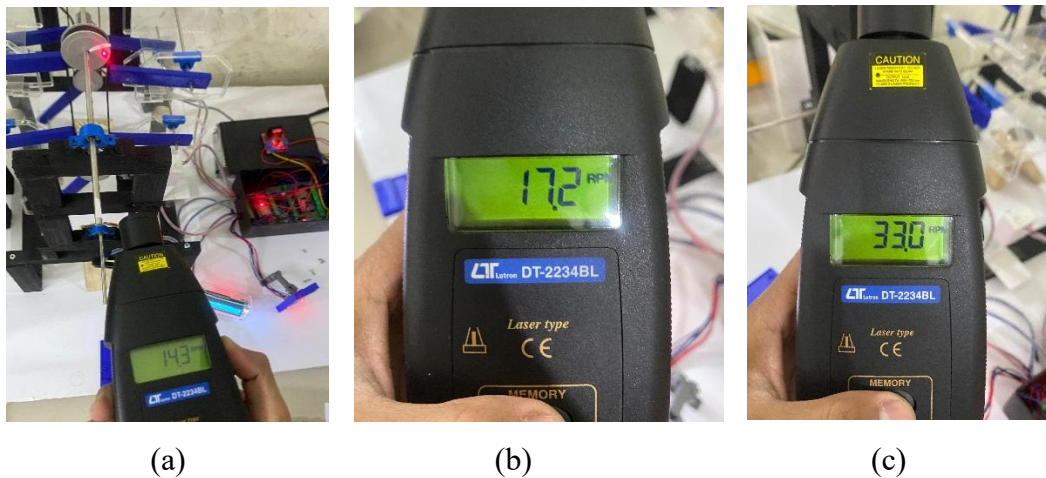
Tabel 4. 3 Pengujian Hall Effect Sensor

Jarak Magnet ke Sensor (mm)	V_{out} (V) Percobaan Ke-1 (V)	V_{out} (V) Percobaan Ke-2 (V)	V_{out} (V) Percobaan Ke-3 (V)	Rata rata V_{out} (V)	Logika Terbaca ESP32
1,0	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	Low
2,0	0,0182	0,0183	0,0182	0,0182	Low
3,0	0,0183	0,0183	0,0183	0,0183	Low
4,0	0,0184	0,0184	0,0185	0,0184	Low
5,0	0,0185	0,0185	0,0188	0,0186	Low
6,0	3,27	3,26	3,28	3,27	High
7,0	3,28	3,28	3,28	3,28	High

Berdasarkan hasil pengukuran parameter fisis pada Tabel 4. 3, sensor *Hall Effect* tipe IC A3144 menunjukkan batas transisi level tegangan logika yang sangat tegas dan konsisten terhadap perubahan jarak celah paparan medan magnet neodmium. Pada jarak pengujian 1,0 mm hingga 5,0 mm, medan magnet kutub selatan (*South*) memicu konduksi transistor keluaran internal sensor, sehingga tegangan keluaran (V_{out}) turun drastis ke kisaran nilai milivolt, yaitu rata-rata 0,0182 V (18,2 mV) pada jarak 1,0 mm dan naik perlahan hingga 0,0186 V (18,6 mV) pada jarak 5,0 mm. Nilai tegangan yang sangat mendekati 0 V ini secara mutlak diidentifikasi oleh pin GPIO interupsi ESP32 Master sebagai sinyal logika rendah (*LOW* / Logika 0), yang menandakan bahwa magnet penanda pada keranjang parkir terdeteksi dengan benar. Sebaliknya, saat jarak celah diperlebar menjadi 6,0 mm dan 7,0 mm, kerapatan fluks medan magnet yang mencapai sensor telah melemah dan berada di bawah ambang batas pemicuan (*magnetic release point* / B_{RP}). Akibatnya, transistor keluaran sensor kembali ke status non-konduktif dan tegangan pin ditarik ke atas (*pull-up*) ke rel tegangan logika mikrokontroler, menghasilkan tegangan keluaran terukur rata-rata sebesar 3,27 V pada jarak 6,0 mm dan 3,28 V pada jarak 7,0 mm. Tegangan ini dibaca secara stabil oleh ESP32 Master sebagai sinyal logika tinggi (*HIGH* / Logika 1). Perbedaan tegangan yang sangat kontras antara kondisi aktif (0,018 V) dan siaga (3,28 V) membuktikan bahwa sensor memiliki ambang jarak deteksi efektif maksimal pada $\leq 5,0$ mm.

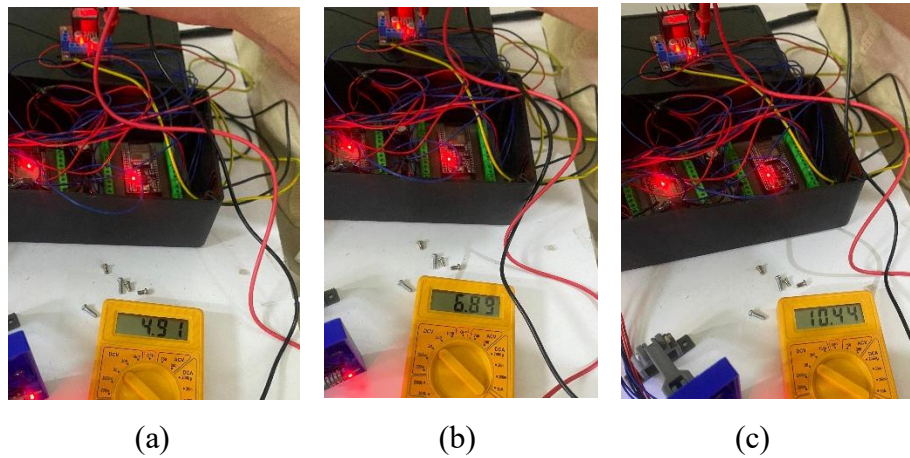
4. 2. 4. Pengujian Driver L298N dan Motor DC 12V

Dalam pengujian komponen Motor Driver L298N pada model *Smart Rotary Parking*, peneliti menguji berbagai nilai *value* yang terkait dengan pengendalian motor dinamo berbasis tegangan. Komponen motor dinamo yang digunakan memiliki spesifikasi 12 VDC. Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis hubungan antara sinyal kendali PWM dari mikrokontroler terhadap tegangan keluaran driver L298N, kecepatan putar motor DC gearbox JG25-370, serta durasi rotasi penuh satu siklus struktur *rotary parking*.



Gambar 4. 4 Pengukuran RPM motor (a) dengan PWM 128, (b) dengan PWM 160, dan (c) dengan PWM 255

Gambar 4. 4 memperlihatkan proses pengukuran kecepatan putar poros motor DC gearbox JG25-370 menggunakan alat *tachometer* DT-2234BL berdasarkan tiga variasi nilai sinyal modulasi lebar pulsa PWM. Pada Gambar 4. 4(a), pemberian sinyal PWM sebesar 128 (*duty cycle* 50,2%) menghasilkan kecepatan putar poros sebesar 14,3 RPM. Pada Gambar 4. 4(b), saat nilai PWM dinaikkan menjadi 160 (*duty cycle* 62,75%), kecepatan putar motor meningkat menjadi 17,2 RPM. Selanjutnya pada Gambar 4. 4(c), pengujian dengan nilai PWM penuh sebesar 255 (*duty cycle* 100%) menghasilkan kecepatan maksimal mencapai 33,0 RPM. Hasil pengukuran ini memperlihatkan bahwa peningkatan nilai PWM berbanding lurus terhadap peningkatan laju putaran mekanik sistem *rotary parking*. Selain pengukuran kecepatan putar mekanis, dilakukan pula verifikasi elektrik terhadap besaran tegangan keluaran (V_{out}) yang disuplai oleh modul *driver* motor L298N menuju terminal motor DC. Dokumentasi pengukuran nilai tegangan keluaran tersebut disajikan pada Gambar 4. 5.



Gambar 4. 5 Pengukuran Tegangan Motor (a) dengan PWM 128, (b) dengan PWM 160, dan (c) dengan PWM 255

Gambar 4. 5 mendokumentasikan hasil pembacaan tegangan keluaran terminal *driver* L298N menggunakan multimeter digital pada tiga tingkatan sinyal PWM yang identik dengan pengujian sebelumnya. Pada Gambar 4. 5(a), nilai PWM 128 menghasilkan tegangan terminal sebesar 4,91 VDC. Pada Gambar 4. 5(b), peningkatan PWM ke nilai 160 menaikkan tegangan suplai menjadi 6,89 VDC. Pada Gambar 4. 5(c), saat PWM mencapai nilai saturasi 255, tegangan keluaran terukur sebesar 10,44 VDC. Nilai tegangan 10,44 VDC pada kondisi *duty cycle* 100% ini membuktikan adanya *voltage drop* internal sekitar 1,42 V pada transistor bipolar modul L298N dari sumber catu daya 11,86 VDC. Rekapitulasi keseluruhan data pengujian pengaruh PWM terhadap tegangan dan kecepatan putar aktual disajikan pada Tabel 4. 4.

Tabel 4. 4 Pengujian Motor dan Driver

Nilai PWM	Duty Cycle (%)	V _{out} (V)	RPM Aktual	RPM Pengujian Ke-1	RPM Pengujian Ke-2	RPM Pengujian Ke-3	Rata - rata
64	25,10	2,81	0	0	0	0	0
128	50,20	4,91	12	14,3	9,0	15,6	12,96
160	62,75	6,90	17	17,1	17,2	16,6	16,97
255	100	10,44	35	28,4	33,0	31,6	31,00

Berdasarkan data pada Tabel 4. 4, kecepatan putar motor DC gearbox JG25-370 dan driver L298N yang dilakukan pada as poros keluaran menggunakan *tachometer* optik non-kontak. Pengujian dilakukan dengan menempelkan satu spot stiker berwarna hitam pada as *stainless steel* guna mengeliminasi pantulan atau *glare* dan menghindari pembacaan ganda. Hasil pengukuran memperlihatkan pola yang jelas antara peningkatan persentase sinyal kendali PWM, tegangan keluaran rata-rata driver (V_{out}), serta kecepatan putar mekanik poros. Pada pengujian awal dengan nilai PWM 64 (*duty cycle* 25,10%), tegangan yang keluar dari *driver* tercatat sebesar 2,81 V, namun poros motor masih belum bergerak sama sekali (0 RPM) di seluruh percobaan. Kondisi ini karena tegangan yang masuk masih terlalu kecil untuk menghasilkan torsi awal yang cukup kuat dalam melawan gesekan mekanik pada *gearboxs* motor.

Motor baru mulai berputar ketika nilai PWM dinaikkan menjadi 128 (*duty cycle* 50,20%) dengan suplai tegangan yang dihasilkan sebesar 4,91 V. Pada tahap ini, hasil pengukuran RPM sempat memperlihatkan sedikit fluktuasi di antara ketiga pengujian, yakni 14,3 RPM, 9,0 RPM, dan 15,6 RPM, yang kemungkinan dipengaruhi oleh perubahan posisi beban saat motor mulai jalan. Meskipun bervariasi, nilai rata-rata yang diperoleh adalah 12,96 RPM, di mana angka ini tergolong sangat dekat dan konsisten dengan target RPM aktual sebesar 12 RPM. Kestabilan putaran motor terlihat semakin baik pada pengujian PWM 160 (*duty cycle* 62,75%) dengan tegangan keluaran sebesar 6,90 V. Pengukuran pada ketiga percobaan menunjukkan angka yang sangat rapat, yaitu 17,1 RPM, 17,2 RPM, dan 16,6 RPM, sehingga menghasilkan rata-rata sebesar 16,97 RPM yang persis menyentuh nilai acuan aktual 17 RPM. Terakhir, pada pemberian nilai penuh PWM 255 (*duty cycle* 100%), tegangan tertinggi yang dialirkan mencapai 10,44 V dengan hasil putaran motor masing-masing 28,4 RPM, 33,0 RPM, dan 31,6 RPM. Nilai rata-rata pada titik maksimal ini berada di angka 31,00 RPM, sedikit di bawah target awal 35 RPM akibat adanya hambatan inersia dan beban mekanik sistem rotary saat dipacu ke kecepatan puncak. Secara keseluruhan, pengujian ini membuktikan bahwa pengaturan kecepatan motor menggunakan metode PWM berjalan secara linier dan bekerja sesuai rancangan.

4.2.5. Pengujian Modul ESP32-CAM (Image Processing)

Pengujian pada modul ESP32-CAM difokuskan untuk mengevaluasi keandalan sistem pengolahan citra (*image processing*) dalam mengidentifikasi ketersediaan ruang pada slot parkir secara visual. Fitur ini merupakan inti dari kebaruan rancang bangun, di mana pengambilan keputusan untuk mengizinkan kendaraan masuk sangat bergantung pada akurasi tangkapan kamera. ESP32-CAM bertugas mendeteksi apakah slot benar-benar kosong atau sudah ada kendaraan di dalamnya, kemudian mengirimkan sinyal karakter ('K' untuk kosong, 'T' untuk terisi) ke mikrokontroler *Master*. Pengujian dilakukan dengan meletakkan *prototype* mobil pada slot parkir di bawah berbagai kondisi pencahayaan untuk melihat tingkat akurasi deteksi visual:



```

43 | html += "<title>Kalibrasi Posisi Kamera</title>";
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'AI Thinker ESP32-CAM' on 'COM5')
20:57:39.357 -> T
20:57:39.668 -> T
20:57:39.944 -> T
20:57:40.289 -> T
20:57:40.568 -> T
20:57:40.844 -> T
20:57:41.145 -> T
20:57:41.471 -> T

```

Gambar 4. 6 Hasil pengiriman data ke ESP Master

Gambar 4. 6 memperlihatkan hasil keluaran data serial pada antarmuka *Serial Monitor* saat modul ESP32-CAM mengirimkan karakter status hasil pemrosesan citra ke mikrokontroler ESP32 Master. Pada tampilan tersebut, modul kamera mentransmisikan karakter biner status secara kontinu dan *real-time* disertai penanda waktu (*timestamp*). Terlihat transmisi karakter 'T' (*Terisi*) yang dikirimkan berulang kali, membuktikan bahwa algoritma *inverted thresholding* dan analisis area ROI berhasil mengidentifikasi keberadaan rangka kendaraan miniatur di dalam keranjang parkir. Pengiriman karakter tunggal berbasis serial UART ini berjalan cepat tanpa *delay*, sehingga ESP32 Master dapat secara langsung memproses data tersebut sebagai acuan logika untuk menginstruksikan motor melanjutkan putaran mencari keranjang berikutnya yang berstatus 'K' (*Kosong*).

Tabel 4. 5 Pengujian Deteksi Visual Cahaya ESP32-CAM

Kondisi Fisik Slot	Kondisi Ruangan	Intensitas Cahaya (lx)	Tegangan Sinyal (V)	Logika Sinyal
Kosong	Satu lampu menyala	3.14	0	K
Kosong	Dua lampu menyala	5.49	0	K
Kosong	Tiga lampu menyala	10.49	0	K
Kosong	Empat lampu menyala	41.9	0	K
Terdapat Kendaraan	Satu lampu menyala	3.69	3.33	T
Terdapat Kendaraan	Dua lampu menyala	7.22	3.33	T
Terdapat Kendaraan	Tiga lampu menyala	11.00	3.33	T
Terdapat Kendaraan	Empat lampu menyala	42.73	3.33	T

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4. 5, Pengujian dilakukan pada lingkungan tertutup *indoor* dengan menggunakan *lux* meter pada aplikasi handphone dengan pengaturan *auto*. Pengujian dilakukan dalam ruangan indoor dengan menyalakan mulai dari semua lampu mati sampai nyala keempatnya. Didapatkan hasil rentang intensitas cahaya mulai dari 3,14 lx (kondisi redup dengan satu lampu menyala) hingga 42,73 lx (kondisi terang dengan empat lampu menyala). Pada pengujian kondisi fisik slot kosong di seluruh tingkatan pencahayaan (3,14 lx hingga 41,9 lx), algoritma pemrosesan citra tidak mendeteksi adanya akumulasi objek gelap di area ROI. Kondisi ini menyebabkan pin transmisi keluaran menghasilkan tegangan sinyal sebesar 0 V yang diterjemahkan sebagai sinyal logika rendah (*LOW* / Logika 0), serta secara kontinu mengirimkan karakter status 'K' (Kosong) ke mikrokontroler ESP32 Master tanpa menghasilkan kesalahan pembacaan.

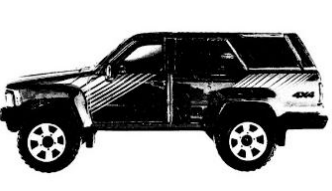
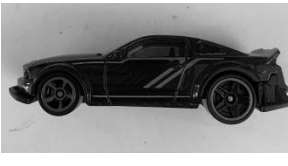
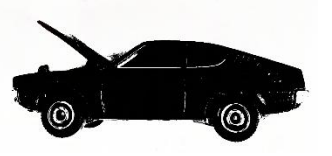
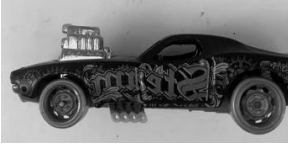
Sebaliknya, ketika miniatur mobil uji diletakkan pada platform keranjang di bawah variasi pencahayaan yang sama (intensitas 3,69 lx hingga 42,73 lx), rangka

kendaraan berhasil teridentifikasi sebagai objek gelap yang menutupi area ROI. Hal ini memicu ESP32-CAM untuk membangkitkan tegangan sinyal keluaran sebesar 3,33 V (level logika tinggi / *HIGH* / Logika 1) dan mentransmisikan karakter status serial 'T' (Terisi) ke ESP32 Master. Level tegangan 3,33 V yang dihasilkan sangat presisi sesuai dengan rel tegangan logika standar mikrokontroler ESP32, sehingga tidak menimbulkan kebingungan pembacaan bit logika pada pin masukan Master.

Stabilitas pembacaan status pada pengujian ini membuktikan bahwa kombinasi metode binerisasi *inverted thresholding* (BATAS_THRESHOLD = 170) dan batas toleransi luasan piksel (BATAS_PERSentase = 50.0%) memiliki tingkat kesensitifan yang andal terhadap fluktuasi intensitas cahaya ruangan di atas 3 lx. Penggunaan latar belakang dasar putih pada lantai keranjang akrilik memberikan kontras optik yang tegas terhadap penampang bodi mobil, sehingga proses diskriminasi status ketersediaan ruang parkir melalui sinyal diskrit 0 V (karakter 'K') dan 3,33 V (karakter 'T') dapat berjalan cepat secara *real-time* tanpa mengalami (*delay*) komunikasi.

Selanjutnya adalah pengujian terhadap warna kendaraan di dalam slot dengan kondisi cahaya yang cukup. Pada prototipe ini, metode pengolahan citra yang digunakan adalah merubah gambar warna menjadi Hitam Putih (*Grayscale*) lalu menerapkan *Thresholding*. Kamera diprogram untuk mencari kumpulan "piksel gelap" sebagai penanda adanya mobil. Oleh karena itu, pengujian kedua ini sangat penting untuk membuktikan apakah sistem bisa mengenali semua jenis warna mobil. Pengujian dilakukan di ruangan terang dengan mengganti-ganti warna mobil uji coba. Berikut adalah warna dan bentuk mobil setelah diproses menggunakan metode *grayscale* dan juga *thresholding*

Tabel 4. 6 Hasil gambar dari metode Grayscale dan Thresholding

No	Gambar asli	Setelah proses Grayscale	Setelah proses Thresholding
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Berdasarkan hasil pengujian visual pada Tabel 4.6, proses deteksi ketersediaan slot diawali dengan mengonversi citra berwarna asli (*RGB*) menjadi citra skala abu-abu (*Grayscale*) guna memangkas ukuran data piksel agar sesuai dengan keterbatasan memori ESP32-CAM. Citra abu-abu tersebut kemudian melalui proses binerisasi menggunakan metode *Inverted Thresholding* dengan parameter $BATAS_THRESHOLD = 170$. Melalui metode ini, seluruh titik piksel dengan tingkat kecerahan di bawah nilai 170 secara otomatis diklasifikasikan sebagai objek gelap (representasi fisik bodi mobil), sedangkan piksel bernilai 170 ke atas dianggap sebagai warna latar putih dari lantai keranjang parkir.

Hasil penerapan tahapan metode ini menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan bergantung pada warna bodi kendaraan. Pada kendaraan dengan warna reguler dan pekat, seperti Mobil 1 (Biru), Mobil 2 (Merah), Mobil 3 (Hijau Tua), Mobil 4 (Oranye), dan Mobil 6 (Hitam Motif), proses *grayscale* menghasilkan intensitas abu-abu yang cukup gelap. Saat diterapkan ambang batas *thresholding*, hampir seluruh penampang bodi mobil sukses terkonversi menjadi siluet piksel hitam pekat yang sangat kontras dengan latar belakang. Karena kumpulan piksel gelap ini menutupi lebih dari 50% area kotak pembacaan (*Region of Interest / ROI*), sistem secara konsisten mengklasifikasikan slot dalam keadaan terisi dan berhasil mengirimkan karakter status 'T' ke ESP32 Master dengan tingkat keberhasilan 100%.

Sebaliknya, pengujian pada Mobil 5 yang didominasi warna putih patroli memperlihatkan keterbatasan dari metode *thresholding* sederhana ini. Bodi mobil yang berwarna putih memiliki tingkat pemantulan cahaya yang sangat tinggi, sehingga pada tahap *grayscale* nilai intensitas pikselnya hampir identik dengan warna putih lantai keranjang. Akibatnya, saat diproses ke tahap *thresholding*, sebagian besar bodi utama mobil justru terkonversi menjadi warna putih (dianggap lantai kosong) dan hanya menyisakan area ban, kaca jendela, serta garis motif biru yang menjadi piksel gelap. Karena luasan piksel gelap yang tersisa sering kali berada di bawah batas syarat 50% dari total area ROI, sistem menjadi rentan menghasilkan pembacaan palsu dan secara keliru mengirimkan status 'K' (Kosong) padahal di dalam keranjang terdapat kendaraan.

Pengujian terhadap variasi warna bodi kendaraan dilakukan untuk menguji sejauh mana algoritma pengolahan citra pada ESP32-CAM mampu membedakan keberadaan objek terhadap latar belakang lantai keranjang parkir. Pada pengujian ini, kode program di dalam mikrokontroler ESP32-CAM dirancang khusus agar dapat mengekstrak data kuantitatif dari area *Region of Interest* (ROI) secara *real-time*. Parameter kalkulasi seperti nilai *grayscale* rata-rata, persentase luas akumulasi piksel gelap, logika keluaran, dan karakter keputusan status kemudian dikirimkan ke komputer pengembang melalui antarmuka serial UART untuk ditampilkan. Tampilan keluaran data telemetri pembacaan visual pada antarmuka *Serial Monitor* tersebut disajikan pada Gambar 4. 7.

```

20:33:51.638 -> ===== PENGUJIAN VISUAL =====
20:33:51.638 -> Rata-rata Grayscale (0-255)      : 148.15
20:33:51.638 -> Kepadatan Piksel Gelap (%)       : 53.49%
20:33:51.638 -> Logika Sinyal Terkirim          : 1
20:33:51.638 -> Karakter Status UART           : T
20:33:51.638 -> =====

```

Gambar 4. 7 Tampilan serial monitor Nilai pengujian

Gambar 4. 7 memperlihatkan baris data *real-time* yang ditampilkan pada antarmuka *Serial Monitor* Arduino IDE melalui kode program pemrosesan citra ESP32-CAM. Pada pengujian salah satu spesimen kendaraan (spesimen mobil coklat), program secara otomatis mengekstrak dan menampilkan empat parameter kalkulasi utama, yaitu: rata-rata nilai intensitas *grayscale* sebesar 148,15 dari rentang skala 0–255, persentase kepadatan piksel gelap sebesar 53,49% di dalam area kotak *Region of Interest* (ROI), pengiriman level logika digital 1 (HIGH), serta pengiriman karakter biner status UART berupa huruf 'T' (*Terisi*). Pengujian kemudian diperluas ke berbagai variasi warna bodi kendaraan miniatur lainnya, dengan data rekapitulasi disajikan pada Tabel 4. 7.

Tabel 4. 7 Pengujian warna pada kendaraan

Warna Kendaraan	Nilai Grayscale	Kepadatan Piksel Gelap (%)	Tegangan Sinyal V_{out} (V)	Logika Sinyal	Status
Hijau Tua	145.22	54.69	3.33	1	“T”
Biru tua	141.31	58.76	3.33	1	“T”
Merah	142.18	56.85	3.33	1	“T”
Kuning	145.62	54.44	3.33	1	“T”
Coklat	148.15	53.49	3.33	1	“T”

Putih	151.16	51.86	3.33	1	“T”
Hitam	135.15	62.36	3.33	1	“T”

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4. 7, ESP32-CAM menunjukkan respon pembacaan yang konsisten terhadap tujuh variasi warna kendaraan miniatur dengan karakteristik penyerapan dan pemantulan cahaya yang berbeda. Nilai intensitas rata-rata *grayscale* yang diekstrak berada pada rentang 135,15 hingga 151,16, di mana seluruh nilai tersebut berada di bawah parameter batas ambang binerisasi $BATAS_THRESHOLD = 170$. Hal ini menyebabkan bodi setiap miniatur mobil uji berhasil diklasifikasikan sebagai kumpulan objek piksel gelap (bernilai 0) yang kontras terhadap latar belakang lantai keranjang. Kendaraan berwarna Hitam menghasilkan nilai intensitas *grayscale* paling rendah, yaitu 135,15, dengan kepadatan piksel gelap tertinggi mencapai 62,36%. Tingginya persentase ini disebabkan oleh sifat pigmen warna hitam yang menyerap hampir seluruh spektrum cahaya, sehingga mempermudah proses binerisasi siluet kendaraan secara pekat. Sebaliknya, kendaraan berwarna Putih menghasilkan nilai intensitas *grayscale* paling terang yaitu 151,16 dan kepadatan piksel gelap terendah sebesar 51,86%. Nilai 51,86% ini tergolong berada di batas marjinal atau sangat mendekati batas toleransi minimum sistem ($BATAS_PERSENTASE = 50.0\%$). Kondisi ini membuktikan penjelasan teknis pada batasan masalah, di mana bodi mobil putih memiliki reflektivitas tinggi yang nilainya mendekati intensitas latar belakang akrilik putih, sehingga hanya menyisakan area bayangan, ban, dan kaca jendela sebagai penentu akumulasi piksel gelap.

Selain faktor cahaya dan warna, tingkat akurasi kamera ESP32-CAM sangat bergantung pada penentuan batas area pembacaan atau *Region of Interest* (ROI). Karena resolusi gambar yang digunakan adalah QQVGA (160 x 120 piksel), sistem harus diprogram agar hanya memproses piksel yang berada tepat di area lantai keranjang parkir, serta mengabaikan area pinggiran seperti tiang penyangga atau latar belakang di luar alat. Untuk mendapatkan koordinat yang pas, dilakukan pengujian kalibrasi dengan menggeser titik awal sumbu X dan Y, serta mengatur lebar dan tinggi kotak pembacaan (ROI).

Tabel 4. 8 Hasil dari metode ROI

Nilai ROI	Kondisi Kotak ROI	Hasil Pembacaan Nilai
X START = 40 Y START = 30 ROI WIDTH = 80 ROI HEIGHT = 60		Area terlalu kecil sehingga tidak akurat karena kamera hanya membaca sebagian benda
X START = 20 Y START = 20 ROI WIDTH = 120 ROI HEIGHT = 65		Area sudah cukup untuk satu bodi mobil, hasil cukup akurat karena hampir mencakup seluruh bodi mobil

Berdasarkan pengujian kalibrasi visual tersebut, didapatkan nilai koordinat ROI yang paling optimal untuk prototipe ini, yaitu dengan menggeser titik awal X dan Y, serta membatasi lebar (*width*) dan tinggi (*height*) kotak pembacaan agar pas membingkai mobil miniatur.

Dengan membatasi area pembacaan (ROI) ini, beban kerja otak (*CPU*) pada ESP32-CAM menjadi jauh lebih ringan karena tidak perlu memproses keseluruhan 19.200 piksel gambar, melainkan hanya memproses piksel yang berada di dalam kotak merah saja. Hal ini membuat pengiriman data karakter 'K' atau 'T' ke ESP32 Master menjadi sangat cepat tanpa *lag*.

Setelah menentukan koordinat *Region of Interest* (ROI), langkah krusial berikutnya dalam pemrosesan citra ESP32 CAM adalah menentukan parameter pengambilan keputusan melalui variabel `BATAS_THRESHOLD` dan `BATAS_PERSENTASE`. Mengingat kamera dikonfigurasi dalam format hitam putih (*Grayscale*), setiap titik piksel memiliki nilai kecerahan mulai dari 0 (hitam pekat) hingga 255 (putih terang). Variabel `BATAS_THRESHOLD` yang diatur pada angka 170 berfungsi sebagai garis batas pemisah antara *background* putih dengan bodi mobil yang cenderung lebih gelap. Berdasarkan pengujian, apabila nilai suatu piksel berada di bawah 170, program akan mencatatnya sebagai bagian

dari bodi mobil. Sebaliknya, nilai piksel 170 ke atas akan langsung diabaikan dan dianggap sebagai lantai keranjang. Penentuan angka 170 ini merupakan hasil kalibrasi yang paling optimal, sebab jika diatur terlalu rendah (misalnya 50), kamera hanya akan mampu mengenali warna hitam pekat, sehingga mobil dengan warna gelap lain seperti biru atau merah tua berisiko gagal terdeteksi. Namun, jika batas ini diatur terlalu tinggi (misalnya 220), bayangan tipis pada lantai keranjang bisa dengan mudah keliru dianggap sebagai mobil.

Setelah kamera berhasil mengklasifikasikan dan menghitung jumlah piksel gelap di dalam kotak ROI, sistem tidak serta-merta langsung memutuskan bahwa objek tersebut adalah sebuah kendaraan. Di sinilah variabel `BATAS_PERSENTASE` yang diatur pada angka 50.0 memegang peranan sebagai syarat validasi akhir. Angka ini mengharuskan sekumpulan piksel gelap tersebut untuk menutupi minimal setengah (50%) dari total luas area kotak ROI agar sah diakui sebagai sebuah mobil. Filter toleransi ini terbukti sangat ampuh untuk mencegah terjadinya pembacaan palsu (*false positive*). Sebagai contoh, jika terdapat gangguan kecil seperti bayangan orang lewat, pantulan kabel, atau kotoran debu di dalam keranjang, piksel gelap yang dihasilkan umumnya hanya memakan sekitar 10% hingga 20% area pembacaan. Karena luasannya kurang dari 50%, sistem dengan cerdas akan mengabaikan gangguan tersebut dan tetap mengirimkan status bahwa slot masih Kosong ('K'). Sebaliknya, ketika sebuah mobil benar-benar masuk, bodinya pasti akan menutupi lebih dari 50% area kotak ROI, sehingga sistem dapat langsung mengirimkan status Terisi ('T') ke mikrokontroler ESP32 Master secara meyakinkan.

4.3 Pengujian Komunikasi Serial Antar-Mikrokontroler

Pada alat *Smart Rotary Parking* ini, tugas tidak dibebankan hanya pada satu "otak" saja, melainkan dibagi ke tiga mikrokontroler sekaligus, yaitu ESP32 Master, ESP32 Slave, dan ESP32-CAM. Pembagian tugas ini dilakukan agar sistem tidak mengalami *lag* (lambat) saat harus mengurus sensor, memutar motor, dan memproses gambar secara bersamaan.

Pengujian komunikasi serial ini bertujuan untuk membuktikan bahwa pertukaran data antar-mikrokontroler melalui kabel TX dan RX dapat berjalan

dengan lancar tanpa adanya *delay* (keterlambatan) atau data yang hilang (*data loss/error*).

4.3.1 Pengujian Komunikasi Serial ESP32 Cam ke ESP32 Master

Jalur komunikasi ini digunakan oleh kamera (ESP32-CAM) untuk melaporkan hasil pembacaan kondisi slot parkir kepada Master. Berbeda dengan komunikasi ke Slave, jalur ini menggunakan kecepatan yang lebih tinggi, yaitu 115200 bps, agar data hasil olah citra gambar bisa dikirim secepat mungkin. Kamera hanya mengirimkan satu huruf tunggal sebagai kode status keranjang.

Tabel 4. 9 Hasil pengujian komunikasi ESP32 Cam ke ESP Master

No	Data yang dikirim kamera	Tegangan Serial TX (V)	Aksi oleh ESP32 Master
1	20:55:46.362 -> T	3.33	Master mengabaikan keranjang tersebut dan membiarkan motor terus berputar mencari slot lain.
	20:55:46.368 -> T		
	20:55:46.368 -> T		
	20:55:46.368 -> T		
2	20:57:41.471 -> T	3.32	Master mengabaikan keranjang tersebut dan membiarkan motor terus berputar mencari slot lain.
	20:57:42.939 -> T		
	20:58:03.993 -> T		
3	20:45:23.000 -> K	3.33	Master bersiap mengirim perintah "MOTOR_OFF" saat posisi keranjang sudah pas dengan pintu.
	20:45:23.006 -> K		
	20:45:23.006 -> K		
	20:45:23.006 -> K		
4	20:41:52.000 -> K	3.33	Master bersiap mengirim perintah "MOTOR_OFF" saat posisi keranjang sudah pas dengan pintu.
	20:41:52.006 -> K		
	20:41:52.006 -> K		
	20:41:52.006 -> K		

Berdasarkan data pengukuran parameter fisis pada Tabel 4. 10, pertukaran data serial antara modul visi ESP32-CAM dan ESP32 Master beroperasi secara konsisten pada rel tegangan logika standar 3,33 VDC. Pengukuran pada jalur transmisi data serial UART (Pin U0TXD ESP32-CAM ke Pin GPIO 26 Master) menunjukkan nilai tegangan yang konstan sebesar 3,33 VDC, baik saat kamera mengirimkan karakter 'T' (status slot terisi) maupun karakter 'K' (status slot

Nilai 3,33 VDC ini menunjukkan bahwa jalur komunikasi beroperasi penuh pada level tegangan logika tinggi (*HIGH*) standar ESP32. Transmisi paket karakter teks yang berlangsung sangat singkat pada kecepatan 9600 bps tidak menyebabkan penurunan tegangan yang terbaca oleh instrumen, membuktikan bahwa jalur kabel serial memiliki impedansi rendah dan bebas dari gangguan induksi medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh motor penggerak.

4.4 Analisis Efek Inersia dan Jeda Penstabilan Mekanik (Settle Time)

Pada pengujian awal sistem mekanik *rotary parking*, ditemukan kendala teknis berupa adanya gaya inersia atau momentum sisa saat motor DC dihentikan. Ketika sensor *Hall Effect* mendeteksi magnet dan mikrokontroler Master mengirimkan perintah "MOTOR_OFF" ke Slave, dinamo memang langsung memutus daya secara mendadak. Namun, karena keranjang parkir memiliki beban fisik dan terpasang dengan sistem engsel gantung bebas, keranjang tersebut tidak langsung diam seketika, melainkan masih mengalami ayunan bolak-balik selama beberapa saat sebelum benar-benar stabil.

Fenomena ayunan keranjang ini berdampak langsung terhadap kinerja kamera ESP32-CAM. Jika kamera langsung mengambil gambar tepat di saat motor dimatikan, gambar yang ditangkap akan mengalami efek buram atau goyang (*motion blur*). Akibatnya, rantai akrilik keranjang yang seharusnya terang dan kosong justru terbaca gelap dan berbayang oleh algoritma kamera, sehingga sistem keliru menyimpulkan bahwa slot tersebut terisi (mengirim status 'T' padahal aslinya kosong).

Untuk mengatasi masalah tersebut, diterapkan metode jeda penstabilan mekanik (*Settle Time*). Pada program Master, ditambahkan jeda waktu tunggu selama 1,5 detik menggunakan fungsi `delay(1500)` sesaat setelah motor dihentikan. Waktu 1,5 detik ini memberikan kesempatan bagi keranjang untuk berhenti mengayun dan berada dalam kondisi diam sempurna (*statis*) sebelum kamera mulai memindai. Selain itu, program juga ditambahkan baris pembersih memori antrean serial (`while(Serial1.available()) Serial1.read();`) untuk membuang data gambar buram yang sempat terkirim saat proses pengereman berlangsung.

4.5 Pengujian Integrasi Sistem Keseluruhan

Pengujian integrasi dilakukan untuk memvalidasi bahwa seluruh komponen (sensor *Hall Effect*, modul visi ESP32-CAM, ESP32 Master, ESP32 Slave, aktuator motor DC *gearbox*, dan motor servo gerbang) dapat bekerja berurutan secara otomatis tanpa ada kegagalan komunikasi atau tabrakan data. Skenario pengujian dibagi menjadi dua siklus utama: siklus penyimpanan (*Tap-in*) dan siklus pengambilan (*Tap-out*).

4.5.1 Pengujian Siklus Penyimpanan (Tap-in)

Pengujian ini mensimulasikan alur kerja saat pengguna datang untuk memarkirkan kendaraannya. Master mencari slot kosong secara visual menggunakan kamera, memposisikan keranjang tepat di bawah, lalu membuka palang gerbang.

Tabel 4. 11 Pengujian Tahapan Tap in kendaraan

Tahapan	Sinyal Input	Sinyal Output	Durasi (S)
Permintaan Masuk	SPI (UID Kartu)	Serial TX2 (3.33V)	243 (ms)
<i>Counting</i>	V_{in} <i>Hall Effect</i> (0.018V) LOW	$\Delta x = +1$	0
Jeda Penstabilan	<i>Hall effect</i> (0.018V) LOW	Tegangan Motor 0.00 V	1.50
Pemrosesan Citra	Kepadatan Piksel ROI: < 50%	Serial UART TX 3,33 V	0.30
Akses Gerbang Masuk	3.33V ke ESP Master	PWM Servo 90°	5.00

Berdasarkan data pada Tabel 4. 11, pengujian tahapan proses penyimpanan kendaraan (*Tap-in*) membuktikan bahwa sistem kendali sekuensial bekerja secara sinkron dan terukur pada setiap transisi masukan hingga keluaran. Tahap pertama diawali dengan proses Permintaan Masuk ketika modul RFID membaca identitas kartu pengguna melalui jalur komunikasi SPI, yang langsung direspons oleh ESP32 Master dengan memberikan sinyal serial TX2 pada level tegangan logika tinggi 3,33 V untuk menginstruksikan motor penggerak *rotary* mulai berputar. Pada tahap *Counting*, perputaran keranjang parkir dipantau secara langsung oleh sensor *Hall*

Effect. Saat magnet melintas tepat di depan sensor, tegangan keluaran sensor terbaca turun menjadi 0,018 V (logika *LOW*), yang secara instan diproses sebagai penambahan satu satuan langkah posisi platform ($\Delta x = +1$) tanpa adanya delay.

Selanjutnya, saat keranjang target tiba di titik akses bawah, pemicuan sinyal *LOW* (0,018 V) dari sensor *Hall Effect* mengaktifkan tahap Jeda Penstabilan. Pada tahap ini, tegangan kerja motor dinamo diputus menjadi 0,00 V disertai penerapan waktu jeda penstabilan mekanik selama 1,50 detik. Jeda waktu ini berfungsi untuk meredam osilasi ayunan inersia dari keranjang agar berada dalam kondisi diam sempurna sebelum kamera mulai mengambil gambar. Setelah struktur keranjang stabil, sistem melanjutkan ke tahap Pemrosesan Citra oleh ESP32-CAM dengan durasi komputasi selama 0,30 detik. Algoritma mendeteksi bahwa kepadatan piksel objek gelap pada area ROI berada di bawah batas syarat ($< 50\%$), yang menandakan bahwa ruang lantai keranjang dalam keadaan kosong. Hasil verifikasi visual ini ditransmisikan melalui jalur serial UART TX pada tegangan 3,33 V menuju ESP32 Master. Sebagai penutup siklus penyimpanan, penerimaan sinyal validasi bertegangan 3,33 V pada ESP32 Master memicu tahap Akses Gerbang Masuk, di mana mikrokontroler mengirimkan pulsa kendali PWM untuk menggerakkan motor servo membuka palang pintu ke sudut 90° serta menahannya selama 5 detik agar kendaraan miniatur dapat diparkirkan ke dalam keranjang.

4.5.2 Pengujian Siklus Pengambilan (Tap-out)

Pengujian ini mensimulasikan proses penjemputan kendaraan yang sudah terparkir. Pada siklus ini, sistem mengabaikan pembacaan visual kamera dan murni mengandalkan ketepatan perhitungan sensor *Hall Effect* untuk memanggil slot target ke posisi bawah.

Tabel 4. 12 Pengujian Tahapan Tap out kendaraan

Tahapan	Sinyal Input	Sinyal Output	Durasi (s)
Permintaan Keluar	SPI (UID Kartu Terdaftar)	Komputasi Selisih Langkah (Δx)	243 (ms)
Putaran Menuju Target	Serial TX2 MOTOR_ON (3,33 V)	PWM Driver (Tegangan Motor 11,86 V)	2.52

Target Tercapai	V_{in} Hall Effect (0,018 V) LOW	Serial TX2 MOTOR_OFF (Tegangan Motor 0,00 V)	0.43
Akses Gerbang Masuk	Serial TX2 GATE_OUT (3,33 V)	PWM Servo 90°	5.00

Berdasarkan data parameter fisis pada Tabel 4. 12, pengujian tahapan sekuensial proses pengambilan kendaraan (*Tap-out*) membuktikan bahwa sistem dapat mengeksekusi pemanggilan slot secara mandiri dan presisi berbasis kendali posisi tanpa memerlukan verifikasi visual kamera. Tahap pertama diawali dengan proses permintaan keluar, ketika pengguna melakukan *tap* kartu RFID terdaftar pada modul pembaca. ESP32 Master membaca UID kartu tersebut melalui antarmuka SPI, mencocokkannya dengan memori *database*, dan secara instan melakukan komputasi selisih langkah perpindahan (Δx) menuju titik akses keluar. Setelah target perpindahan ditentukan, sistem melanjutkan ke tahap Putaran Menuju Target. ESP32 Master membangkitkan instruksi serial MOTOR_ON pada pin TX2 dengan level tegangan logika tinggi 3,33 V menuju ESP32 Slave. Sinyal kendali ini diteruskan oleh Slave dalam bentuk sinyal PWM ke modul *driver* L298N untuk mengalirkan tegangan kerja sebesar 11,86 VDC ke motor DC gearbox JG25-370. Motor berputar menggerakkan struktur *rotary* menuju posisi slot target dengan durasi mekanik terukur sebesar 2,52 detik per langkah perpindahan.

Ketika keranjang yang dituju telah mencapai bibir gerbang keluar, medan magnet neodmium pada rangka keranjang memicu sensor *Hall Effect* sehingga tegangannya turun drastis ke level 0,018 V (logika *LOW*). Terjadinya transisi sinyal ini menandai tahap Target Tercapai, di mana mikrokontroler segera mengirimkan perintah serial MOTOR_OFF melalui pin TX2 untuk memutus tegangan suplai motor menjadi 0,00 V. Seluruh proses deteksi magnet hingga pemutusan arus motor berlangsung sangat cepat dengan durasi respons hanya 0,43 detik, sehingga keranjang berhenti secara presisi tanpa mengalami kelebihan langkah putar (*overshoot*). Siklus pengambilan diakhiri dengan tahap Akses Gerbang Keluar saat ESP32 Master mentransmisikan instruksi GATE_OUT pada tegangan serial 3,33 V ke ESP32 Slave. Sinyal ini memicu pembangkitan pulsa PWM untuk

menggerakkan motor servo palang keluar ke sudut 90° dan menahannya selama 5,00 detik agar miniatur kendaraan dapat dikeluarkan dari keranjang parkir dengan aman. Keterpaduan respon sinyal logika 3,33 V, transisi tegangan sensor 0,018 V, serta ketepatan pengereman motor membuktikan bahwa mekanisme kendali sekuensial siklus *Tap-out* bekerja stabil, terukur, dan berulang.

4.5.3 Pengujian Kinerja Sistem Berdasarkan Skenario Operasi

Pengujian kinerja berbasis skenario operasional ini dilakukan untuk melihat langsung bagaimana respon mekanik, akurasi sensor posisi, dan keandalan kamera ESP32-CAM bekerja ketika menghadapi kondisi parkir yang sebenarnya di lapangan. Melalui pengujian ini, kita dapat mengetahui seberapa cepat dan tepat alat dalam memindahkan keranjang, mendeteksi ketersediaan ruang, hingga membuka palang gerbang secara otomatis. Pencatatan waktu kerja alat diukur langsung menggunakan *stopwatch*, dimulai dari saat sistem menerima perintah kerja hingga motor servo selesai membuka palang gerbang ke sudut 90 derajat. Pengujian ini dibagi menjadi dua bagian skenario utama, yaitu alur penyimpanan kendaraan (*Tap-in*) dan alur penjemputan atau pengambilan kendaraan (*Tap-out*).

Pada siklus penyimpanan, pengujian difokuskan untuk melihat perilaku alat saat mencari slot kosong yang letaknya berpindah-pindah. Pengujian ini menggunakan 5 variasi kondisi awal dari total 5 slot aktif yang ada pada purwarupa. Ketika sistem mulai bekerja, motor *rotary* akan membawa keranjang parkir satu per satu ke titik bawah. Di titik henti tersebut, sensor *Hall Effect* mendeteksi magnet penanda, motor dihentikan sementara, dan kamera ESP32-CAM akan memindai isi keranjang sebelum memutuskan apakah keranjang tersebut siap diisi atau harus memutar keranjang berikutnya.

Dalam menganalisis pergerakan mekanik rotary, analisis data pada bab ini merujuk pada konsep kinematika perpindahan posisi yang telah dirumuskan pada Persamaan 2.1 di Bab II. Parameter perpindahan langkah (Δx) merepresentasikan seberapa banyak jumlah pulsa magnetik yang harus dihitung oleh sensor *Hall Effect* sebelum mikrokontroler memutus arus motor penggerak. Nilai Δx ini diperoleh dari selisih posisi fisik antara nomor slot yang menjadi target tujuan (x_2) dengan nomor slot awal yang saat itu sedang berada di depan pintu akses (x_1). Serta dengan visual

pergerakan dan juga posisi seperti gambar yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Berikut adalah hasil pengujian dari beberapa skenario yang dipakai, mulai dari skenario *Tap in* sampai *Tap out*. Durasi rotary adalah waktu (s) yang dibutuhkan proses rotary dari slot di posisi paling bawah (x_2) hingga ke posisi yg diinginkan (x_1). Total durasi keseluruhan adalah waktu (s) yg dibutuhkan mulai dari proses *Tap in* / *Tap out* hingga *gate* tertutup kembali.

Tabel 4. 13 Percobaan pertama skenario *Tap in* Berurutan

No	Skenario Pengujian	Kondisi pada Slot	Perpindahan Slot ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Hasil deteksi kamera	Durasi rotary (s)
1	Slot Langsung Tersedia	Semua slot kosong	0	Mendeteksi slot kosong	0
2	Slot Bergeser 1 Langkah	Slot 1 Terisi, Slot 2-5 Kosong	1	Slot 1 terdeteksi terisi, slot 2 terdeteksi kosong	2,74
3	Slot Bergeser 2 Langkah	Slot 1-2 terisi, slot 3-5 kosong	2	Slot 1-2 terdeteksi terisi, slot 3 terdeteksi kosong	6,52
4	Slot Bergeser 3 Langkah	Slot 1-3 terisi, slot 4-5 kosong	3	Slot 1-3 terdeteksi terisi, slot 3 terdeteksi kosong	10,88
5	Slot Terjauh Tersedia	Slot 1-4 terisi, slot 5 kosong	4	Slot 1-4 terdeteksi terisi, slot 5 terdeteksi kosong	14,77
6	Kondisi Parkir Penuh	Seluruh Slot (1 s.d. 5) Terisi Penuh	Tidak ada	Tidak ada	0

Berdasarkan data pengujian pertama pada Tabel 4.13, lama perputaran motor DC terbukti berbanding lurus dengan nilai perpindahan langkah slot (Δx).

Saat seluruh keranjang masih kosong, posisi awal sudah sesuai sehingga nilai perpindahan adalah 0 langkah dan motor tidak perlu berputar (0,00 detik), meskipun sistem tetap membutuhkan total waktu dasar 9,65 detik untuk membaca kartu RFID, memproses citra visual, dan membuka palang gerbang. Begitu keranjang terisi secara bertahap, durasi putaran dinamo meningkat secara teratur mengikuti pertambahan nilai Δx , yaitu tercatat 2,74 detik pada perpindahan 1 langkah dengan total waktu 8,97 detik, meningkat menjadi 6,52 detik pada 2 langkah, 10,88 detik pada 3 langkah, hingga mencapai waktu putar terlama 14,77 detik pada perpindahan 4 langkah dengan total siklus 21,80 detik. Adapun pada kondisi parkir penuh, sistem langsung mencatat waktu 0,00 detik karena mikrokontroler Master secara otomatis menolak akses masuk berdasarkan data memori tanpa mengaktifkan putaran motor maupun modul kamera.

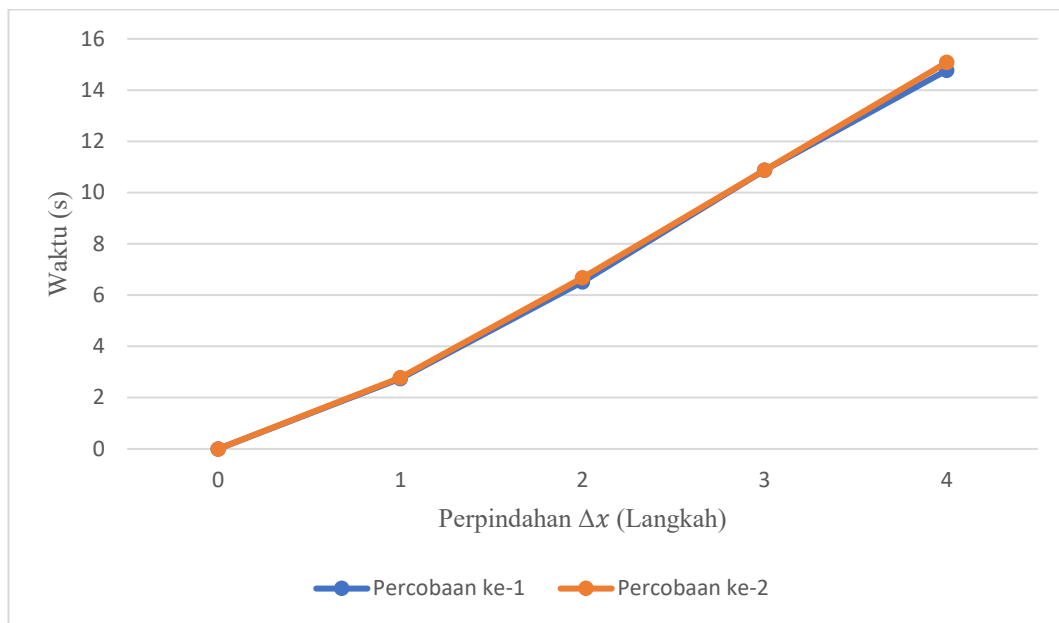
Tabel 4. 14 Percobaan kedua skenario Tap in Berurutan

No	Skenario Pengujian	Kondisi pada Slot	Perpindahan Slot ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Hasil deteksi kamera	Durasi rotary (s)
1	Slot Langsung Tersedia	Semua slot kosong	0	Mendeteksi slot kosong	0
2	Slot Bergeser 1 Langkah	Slot 1 Terisi, Slot 2-5 Kosong	1	Slot 1 terdeteksi terisi, slot 2 terdeteksi kosong	2,78
3	Slot Bergeser 2 Langkah	Slot 1-2 terisi, slot 3-5 kosong	2	Slot 1-2 terdeteksi terisi, slot 3 terdeteksi ksosng	6,68
4	Slot Bergeser 3 Langkah	Slot 1-3 terisi, slot 4-5 kosong	3	Slot 1-3 terdeteksi terisi, slot 3 terdeteksi ksosng	10,88
5	Slot Terjauh Tersedia	Slot 1-4 terisi, slot 5 kosong	4	Slot 1-4 terdeteksi terisi, slot 5 terdeteksi kosong	15,08

6	Kondisi Parkir Penuh	Seluruh Slot (1 s.d. 5) Terisi Penuh	Tidak ada	Tidak ada	0
---	----------------------	--------------------------------------	-----------	-----------	---

Hasil pengujian ulang pada Tabel 4.14 memperlihatkan pola respon sistem yang tetap konsisten dengan pengujian sebelumnya. Ketika seluruh keranjang dalam kondisi kosong sehingga nilai perpindahan bernilai 0 langkah, motor dinamo tidak berputar (0,00 detik) dan sistem hanya memerlukan total waktu siklus 9,25 detik untuk memvalidasi kartu RFID serta membuka palang gerbang. Saat sistem mengeksekusi perpindahan posisi, durasi perputaran dinamo meningkat secara bertahap mengikuti pertambahan nilai Δx , yaitu 2,78 detik pada perpindahan 1 langkah dengan total waktu 9,14 detik, 6,68 detik pada 2 langkah, 10,88 detik pada 3 langkah, hingga 15,08 detik pada perpindahan terjauh 4 langkah dengan total siklus 21,95 detik. Logika penguncian pada ESP32 Master juga kembali bekerja dengan tepat pada kondisi parkir penuh, di mana akses masuk langsung dibatalkan dengan catatan durasi 0,00 detik tanpa memicu pergerakan mekanik ataupun pemrosesan kamera

Berdasarkan perbandingan antara data Tabel 4.17 dan Tabel 4.18, performa sistem rotary terbukti memiliki tingkat keterulangan (*repeatability*) yang sangat tinggi dengan selisih waktu putaran motor yang sangat kecil, yaitu tidak lebih dari 0,31 detik pada setiap skenario perpindahan langkah. Pada perpindahan 1 langkah ($\Delta x = 1$), selisih waktu putar antara Percobaan 1 (2,74 detik) dan Percobaan 2 (2,78 detik) hanya sebesar 0,04 detik, sementara pada perpindahan 3 langkah ($\Delta x = 3$) durasi keduanya bahkan tercatat identik di angka 10,88 detik. Selisih terbesar hanya terjadi pada perpindahan terjauh 4 langkah ($\Delta x = 4$) sebesar 0,31 detik (14,77 detik berbanding 15,08 detik), dengan deviasi total durasi keseluruhan yang juga relatif stabil di bawah 0,40 detik. Nilai penyimpangan yang sangat minim ini membuktikan bahwa motor DC gearbox JG25-370 mampu mempertahankan stabilitas torsi saat memutar beban dinamis keranjang, serta integrasi sensor *Hall Effect* mampu memutus aliran daya motor secara presisi tepat saat magnet penanda slot terbaca.



Gambar 4. 8 Grafik sekenario perpindahan berurutan durasi rotary

Berdasarkan Gambar 4.8, grafik hubungan antara perpindahan langkah slot (Δx) pada sumbu horizontal terhadap durasi putaran dinamo pada sumbu vertikal membentuk kurva linier positif yang menaik secara konstan. Garis plot data antara Percobaan 1 dan Percobaan 2 tampak saling berhimpitan, dimulai dari titik 0,00 detik saat tanpa perpindahan langkah ($\Delta x = 0$) hingga mencapai puncak sekitar 15 detik pada perpindahan langkah terjauh ($\Delta x = 4$). Karakteristik garis yang lurus dan berimpit ini membuktikan bahwa motor DC gearbox JG25-370 bekerja pada kecepatan sudut yang konstan saat menarik beban keranjang akrilik, sehingga penambahan tiap satu langkah pulsa magnetik membutuhkan durasi waktu mekanik yang seragam dan sangat stabil.

Setelah menguji performa sistem pada skenario berurutan, pengujian dilanjutkan dengan skenario penyimpanan kendaraan (*Tap-in*) secara acak. Pengujian ini bertujuan untuk menguji keandalan sistem kontrol sekuensial dan respon modul kamera ESP32-CAM ketika pola keterisian slot tidak beraturan atau melompati posisi tertentu, menyerupai kondisi operasional di lapangan saat kendaraan pengguna terparkir secara berselang-seling. Dalam skenario ini, posisi keranjang parkir yang melintas di depan titik inspeksi tidak selalu berstatus kosong, melainkan dapat berupa keranjang yang sudah terisi kendaraan sehingga motor

harus berhenti sesaat untuk proses verifikasi visual sebelum melanjutkan putaran menuju slot target berikutnya. Pengujian acak ini juga dilakukan sebanyak dua kali pengulangan (Percobaan 1 dan Percobaan 2) dengan hasil pengukuran percobaan pertama disajikan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Percobaan pertama skenario *Tap in Acak*

No	Kondisi pada Slot	Posisi Awal (x_1)	Posisi Target (x_2)	Perpindahan Langkah ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Hasil deteksi kamera	Durasi rotary (s)
1	Slot 1-2 terisi, slot 3-5 kosong	1	3	2	Slot 1-2 terdeteksi terisi, slot 3 terdeteksi kosong	7,43
2	Slot 1-3 terisi, slot 4-5 kosong	3	4	1	Slot 3 terdeteksi terisi, slot 4 terdeteksi kosong	3,08
3	Slot 1-4 terisi, slot 5 kosong	1	5	4	Slot 1-4 terdeteksi terisi, slot 5 terdeteksi kosong	15,82
4	Seluruh Slot (1 s.d. 5) Terisi Penuh	-	-	-	Tidak mendeteksi	0

Berdasarkan data pengujian pertama skenario acak pada Tabel 4.15, sistem terbukti mampu merespons pola keterisian slot yang melompat secara adaptif berdasarkan nilai perpindahan langkah (Δx). Ketika sistem harus memindahkan platform dari Slot 1 menuju Slot 3 dengan selisih perpindahan 2 langkah ($\Delta x = 2$), motor berputar selama 7,43 detik dengan total waktu operasional 13,95 detik karena sistem sempat berhenti sesaat untuk memverifikasi kondisi keranjang yang terisi di posisi perantara. Pada pengujian kedua saat posisi awal berada di Slot 3 menuju Slot 4 dengan selisih 1 langkah ($\Delta x = 1$), durasi putaran motor tercatat jauh lebih singkat yaitu 3,08 detik dengan total waktu 9,13 detik. Durasi operasional terlalu lama terjadi pada pengujian ketiga saat mencari slot kosong terjauh dari Slot 1 menuju Slot 5 dengan selisih 4 langkah ($\Delta x = 4$), di mana motor berputar selama 15,82 detik. Sementara itu, pada kondisi kapasitas parkir terisi penuh, mikrokontroler Master secara otomatis mengabaikan perintah perputaran dan mencatat waktu 0,00 detik karena data memori memvalidasi tidak ada lagi slot kosong yang tersedia.

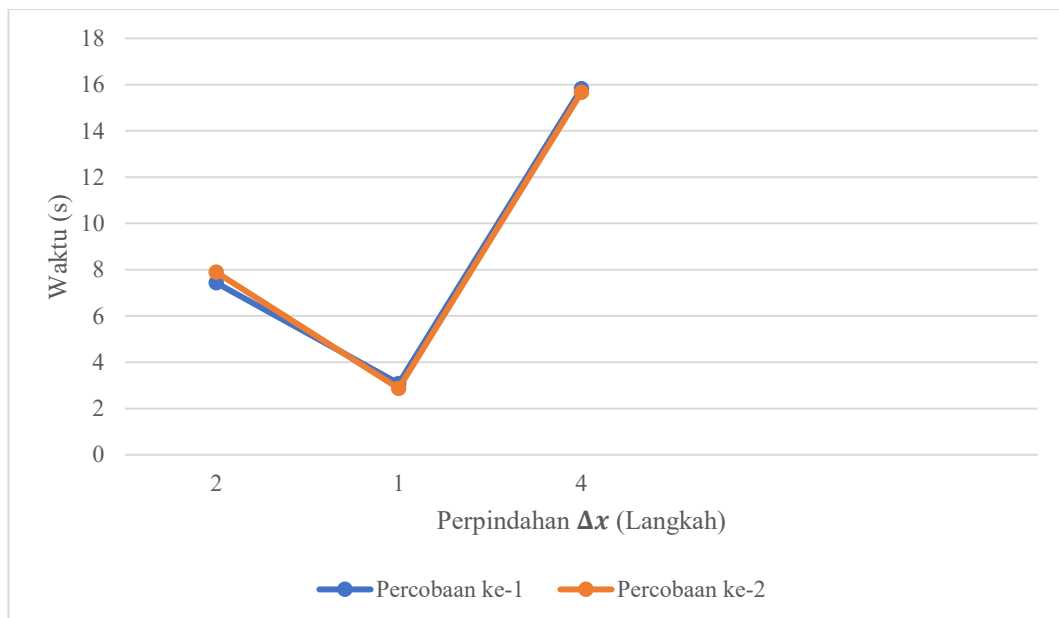
Tabel 4. 16 Percobaan kedua skenario *Tap in Acak*

No	Skenario Pengujian	Kondisi pada Slot	Posisi Awal (x_1)	Posisi Target (x_2)	Perpindahan Langkah ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Hasil deteksi kamera	Durasi rotary (s)
1	Perpindahan 2 Langkah	Slot 1-2 terisi, slot 3-5 kosong	1	3	2	Slot 1-2 terdeteksi terisi, slot 3 terdeteksi kosong	7,89
2	Perpindahan 1 Langkah	Slot 1-3 terisi, slot 4-5 kosong	3	4	1	Slot 3 terdeteksi terisi, slot 4 terdeteksi kosong	2,87
3	Perpindahan	Slot 1-4 terisi, slot 5 kosong	1	5	4	Slot 1-4 terdeteksi terisi, slot 5 terdeteksi kosong	15,66
4	Terjauh Kondisi Parkir Penuh	Seluruh Slot (1 s.d. 5) Terisi Penuh	-	-	-	Tidak mendeteksi	0

Hasil pengujian kedua pada Tabel 4.16 menunjukkan respon kerja sistem yang konsisten dengan percobaan sebelumnya ketika menangani variasi perpindahan posisi acak. Pada pengujian perpindahan dari Slot 1 ke Slot 3 dengan selisih 2 langkah ($\Delta x = 2$), durasi putaran motor tercatat 7,89 detik. Saat sistem melanjutkan pencarian dari Slot 3 menuju Slot 4 dengan selisih 1 langkah ($\Delta x = 1$), dinamo menyelesaikan putaran dalam waktu 2,87 detik. Sementara itu, pada skenario pencarian keranjang terjauh dari Slot 1 ke Slot 5 dengan selisih 4 langkah ($\Delta x = 4$), motor membutuhkan waktu putar 15,66 detik. Pada kondisi seluruh slot terisi penuh, logika pengaman pada ESP32 Master kembali bekerja tepat dengan menolak akses masuk tanpa memicu pergerakan motor rotary maupun modul kamera (0,00 detik).

Kalau kita bandingkan data pada Percobaan 1 dan Percobaan 2, pergerakan alat saat mencari slot kosong secara acak terbukti sangat konsisten dengan selisih waktu putar motor yang tipis, yakni cuma berkisar antara 0,16 sampai 0,46 detik di setiap langkahnya. Waktu motor berputar 2 langkah ($\Delta x = 2$) cuma berselisih 0,46 detik (7,43 detik dan 7,89 detik), lalu saat bergeser 1 langkah ($\Delta x = 1$) selisihnya makin rapat di angka 0,21 detik (3,08 detik dan 2,87 detik) dengan total waktu

proses yang hampir sama persis yaitu 9,13 detik dan 9,15 detik, serta pada jarak terjauh 4 langkah ($\Delta x = 4$) bedanya cuma 0,16 detik. Jika diperhatikan lebih lanjut, total waktu di pengujian acak ini memang sedikit lebih lama sekitar 0,5 sampai 1,2 detik dibandingkan pengujian berurutan pada jarak langkah yang sama. Hal ini wajar terjadi karena setiap kali keranjang yang lewat terbaca sudah ada mobilnya ('T'), program sengaja memberi jeda rem (*Settle Time*) selama 1,5 detik agar ayunan keranjang berhenti dulu sebelum kamera memotret lantai keranjang dan menyuruh dinamo jalan lagi mencari slot berikutnya.



Gambar 4. 9 Skenario perpindahan Acak durasi rotary

Berdasarkan Gambar 4.9, grafik durasi putaran motor pada skenario acak memperlihatkan garis yang bergerak naik-turun mengikuti besar kecilnya nilai selisih langkah slot (Δx), bukan urutan percobaannya. Garis data antara Percobaan 1 dan Percobaan 2 tampak saling menempel rapat, di mana titik paling rendah berada pada perpindahan 1 langkah ($\Delta x = 1$) dengan waktu sekitar 2,8 hingga 3 detik, lalu naik pada perpindahan 2 langkah ($\Delta x = 2$) di kisaran 7,4 sampai 7,8 detik, dan mencapai puncaknya pada jarak terjauh 4 langkah ($\Delta x = 4$) di angka 15,6 sampai 15,8 detik. Bentuk kurva yang konsisten ini membuktikan bahwa dinamo berputar murni berdasarkan jarak fisik langkah slot yang harus dilewati,

serta motor DC gearbox mampu mempertahankan torsi putar yang stabil meskipun pola pencarian slot kosongnya melompat-lompat.

Pengujian siklus penjemputan kendaraan (*Tap-out*) dilakukan untuk melihat performa dan kecepatan mekanik saat memanggil kembali mobil yang sudah terparkir menuju gerbang keluar. Pada alur ini, kamera ESP32-CAM sengaja dinonaktifkan dari sistem kendali karena nomor slot mobil sudah tersimpan rapi di dalam memori database mikrokontroler saat proses masuk. Sistem murni mengandalkan kecepatan dinamo DC gearbox 12V dan pembacaan pulsa magnet oleh sensor *Hall Effect* untuk menghitung jarak langkah perpindahan (Δx) dari posisi terakhir menuju bibir gerbang keluar. Pengujian ini dilakukan dua kali pengulangan (Percobaan 1 dan Percobaan 2) dengan pengambilan kartu RFID secara berurutan, dimulai dari kartu nomor 1 sampai nomor 5.

Tabel 4. 17 Percobaan pertama skenario *Tap out* berurutan

No	Skenario pengujian	RFID yang dipanggil	Slot Terpanggil (x_2)	Posisi Awal (x_1)	Perpindahan Langkah ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Durasi putaran (s)
1	Pemanggilan slot 1	RFID No.1	Slot 1	5	1	3,09
2	Pemanggilan slot 2	RFID No.2	Slot 2	1	1	2,74
3	Pemanggilan slot 3	RFID No.3	Slot 3	2	1	2,55
4	Pemanggilan slot 4	RFID No.4	Slot 4	3	1	2,43
5	Pemanggilan slot 5	RFID No.5	Slot 5	4	1	2,22

Dari data pengujian pertama pada Tabel 4.17, respon putaran motor dinamo saat mengeluarkan kendaraan terbukti sangat cepat dan konsisten di setiap pemanggilan. Karena kartu di-tap secara berurutan, jarak perpindahan yang harus ditempuh oleh motor selalu seragam yaitu sebesar 1 langkah ($\Delta x = 1$). Waktu putaran motor yang dibutuhkan untuk menggeser satu keranjang berada pada rentang yang stabil antara 2,22 hingga 3,09 detik, dengan durasi terlama terjadi saat menjemput Slot 1 (3,09 detik) dan tercepat pada Slot 5 (2,22 detik). Waktu

pengoperasian ini jauh lebih singkat dibanding proses masuk (*Tap-in*) karena alat tidak perlu lagi berhenti untuk menunggu keranjang stabil ataupun menjalankan pemrosesan citra dari kamera, sehingga motor bisa langsung mengerem presisi begitu sensor *Hall Effect* membaca magnet slot yang dituju dan palang gerbang keluar langsung terbuka.

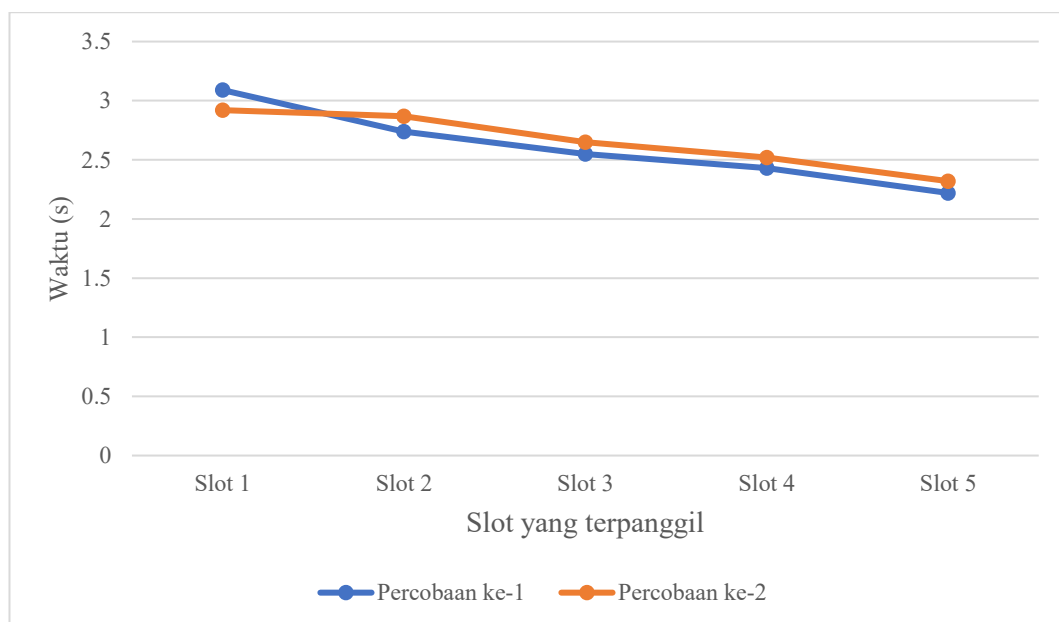
Tabel 4. 18 Percobaan kedua skenario *Tap out* berurutan

No	Skenario pengujian	RFID yang dipanggil	Slot Terpanggil (x_2)	Posisi Awal (x_1)	Perpindahan Langkah ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Durasi putaran (s)
1	Pemanggilan slot 1	RFID No.1	Slot 1	5	1	2,92
2	Pemanggilan slot 2	RFID No.2	Slot 2	1	1	2,87
3	Pemanggilan slot 3	RFID No.3	Slot 3	2	1	2,65
4	Pemanggilan slot 4	RFID No.4	Slot 4	3	1	2,52
5	Pemanggilan slot 5	RFID No.5	Slot 5	4	1	2,32

Pada pengujian kedua di Tabel 4.18, sistem kembali memperlihatkan performa gerak mekanik yang stabil saat melayani pemanggilan kendaraan berurutan 1 langkah ($\Delta x = 1$). Rentang durasi perputaran dinamo tercatat sangat rapat, yaitu antara 2,32 detik sampai 2,92 detik, dengan rata-rata waktu tempuh berada di kisaran 2,6 detik per slotnya. Dinamo motor DC gearbox 12V terbukti tidak mengalami penurunan tenaga meskipun membawa beban keranjang yang terisi mobil mainan, serta mikrokontroler Master berhasil membaca UID kartu dengan cepat dan menginstruksikan penghentian motor secara akurat tepat saat magnet penanda keranjang terdeteksi di bibir gerbang keluar.

Kalau kedua tabel ini dibandingkan, respon putaran motor saat mengeluarkan kendaraan secara berurutan terbukti sangat konsisten dengan selisih waktu yang sangat tipis di setiap nomor slotnya. Perbedaan waktu putar dinamo antara Percobaan 1 dan Percobaan 2 cuma berkisar antara 0,09 sampai 0,17 detik

saja. Selisih paling besar cuma terjadi saat memanggil Slot 1 (0,17 detik) dan Slot 2 (0,13 detik), sedangkan saat memanggil Slot 3, Slot 4, dan Slot 5 bedanya makin rapat di bawah 0,10 detik. Dari kedua pengujian ini, rata-rata kecepatan mekanik alat untuk memindahkan 1 langkah slot ($\Delta x = 1$) stabil di angka sekitar 2,5 sampai 2,6 detik. Konsistensi data ini membuktikan bahwa motor DC gearbox JG25-370 mampu menjaga kestabilan torsi putarnya dengan sangat baik tanpa ada penurunan performa saat membawa beban keranjang berisi mobil, serta sensor *Hall Effect* selalu berhasil mendeteksi pulsa magnetik penanda slot target secara presisi sehingga posisi keranjang selalu berhenti tepat di depan gerbang keluar.



Gambar 4. 10 Grafik skenario perpindahan berurutan tap out

Dari Gambar 4. 10 grafik pengujian *Tap-out* berurutan, kurva waktu putaran motor untuk Percobaan 1 dan Percobaan 2 tampak membentuk garis yang hampir mendatar dan saling berhimpitan di setiap slot yang dipanggil. Nilai durasi putaran stabil berada pada rentang sempit antara 2,2 hingga 3,0 detik, tanpa adanya lonjakan waktu yang drastis dari Slot 1 sampai Slot 5. Bentuk kurva yang rata dan konsisten ini membuktikan bahwa mekanisme pemindah beban bekerja pada kecepatan sudut yang seragam karena setiap pemanggilan berurutan hanya menempuh perpindahan tetap sebesar 1 langkah slot ($\Delta x = 1$), serta motor dinamo tidak mengalami

penurunan performa akibat beban keranjang saat mengantarkan kendaraan ke pintu keluar.

Pengujian *Tap-out* secara acak dilakukan dengan menempelkan kartu RFID secara berselang-seling tanpa mengikuti urutan nomor slot. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi ketepatan algoritma perhitungan posisi pada ESP32 Master dalam mencocokkan UID kartu terhadap nomor keranjang fisik dan menghitung jumlah langkah perpindahan yang diperlukan.

Tabel 4. 19 Percobaan pertama skenario *Tap out* acak

Skenario pengujian	RFID yang dipanggil	Slot Terpanggil (x_2)	Posisi Awal (x_1)	Perpindahan Langkah ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Durasi putaran (s)
Pemanggilan slot 2	RFID No.2	Slot 2	5	2	6,46
Pemanggilan slot 4	RFID No.4	Slot 4	2	2	6,29
Pemanggilan slot 5	RFID No.5	Slot 5	4	1	3,08
Pemanggilan slot 3	RFID No.3	Slot 3	5	3	7,95
Pemanggilan slot 1	RFID No.1	Slot 1	3	3	7,43

Berdasarkan data Tabel 4.19, waktu respon putaran motor dinamo berjalan sebanding dengan besarnya nilai perpindahan langkah slot (Δx). Pada saat memanggil Slot 5 yang hanya butuh perpindahan 1 langkah ($\Delta x = 1$), dinamo merespon paling cepat dengan waktu putar 3,08 detik. Ketika sistem diminta menjemput slot dengan jarak 2 langkah ($\Delta x = 2$) seperti pada pemanggilan Slot 2 dan Slot 4, durasi putaran motor meningkat menjadi 6,46 detik dan 6,29 detik. Durasi putar paling lama terjadi saat menjemput slot dengan jarak 3 langkah ($\Delta x = 3$) pada pemanggilan Slot 3 dan Slot 1, di mana waktu putaran masing-masing memakan waktu 7,95 detik dan 7,43 detik. Seluruh perintah panggilan kartu berhasil dieksekusi dengan tepat dan keranjang berhenti presisi di depan pintu keluar tanpa ada kesalahan nomor keranjang yang tertukar.

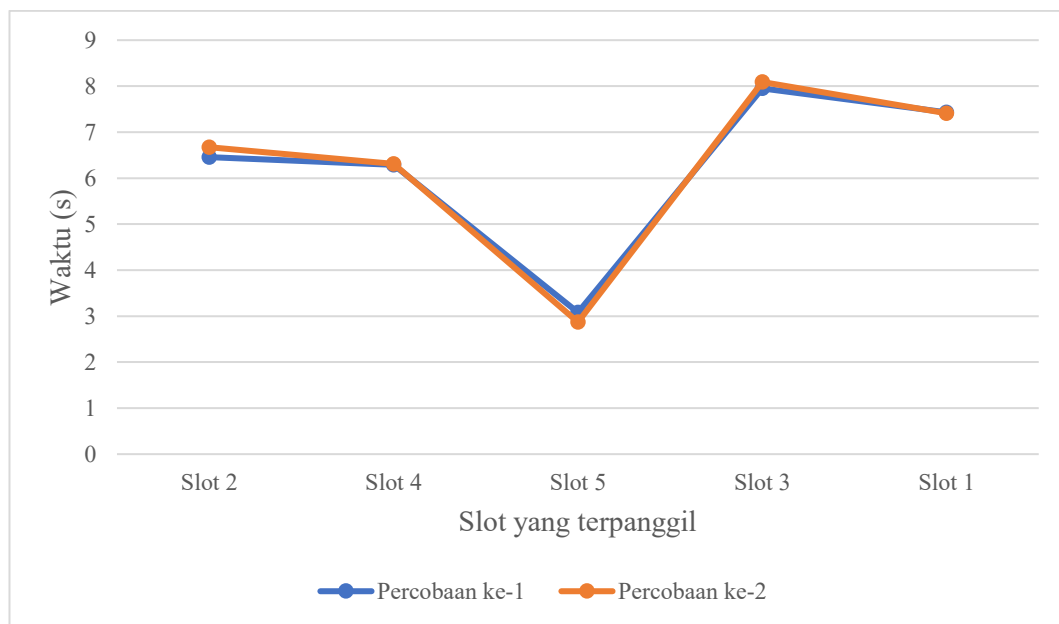
Tabel 4. 20 Percobaan ketiga skenario *Tap out* acak

Skenario pengujian	RFID yang dipanggil	Slot Terpanggil (x_2)	Posisi Awal (x_1)	Perpindahan Langkah ($\Delta x = x_2 - x_1$) (Langkah)	Durasi putaran (s)
Pemanggilan slot 2	RFID No.2	Slot 2	5	2	6,67
Pemanggilan slot 4	RFID No.4	Slot 4	2	2	6,31
Pemanggilan slot 5	RFID No.5	Slot 5	4	1	2,87
Pemanggilan slot 3	RFID No.3	Slot 3	5	3	8,09
Pemanggilan slot 1	RFID No.1	Slot 1	3	3	7,41

Pada pengujian ulang di Tabel 4.20, karakteristik waktu putar motor kembali menunjukkan hasil yang serupa dengan pengujian pertama. Untuk perpindahan sejauh 1 langkah ($\Delta x = 1$) pada pemanggilan Slot 5, dinamo menyelesaikan putaran dalam waktu 2,87 detik. Pada jarak 2 langkah ($\Delta x = 2$) pada pemanggilan Slot 2 dan Slot 4, durasi putar motor tercatat stabil di angka 6,67 detik dan 6,31 detik. Sementara itu, pada perpindahan terjauh 3 langkah ($\Delta x = 3$) pada pemanggilan Slot 3 dan Slot 1, motor membutuhkan waktu putar berturut-turut selama 8,09 detik dan 7,41 detik. Hasil ini membuktikan bahwa pembacaan sensor magnetik dan pengiriman instruksi motor dari ESP32 Master ke Slave tetap berjalan sinkron meskipun urutan pemanggilan kartunya melompat-lompat.

Kalau kita bandingkan data dari Tabel 4.19 dan Tabel 4.20, respon waktu putar motor dinamo saat mengeluarkan kendaraan secara acak memiliki konsistensi yang sangat tinggi dengan selisih yang sangat tipis, yakni berkisar antara 0,02 sampai 0,21 detik saja di setiap pengujiannya. Pada pemanggilan 1 langkah (Slot 5), perbedaan waktu antara Percobaan 1 dan Percobaan 2 cuma 0,21 detik (3,08 detik berbanding 2,87 detik). Pada jarak 2 langkah (Slot 2 dan Slot 4), selisih waktunya juga sangat minim yaitu 0,21 detik dan 0,02 detik. Begitu juga pada jarak tempuh terjauh 3 langkah (Slot 3 dan Slot 1), selisih waktunya tidak lebih dari 0,14

detik. Dari perbandingan kedua pengujian ini, terlihat korelasi yang sangat teratur di mana perpindahan 1 langkah membutuhkan waktu sekitar 2,9 detik, 2 langkah sekitar 6,4 detik, dan 3 langkah sekitar 7,7 detik. Hal ini membuktikan bahwa motor DC gearbox JG25-370 mampu menjaga putaran yang stabil dan sensor *Hall Effect* selalu berhasil mengunci posisi keranjang target dengan tepat di depan gerbang keluar.



Gambar 4. 11 Skenario perpindahan acak Total durasi rotary Tap out

Berdasarkan Gambar 4.11, grafik durasi putaran motor saat penjemputan mobil secara acak memperlihatkan garis yang bergerak naik-turun mengikuti jarak langkah perpindahan slot (Δx). Pola kurva antara Percobaan 1 dan Percobaan 2 tampak saling menempel rapat, di mana titik terendah membentuk lembah saat pemanggilan Slot 5 di kisaran waktu 2,8 hingga 3,0 detik karena jaraknya paling dekat yaitu hanya 1 langkah perpindahan ($\Delta x = 1$). Selanjutnya, grafik naik membentuk titik tengah pada pemanggilan Slot 2 dan Slot 4 di rentang 6,2 hingga 6,6 detik untuk perpindahan 2 langkah ($\Delta x = 2$), serta mencapai puncaknya pada pemanggilan Slot 3 dan Slot 1 di angka 7,4 sampai 8,0 detik karena menempuh langkah terjauh yaitu 3 langkah perpindahan ($\Delta x = 3$). Bentuk kurva yang sangat berhimpitan dan berulang ini membuktikan bahwa motor DC gearbox JG25-370 bekerja pada kecepatan sudut yang konsisten tanpa kehilangan torsi saat menarik

beban mobil miniatur, serta sensor *Hall Effect* mampu menghitung pulsa perpindahan slot secara akurat sehingga motor dapat berhenti presisi di depan gerbang keluar.