

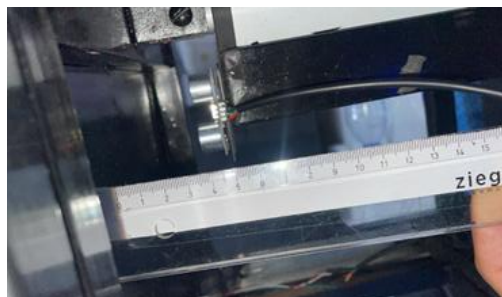
BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

Pengujian sensor *load cell*, sensor ultrasonik HC-SR04, linear actuator, driver motor, push button, dan mikrokontroler ATmega2560, serta metode kontrol *Finite State Machine* (FSM) dan logika fuzzy diperlukan untuk mengevaluasi kinerja seluruh komponen pada sistem *lifting robot mobile* yang dirancang. Pengujian dilakukan untuk memastikan setiap komponen perangkat keras maupun perangkat lunak dapat bekerja sesuai fungsi dan saling terintegrasi dengan baik. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah sistem kendali yang diterapkan mampu menjalankan proses *lifting* secara terstruktur, stabil, dan aman berdasarkan kategori berat beban.

4.1 Pengujian Sensor Ultrasonik

Sensor ultrasonik HC-SR04 bekerja pada tegangan masukan sebesar 3 V hingga 5 V dan memiliki kemampuan untuk mengukur jarak maupun ketinggian pada rentang 3 cm hingga 400 cm. Pada sistem ini, sensor ultrasonik digunakan sebagai pembaca posisi atau ketinggian *linear actuator*. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler ATmega2560 untuk menghasilkan nilai jarak aktual. Untuk mengetahui tingkat akurasi sensor, dilakukan pengujian dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap hasil pengukuran menggunakan penggaris 40 cm sebagai acuan. Pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 ditunjukkan pada Gambar 4.1, sedangkan hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1 Pengujian pengukuran menggunakan penggaris dengan sensor ultrasonik HC-SR04

Tabel 4. 1 Pengujian pengukuran Sensor Ultrasonik HC-SR04

No	Jarak Pengukuran (cm)	Jarak Sensor (cm)	Selisih (cm)	Error (%)
1	4	4	0	0,00
2	6	6	0	0,00
3	7	7	0	0,00
4	8	8	0	0,00
5	9	9	0	0,00
6	11	11	0	0,00
Rata-rata -		-	0	0,00

Berdasarkan Tabel 4.1, sensor ultrasonik HC-SR04 mampu membaca jarak dengan baik pada rentang pengujian 4 cm hingga 11 cm. Seluruh hasil pembacaan sensor menunjukkan nilai yang sama dengan hasil pengukuran menggunakan penggaris sebagai acuan. Oleh karena itu, seluruh pengujian memiliki selisih 0 cm dengan nilai *error* sebesar 0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan pembacaan yang sesuai dengan jarak aktual pada rentang pengujian yang digunakan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penggunaan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai sensor pengukur jarak yang bekerja berdasarkan prinsip pemantulan gelombang ultrasonik (*time of flight*). Ketelitian pembacaan sensor dipengaruhi oleh kondisi permukaan objek, posisi sensor terhadap objek, serta kestabilan pantulan gelombang yang diterima kembali oleh sensor. Pada penelitian ini, seluruh pengujian dilakukan dengan posisi sensor dan objek yang tetap sehingga pembacaan yang dihasilkan menjadi konsisten.

Tidak ditemukannya selisih hasil pengukuran menunjukkan bahwa proses pemasangan sensor, kalibrasi awal, serta pembacaan data oleh mikrokontroler telah berjalan dengan baik. Selain itu, jarak pengujian yang relatif pendek, yaitu 4–11

cm, masih berada pada rentang kerja sensor sehingga sinyal pantulan dapat diterima dengan baik. Kondisi tersebut juga didukung oleh penggunaan proses pembacaan yang stabil sehingga gangguan berupa *noise* dari lingkungan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil pengukuran.

Pada sistem *lifting* yang dirancang, sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk membaca posisi linear actuator selama proses naik dan turun. Sebelum proses pengukuran dilakukan, sistem terlebih dahulu menetapkan posisi awal sebagai titik acuan (*zeroing*). Pada penelitian ini, posisi awal sensor terhadap permukaan aktuator berada pada jarak sekitar 3 cm. Nilai tersebut digunakan sebagai titik referensi sehingga perubahan posisi linear actuator dapat dihitung berdasarkan perpindahan dari posisi awal, bukan berdasarkan jarak absolut sensor terhadap objek.

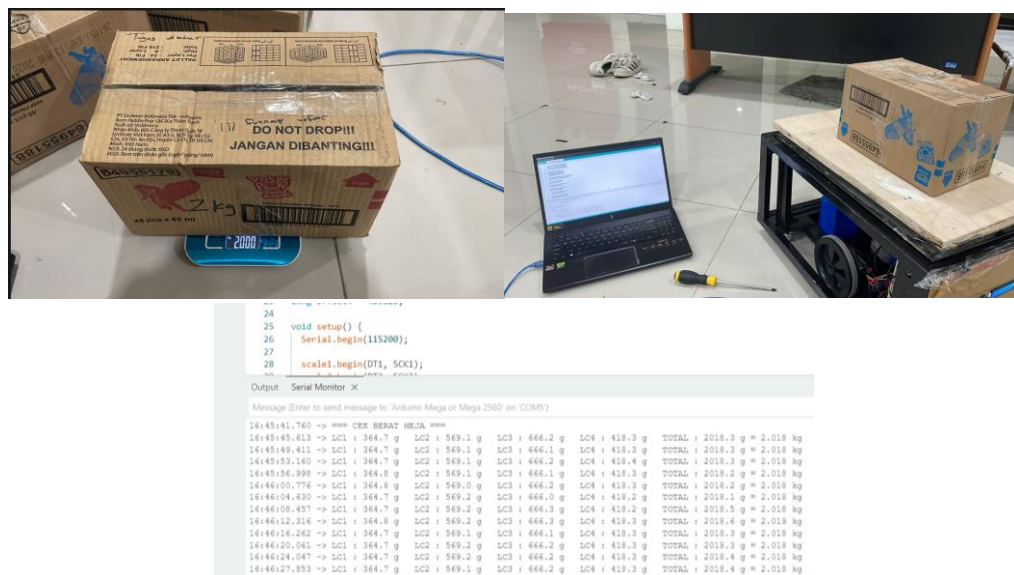
Data hasil pembacaan sensor ultrasonik kemudian digunakan untuk menentukan posisi aktual linear actuator. Selanjutnya, posisi aktual tersebut dibandingkan dengan target ketinggian berdasarkan kategori berat beban sehingga diperoleh nilai selisih (*error posisi*). Nilai selisih inilah yang menjadi salah satu masukan pada metode *fuzzy logic* untuk menentukan nilai PWM motor linear actuator. Dengan cara tersebut, pergerakan aktuator dapat berlangsung lebih halus, stabil, serta membantu mengurangi osilasi ketika aktuator mendekati posisi target.

4.2 Pengujian Sistem Penimbangan 4 Load Cell

Pengujian sistem penimbangan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem yang menggunakan empat sensor *load cell* sebagai sensor utama dalam mengukur berat beban sebelum proses klasifikasi dan pengendalian sistem *lifting* menggunakan metode *Fuzzy Logic Mamdani*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi dan kestabilan hasil pembacaan sistem terhadap berat aktual sehingga data yang dihasilkan layak digunakan sebagai masukan pada proses pengambilan keputusan oleh pengendali *fuzzy*.

Pengujian dilakukan menggunakan lima variasi beban, yaitu 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Setiap beban terlebih dahulu diukur menggunakan timbangan digital yang telah dikalibrasi sebagai nilai acuan (*ground truth*). Selanjutnya, setiap variasi beban diletakkan pada sistem sebanyak tiga kali (tiga peletakan), dan pada

setiap peletakan dilakukan pengambilan sejumlah data setelah pembacaan sensor mencapai kondisi stabil. Nilai rata-rata dari seluruh data pengukuran digunakan sebagai hasil pembacaan sistem, sedangkan standar deviasi dihitung untuk mengevaluasi kestabilan pembacaan sensor. Hasil pengujian akurasi sistem penimbangan disajikan pada Tabel 4.2, sedangkan proses pengujian menggunakan empat sensor *load cell* ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Pengujian Sistem Penimbangan Menggunakan Empat Load Cell

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sistem Penimbangan

Berat Aktual (kg)	Hasil Pembacaan Sistem (kg)	Standar Deviasi (kg)	Selisih Berat (kg)	Error (%)
2,000	2,018	0,00053	0,018	0,90
4,000	4,020	0,00116	0,020	0,50
6,000	6,029	0,00075	0,029	0,48
8,000	8,021	0,00104	0,021	0,26
10,000	10,031	0,00043	0,031	0,31
Rata-rata	—	0,00078	0,024	0,49

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, sistem penimbangan mampu menghasilkan pembacaan yang mendekati berat aktual pada seluruh variasi beban

yang diuji. Hasil pembacaan sistem berada pada rentang 2,018 kg hingga 10,031 kg dengan nilai error relatif antara 0,26% hingga 0,90% dan rata-rata sebesar 0,49%. Error terbesar terjadi pada pengujian beban 2 kg, sedangkan error terkecil diperoleh pada beban 8 kg. Secara keseluruhan, nilai error yang dihasilkan relatif kecil dan tidak menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya beban. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses kalibrasi yang dilakukan pada setiap sensor *load cell* telah mampu menghasilkan pembacaan yang konsisten pada rentang pengukuran 2–10 kg.

Selain memiliki nilai error yang rendah, hasil pengujian juga menunjukkan nilai standar deviasi yang berada pada rentang 0,00043 kg hingga 0,00116 kg dengan rata-rata sebesar 0,00078 kg. Nilai standar deviasi yang kecil menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor memiliki tingkat kestabilan yang baik pada setiap variasi beban. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu menghasilkan nilai pengukuran yang mendekati berat aktual, tetapi juga memberikan hasil pembacaan yang konsisten ketika dilakukan pengambilan data secara berulang.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian [41], yang menjelaskan bahwa sistem penimbangan berbasis *load cell* dan modul HX711 mampu menghasilkan pembacaan yang mendekati berat aktual setelah dilakukan proses kalibrasi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa proses kalibrasi merupakan salah satu faktor penting sebagai strategi stabilisasi pembacaan sistem penimbangan. Meskipun konfigurasi sistem dan objek pengujian yang digunakan berbeda, hasil penelitian tersebut mendukung bahwa kombinasi sensor *load cell* dan modul HX711 dapat digunakan sebagai sistem penimbangan dengan tingkat akurasi dan kestabilan yang baik.

Rendahnya nilai error dan standar deviasi pada penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor. Setiap sensor *load cell* dikalibrasi secara terpisah sehingga karakteristik masing-masing sensor dapat disesuaikan sebelum digunakan. Selain itu, modul HX711 berfungsi sebagai penguat sinyal sekaligus konverter analog-ke-digital (*analog-to-digital converter/ADC*) sehingga perubahan sinyal dari *load cell* dapat dibaca dengan resolusi yang lebih baik oleh mikrokontroler. Sistem juga menggunakan rata-rata 10 kali pembacaan melalui fungsi `get_units(10)` untuk

mengurangi pengaruh *noise* dan fluktuasi sinyal sebelum menghasilkan nilai berat akhir. Di samping itu, penggunaan empat sensor *load cell* pada setiap sudut papan penimbangan membuat distribusi beban menjadi lebih merata sehingga pembacaan masing-masing sensor lebih seimbang dan menghasilkan pengukuran yang lebih stabil.

Meskipun demikian, masih terdapat selisih kecil antara berat aktual dan hasil pembacaan sistem. Selisih tersebut merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada sistem penimbangan berbasis *load cell*. Nilai error dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti karakteristik masing-masing sensor, proses konversi sinyal pada modul HX711, distribusi beban yang tidak selalu identik pada setiap titik penyangga, serta toleransi pada konstruksi mekanik sistem. Oleh karena itu, nilai error rata-rata sebesar 0,49% pada penelitian ini merupakan error sistem secara keseluruhan (*system error*) yang merupakan akumulasi dari berbagai sumber kesalahan tersebut.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem penimbangan yang dikembangkan mampu menghasilkan pembacaan yang mendekati berat aktual dengan rata-rata error relatif sebesar 0,49% dan memiliki tingkat kestabilan yang baik berdasarkan nilai standar deviasi yang rendah. Seluruh hasil pembacaan juga berada pada rentang klasifikasi beban yang sesuai, yaitu beban ringan (0–2,099 kg), beban sedang (2,100–5,099 kg), dan beban berat (5,100–10,000 kg), sehingga tidak terjadi kesalahan klasifikasi yang dapat memengaruhi proses pengendalian sistem *lifting*.

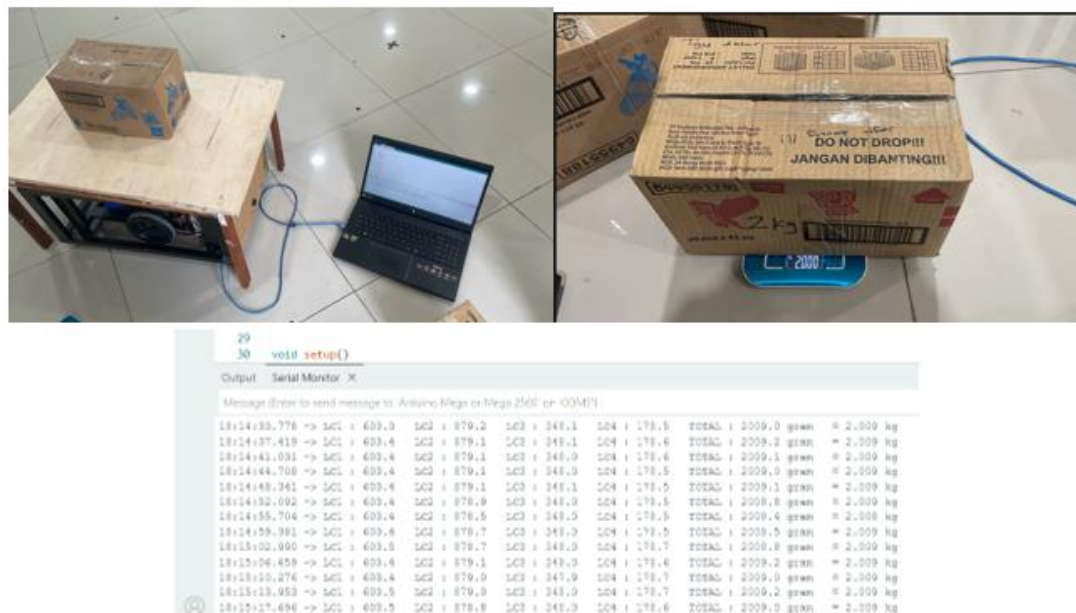
Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem penimbangan menggunakan empat sensor *load cell* telah memenuhi kebutuhan penelitian. Sistem mampu menghasilkan pengukuran yang akurat dan stabil dengan rata-rata error relatif sebesar 0,49% serta mampu memberikan hasil klasifikasi beban yang benar pada setiap variasi pengujian. Oleh karena itu, sistem penimbangan dinilai layak digunakan sebagai masukan bagi pengendali *Fuzzy Logic Mamdani* dalam menentukan target posisi *lifting* pada robot *mobile*.

4.3 Pengujian Sistem Penimbangan dengan Berat Meja

Pengujian sistem penimbangan dilakukan setelah penerapan metode *offset* (*tare*). Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa proses *offset* mampu

menghilangkan pengaruh berat awal platform penimbangan sehingga sistem hanya menampilkan berat beban yang diletakkan di atas platform. Pada kondisi awal, platform penimbangan memiliki berat sendiri yang turut terbaca oleh empat sensor *load cell*. Oleh karena itu, sebelum proses penimbangan dilakukan, sistem terlebih dahulu menjalankan proses *tare*, yaitu menyimpan nilai pembacaan platform kosong sebagai nilai *offset*. Nilai *offset* tersebut kemudian dikurangkan dari hasil pembacaan sensor sehingga berat yang ditampilkan merupakan berat bersih (*net weight*) tanpa dipengaruhi oleh berat platform.

Pengujian dilakukan menggunakan lima variasi beban, yaitu 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Seluruh beban terlebih dahulu diverifikasi menggunakan timbangan digital sebagai alat acuan sehingga dapat digunakan sebagai pembanding terhadap hasil pembacaan sistem. Pada setiap variasi beban dilakukan tiga kali peletakan, dan pada setiap peletakan sistem merekam 20 data hasil pembacaan setelah nilai sensor berada pada kondisi stabil. Setiap data pembacaan merupakan hasil rata-rata dari 10 pembacaan sensor melalui fungsi `get_units(10)`, sehingga pengaruh *noise* elektronik dapat dikurangi dan nilai yang dihasilkan menjadi lebih stabil. Selanjutnya, seluruh data hasil pengukuran digunakan untuk menghitung nilai rata-rata, standar deviasi, selisih pengukuran, dan *error* relatif sebagai parameter evaluasi kinerja sistem penimbangan. Hasil pengujian sistem penimbangan menggunakan metode *offset (tare)* disajikan pada Tabel 4.3, sedangkan proses pengujian menggunakan empat sensor *load cell* ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Pengujian Sistem Penimbangan Menggunakan Meja

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Sistem Penimbangan

Berat Aktual (kg)	Hasil Pembacaan Sistem (kg)	Standar Deviasi (kg)	Selisih Berat (kg)	Error (%)
2,000	2,009	0,00053	0,009	0,45
4,000	4,021	0,00116	0,021	0,53
6,000	6,019	0,00075	0,019	0,32
8,000	8,014	0,00104	0,014	0,18
10,000	10,021	0,00068	0,021	0,21
Rata-rata	—	0,00083	0,017	0,34

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3, sistem penimbangan yang telah menerapkan metode *offset (tare)* mampu menghasilkan pembacaan yang mendekati berat aktual pada seluruh variasi beban yang diuji. Nilai *error* relatif berada pada rentang 0,18% hingga 0,53% dengan rata-rata sebesar 0,34%, sedangkan rata-rata selisih pengukuran hanya sebesar 0,017 kg atau sekitar 17 gram. Selain itu, nilai standar deviasi berada pada rentang 0,00053 kg hingga 0,00116 kg, yang menunjukkan bahwa variasi hasil pembacaan antar-pengukuran relatif kecil

sehingga sistem memiliki konsistensi (*repeatability*) yang baik. *Error* terbesar diperoleh pada pengujian beban 4 kg, sedangkan *error* terkecil terjadi pada beban 8 kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode *offset (tare)* mampu mengurangi pengaruh berat awal platform penimbangan sehingga sistem dapat mengukur berat benda dengan lebih mendekati nilai sebenarnya.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian[42], yang mengembangkan sistem penimbangan digital berbasis *load cell*, modul HX711, dan Arduino Nano. Pada penelitian tersebut, hasil pembacaan sistem dibandingkan dengan timbangan digital sebagai acuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi alat dan menghasilkan rata-rata *error* sebesar 3,83%. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa proses kalibrasi sensor, penggunaan modul HX711 sebagai pengondisi sinyal, serta pengujian menggunakan beban acuan merupakan faktor penting yang memengaruhi tingkat akurasi sistem penimbangan.

Performa sistem penimbangan pada penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor pertama adalah proses kalibrasi pada masing-masing sensor *load cell*, sehingga hubungan antara perubahan sinyal listrik dan nilai berat dapat disesuaikan dengan karakteristik sensor yang digunakan. Faktor kedua adalah penerapan metode *offset (tare)* yang berfungsi menghilangkan pengaruh berat awal platform penimbangan, sehingga nilai yang ditampilkan merupakan berat bersih benda uji. Faktor ketiga adalah penggunaan modul HX711 sebagai penguat sinyal sekaligus *Analog-to-Digital Converter (ADC)* beresolusi 24-bit, sehingga sinyal keluaran *load cell* dapat dikonversi menjadi data digital dengan resolusi yang tinggi.

Selain itu, sistem menerapkan proses perataan data melalui fungsi `get_units(10)`, yaitu setiap satu nilai pembacaan berat merupakan hasil rata-rata dari 10 kali pembacaan sensor *load cell*. Dengan demikian, pengaruh *noise* elektronik pada setiap pembacaan dapat dikurangi sehingga nilai yang dihasilkan menjadi lebih stabil. Pada tahap pengujian, setiap variasi beban diukur sebanyak 20 kali untuk setiap peletakan. Dua puluh data hasil pembacaan tersebut kemudian digunakan untuk menghitung nilai rata-rata, standar deviasi, selisih pengukuran, dan *error* relatif. Oleh karena itu, proses perataan data menggunakan `get_units(10)` berfungsi meningkatkan kestabilan setiap pembacaan, sedangkan pengambilan 20

data dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi dan performa sistem penimbangan secara keseluruhan.

Di sisi lain, penggunaan empat sensor *load cell* pada setiap sudut platform penimbangan membantu mendistribusikan beban secara lebih merata sehingga gaya yang diterima oleh masing-masing sensor menjadi lebih seimbang. Kondisi tersebut turut mendukung hasil pembacaan yang lebih stabil dan konsisten.

Meskipun demikian, masih terdapat selisih kecil antara berat aktual dan hasil pembacaan sistem. Selisih tersebut merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada sistem penimbangan berbasis *load cell*. Nilai *error* dapat dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing sensor, distribusi beban yang tidak sepenuhnya merata pada setiap titik penyangga, toleransi pemasangan mekanik, proses konversi sinyal pada modul HX711, serta gangguan *noise* dari lingkungan sekitar. Oleh karena itu, nilai *error* yang diperoleh pada penelitian ini merupakan *system error*, yaitu kesalahan yang berasal dari gabungan seluruh komponen penyusun sistem penimbangan, bukan hanya berasal dari sensor *load cell*.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem penimbangan yang telah menerapkan metode *offset (tare)* menghasilkan rata-rata *error* sebesar 0,34%, yang setara dengan tingkat akurasi sekitar 99,66%. Selain memiliki tingkat akurasi yang tinggi, sistem juga menunjukkan konsistensi pembacaan yang baik, yang ditunjukkan oleh nilai rata-rata standar deviasi sebesar 0,00083 kg. Seluruh hasil pembacaan tetap berada pada kategori beban yang benar, yaitu light (0–2,099 kg), medium (2,100–5,099 kg), dan heavy (5,100–10,000 kg). Dengan demikian, tidak ditemukan kesalahan klasifikasi akibat kesalahan pengukuran sehingga hasil penimbangan dapat digunakan sebagai masukan bagi pengendali *fuzzy logic*.

Berdasarkan seluruh hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode *offset (tare)* mampu mengurangi pengaruh berat awal platform penimbangan sehingga sistem dapat mengukur berat beban dengan lebih akurat dan konsisten. Rata-rata selisih pengukuran sebesar 17 gram, rata-rata *error* sebesar 0,34%, serta nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa sistem penimbangan memiliki performa yang baik. Dengan tingkat akurasi sekitar 99,66%, kestabilan pembacaan yang tinggi, dan tidak ditemukannya kesalahan klasifikasi

beban, sistem penimbangan dinilai layak digunakan sebagai masukan pada proses klasifikasi beban dan penentuan target posisi *lifting* menggunakan pengendali *fuzzy logic*.

4.4 Pengujian Finite State Machine (FSM)

Pengujian *Finite State Machine* (FSM) dilakukan untuk memastikan seluruh *state* pada sistem *lifting robot mobile* dapat berjalan sesuai dengan urutan yang telah dirancang dapat dilihat pada lampiran gambar hasil status ditampilkan di LCD I2C. FSM digunakan sebagai metode pengendalian utama untuk mengatur alur kerja sistem mulai dari kondisi awal, proses penimbangan, pengangkatan, penahanan posisi, hingga kembali ke posisi awal. Pengujian dilakukan dengan mengamati perubahan *state* yang terjadi selama sistem beroperasi berdasarkan data yang tersimpan pada file log hasil pengujian yang dikaji pada Tabel 4. 4.

Tabel 4. 4 Pengujian *Finite State Machine* (FSM)

No State	Kondisi Pemicu	State Berikutnya	Status
1 <i>Idle</i>	Tombol Start ditekan	Naik_3cm	Berhasil
2 Naik_3cm	Tinggi mencapai 3 cm	<i>Weighing</i>	Berhasil
3 <i>Weighing</i>	Berat berhasil dibaca dan target lifting telah ditentukan	<i>lifting</i>	Berhasil
4 <i>lifting</i>	Tinggi aktual mencapai target lifting	<i>Hold</i>	Berhasil
5 <i>Hold</i>	Robot menerima perintah untuk menuju posisi tujuan (<i>navigation</i>)	<i>Lower</i>	Berhasil
6 <i>Lower</i>	Linear actuator mencapai posisi bawah (0 cm)	<i>Idle</i>	Berhasil

Berdasarkan Tabel 4.4 seluruh *state* pada sistem berhasil berjalan sesuai dengan urutan yang telah dirancang. Sistem dimulai dari *state idle* sebagai kondisi standby. Ketika tombol *start* ditekan, sistem berpindah ke *state* naik_3cm untuk mengangkat platform sejauh 3 cm sebelum proses penimbangan dilakukan. Setelah ketinggian tercapai, sistem masuk ke *state weighing* untuk membaca berat menggunakan empat sensor *load cell* dan menentukan kategori beban. Selanjutnya

sistem berpindah ke *state lifting*, dimana linear actuator bergerak menuju target *lifting* sesuai hasil klasifikasi beban. Beban *light* diarahkan ke target 10 cm, beban sedang ke target 8 cm, dan beban berat ke target 6 cm. Setelah target tercapai, sistem masuk ke *state hold* untuk mempertahankan posisi actuator selama robot *mobile* melakukan proses navigasi menuju lokasi tujuan.

Ketika Raspberry Pi mengirimkan sinyal bahwa robot *mobile* telah sampai di lokasi tujuan, sistem berpindah ke *state lower* untuk menurunkan actuator hingga kembali ke posisi awal. Setelah posisi awal tercapai, sistem kembali ke *state idle* dan siap menjalankan proses berikutnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap *state* dapat berpindah ke *state* berikutnya sesuai kondisi yang telah ditentukan tanpa terjadi kesalahan transisi. Tidak ditemukan *state* yang terlewati maupun perpindahan *state* yang tidak sesuai urutan. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Finite State Machine* (FSM) mampu mengatur alur kerja sistem *lifting* secara terstruktur mulai dari proses penimbangan, klasifikasi beban, pengangkatan, penahanan posisi, hingga pengembalian actuator ke posisi awal. Secara keseluruhan, FSM berhasil menjalankan seluruh fungsi sistem sesuai perancangan dengan tingkat keberhasilan sebesar 100%. Hasil ini menunjukkan bahwa FSM dapat digunakan sebagai metode kendali untuk mengatur proses *lifting* agar berjalan secara berurutan, aman, dan mudah dikontrol.

4.5 Desain Membership Function Fuzzy dan Penyesuaian Parameter (*trial and Error*)

Membership function fuzzy pada penelitian ini dirancang untuk mengatur kecepatan *linear actuator* berdasarkan dua variabel masukan, yaitu berat beban dan *error* posisi terhadap target ketinggian. Fungsi keanggotaan yang digunakan merupakan kombinasi antara *triangular membership function* dan *shoulder membership function*. Bentuk segitiga digunakan pada kategori tengah, sedangkan bentuk *left shoulder* dan *right shoulder* digunakan pada kategori batas bawah dan batas atas. Pada implementasinya, bentuk *shoulder* tetap direpresentasikan dalam format parameter dengan adanya titik parameter yang berulang, misalnya (0, 0, 2.3) untuk *left shoulder* dan (4.9, 10, 10) untuk *right shoulder*. Pemilihan bentuk ini dilakukan karena sederhana, mudah diterapkan pada mikrokontroler, serta memiliki

kebutuhan komputasi yang relatif *light*. Sistem *lifting* yang diuji memiliki variasi beban yang berbeda, sehingga respons aktuator tidak selalu sama pada setiap kondisi pengujian. Perubahan massa beban dapat memengaruhi kecepatan gerak aktuator, nilai PWM yang dibutuhkan, waktu pencapaian target, serta besar osilasi yang terbaca oleh sensor MPU6050.

Proses *trial and error* dilakukan dengan mempertahankan parameter *input* berat dan parameter *input* selisih target, sedangkan rentang *membership function* pada variabel *output* PWM diubah secara bertahap. Setiap konfigurasi diuji menggunakan lima variasi beban aktual, yaitu 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Data pengujian diperoleh dari hasil *logging* sensor MPU6050, *load cell*, dan sensor jarak HC-SR04 pada sistem *lifting*.

Pada pengolahan data ini, evaluasi osilasi difokuskan hanya pada fase aktif pengangkatan, yaitu data dengan kondisi *state* = *lifting*. Pemilihan kondisi tersebut dilakukan agar nilai rata-rata osilasi tidak tercampur dengan kondisi diam atau kondisi lain, seperti *idle*, *lower*, *holding*, dan *weighing*, yang tidak merepresentasikan respons gerak aktuator saat proses pengangkatan berlangsung. Dengan demikian, nilai osilasi yang dianalisis lebih relevan untuk menilai kestabilan sistem ketika aktuator benar-benar bergerak menuju target ketinggian.

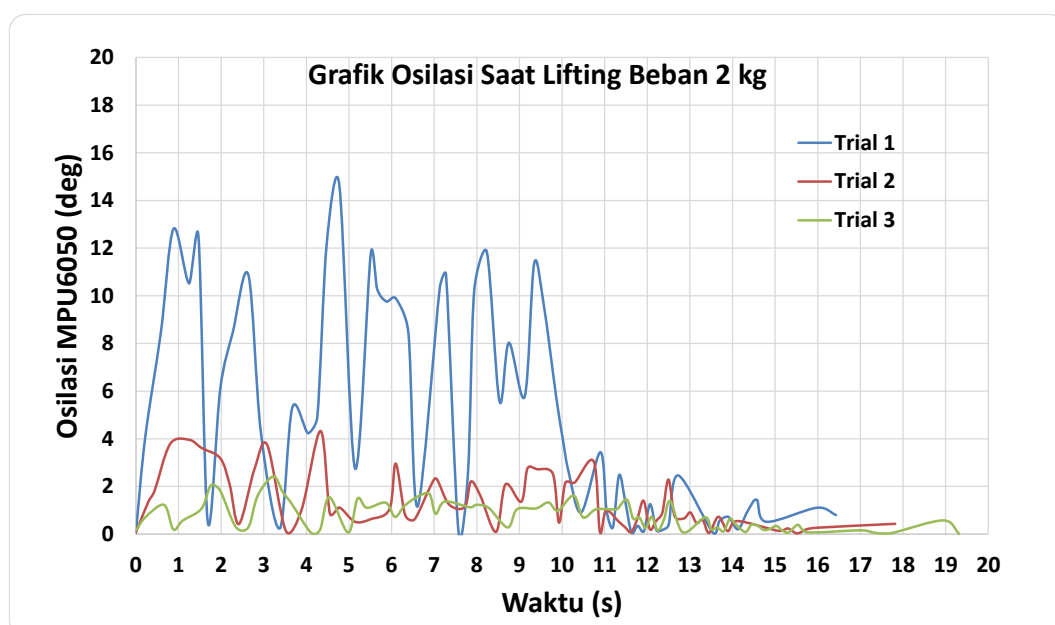
Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.5, konfigurasi *membership function* pada setiap *trial* memiliki parameter masukan berat dan selisih target yang sama. Perbedaan utama antar-*trial* terletak pada rentang *output* PWM. Pada *trial* 1, nilai PWM yang digunakan relatif lebih tinggi. Pada *trial* 2, rentang PWM mulai diturunkan, sedangkan pada *trial* 3 rentang PWM dibuat lebih rendah untuk mengurangi respons aktuator yang terlalu agresif. Perubahan rentang PWM ini bertujuan untuk memperoleh gerakan *lifting* yang lebih halus dan mengurangi osilasi pada sistem.

Tabel 4. 5 Konfigurasi Parameter Membership Function pada Setiap *trial*

No Percobaan	Parameter Berat	Parameter SelisihTarget	Parameter Output PWM
1 <i>trial 1</i>	<i>light</i> :	<i>very close</i> :	<i>slow</i> :
	(0,0,2.3)	(0,0,2)	(0,40,90)
	<i>medium</i> :	<i>close</i> :	<i>medium</i> :
	(1.9,3.6,5.3)	(1,5,9)	(70,130,180)
	<i>heavy</i> :	<i>far</i> :	<i>fast</i> :
	(4.9,10,10)	(8,10,10)	(160,220,255)
2 <i>trial 2</i>	<i>light</i> :	<i>very close</i> :	<i>slow</i> :
	(0,0,2.3)	(0,0,2)	(0,35,80)
	<i>medium</i> :	<i>close</i> :	<i>medium</i> :
	(1.9,3.6,5.3)	(1,5,9)	(60,120,170)
	<i>heavy</i> :	<i>far</i> :	<i>fast</i> :
	(4.9,10,10)	(8,10,10)	(150,210,245)
3 <i>trial 3</i>	<i>light</i> :	<i>very close</i> :	<i>slow</i> :
	(0,0,2.3)	(0,0,2)	(0,30,70)
	<i>medium</i> :	<i>close</i> :	<i>medium</i> :
	(1.9,3.6,5.3)	(1,5,9)	(50,110,160)
	<i>heavy</i> :	<i>far</i> :	<i>fast</i> :
	(4.9,10,10)	(8,10,10)	(140,200,235)

Berdasarkan Tabel 4.5, penurunan rentang PWM dari *trial 1* hingga *trial 3* dilakukan untuk melihat pengaruh besar sinyal kendali terhadap kestabilan gerak aktuator. Rentang PWM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aktuator bergerak lebih cepat, tetapi berpotensi menimbulkan lonjakan gerak dan osilasi yang lebih besar. Sebaliknya, rentang PWM yang lebih rendah dapat membuat gerakan aktuator lebih halus, meskipun waktu pencapaian target dapat menjadi lebih lama. Oleh karena itu, perbandingan antar-*trial* digunakan untuk menentukan konfigurasi yang menghasilkan keseimbangan antara kecepatan gerak dan kestabilan osilasi.

Grafik-grafik berikut menampilkan perbandingan hasil pengujian berdasarkan konfigurasi fungsi keanggotaan *trial 1*, *trial 2*, dan *trial 3* pada beban 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Sumbu horizontal menunjukkan waktu relatif sejak kondisi *state = lifting* dimulai, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai osilasi absolut sensor MPU6050 dalam satuan derajat. Penggunaan waktu relatif bertujuan agar perbandingan antar-*trial* lebih mudah dibaca, karena setiap *trial* dapat dimulai pada waktu *logging* yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 4. 4 sampai dengan Gambar 4. 8.

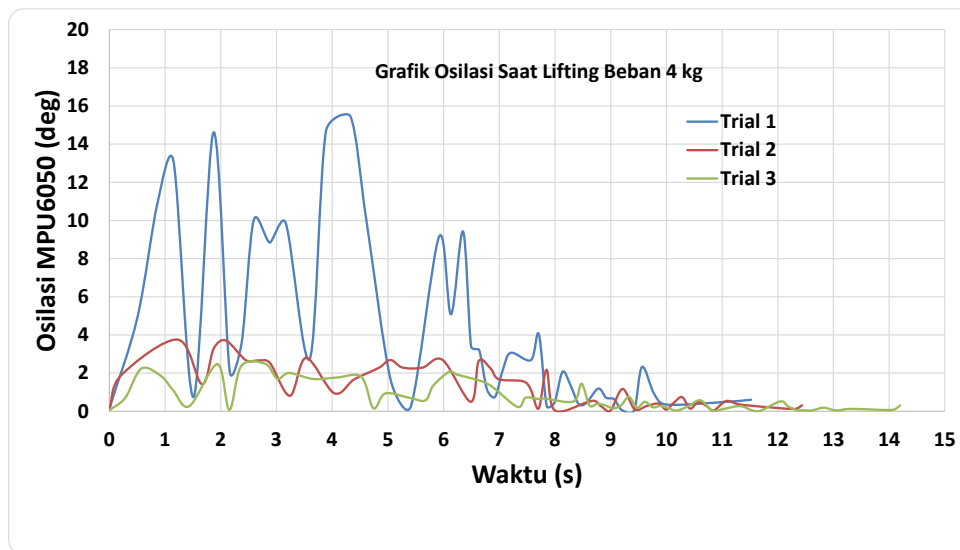


Gambar 4. 4 Grafik *trial and error* Beban 2 kg

Berdasarkan Gambar 4. 4 dan Tabel 4. 6 *trial 3* menghasilkan rata-rata osilasi paling kecil, yaitu 0,756 deg, sedangkan *trial 2* sebesar 1,326 deg dan *trial 1* sebesar 4,815 deg. Jika dibandingkan dengan *trial 1*, rata-rata osilasi pada *trial 3* menurun sekitar 84,30%. Nilai puncak osilasi juga turun dari 14,658 deg pada *trial 1* menjadi 2,421 deg pada *trial 3* atau berkurang sekitar 83,48%. Kondisi tersebut terjadi karena beban 2 kg memiliki massa yang relatif kecil sehingga gaya dorong dari aktuator lebih mudah menghasilkan percepatan yang tinggi. Ketika aktuator menerima nilai PWM yang besar, perpindahan awal menjadi lebih cepat sehingga rangka mekanik mengalami hentakan. Hentakan ini kemudian terbaca oleh sensor

MPU6050 sebagai perubahan sudut yang lebih besar. Oleh karena itu, pada *trial* 1 terlihat banyak lonjakan osilasi karena rentang PWM masih cukup tinggi.

Sebaliknya, *trial* 3 menggunakan rentang PWM yang lebih rendah, yaitu *slow* (0, 30, 70), *medium* (50, 110, 160), dan *fast* (140, 200, 235). Perubahan kecepatan aktuator menjadi lebih bertahap sehingga gaya yang diteruskan ke mekanik juga lebih halus. Dampaknya, amplitudo osilasi dapat ditekan dan grafik pada Gambar 4. 4 menunjukkan pola yang lebih stabil selama proses *lifting*.

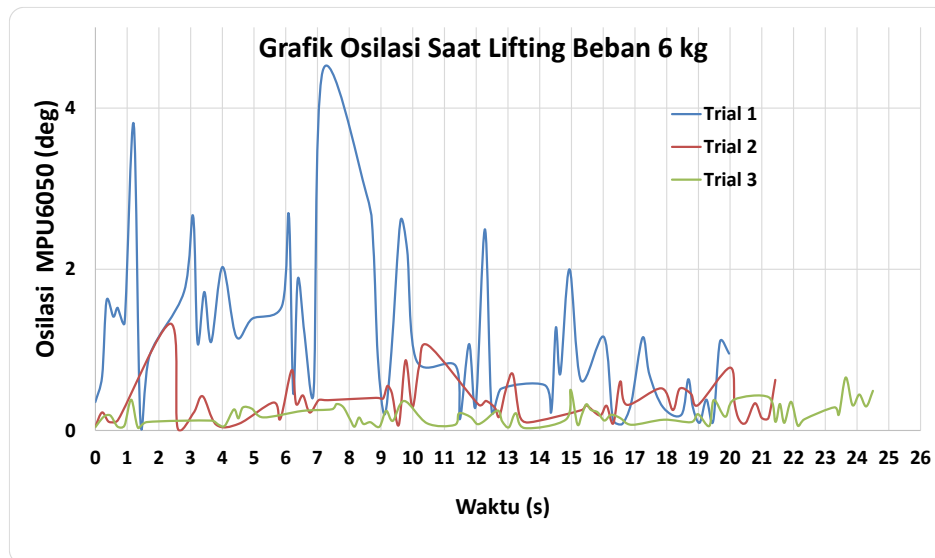


Gambar 4. 5 Grafik *trial* and *error* Beban 4 kg

Berdasarkan Gambar 4. 5 dan Tabel 4. 6, pada beban 4 kg *trial* 3 kembali memberikan performa terbaik dengan rata-rata osilasi sebesar 0,748 deg, sedangkan *trial* 2 sebesar 1,271 deg dan *trial* 1 sebesar 4,095 deg. Nilai tersebut menunjukkan penurunan rata-rata osilasi sekitar 81,72% dibandingkan *trial* 1. Puncak osilasi juga turun dari 15,475 deg menjadi 2,491 deg, atau berkurang sekitar 83,90%.

Meskipun beban bertambah dibandingkan pengujian sebelumnya, massa 4 kg masih tergolong cukup *light* sehingga sistem masih mudah mengalami perubahan percepatan ketika aktuator mulai bergerak. Jika keluaran PWM berubah terlalu besar, gaya awal aktuator akan menghasilkan hentakan pada mekanisme *lifting* sehingga muncul lonjakan sudut yang cukup tinggi. Hal tersebut terlihat pada *trial* 1 yang masih memiliki beberapa spike dengan amplitudo besar.

Pada *trial* 3, keluaran PWM dibuat lebih halus sehingga percepatan aktuator meningkat secara bertahap. Perubahan ini mengurangi gaya kejut pada sambungan mekanik sehingga amplitudo osilasi menjadi lebih kecil. Pola tersebut terlihat pada Gambar 4. 5, di mana fluktuasi sudut lebih rapat dan tidak banyak menunjukkan lonjakan yang ekstrem.

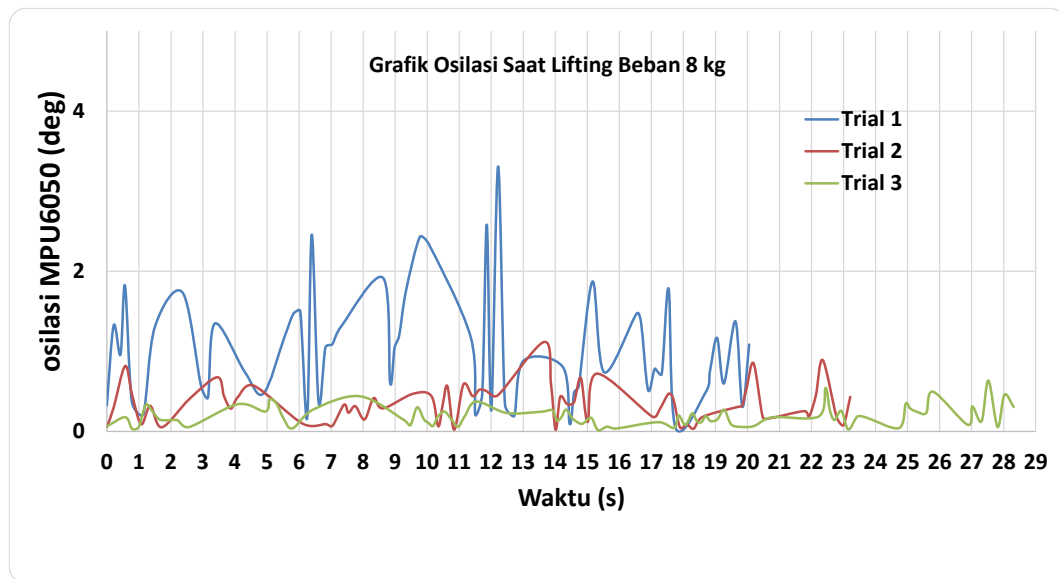


Gambar 4. 6 Grafik *trial* and *error* Beban 6 kg

Berdasarkan Gambar 4.6 dan Tabel 4.6 , pada beban 6 kg *trial* 3 menghasilkan rata-rata osilasi sebesar 0,195 deg, lebih kecil dibandingkan *trial* 2 sebesar 0,363 deg dan *trial* 1 sebesar 1,149 deg. Jika dibandingkan dengan *trial* 1, rata-rata osilasi berkurang sekitar 83,02%, sedangkan puncak osilasi turun dari 4,460 deg menjadi 0,658 deg atau sekitar 85,25%.

Penurunan osilasi pada beban ini dipengaruhi oleh bertambahnya massa yang diangkat. Beban yang lebih besar memiliki inersia lebih tinggi sehingga perubahan gerak mendadak menjadi lebih sulit terjadi. Akibatnya, getaran berfrekuensi tinggi lebih mudah teredam dibandingkan pada beban *light*. Oleh karena itu, rata-rata osilasi pada beban 6 kg lebih rendah dibandingkan pengujian 2 kg dan 4 kg.

Selain dipengaruhi oleh inersia beban, keluaran PWM pada *trial* 3 juga membantu menjaga perpindahan aktuator tetap halus. Perubahan kecepatan yang lebih bertahap membuat koreksi posisi tidak menghasilkan hentakan besar sehingga grafik pada Gambar 4.6 menunjukkan pola yang lebih stabil sepanjang fase *lifting*.

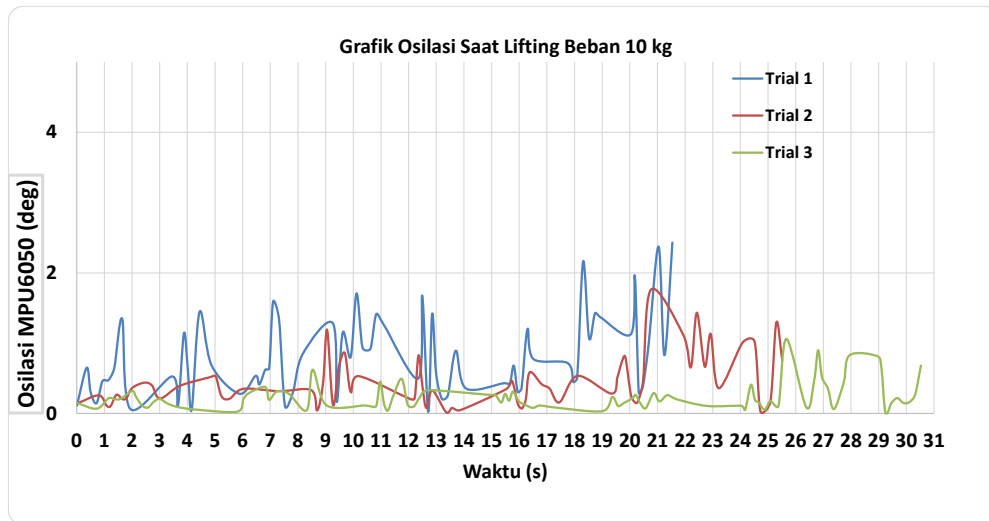


Gambar 4. 7 Grafik *trial and error* Beban 8 kg

Berdasarkan Gambar 4.7 dan Tabel 4.6, pengujian pada beban 8 kg menunjukkan bahwa *trial 3* menghasilkan rata-rata osilasi paling kecil, yaitu 0,194 deg, sedangkan *trial 2* sebesar 0,353 deg dan *trial 1* sebesar 1,033 deg. Dibandingkan *trial 1*, rata-rata osilasi turun sekitar 81,26%, sedangkan puncak osilasi berkurang dari 3,309 deg menjadi 0,637 deg atau sekitar 80,75%.

Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan beban tidak selalu menyebabkan osilasi meningkat. Pada beban yang lebih besar, inersia membantu meredam perubahan gerak secara tiba-tiba sehingga struktur mekanik menjadi lebih stabil. Namun, aktuator tetap memerlukan gaya yang lebih besar untuk mengangkat beban sehingga pengaturan PWM masih berperan penting dalam menjaga kestabilan sistem.

Rentang PWM pada *trial 3* menghasilkan perubahan kecepatan yang lebih halus sehingga gaya yang diberikan ke mekanisme *lifting* tidak berubah secara mendadak. Oleh karena itu, Gambar 4.7 memperlihatkan pola osilasi yang lebih rendah dengan jumlah spike yang lebih sedikit dibandingkan *trial 1* dan *trial 2*.



Gambar 4.8 Grafik *trial and error* Beban 10 kg

Berdasarkan Gambar 4.8 dan Tabel 4.6, *trial 3* tetap memberikan hasil terbaik pada beban 10 kg dengan rata-rata osilasi sebesar 0,239 deg, sedangkan *trial 2* sebesar 0,452 deg dan *trial 1* sebesar 0,808 deg. Dibandingkan *trial 1*, rata-rata osilasi menurun sekitar 70,43%, sedangkan puncak osilasi turun dari 2,430 deg menjadi 1,060 deg atau sekitar 56,38%.

Pada beban maksimum, massa yang lebih besar membuat sistem bergerak lebih lambat sehingga sebagian getaran dapat teredam oleh inersia. Akan tetapi, gaya angkat yang dibutuhkan aktuator juga semakin besar sehingga pengaruh gesekan mekanik, perubahan beban, maupun kestabilan catu daya menjadi lebih terlihat. Kondisi tersebut menyebabkan nilai osilasi tidak selalu terus menurun ketika beban bertambah.

Walaupun demikian, *trial 3* tetap mampu menghasilkan respon yang paling stabil. Rentang PWM yang lebih rendah membuat perubahan kecepatan aktuator berlangsung secara bertahap sehingga hentakan awal maupun koreksi posisi dapat dikurangi. Hal tersebut terlihat pada Gambar 4.8, di mana fluktuasi sudut lebih kecil dibandingkan *trial 1* dan *trial 2*. Untuk hasil Rekapitulasi nilai rata rata osilasi tiap *trial* dikaji pada Tabel 4.6.

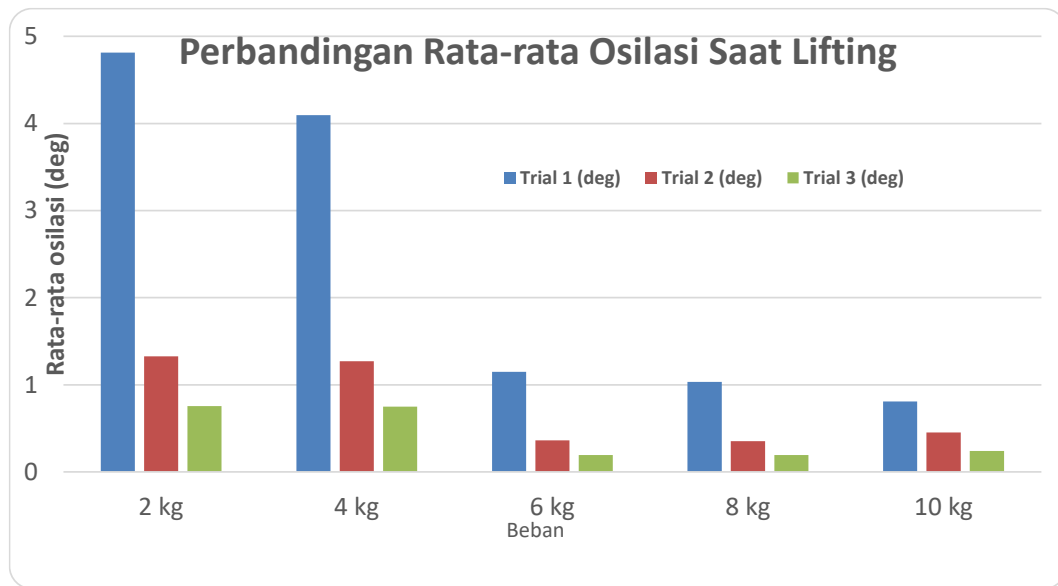
Tabel 4.6 Rekapitulasi Hasil *trial and error* Berdasarkan Osilasi MPU6050

Beban	<i>trial</i> 1 (deg)	<i>trial</i> 2 (deg)	<i>trial</i> 3 (deg)
2 kg	4,815	1,326	0,756
4 kg	4,095	1,271	0,748
6 kg	1,149	0,363	0,195
8 kg	1,033	0,353	0,194
10 kg	0,808	0,452	0,239

Berdasarkan Tabel 4.6 serta Gambar 4.4 hingga Gambar 4.8, terlihat bahwa *trial* 3 secara konsisten menghasilkan rata-rata osilasi paling rendah pada seluruh variasi beban. Hasil ini menunjukkan bahwa penyesuaian parameter output PWM melalui proses *trial and error* berhasil membuat gerakan aktuator menjadi lebih halus sehingga getaran mekanik dapat dikurangi.

Osilasi pada sistem *lifting* terutama muncul ketika aktuator mulai bergerak atau saat melakukan perubahan kecepatan menuju posisi target. Pada kondisi tersebut terjadi percepatan awal yang menghasilkan lonjakan pada rangka, sambungan mekanik, dan beban yang diangkat. Gaya kejut tersebut kemudian terbaca oleh sensor MPU6050 sebagai perubahan sudut. Apabila perubahan PWM terlalu besar, percepatan aktuator menjadi lebih tinggi sehingga amplitudo osilasi juga meningkat. Sebaliknya, perubahan PWM yang lebih bertahap mampu mengurangi hentakan sehingga respon sistem menjadi lebih stabil.

Selain dipengaruhi oleh keluaran PWM, besarnya osilasi juga dipengaruhi oleh karakteristik beban. Beban *light* lebih mudah mengalami perubahan gerak sehingga rata-rata osilasi cenderung lebih tinggi. Sementara itu, beban yang lebih besar memiliki inersia yang membantu meredam getaran cepat. Meskipun demikian, beban yang semakin berat tetap meningkatkan kebutuhan gaya aktuator sehingga kestabilan sistem masih sangat dipengaruhi oleh pengaturan kontrol fuzzy. Secara keseluruhan, hasil pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa konfigurasi *trial* 3 memberikan hasil terbaik antara kemampuan mengangkat beban dan kestabilan Gerak dapat dilihat pada Gambar 4.9. Oleh karena itu, konfigurasi ini dipilih sebagai parameter akhir untuk pengujian sistem pada tahap berikutnya.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan rata-rata osilasi pada *state = lifting*

Pada Gambar 4.9 disajikan perbandingan rata-rata osilasi pada *State lifting* untuk setiap konfigurasi *membership function* hasil proses *trial and error* pada seluruh variasi beban, yaitu 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Grafik ini merupakan rekapitulasi hasil pengujian yang telah dijelaskan pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.8 dan Tabel 4.6 sehingga memudahkan proses evaluasi terhadap performa masing-masing konfigurasi secara keseluruhan.

Proses *trial and error* dilakukan dengan menyesuaikan parameter *Triangular Membership Function* (TRIMF) pada variabel keluaran PWM, sedangkan *membership function* variabel masukan dan *rule base* dipertahankan. Penentuan *rule base* pada penelitian ini didasarkan pada *expert knowledge* mengenai karakteristik mekanik *linear actuator*. Ketika beban ringan dan selisih target masih jauh, aktuator memerlukan nilai PWM yang tinggi agar mampu mencapai target dengan cepat. Sebaliknya, ketika selisih target semakin kecil atau beban semakin besar, nilai PWM diturunkan agar kecepatan aktuator berkurang sehingga pergerakan menuju target menjadi lebih halus dan stabil. Oleh karena itu, perubahan parameter selama proses *trial and error* difokuskan pada variabel keluaran PWM tanpa mengubah *rule base*, sehingga pengaruh perubahan respons sistem berasal dari penyesuaian parameter *membership function* keluaran.

Pemilihan rentang (*range*) setiap *membership function* juga didasarkan pada karakteristik sistem dan hasil pengujian awal (*preliminary testing*). Variabel masukan berat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu ringan, sedang, dan berat, sesuai rentang beban kerja sistem sebesar 0–10 kg. Variabel masukan selisih target dibagi menjadi kategori sangat dekat, dekat, dan jauh berdasarkan besarnya selisih antara posisi aktual dengan target *lifting*. Sementara itu, variabel keluaran PWM dibagi menjadi kategori lambat, sedang, dan cepat untuk merepresentasikan tingkat kecepatan gerak *linear actuator*. Rentang setiap fungsi keanggotaan ditentukan berdasarkan hasil pengujian awal terhadap respons aktuator, kemudian disempurnakan melalui proses *trial and error* hingga diperoleh konfigurasi yang menghasilkan osilasi paling kecil.

Fungsi keanggotaan TRIMF dipilih karena memiliki bentuk yang sederhana, menghasilkan perubahan derajat keanggotaan secara linier, serta mampu menghasilkan perubahan nilai PWM secara bertahap sehingga sesuai dengan karakteristik gerak *linear actuator*. Selain itu, bentuk segitiga memungkinkan terjadinya daerah tumpang tindih (*overlap*) antarfungsi keanggotaan sehingga proses transisi antaraturan (*rule*) berlangsung secara halus tanpa menyebabkan perubahan keluaran yang mendadak. Karakteristik tersebut sangat sesuai untuk sistem *lifting* yang memerlukan perubahan kecepatan secara bertahap agar osilasi dapat diminimalkan.

Berbeda dengan fungsi keanggotaan *trapezoidal* yang memiliki daerah keanggotaan penuh (*plateau*), keluaran sistem cenderung bernilai konstan pada rentang tertentu sehingga perubahan PWM menjadi kurang responsif terhadap perubahan nilai masukan. Kondisi tersebut berpotensi menghasilkan perubahan kecepatan aktuator yang kurang halus ketika mendekati target. Sementara itu, fungsi keanggotaan *Gaussian* mampu menghasilkan transisi yang sangat halus, tetapi memerlukan operasi eksponensial sehingga beban komputasi menjadi lebih tinggi. Mengingat sistem diimplementasikan pada mikrokontroler ATmega2560 yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi, TRIMF dipilih karena mampu memberikan keseimbangan antara kesederhanaan perhitungan, kecepatan eksekusi, dan kualitas respons kendali.

Tujuan penyesuaian parameter *membership function* keluaran PWM adalah memperoleh respons sistem *lifting* yang lebih stabil dengan meminimalkan osilasi selama proses pengangkatan. Pada penelitian ini, nilai osilasi digunakan sebagai indikator performa untuk mengevaluasi setiap konfigurasi *membership function*. Hal ini dikarenakan hingga saat ini belum terdapat nilai baku yang menetapkan batas osilasi yang dianggap ideal pada sistem *lifting* robot *mobile*. Oleh karena itu, konfigurasi terbaik ditentukan berdasarkan hasil pengujian eksperimental, yaitu konfigurasi yang secara konsisten menghasilkan nilai osilasi paling kecil pada seluruh variasi beban.

Berdasarkan Gambar 4.9 terlihat bahwa nilai rata-rata osilasi cenderung menurun dari *Trial 1* hingga *Trial 3* pada seluruh variasi beban. Pola tersebut menunjukkan bahwa penyesuaian parameter TRIMF pada keluaran PWM memberikan pengaruh langsung terhadap karakteristik sinyal kendali yang dihasilkan melalui proses *defuzzification*. Pada *Trial 1*, rentang *membership function* keluaran PWM masih relatif tinggi sehingga nilai PWM hasil *defuzzification* juga lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan *linear actuator* bergerak dengan percepatan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan hentakan mekanik pada awal proses *lifting* dan meningkatkan osilasi. Pada *Trial 2*, rentang keluaran PWM diperkecil sehingga perubahan kecepatan aktuator menjadi lebih bertahap dan osilasi mulai berkurang. Selanjutnya, pada *Trial 3* dilakukan penyesuaian kembali terhadap rentang fungsi keanggotaan keluaran sehingga nilai PWM yang dihasilkan semakin rendah dan perubahan PWM berlangsung lebih halus. Akibatnya, percepatan *linear actuator* menjadi lebih terkendali, proses pengangkatan berlangsung lebih stabil, dan perubahan sudut yang diukur menggunakan sensor MPU6050 menjadi lebih kecil dibandingkan konfigurasi sebelumnya.

Hasil tersebut diperkuat oleh Tabel 4.7 yang menunjukkan bahwa *Trial 3* memiliki rata-rata osilasi keseluruhan paling rendah, yaitu sebesar 0,426 deg dibandingkan *Trial 2* sebesar 0,753 deg dan *Trial 1* sebesar 2,38 deg. Nilai rata-rata osilasi yang semakin kecil menunjukkan bahwa sistem memiliki kestabilan gerakan yang semakin baik selama proses *lifting*. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter

membership function keluaran PWM pada *Trial 3* mampu menghasilkan sinyal kendali yang lebih sesuai dengan karakteristik mekanik sistem sehingga perubahan kecepatan *linear actuator* berlangsung lebih halus. Dampaknya, getaran dan hentakan mekanik selama proses pengangkatan dapat diminimalkan tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam mengangkat beban hingga 10 kg.

Berdasarkan hasil pengujian pada seluruh variasi beban, *Trial 3* memberikan performa kestabilan terbaik sehingga dipilih sebagai konfigurasi akhir (*final*) *membership function* yang digunakan pada sistem. Pemilihan konfigurasi tersebut didasarkan pada hasil evaluasi komparatif terhadap seluruh konfigurasi hasil *trial and error*, di mana *Trial 3* secara konsisten menghasilkan nilai rata-rata osilasi paling rendah, *steady-state error* paling kecil, serta respons gerak aktuator yang paling stabil pada setiap variasi beban. Hasil tersebut menunjukkan bahwa parameter *membership function* keluaran PWM pada *Trial 3* mampu menghasilkan proses *lifting* yang lebih halus dan respons kendali yang paling sesuai dengan karakteristik mekanik sistem.

Selanjutnya, parameter *membership function* yang digunakan sebagai konfigurasi akhir ditunjukkan pada Tabel 4.8. Parameter tersebut meliputi fungsi keanggotaan variabel berat, selisih target, dan keluaran PWM yang diperoleh melalui proses *trial and error*. Konfigurasi *Trial 3* dipilih sebagai parameter akhir karena memberikan keseimbangan terbaik antara kestabilan gerakan, kemampuan mencapai target *lifting*, akurasi posisi akhir, serta kualitas respons kendali sistem berdasarkan hasil pengujian eksperimental. Oleh karena itu, konfigurasi ini digunakan sebagai parameter *membership function* pada implementasi akhir sistem *lifting robot mobile*.

Tabel 4.7 Rekapitulasi Rata-rata Osilasi Keseluruhan

Percobaan	Rata-rata Osilasi (deg)
<i>trial 3</i>	0,426
<i>trial 2</i>	0,753
<i>trial 1</i>	2,38

Tabel 4.8 Membership Function Final yang Digunakan

Variabel	Himpunan Fuzzy	Parameter Membership fuzzy Final
Berat	<i>light</i>	(0, 0, 2.3)
Berat	<i>medium</i>	(1.9, 3.6, 5.3)
Berat	<i>heavy</i>	(4.9, 10, 10)
Selisih Target	<i>very close</i>	(0, 0, 2)
Selisih Target	<i>close</i>	(1, 5, 9)
Selisih Target	<i>far</i>	(8, 10, 10)
PWM	<i>slow</i>	(0, 30, 70)
PWM	<i>medium</i>	(50, 110, 160)
PWM	<i>fast</i>	(140, 200, 235)

4.6 Perbandingan Output *fuzzy logic*

Pengujian respons sistem dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik keluaran sistem *lifting* berbasis *Fuzzy Logic* pada setiap *trial* penyesuaian parameter *membership function* keluaran. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis parameter respons sistem yang meliputi *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai tinggi target, waktu yang dibutuhkan hingga sistem mencapai kondisi stabil, serta tingkat ketelitian sistem terhadap posisi target yang telah ditentukan.

Pengambilan data dilakukan ketika *Finite State Machine* (FSM) memasuki State *lifting*, yaitu kondisi ketika *linear actuator* bergerak menuju tinggi target berdasarkan nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) hasil proses inferensi *Fuzzy Logic*. Selama aktuator bergerak, data tinggi aktuator yang diperoleh dari sensor ultrasonik HC-SR04 direkam secara kontinu hingga sistem berpindah ke State *hold*, yaitu saat aktuator telah berhenti pada posisi akhir. Seluruh parameter respons sistem dihitung menggunakan data yang diperoleh pada rentang waktu tersebut.

Parameter *overshoot* dihitung berdasarkan selisih antara tinggi maksimum yang dicapai aktuator terhadap tinggi target selama proses *lifting*. *Settling time*

didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan sistem sejak memasuki State *lifting* hingga tinggi aktuator berada pada daerah toleransi terhadap tinggi target dan tetap stabil sampai memasuki State *hold*. Sementara itu, *steady-state error* dihitung sebagai selisih antara tinggi target dengan tinggi aktual akhir aktuator sebelum sistem memasuki State *hold*. Nilai *steady-state error* yang semakin kecil menunjukkan bahwa sistem memiliki ketelitian posisi yang semakin baik dalam mencapai tinggi target.

Hasil pengujian respons sistem pada setiap *trial* ditunjukkan pada Tabel 4.9. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat dianalisis pengaruh penyesuaian parameter *membership function* keluaran terhadap karakteristik respons sistem yang meliputi nilai *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error* pada masing-masing variasi beban.

Tabel 4.9 Perbandingan *Output fuzzy logic*

Beban (kg)	<i>Trial</i>	PWM Rata-rata	<i>Overshoot</i> (cm)	<i>Settling Time</i> (s)	<i>Steady-State</i> <i>Error / Selisih</i> Target (cm)
2	<i>Trial 1</i>	98,71	0,00	1,84	0,24
	<i>Trial 2</i>	91,45	0,00	1,63	0,20
	<i>Trial 3</i>	85,40	0,00	1,42	0,16
4	<i>Trial 1</i>	94,50	0,00	1,73	0,25
	<i>Trial 2</i>	83,14	0,00	1,54	0,22
	<i>Trial 3</i>	76,40	0,00	1,34	0,17
6	<i>Trial 1</i>	44,69	0,00	1,48	0,21
	<i>Trial 2</i>	39,61	0,00	1,32	0,19
	<i>Trial 3</i>	34,45	0,00	1,16	0,16
8	<i>Trial 1</i>	44,15	0,00	1,35	0,18
	<i>Trial 2</i>	39,20	0,00	1,21	0,16
	<i>Trial 3</i>	34,20	0,00	1,05	0,11

Beban (kg)	<i>Trial</i>	PWM Rata-rata	<i>Overshoot</i> (cm)	<i>Settling Time</i> (s)	<i>Steady-State Error</i> / Selisih Target (cm)
10	<i>Trial 1</i>	44,12	0,00	1,39	0,20
	<i>Trial 2</i>	39,12	0,00	1,24	0,18
	<i>Trial 3</i>	34,15	0,00	1,08	0,11
Rata-rata	<i>Trial 1</i>	65,23	0,00	1,56	0,216
	<i>Trial 2</i>	58,50	0,00	1,39	0,190
	<i>Trial 3</i>	52,92	0,00	1,21	0,142

Berdasarkan Tabel 4.9, perubahan parameter *membership function* pada variabel keluaran *Fuzzy Logic* memberikan pengaruh terhadap nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) rata-rata yang dihasilkan sistem selama proses *lifting*, *settling time*, serta *steady-state error* yang diperoleh ketika aktuator mencapai posisi akhir. Nilai PWM rata-rata dihitung dari seluruh data ketika sistem berada pada *State lifting*, sedangkan *steady-state error* atau selisih target dihitung berdasarkan selisih antara tinggi target dan tinggi aktual pada data pertama saat sistem memasuki *State hold*. Selain itu, *settling time* dihitung mulai dari saat *Finite State Machine* (FSM) memasuki *State lifting* hingga aktuator mencapai kondisi stabil dan berpindah ke *State hold*. Sementara itu, parameter *overshoot* diperoleh dari selisih antara tinggi maksimum yang dicapai aktuator terhadap tinggi target selama proses *lifting*. Pada seluruh pengujian tidak ditemukan kondisi ketika aktuator melampaui tinggi target, sehingga nilai *overshoot* pada setiap *trial* adalah 0 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menghentikan aktuator sebelum melewati posisi target.

Pada beban 2 kg dan 4 kg, nilai PWM rata-rata mengalami penurunan secara bertahap dari *Trial 1* hingga *Trial 3*. Kondisi tersebut terjadi karena proses *trial and error* pada parameter *membership function* keluaran mempersempit rentang fungsi keanggotaan PWM sehingga hasil *defuzzification* metode Mamdani menghasilkan nilai PWM yang lebih rendah. Penurunan nilai PWM menyebabkan kecepatan

gerak *linear actuator* menjadi lebih kecil ketika mendekati posisi target. Akibatnya, perubahan posisi aktuator berlangsung lebih halus sehingga sistem memiliki waktu yang cukup untuk mencapai kondisi stabil sebelum memasuki *State hold*. Kondisi tersebut ditunjukkan oleh penurunan nilai *settling time* dan *steady-state error* pada kedua variasi beban tersebut.

Karakteristik yang sama juga terlihat pada beban 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Meskipun kategori beban berat menggunakan target *lifting* yang lebih rendah, yaitu 6 cm, hasil *tuning membership function* tetap menghasilkan penurunan PWM secara konsisten pada setiap *trial*. Hal tersebut menunjukkan bahwa perubahan parameter keluaran tidak hanya memengaruhi satu kondisi beban tertentu, tetapi mampu memberikan karakteristik kendali yang seragam pada seluruh rentang pengujian. Penurunan PWM membuat *linear actuator* bergerak dengan percepatan yang lebih terkendali sehingga energi gerak ketika mendekati target menjadi lebih kecil. Akibatnya, kecenderungan terjadinya *overshoot* dapat dihilangkan dan aktuator berhenti tepat pada daerah target tanpa melewati posisi yang telah ditentukan.

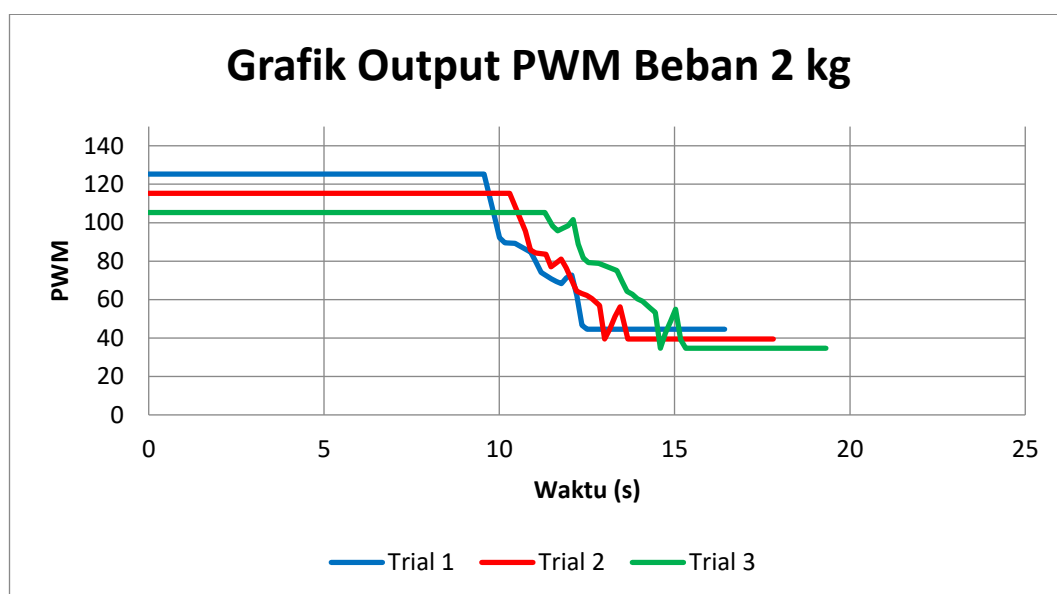
Hubungan antara nilai PWM rata-rata, *settling time*, dan *steady-state error* menunjukkan bahwa proses *tuning membership function* memberikan pengaruh langsung terhadap karakteristik respons sistem. Pada *Trial 1*, keluaran PWM yang relatif lebih besar menyebabkan aktuator bergerak lebih cepat sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil masih relatif lebih lama dan menghasilkan *steady-state error* rata-rata sebesar 0,216 cm. Setelah parameter keluaran disesuaikan pada *Trial 2*, rata-rata PWM menurun menjadi 58,50 sehingga *settling time* menjadi lebih singkat dan *steady-state error* berkurang menjadi 0,190 cm. Penyesuaian kembali pada *Trial 3* menghasilkan PWM rata-rata terendah, yaitu 52,92, yang diikuti dengan *settling time* tercepat serta penurunan *steady-state error* menjadi 0,142 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penurunan keluaran PWM mampu meningkatkan ketepatan posisi akhir karena energi gerak aktuator sebelum berhenti menjadi lebih kecil sehingga sistem dapat berhenti lebih dekat dengan target yang diinginkan tanpa menghasilkan *overshoot*.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa proses *tuning membership function* pada variabel keluaran *Fuzzy Logic* memberikan pengaruh

signifikan terhadap kualitas respons sistem *lifting*. Penyesuaian parameter keluaran tidak hanya mengurangi nilai PWM rata-rata, tetapi juga mempercepat tercapainya kondisi stabil, memperkecil *steady-state error*, serta menghilangkan *overshoot* pada seluruh variasi beban. Dengan demikian, parameter *membership function* keluaran yang digunakan pada *Trial 3* merupakan parameter yang paling optimal karena mampu menghasilkan respons sistem yang lebih stabil, pergerakan aktuator yang lebih halus, serta tingkat akurasi posisi akhir yang paling tinggi dibandingkan *Trial 1* dan *Trial 2*.

4.6.1 Perbandingan Output fuzzy logic Beban 2 kg

Pengujian pada beban 2 kg dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik keluaran *fuzzy logic* terhadap sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) selama proses *lifting*. Data yang dianalisis diambil ketika sistem berada pada *state = lifting*, yaitu sejak *linear actuator* mulai bergerak menuju target hingga sebelum sistem memasuki *state = hold*. Rentang pengambilan data tersebut dipilih karena pada fase inilah *fuzzy logic* secara aktif menghasilkan keluaran PWM untuk mengatur kecepatan gerak aktuator sesuai kondisi beban dan parameter *membership function* yang digunakan. Melalui Gambar 4.10 dan Tabel 4.9, dapat diamati perbandingan karakteristik keluaran rata rata PWM pada *trial 1*, *trial 2*, dan *trial 3* sebagai hasil penyesuaian parameter *membership function* menggunakan metode *trial and error*.



Gambar 4. 10 Grafik Output *fuzzy logic* Beban 2 kg

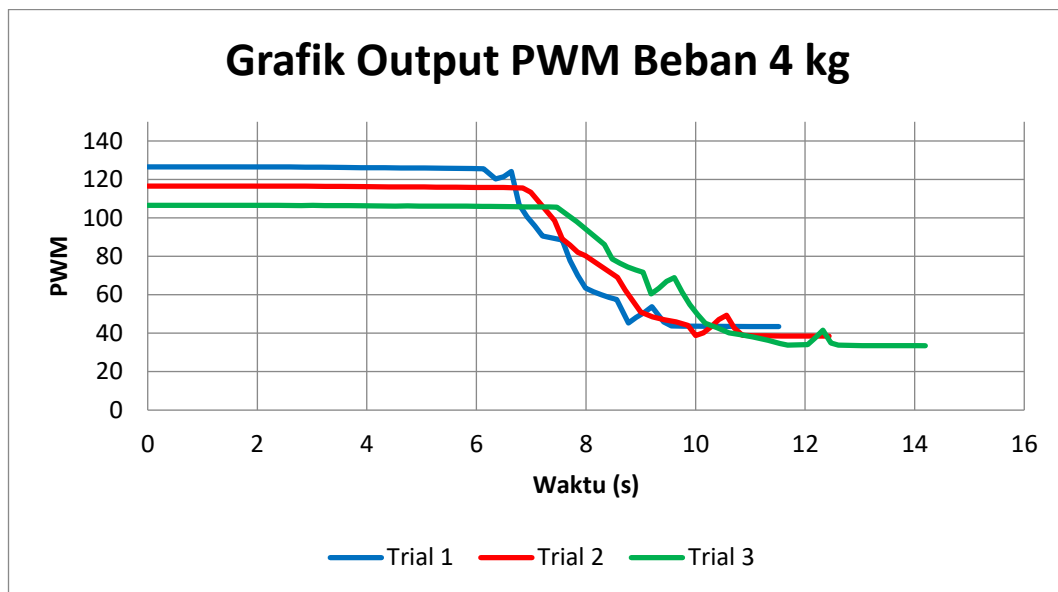
Berdasarkan Gambar 4.10 dan Tabel 4.9, perubahan parameter *membership function* pada setiap *trial* memengaruhi karakteristik keluaran PWM selama proses *lifting* pada beban 2 kg. *trial* 1 menghasilkan PWM rata-rata sebesar 98,71, kemudian menurun menjadi 91,45 pada *trial* 2 dan kembali menurun menjadi 85,40 pada *trial* 3. Penurunan nilai PWM tersebut menunjukkan bahwa proses *trial and error* berhasil menghasilkan keluaran kendali yang lebih moderat tanpa mengubah mekanisme kerja sistem.

Pola tersebut juga terlihat pada grafik keluaran PWM. Ketiga *trial* memiliki karakteristik yang sama, yaitu menghasilkan nilai PWM yang relatif konstan pada awal proses *lifting*, kemudian menurun secara bertahap seiring bertambahnya ketinggian *linear actuator*. Perbedaananya terletak pada besarnya keluaran PWM, di mana *trial* 1 mempertahankan nilai PWM yang lebih tinggi dibandingkan *trial* 2 dan *trial* 3. Kondisi tersebut menyebabkan aktuator bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi sehingga perubahan kecepatan saat mendekati target menjadi lebih besar.

Sebaliknya, *trial* 3 menghasilkan keluaran PWM yang lebih rendah dengan pola penurunan yang lebih bertahap. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa *fuzzy logic* memberikan sinyal kendali yang lebih halus kepada *linear actuator*, sehingga perubahan kecepatan selama proses *lifting* berlangsung lebih terkendali. Secara umum, keluaran PWM yang lebih moderat cenderung menghasilkan respons gerak yang lebih stabil dan mengurangi kecenderungan timbulnya getaran pada mekanisme *lifting*. Hubungan antara karakteristik keluaran PWM dan kestabilan gerakan tersebut telah dibuktikan melalui hasil pengujian osilasi yang telah dibahas pada subbab sebelumnya.

4.6.2 Perbandingan Output *fuzzy logic* Beban 4 kg

Pengujian pada beban 4 kg dilakukan untuk mengevaluasi pola keluaran PWM pada sistem *fuzzy logic*. Grafik PWM dianalisis untuk melihat bagaimana sistem menyesuaikan kecepatan *linear actuator* selama fase pengangkatan aktif (*State lifting*). Melalui **Gambar 4.11**, dapat diamati perbandingan *output fuzzy* pada *trial* 1, *trial* 2, dan *trial* 3.



Gambar 4. 11 Grafik Output *fuzzy logic* Beban 4 kg

Berdasarkan Gambar 4.11 dan Tabel 4.9, perubahan parameter *membership function* pada beban 4 kg memberikan pengaruh terhadap karakteristik keluaran PWM selama proses *lifting*. *trial 1* menghasilkan PWM rata-rata sebesar 94,50, kemudian menurun menjadi 83,14 pada *trial 2* dan kembali menurun menjadi 76,40 pada *trial 3*. Penurunan nilai PWM tersebut menunjukkan bahwa proses *trial and error* menghasilkan keluaran kendali yang semakin halus pada setiap *trial*.

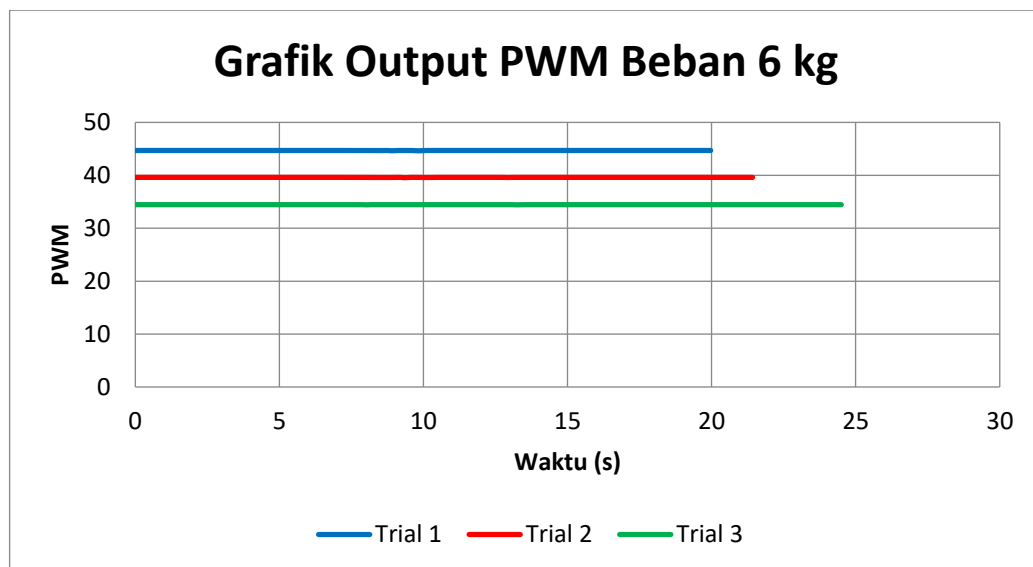
Pola tersebut juga terlihat pada grafik keluaran PWM. Ketiga *trial* menunjukkan pola yang serupa, yaitu nilai PWM relatif konstan pada awal proses *lifting* kemudian menurun secara bertahap seiring *linear actuator* mendekati target ketinggian. Perbedaannya terletak pada besarnya keluaran PWM yang dihasilkan, di mana *trial 1* mempertahankan nilai PWM yang lebih tinggi dibandingkan *trial 2* dan *trial 3*. Kondisi tersebut menyebabkan aktuator bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi sehingga perubahan kecepatan yang terjadi selama proses perlambatan menjadi lebih besar.

Sebaliknya, *trial 3* menghasilkan keluaran PWM yang lebih rendah dengan pola penurunan yang lebih bertahap. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa *fuzzy logic* memberikan sinyal kendali yang lebih moderat kepada *linear actuator*, sehingga perubahan kecepatan selama proses *lifting* berlangsung lebih terkendali. Secara umum, keluaran PWM yang lebih rendah dan berubah secara bertahap

cenderung menghasilkan respons gerak yang lebih halus, sehingga kecenderungan terjadinya getaran pada mekanisme *lifting* dapat diminimalkan. Hubungan antara karakteristik keluaran PWM dan kestabilan gerakan telah dibahas pada subbab pengujian osilasi.

4.6.3 Perbandingan Output *fuzzy logic* Beban 6 kg

Pengujian pada beban 6 kg dilakukan untuk mengevaluasi pola keluaran PWM pada sistem *fuzzy logic*. Grafik PWM dianalisis untuk melihat bagaimana sistem menyesuaikan kecepatan *linear actuator* selama fase pengangkatan aktif (*state lifting*). Melalui Gambar 4.12, dapat diamati perbandingan *output fuzzy* pada *trial 1*, *trial 2*, dan *trial 3*.



Gambar 4. 12 Grafik Output *fuzzy logic* Beban 6 kg

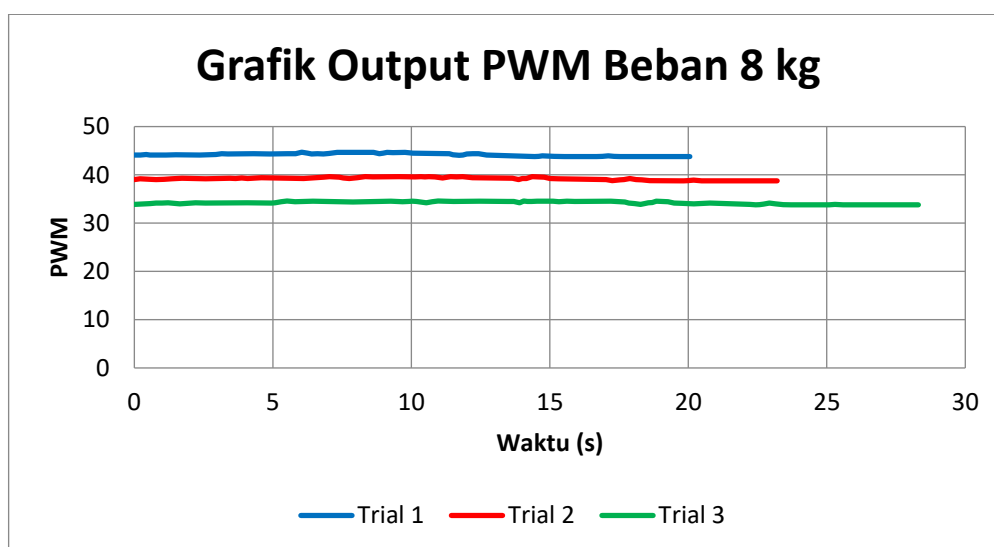
Berdasarkan Gambar 4.12 dan Tabel 4.9, perubahan parameter *membership function* pada beban 6 kg turut memengaruhi karakteristik keluaran PWM selama proses *lifting*. *trial 1* menghasilkan PWM rata-rata sebesar 44,69, kemudian menurun menjadi 39,61 pada *trial 2* dan kembali menurun menjadi 34,45 pada *trial 3*. Nilai PWM rata-rata pada beban 6 kg terlihat jauh lebih rendah dibandingkan pada pengujian beban 2 kg dan 4 kg. Kondisi ini disebabkan karena beban 6 kg termasuk kategori beban berat dengan target *lifting* sebesar 6 cm. Target yang lebih pendek menyebabkan *linear actuator* lebih cepat mendekati posisi tujuan sehingga nilai *error* yang menjadi masukan *fuzzy logic* semakin kecil. Akibatnya, hasil

defuzzification menghasilkan keluaran PWM yang lebih rendah agar aktuator melakukan perlambatan secara bertahap sebelum mencapai target.

Pola tersebut juga terlihat pada grafik keluaran PWM. Ketiga *trial* menunjukkan karakteristik yang sama, yaitu nilai PWM relatif konstan pada awal proses *lifting* kemudian menurun secara bertahap hingga aktuator mendekati target. Perbedaannya terletak pada besarnya keluaran PWM yang dihasilkan, di mana *trial* 1 mempertahankan nilai PWM yang lebih tinggi dibandingkan *trial* 2 dan *trial* 3. Sebaliknya, *trial* 3 menghasilkan keluaran PWM yang lebih rendah dengan pola penurunan yang lebih halus, sehingga perubahan kecepatan aktuator berlangsung lebih bertahap selama proses *lifting*. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa penyesuaian parameter *membership function* mampu menghasilkan sinyal kendali yang lebih moderat sehingga respons gerak *linear actuator* menjadi lebih terkendali. Hubungan antara karakteristik keluaran PWM dan kestabilan gerakan telah dibahas pada subbab pengujian osilasi.

4.6.4 Perbandingan Output fuzzy logic Beban 8 kg

Pengujian pada beban 8 kg dilakukan untuk mengevaluasi pola keluaran PWM pada sistem *fuzzy logic*. Grafik PWM dianalisis untuk melihat bagaimana sistem menyesuaikan kecepatan *linear actuator* selama fase pengangkatan aktif (*State lifting*). Melalui Gambar 4.13, dapat diamati perbandingan *output fuzzy* pada *trial* 1, *trial* 2, dan *trial* 3



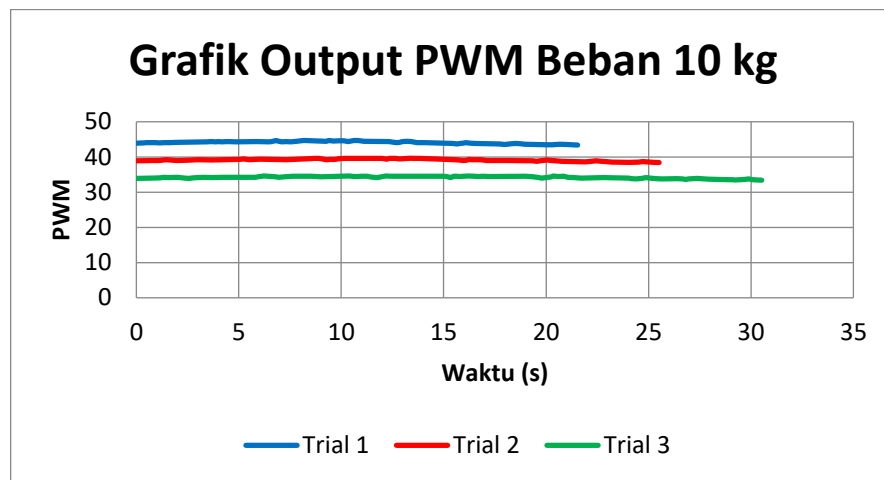
Gambar 4. 13 Grafik Output *fuzzy logic* Beban 8Kg

Berdasarkan Gambar 4.13 dan Tabel 4.9, perubahan parameter *membership function* pada beban 8 kg memengaruhi karakteristik keluaran PWM selama proses *lifting*. *trial* 1 menghasilkan PWM rata-rata sebesar 44,15, kemudian menurun menjadi 39,20 pada *trial* 2 dan kembali menurun menjadi 34,20 pada *trial* 3. Nilai PWM rata-rata tersebut relatif sama dengan hasil pengujian pada beban 6 kg. Kondisi ini disebabkan karena beban 6 kg dan 8 kg sama-sama termasuk kategori beban berat, sehingga keduanya memiliki target *lifting* sebesar 6 cm dan mengaktifkan aturan (*rule base*) *fuzzy logic* yang serupa. Akibatnya, keluaran PWM yang dihasilkan pada kedua pengujian memiliki karakteristik yang hampir sama.

Pola tersebut juga terlihat pada grafik keluaran PWM. Ketiga *trial* menunjukkan nilai PWM yang relatif konstan pada awal proses *lifting* kemudian menurun secara bertahap ketika *linear actuator* mendekati target ketinggian. Perbedaannya terletak pada besarnya keluaran PWM yang dihasilkan, di mana *trial* 1 mempertahankan nilai PWM yang lebih tinggi dibandingkan *trial* 2 dan *trial* 3. Sebaliknya, *trial* 3 menghasilkan keluaran PWM yang lebih rendah dengan pola penurunan yang lebih halus. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa penyesuaian parameter *membership function* mampu menghasilkan sinyal kendali yang lebih moderat sehingga perubahan kecepatan *linear actuator* berlangsung secara bertahap selama proses *lifting*. Hubungan antara karakteristik keluaran PWM dan kestabilan gerakan telah dibahas pada subbab pengujian osilasi.

4.6.5 Perbandingan Output *fuzzy logic* Beban 10 kg

Pengujian pada beban 10 kg dilakukan untuk mengevaluasi pola keluaran PWM pada sistem *fuzzy logic*. Grafik PWM dianalisis untuk melihat bagaimana sistem menyesuaikan kecepatan *linear actuator* selama fase pengangkatan aktif (*state lifting*). Melalui Gambar 4.14, dapat diamati perbandingan *output fuzzy* pada *trial* 1, *trial* 2, dan *trial* 3.

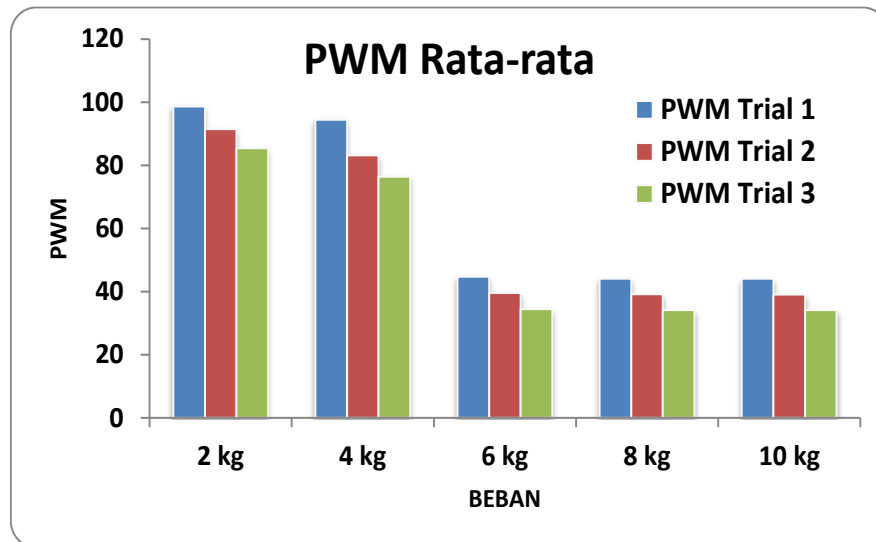


Gambar 4. 14 Grafik Output *fuzzy logic* Beban 10 kg

Berdasarkan Gambar 4.14 dan Tabel 4.9, perubahan parameter *membership function* pada beban 10 kg memengaruhi karakteristik keluaran PWM selama proses *lifting*. *trial* 1 menghasilkan PWM rata-rata sebesar 44,12, kemudian menurun menjadi 39,12 pada *trial* 2 dan kembali menurun menjadi 34,15 pada *trial* 3. Nilai PWM rata-rata tersebut relatif sama dengan hasil pengujian pada beban 6 kg dan 8 kg. Kondisi ini disebabkan karena ketiga variasi beban tersebut termasuk dalam kategori beban berat, sehingga memiliki target *lifting* yang sama, yaitu 6 cm. Selain itu, derajat keanggotaan variabel beban berada pada himpunan *heavy*, sehingga *rule base* yang aktif pada *fuzzy logic* memiliki karakteristik yang serupa. Akibatnya, keluaran PWM yang dihasilkan pada ketiga variasi beban tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

Pola tersebut juga terlihat pada grafik keluaran PWM. Ketiga *trial* menunjukkan nilai PWM yang relatif konstan pada awal proses *lifting* kemudian menurun secara bertahap ketika *linear actuator* mendekati target ketinggian. Perbedaannya terletak pada besarnya keluaran PWM yang dihasilkan, di mana *trial* 1 mempertahankan nilai PWM yang lebih tinggi dibandingkan *trial* 2 dan *trial* 3 dikaji pada Gambar 4.15. Sebaliknya, *trial* 3 menghasilkan keluaran PWM yang lebih rendah dengan pola penurunan yang lebih halus. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa penyesuaian parameter *membership function* mampu menghasilkan sinyal kendali yang lebih moderat sehingga perubahan kecepatan *linear actuator* berlangsung secara bertahap selama proses *lifting*. Karakteristik

keluaran PWM tersebut memberikan respons gerak aktuator yang lebih terkendali, sedangkan pengaruhnya terhadap kestabilan gerakan telah dibahas pada subbab pengujian osilasi.

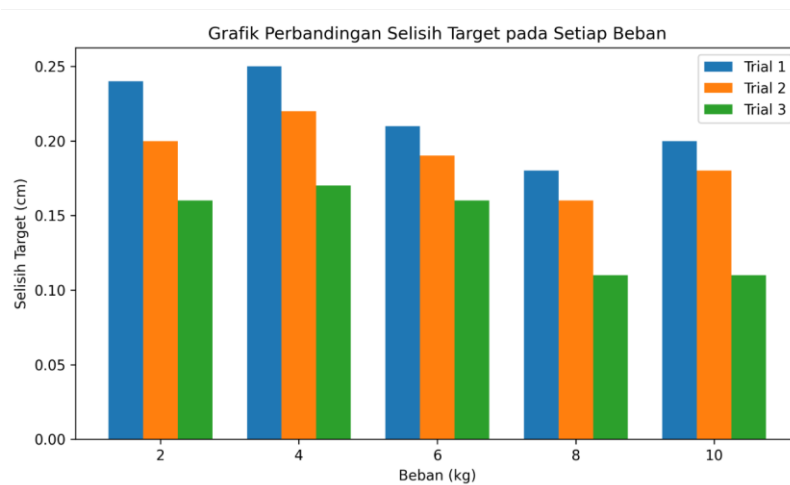


Gambar 4. 15 Grafik PWM rata rata dari Tiap *trial*

Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa proses *trial and error* pada parameter keluaran *fuzzy logic* memberikan pengaruh langsung terhadap karakteristik keluaran sistem. Pada *trial 1*, nilai PWM rata-rata masih relatif tinggi pada seluruh variasi beban sehingga aktuator bergerak dengan kecepatan yang lebih besar selama proses *lifting*. Setelah dilakukan penyesuaian parameter pada *trial 2*, nilai PWM rata-rata mengalami penurunan pada seluruh variasi beban. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa keluaran *fuzzy logic* menjadi lebih moderat sehingga perubahan kecepatan aktuator berlangsung lebih bertahap ketika bergerak menuju target.

Pada *trial 3*, parameter keluaran *fuzzy logic* kembali disempurnakan sehingga menghasilkan nilai PWM rata-rata paling rendah pada seluruh variasi beban. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses *trial and error* berhasil menghasilkan konfigurasi *membership function* yang mampu mengatur kecepatan aktuator secara lebih adaptif. Pengurangan nilai PWM tidak menyebabkan aktuator kehilangan kemampuan untuk mencapai target, tetapi menghasilkan proses pergerakan yang lebih terkendali dibandingkan *trial 1* maupun *trial 2*.

Selain dipengaruhi oleh parameter *membership function*, nilai PWM juga dipengaruhi oleh kategori beban yang telah ditentukan dalam sistem. Beban 2 kg dan 4 kg memiliki target *lifting* yang lebih tinggi dibandingkan beban 6 kg, 8 kg, dan 10 kg sehingga aktuator memerlukan nilai PWM yang lebih besar untuk mencapai target tersebut. Sebaliknya, pada kategori beban yang lebih berat, target *lifting* lebih rendah sehingga kebutuhan PWM juga menurun. Oleh karena itu, nilai PWM rata-rata pada beban 6 kg hingga 10 kg berada pada kisaran 34–45, sedangkan pada beban 2 kg dan 4 kg berada pada kisaran 76–99.



Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Selisih Target pada Setiap Beban

Hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 memperlihatkan perbandingan selisih target pada setiap variasi beban untuk masing-masing *trial*. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa nilai selisih target mengalami penurunan secara konsisten dari *Trial 1* hingga *Trial 3* pada seluruh variasi beban. Pada *Trial 1*, rata-rata selisih target sebesar 0,216 cm, kemudian menurun menjadi 0,190 cm pada *Trial 2*, dan kembali menurun menjadi 0,142 cm pada *Trial 3*. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa proses *trial and error* pada parameter keluaran *Fuzzy Logic Mamdani* berhasil meningkatkan ketepatan posisi akhir *lifting*.

Secara lebih rinci, selisih target terbesar terjadi pada beban 4 kg pada *Trial 1*, yaitu sebesar 0,25 cm, sedangkan selisih target terkecil diperoleh pada beban 8 kg dan 10 kg pada *Trial 3*, yaitu sebesar 0,11 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi *membership function* pada *Trial 3* mampu menghasilkan respons

pengendalian yang lebih adaptif sehingga linear actuator dapat mengurangi kecepatan secara bertahap ketika mendekati posisi target.

Penurunan selisih target pada seluruh variasi beban juga menunjukkan bahwa parameter keluaran *fuzzy logic* yang diperoleh pada *Trial 3* tidak hanya menghasilkan nilai PWM yang lebih sesuai, tetapi juga mampu meningkatkan ketepatan posisi akhir *lifting*. Dengan demikian, hasil pengujian membuktikan bahwa proses penyetelan parameter melalui *trial and error* memberikan pengaruh positif terhadap performa sistem, yaitu menghasilkan posisi akhir yang semakin mendekati target pada seluruh kategori beban yang diuji.

4.7 Pengujian Kesesuaian Posisi *lifting* Berdasarkan Kategori Beban

Pengujian kesesuaian posisi *lifting* dilakukan menggunakan parameter akhir *trial 3* untuk mengevaluasi kemampuan sistem mencapai target pengangkatan berdasarkan hasil klasifikasi beban. Setelah proses penimbangan selesai dan kategori beban ditentukan pada *state weighing*, sistem secara otomatis menetapkan target *lifting*, yaitu 10 cm untuk kategori *light*, 8 cm untuk kategori sedang, dan 6 cm untuk kategori berat.

Selama proses pengangkatan berlangsung, sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan sebagai sensor umpan balik (*feedback*) untuk memantau posisi linear actuator secara kontinu. Nilai posisi aktual diproses secara real-time oleh metode *fuzzy logic* untuk menentukan nilai PWM sehingga kecepatan linear actuator berkurang secara bertahap ketika mendekati target.

Data Tinggi Aktual Akhir pada Tabel 4.10 diambil ketika sistem pertama kali memasuki *state hold*, yaitu sesaat setelah linear actuator berhenti karena target *lifting* telah tercapai. Pengambilan data pada kondisi tersebut dipilih agar posisi yang dicatat merupakan posisi akhir hasil pengendalian *trial 3* sebelum dipengaruhi fluktuasi kecil pembacaan sensor yang masih dapat terjadi selama sistem tetap berada pada *state hold*.

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Kesesuaian Posisi *lifting* Berdasarkan Kategori Beban

No	Berat (kg)	Sistem Kategori Beban	Target (cm)	<i>lifting</i> Tinggi (cm)	Sistem Selisih terhadap Target (cm)
1	2,010	<i>light</i>	10	9,84	0,16
2	3,997	<i>medium</i>	8	7,83	0,17
3	6,005	<i>heavy</i>	6	5,84	0,16
4	7,999	<i>heavy</i>	6	5,89	0,11
5	10,004	<i>heavy</i>	6	5,89	0,11

Berdasarkan Tabel 4.11, sistem berhasil mencapai target *lifting* pada seluruh variasi beban yang diuji dengan tingkat keberhasilan sebesar 100%. Pada kategori *light* dengan berat sistem sebesar 2,010 kg, tinggi aktual akhir yang diperoleh sebesar 9,84 cm terhadap target 10 cm, sehingga menghasilkan selisih terhadap target sebesar 0,16 cm. Pada kategori *medium* dengan berat sistem sebesar 3,997 kg, tinggi aktual akhir mencapai 7,83 cm terhadap target 8 cm, dengan selisih terhadap target sebesar 0,17 cm. Sementara itu, pada kategori *heavy* yang terdiri atas beban 6,005 kg, 7,999 kg, dan 10,004 kg, tinggi aktual akhir masing-masing sebesar 5,84 cm, 5,89 cm, dan 5,89 cm terhadap target 6 cm, sehingga diperoleh selisih terhadap target berturut-turut sebesar 0,16 cm, 0,11 cm, dan 0,11 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai posisi *lifting* yang mendekati target pada seluruh kategori beban dengan penyimpangan yang relatif kecil.

Perbedaan selisih terhadap target pada setiap pengujian dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor pertama adalah karakteristik sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai sensor umpan balik posisi. Sensor ini memiliki resolusi dan toleransi pengukuran tertentu sehingga pembacaan jarak dapat mengalami fluktuasi kecil akibat pantulan gelombang ultrasonik, kondisi permukaan objek, perubahan sudut pantulan, serta gangguan lingkungan di sekitar sensor. Fluktuasi pembacaan tersebut menyebabkan sistem menerima nilai posisi yang sedikit berubah meskipun pergerakan linear actuator relatif kecil.

Faktor kedua adalah karakteristik mekanis linear actuator. Ketika motor menerima perintah berhenti, linear actuator tidak langsung berhenti secara instan

karena masih memiliki inersia dan momentum gerak. Akibatnya, posisi akhir dapat sedikit berbeda dari target yang ditentukan. Pengaruh ini lebih terlihat pada pengujian dengan target *lifting* yang lebih tinggi, yaitu 8 cm dan 10 cm, karena jarak tempuh actuator lebih panjang sehingga energi kinetik yang dimiliki sebelum berhenti juga lebih besar dibandingkan pada target 6 cm.

Selain itu, variasi massa beban turut memengaruhi performa sistem. Beban yang lebih besar menyebabkan gaya yang harus diatasi oleh linear actuator semakin tinggi sehingga respons mekanis actuator menjadi sedikit berbeda dibandingkan saat mengangkat beban *light*. Meskipun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *fuzzy logic* mampu menyesuaikan nilai PWM berdasarkan kategori beban dan selisih terhadap target sehingga kecepatan actuator dapat dikurangi secara bertahap ketika mendekati posisi akhir. Hal ini menyebabkan selisih terhadap target pada kategori berat tetap berada pada kisaran 0,11–0,16 cm, bahkan lebih kecil dibandingkan kategori sedang yang memiliki selisih sebesar 0,17 cm.

Faktor lainnya adalah waktu pemrosesan sistem (*sampling time*). Pembacaan sensor HC-SR04, proses inferensi *fuzzy logic*, serta pengiriman sinyal PWM ke driver motor dilakukan secara periodik sehingga terdapat jeda waktu yang sangat singkat antara perubahan posisi, pembacaan sensor, dan keputusan sistem untuk menghentikan linear actuator. Selama jeda tersebut, actuator masih bergerak beberapa milimeter sebelum benar-benar berhenti. Namun, penggunaan metode *fuzzy logic* mampu meminimalkan pengaruh keterlambatan tersebut melalui penurunan nilai PWM secara bertahap sehingga gerakan actuator menjadi lebih halus dibandingkan kontrol *ON-OFF* yang menghentikan motor secara langsung.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa selisih terhadap target berada pada rentang 0,11–0,17 cm. Jika dibandingkan dengan target *lifting* yang ditentukan, penyimpangan tersebut hanya sekitar 1,1–2,8%, sehingga menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi posisi yang baik. Integrasi sensor *load cell* sebagai penentu kategori beban, sensor HC-SR04 sebagai sensor umpan balik posisi, metode *Finite State Machine* (FSM) sebagai pengatur urutan proses, serta metode *fuzzy logic* sebagai pengendali kecepatan linear actuator mampu bekerja secara sinergis dalam menghasilkan proses *lifting* yang stabil dan

presisi. Dengan demikian, sistem berhasil merealisasikan target pengangkatan sesuai kategori beban pada seluruh variasi beban yang diuji.

4.8 Pengujian Perbandingan Metode *fuzzy logic* Dibandingkan dengan Metode *ON-OFF*

Pengujian perbandingan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja metode *Fuzzy Logic trial 3* dan metode *ON-OFF* pada sistem *lifting robot mobile* dengan kondisi pengujian yang sama. Pengujian dilakukan menggunakan lima variasi beban, yaitu 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg, dan 10 kg. Target *lifting* ditentukan berdasarkan hasil klasifikasi beban pada *State Weighing*, yaitu 10 cm untuk kategori *light*, 8 cm untuk kategori *medium*, dan 6 cm untuk kategori *heavy*. Pada metode *Fuzzy Logic* digunakan konfigurasi *membership function* hasil *trial 3* yang merupakan konfigurasi terbaik berdasarkan hasil pengujian sebelumnya, sedangkan metode *ON-OFF* menggunakan logika pengendalian konvensional dengan nilai PWM tetap sebesar 255 selama aktuator bergerak menuju target.

Data pengujian diperoleh melalui proses *data logging* yang dilakukan secara otomatis selama sistem beroperasi. Pengambilan data dimulai ketika *Finite State Machine* (FSM) memasuki *State Lifting* dan diakhiri saat sistem pertama kali memasuki *State Hold*. Rentang waktu tersebut dipilih karena seluruh proses pengendalian aktuator menuju posisi target berlangsung pada *State Lifting*, sedangkan posisi akhir aktuator telah tercapai ketika sistem memasuki *State Hold*.

Nilai selisih terhadap target diperoleh dari selisih antara tinggi target dan tinggi aktual akhir yang direkam pada data pertama saat sistem memasuki *State Hold*. Nilai standar deviasi getaran dihitung berdasarkan data sudut kemiringan yang diukur sensor MPU6050 selama aktuator bergerak pada *State Lifting*, sehingga mencerminkan tingkat kestabilan sistem selama proses pengangkatan. Sementara itu, nilai PWM rata-rata diperoleh dengan menghitung rata-rata seluruh nilai PWM yang dikirimkan mikrokontroler ke *linear actuator* selama sistem berada pada *State Lifting*. Selain itu, tingkat akurasi kedua metode dibandingkan menggunakan nilai *Mean Absolute Error* (MAE), yang diperoleh dari rata-rata nilai selisih terhadap target pada seluruh variasi beban.

Dengan menggunakan prosedur pengambilan data yang sama pada kedua metode, hasil pengujian dapat dibandingkan secara langsung untuk mengevaluasi akurasi pencapaian target, kestabilan proses *lifting*, karakteristik sinyal kendali yang dihasilkan, serta tingkat kesalahan rata-rata masing-masing metode. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Perbandingan Metode *fuzzy logic* dan *ON-OFF*

Beban (kg)	Selisih terhadap Target (cm)		Selisih terhadap Target <i>ON-OFF</i> (cm)		SD Getaran Fuzzy (°)	SD Getaran <i>ON-OFF</i> (°)	PWM Rata-rata Fuzzy	PWM Rata-rata <i>ON-OFF</i>
	Target	Fuzzy	Target	<i>ON-OFF</i>	Fuzzy (°)	<i>ON-OFF</i> (°)	Fuzzy	<i>ON-OFF</i>
2	0,16		0,97		0,83	1,36	105,08	255
4	0,17		1,41		0,80	1,62	94,85	255
6	0,16		0,39		0,94	1,52	58,44	255
8	0,11		0,73		0,72	1,25	56,96	255
10	0,11		1,21		0,76	1,53	55,79	255

Berdasarkan Tabel 4.12, metode *Fuzzy Logic* (*Trial 3*) memberikan performa yang lebih baik dibandingkan metode *ON-OFF* pada seluruh parameter pengujian. Perbedaan tersebut terlihat dari nilai selisih terhadap target, standar deviasi getaran, dan PWM rata-rata yang dihasilkan selama proses *lifting*. Selain itu, untuk mengevaluasi tingkat akurasi secara keseluruhan dilakukan analisis menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE). Nilai MAE diperoleh berdasarkan perhitungan terhadap seluruh data selisih target pada setiap variasi beban, sedangkan tahapan perhitungannya disajikan pada Lampiran. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, metode *Fuzzy Logic* menghasilkan nilai MAE sebesar 0,142 cm, sedangkan metode *ON-OFF* menghasilkan nilai MAE sebesar 0,942 cm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan posisi akhir metode *Fuzzy Logic* lebih kecil dibandingkan metode *ON-OFF*, sehingga aktuator mampu mencapai posisi target dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Pada parameter selisih terhadap target, metode *Fuzzy Logic* menghasilkan nilai yang lebih kecil pada seluruh variasi beban dibandingkan metode *ON-OFF*.

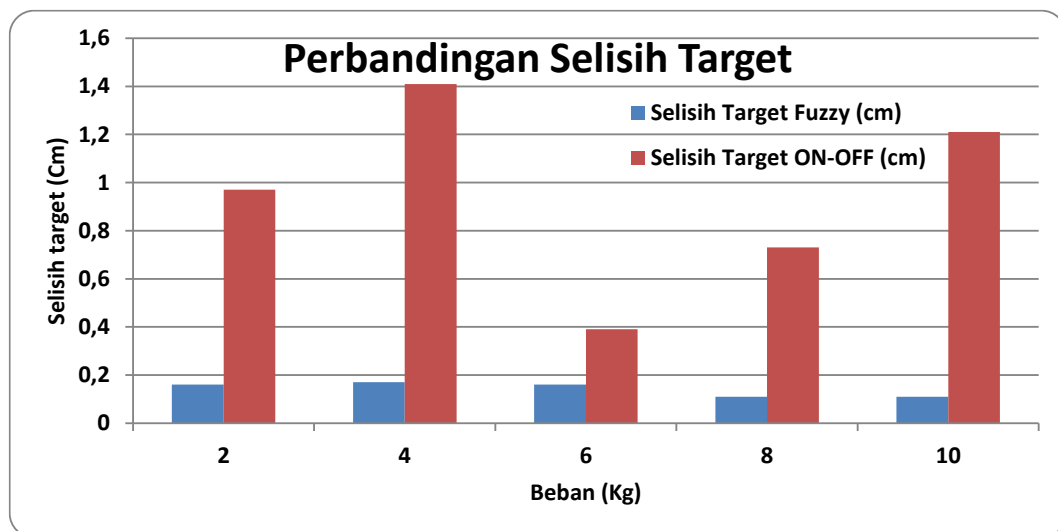
Rata-rata selisih terhadap target pada metode *Fuzzy Logic* sebesar 0,142 cm, sedangkan pada metode ON-OFF sebesar 0,942 cm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa posisi akhir *linear actuator* pada metode *Fuzzy Logic* berhenti lebih dekat dengan target yang telah ditentukan. Hal ini disebabkan keluaran PWM yang dihasilkan *Fuzzy Logic* berubah secara bertahap sesuai kondisi beban dan selisih target, sehingga kecepatan aktuator menurun ketika mendekati target. Sebaliknya, metode ON-OFF menggunakan PWM tetap sebesar 255 selama proses pengangkatan sehingga aktuator bergerak dengan kecepatan konstan hingga mencapai batas penghentian. Kondisi tersebut menyebabkan aktuator masih memiliki momentum gerak yang lebih besar sehingga posisi akhir cenderung lebih jauh dari target.

Selain menghasilkan akurasi yang lebih baik, metode *Fuzzy Logic* juga menunjukkan nilai standar deviasi getaran yang lebih rendah dibandingkan metode ON-OFF pada seluruh variasi beban. Rata-rata standar deviasi getaran metode *Fuzzy Logic* sebesar $0,81^\circ$, sedangkan metode ON-OFF sebesar $1,46^\circ$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses *lifting* menggunakan *Fuzzy Logic* berlangsung lebih stabil dengan fluktuasi sudut yang lebih kecil. Penurunan getaran terjadi karena perubahan PWM dilakukan secara bertahap sehingga percepatan dan perlambatan *linear actuator* menjadi lebih halus. Sebaliknya, perubahan kondisi aktif dan tidak aktif secara langsung pada metode ON-OFF menyebabkan perubahan gaya yang lebih mendadak sehingga meningkatkan getaran pada mekanisme *lifting*.

Perbedaan karakteristik kedua metode juga terlihat pada nilai PWM rata-rata yang dihasilkan. Metode *Fuzzy Logic* menghasilkan PWM rata-rata sebesar 74,22, sedangkan metode ON-OFF menggunakan PWM tetap sebesar 255 pada seluruh variasi beban. Hal tersebut menunjukkan bahwa *Fuzzy Logic* hanya memberikan energi yang diperlukan sesuai kondisi sistem dan secara bertahap mengurangi nilai PWM ketika aktuator mendekati target. Sebaliknya, metode ON-OFF mempertahankan PWM maksimum selama proses pengangkatan sehingga energi yang diberikan kepada aktuator relatif konstan. Akibatnya, gerakan aktuator

menjadi lebih agresif, meningkatkan getaran, serta memperbesar kesalahan posisi akhir terhadap target.

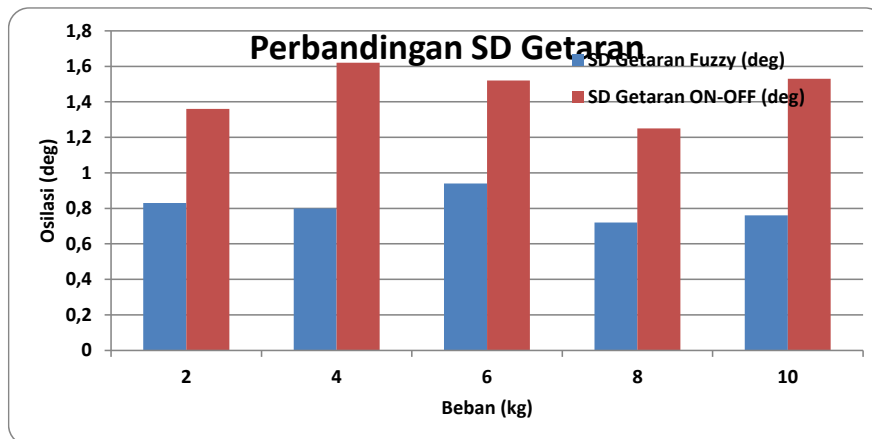
Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa implementasi metode *Fuzzy Logic* (*Trial 3*) mampu menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi berdasarkan nilai MAE, mengurangi getaran sistem, serta menghasilkan sinyal kendali PWM yang lebih adaptif dibandingkan metode ON-OFF. Dengan demikian, metode *Fuzzy Logic* lebih sesuai diterapkan pada sistem *lifting* robot *mobile* karena mampu menghasilkan proses pengangkatan yang lebih halus, stabil, dan presisi pada berbagai variasi beban.



Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan selisih target *fuzzy logic* dan *ON-OFF*

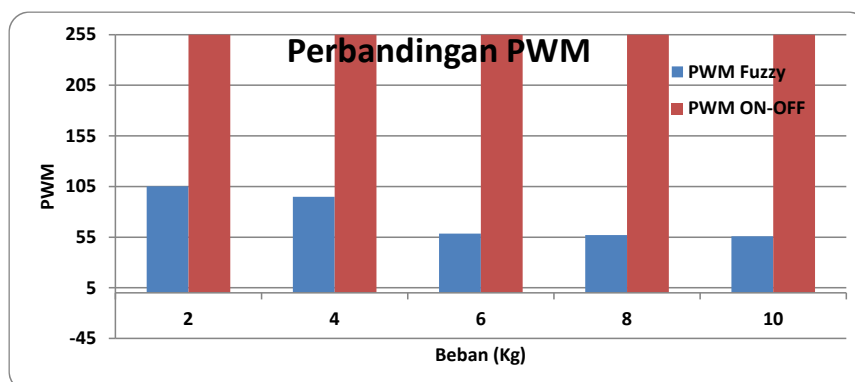
Grafik perbandingan dapat dilihat pada Gambar 4.17 dan Tabel 4.13, selisih terhadap target menunjukkan bahwa metode *fuzzy logic* selalu menghasilkan posisi akhir yang lebih dekat dengan target dibandingkan metode *ON-OFF* pada seluruh variasi beban. Nilai selisih Fuzzy relatif kecil dan cenderung stabil pada setiap pengujian, sedangkan metode *ON-OFF* menunjukkan penyimpangan posisi yang lebih besar. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh mekanisme pengendalian Fuzzy yang mampu menurunkan PWM secara bertahap ketika actuator mendekati target sehingga kecepatan gerak ikut menurun. Sebaliknya, metode *ON-OFF* mempertahankan kecepatan tinggi hingga titik penghentian sehingga masih terdapat momentum gerak yang menyebabkan posisi akhir lebih jauh dari target.

Grafik ini memperlihatkan bahwa *fuzzy logic* memberikan akurasi posisi yang lebih baik pada seluruh variasi beban.



Gambar 4. 18 Grafik Perbandingan Standar Deviasi Getaran *fuzzy logic* dan *ON-OFF*

Grafik standar deviasi yang dimuat pada Gambar 4.18 dan Tabel 4.13, getaran memperlihatkan bahwa metode *fuzzy logic* menghasilkan tingkat getaran yang lebih rendah dibandingkan metode *ON-OFF*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kecepatan actuator pada Fuzzy berlangsung lebih halus sehingga percepatan dan perlambatan tidak terjadi secara tiba-tiba. Sebaliknya, metode *ON-OFF* menghasilkan perubahan gaya yang mendadak akibat pergantian kondisi ON dan OFF sehingga struktur *lifting* mengalami fluktuasi sudut yang lebih besar. Dengan demikian, grafik ini menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu meningkatkan kestabilan mekanik sistem selama proses pengangkatan.



Gambar 4. 19 Grafik Perbandingan PWM *fuzzy logic* dan *ON-OFF*

Grafik PWM pada Gambar 4.19 dan Tabel 4.13 menunjukkan perbedaan karakteristik kedua metode pengendalian. Nilai PWM pada metode *fuzzy logic*

berubah secara adaptif mengikuti kondisi sistem dan cenderung menurun ketika posisi mendekati target. Sebaliknya, metode *ON-OFF* memberikan PWM yang relatif tinggi hampir sepanjang proses pengangkatan karena aktuator bekerja pada kondisi maksimum hingga mencapai batas penghentian. Penggunaan PWM yang lebih terukur pada metode Fuzzy tidak hanya menghasilkan gerakan yang lebih halus, tetapi juga berkontribusi terhadap penurunan getaran serta memperkecil selisih posisi akhir terhadap target.

4.9 Pengujian Integrasi Seluruh Sistem

Pengujian integrasi sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak dalam bekerja secara terpadu sesuai dengan alur kerja yang telah dirancang. Pengujian ini melibatkan empat sensor *load cell* sebagai sensor penimbangan, sensor HC-SR04 sebagai sensor umpan balik (*feedback*) posisi linear actuator, metode *fuzzy logic trial 3* sebagai pengendali kecepatan linear actuator, serta *Finite State Machine* (FSM) sebagai pengatur urutan operasi sistem. Tujuan pengujian ini adalah memastikan bahwa seluruh tahapan proses, mulai dari pembacaan berat, klasifikasi beban, penentuan target *lifting*, pengendalian aktuator, hingga verifikasi posisi akhir dapat berlangsung secara otomatis tanpa terjadi kesalahan logika maupun kesalahan transisi antar-*state*. Pengujian dilakukan menggunakan lima variasi beban, yaitu 2,010 kg, 3,997 kg, 6,005 kg, 7,999 kg, dan 10,004 kg dengan parameter hasil *trial 3* yang telah ditetapkan sebagai konfigurasi akhir sistem.

Hasil pengujian integrasi sistem ditunjukkan pada Tabel 4.12. Tabel tersebut memperlihatkan bahwa seluruh tahapan proses, mulai dari pembacaan berat, klasifikasi beban, penentuan target *lifting*, proses pengangkatan, hingga posisi akhir linear actuator, dapat dijalankan sesuai dengan urutan kerja sistem. Selain itu, rekapitulasi keberhasilan setiap fungsi sistem ditunjukkan pada Tabel 4.13, yang digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan integrasi antara sensor, algoritma pengendalian, aktuator, dan FSM selama proses *lifting* berlangsung.

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Integrasi Sistem

Beban Aktual (kg)	Berat Terbaca Sistem (kg)	Kategori Beban	Target <i>lifting</i> (cm)	Tinggi Aktual Akhir (cm)	Selisih terhadap Target (cm)
2,000	2,010	<i>light</i>	10	9,84	0,16
4,000	3,997	<i>medium</i>	8	7,83	0,17
6,000	6,005	<i>heavy</i>	6	5,84	0,16
8,000	7,999	<i>heavy</i>	6	5,89	0,11
10,000	10,004	<i>heavy</i>	6	5,89	0,11

Tabel 4.13 Rekapitulasi Keberhasilan Integrasi Sistem

Parameter Pengujian	Berhasil	Gagal	Persentase
Pembacaan Load Cell	5	0	100%
Klasifikasi Beban	5	0	100%
Penentuan Target <i>lifting</i>	5	0	100%
Pengendalian <i>fuzzy logic</i>	5	0	100%
Pengendalian Linear Actuator	5	0	100%
Verifikasi Posisi Akhir	5	0	100%
Transisi FSM	5	0	100%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13, seluruh komponen sistem berhasil bekerja secara terintegrasi sesuai dengan urutan operasi yang telah dirancang. Proses diawali dengan pembacaan berat oleh empat sensor *load cell* pada *state weighing*. Nilai berat yang diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan kategori beban sehingga sistem dapat menetapkan target *lifting* secara otomatis, yaitu 10 cm untuk kategori *light*, 8 cm untuk kategori *medium*, dan 6 cm untuk kategori *heavy*. Seluruh proses klasifikasi berhasil dilakukan tanpa terjadi kesalahan identifikasi pada seluruh variasi beban yang diuji.

Selanjutnya, pada *state lifting*, sensor HC-SR04 memberikan informasi posisi *linear actuator* secara *real-time* kepada pengendali *Fuzzy Mamdani trial 3*. Berdasarkan informasi tersebut, *fuzzy logic* menghasilkan nilai PWM yang berubah secara adaptif sesuai dengan selisih antara posisi aktual dan target *lifting*. Ketika posisi masih jauh dari target, sistem memberikan nilai PWM yang lebih besar agar proses pengangkatan berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, ketika posisi mendekati target, nilai PWM secara bertahap dikurangi sehingga kecepatan *linear actuator* menurun secara halus. Karakteristik pengendalian tersebut menyebabkan aktuator mampu berhenti pada posisi yang mendekati target dengan selisih hanya berada pada rentang 0,11–0,17 cm pada seluruh variasi beban.

Berbeda dengan metode *Fuzzy Mamdani*, metode ON-OFF hanya menghasilkan dua kondisi keluaran, yaitu aktuator bergerak dengan PWM tetap atau berhenti ketika target tercapai. Karakteristik tersebut menyebabkan perubahan kecepatan terjadi secara tiba-tiba sehingga *linear actuator* masih memiliki momentum yang relatif besar saat mendekati target. Akibatnya, metode ON-OFF cenderung menghasilkan selisih posisi yang lebih besar dan osilasi yang lebih tinggi dibandingkan metode *Fuzzy Mamdani*. Sebaliknya, pengendalian *Fuzzy Mamdani trial 3* mampu menghasilkan perubahan PWM yang lebih bertahap sehingga perlambatan aktuator berlangsung lebih halus. Dampaknya, hentakan mekanik dapat dikurangi, osilasi menjadi lebih kecil, dan posisi akhir *lifting* menjadi lebih akurat.

Selain dipengaruhi oleh metode *Fuzzy Mamdani*, kecilnya selisih terhadap target juga didukung oleh penggunaan sensor HC-SR04 sebagai umpan balik posisi secara kontinu selama proses *lifting*. Pembacaan posisi secara *real-time* memungkinkan pengendali menyesuaikan nilai PWM berdasarkan kondisi aktual sistem sehingga perlambatan aktuator berlangsung secara bertahap. Akibatnya, momentum gerak *linear actuator* ketika mendekati target dapat dikurangi sehingga posisi akhir menjadi lebih presisi dan kestabilan sistem tetap terjaga.

Dari sisi perangkat lunak, *Finite State Machine* (FSM) berhasil mengatur seluruh perpindahan kondisi sistem secara berurutan mulai dari *idle*, *pre-lift*, *weighing*, *classify*, *lifting*, *hold*, *lower*, hingga kembali ke *idle* tanpa ditemukan

kesalahan transisi (*transition error*) maupun kondisi *deadlock*. Setiap *state* hanya dijalankan setelah kondisi pada *state* sebelumnya terpenuhi sehingga alur kerja sistem berlangsung secara sistematis dan konsisten pada seluruh pengujian.

Rekapitulasi hasil pengujian pada Tabel 4.15. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara sensor *load cell*, sensor HC-SR04, metode *Fuzzy Mamdani trial 3*, *linear actuator*, dan FSM telah berjalan secara sinkron sesuai dengan perancangan sistem. Dibandingkan dengan metode ON-OFF, metode *Fuzzy Mamdani trial 3* memiliki keunggulan dalam menghasilkan perubahan nilai PWM yang adaptif sehingga gerakan *linear actuator* menjadi lebih halus, nilai osilasi lebih kecil, dan akurasi posisi *lifting* lebih tinggi. Namun demikian, metode *Fuzzy Mamdani* memerlukan proses perancangan *membership function*, penyusunan *rule base*, dan proses *tuning* parameter agar diperoleh performa yang optimal, sedangkan metode ON-OFF memiliki implementasi yang lebih sederhana karena hanya menggunakan logika dua kondisi tanpa proses *tuning*. Oleh karena itu, meskipun metode ON-OFF lebih mudah diterapkan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Mamdani trial 3* lebih sesuai digunakan pada sistem *lifting robot mobile* yang membutuhkan proses pengangkatan beban secara stabil dan akurat.