

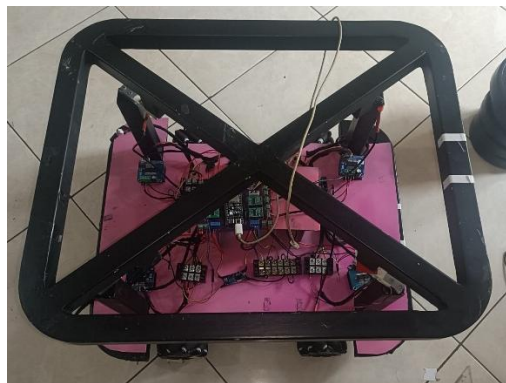
BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Setelah proses perancangan dan pembuatan alat selesai dilakukan, tahapan berikutnya adalah melaksanakan pengujian serta analisis terhadap sistem yang telah dikembangkan. Pengujian bertujuan untuk mengetahui apakah alat mampu beroperasi sesuai dengan rancangan dan memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Agar data yang diperoleh memiliki tingkat keakuratan dan kelengkapan yang baik, diperlukan proses pengecekan, pengukuran, serta evaluasi secara menyeluruh. Selanjutnya, data hasil pengujian dianalisis untuk mengidentifikasi berbagai potensi kendala yang masih muncul pada sistem sekaligus menentukan langkah-langkah perbaikan yang diperlukan guna meningkatkan kinerja alat.

4.1 Hasil Pembuatan Rancangan *Automated Guided Vehicle*.

Hasil penerapan rancangan *Automated Guided Vehicle* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Hasil Chassis Rangka *Automated Guided Vehicle*

Setelah proses perakitan selesai, tahapan berikutnya adalah memasang seluruh komponen elektrik pada sistem dan cover yang akan menutupi AGV. Komponen yang dipasang meliputi baterai, mikrokontroler, driver motor, motor DC, serta komponen pendukung lainnya. Seluruh proses pemasangan dilakukan sesuai dengan rancangan sehingga seluruh komponen elektrik terintegrasi dengan baik pada sasis dan bodi *Automated Guided Vehicle*. Hasil akhir dari proses perakitan komponen elektrik pada bodi *Automated Guided Vehicle* ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Setelah cover terpasang

Setelah melakukan perakitan elektrik, mekanikal dan pemasangan cover pada *Automated Guided Vehicle*, siap dilakukan pengujian dari kemampuan pada *Automated Guided Vehicle* tersebut. sebelum melakukan perakitan pastikan komponen yang digunakan berfungsi dengan baik dan telah diuji untuk mengetahui kondisi dari setiap komponen yang terpasang.

4.2 Pengujian Komponen

Pengujian komponen dilakukan untuk memverifikasi kinerja setiap subsistem secara terpisah sebelum dilakukan integrasi penuh. Metode pengujian mengacu pada spesifikasi teknis masing-masing komponen dan parameter yang telah ditetapkan pada tahap perancangan.

4.2.1 Pengujian Sensor *Load cell*

Pengujian sensor *load cell* dilakukan untuk memverifikasi akurasi sistem penimbangan berbasis empat *load cell full bridge* 10 kg yang dihubungkan ke modul HX711 ADC 24-bit. Pengujian mencakup akurasi per *channel*, akurasi total *platform*, *repeatability* (Presisi), dan pengujian *zero-band*.

A. Pengujian Akurasi Per *Channel* (*Load cell* 1-4)

Pengujian akurasi per *channel* dilakukan dengan meletakkan beban referensi pada *platform* dan membandingkan pembacaan setiap sensor secara independen. Beban diuji dengan 5 variasi untuk memastikan akurasi di seluruh rentang kerja. Data hasil pengujian akurasi keempat *load cell* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Akurasi LC1 (kiri Depan)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	102	102	0	0,00%	100,00%
2	1.239	1.238	1	0,08%	99,92%
3	1.434	1.433	1	0,07%	99,93%
4	2.036	2.035	1	0,05%	99,95%
5	2.138	2.139	1	0,05%	99,95%
Rata-rata			0,8	0,05%	99,95%

Tabel 4.1 hasil pengujian akurasi *load cell* kiri depan dengan 5 kali pengujian dengan beban yang berbeda beda diperoleh nilai rata-rata *error* absolut 0,8 gram, dengan rata-rata *error* persen 0,05%. Nilai tersebut menghasilkan rata-rata akurasi pada *load cell* kiri depan sebesar 99,95%, yang menunjukkan bahwa sensor *load cell* kiri depan (LC1) memiliki tingkat ketelitian yang sangat baik dalam mengukur beban.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Akurasi LC2 (kanan depan)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	102	102	0	0,00%	100,00%
2	1.239	1.239	0	0,00%	100,00%
3	1.434	1.435	1	0,07%	99,93%
4	2.036	2.037	1	0,05%	99,95%
5	2.138	2.141	3	0,14%	99,86%
Rata-rata			1	0,05%	99,95%

Berdasarkan Tabel 4.2, pengujian akurasi *load cell* kanan depan (LC2) yang dilakukan sebanyak 5 kali menggunakan beban referensi yang berbeda. *Load cell* kanan depan memiliki rata-rata *error* absolut sebesar 1 gram, rata-rata persentase *error* sebesar 0,05%, dan rata-rata akurasi mencapai 99,95%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu mengukur beban dengan tingkat ketelitian yang tinggi.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Akurasi LC3 (Kiri belakang)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	102	102	0	0,00%	100,00%
2	1.239	1.240	1	0,08%	99,92%
3	1.434	1.435	1	0,07%	99,93%
4	2.036	2.036	0	0,00%	100,00%
5	2.138	2.140	2	0,09%	99,91%
Rata-rata			0,8	0,05%	99,95%

Berdasarkan Tabel 4.3, pengujian akurasi *load cell* kiri belakang yang telah dilakukan didapatkan hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang tinggi, yang mana menghasilkan rata-rata *error* absolut 0,8 gram, rata-rata persentase *error* sebesar 0,05%, dan rata-rata akurasi mencapai 99,95%.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Akurasi LC4 (Kanan belakang)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	102	100	2	1,96%	98,04%
2	1.239	1.236	3	0,24%	99,76%
3	1.434	1.432	2	0,14%	99,86%
4	2.036	2.035	1	0,05%	99,95%
5	2.138	2.139	1	0,05%	99,95%
Rata-rata			1,8	0,49%	99,51%

Berdasarkan tabel 4.4 pengujian akurasi *load cell* kanan belakang menghasilkan rata-rata *error* absolut sebesar 1,8 gram, rata-rata persentase *error* sebesar 0,49%, dan rata-rata akurasi sebesar 99,51%. Meskipun memiliki *error* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan ketiga *load cell* lainnya, tingkat akurasi yang diperoleh masih sangat baik.

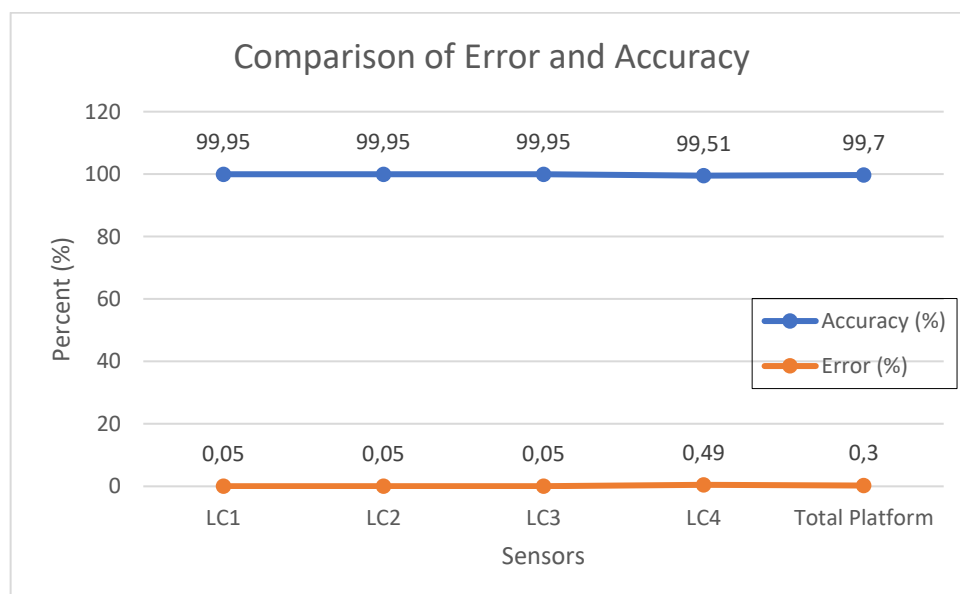
B. Pengujian Akurasi Total Platform

Pengujian total *platform* dilakukan untuk memverifikasi akurasi sistem penimbangan secara keseluruhan (penjumlahan 4 *channel*). Hasil ini yang digunakan sebagai *input* variabel beban pada sistem logika *fuzzy* AGV. Data hasil pengujian akurasi total *platform* dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Akurasi Total *Platform* (gabungan 4 load cell)

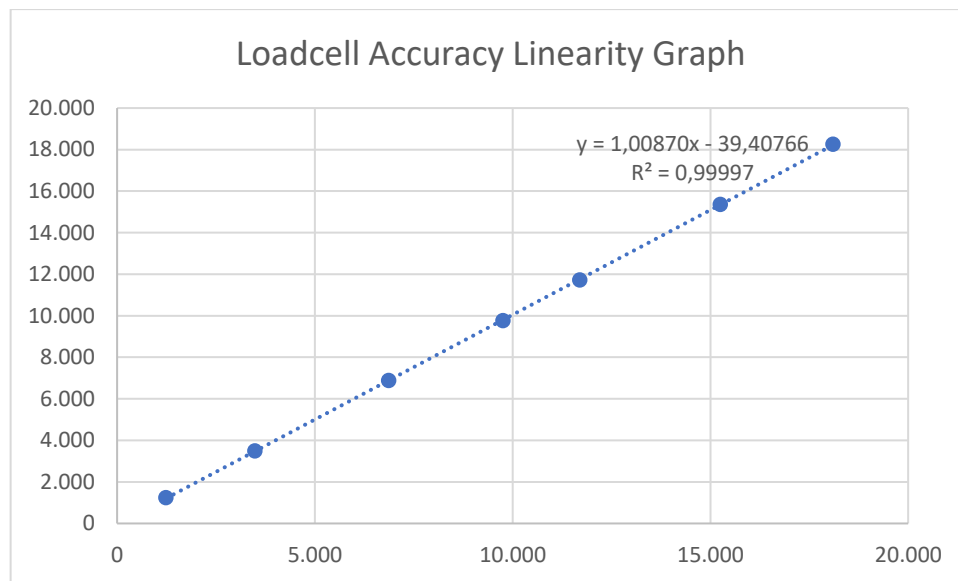
No	Berat Referensi (g)	Hasil <i>Load cell</i> (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	1.240	1.240	0	0,00%	100,00%
2	3.490	3.496	6	0,17%	99,83%
3	6.872	6.881	9	0,13%	99,87%
4	9.757	9.762	5	0,05%	99,95%
5	11.700	11.718	18	0,15%	99,85%
6	15.250	15.360	110	0,72%	99,28%
7	18.100	18.254	154	0,85%	99,15%
Rata-rata			43,1429	0,30%	99,70%

Berdasarkan Tabel 4.5, pengujian akurasi total *platform* dilakukan sebanyak tujuh kali dengan menggunakan variasi beban mulai dari 1.240 gram hingga 18.100 gram. Secara keseluruhan diperoleh rata-rata *error* absolut sebesar 43,14 gram, rata-rata persentase *error* sebesar 0,30%, dan rata-rata akurasi sebesar 99,70%. Meskipun nilai *error* absolut meningkat pada beban yang lebih besar, persentase *error* tetap berada di bawah 1%, sehingga menunjukkan bahwa sistem pengukuran berat berbasis gabungan 4 *load cell* memiliki akurasi yang sangat baik.

**Gambar 4.3** Perbandingan Rata-rata *Error* Absolut dan Akurasi Load cell LC1–LC4 serta Total *Platform*.

Berdasarkan Gambar 4.3, rata-rata *error* absolut pada masing masing *load cell* menunjukkan nilai yang relatif kecil. LC1 dan LC 3 memiliki rata-rata *error* sebesar

0,8 gram, LC2 sebesar 1 gram, sedangkan LC4 Memiliki rata-rata *error* tertinggi, yaitu 1,8 gram. Perbedaan nilai *error* ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik setiap sensor, hasil kalibrasi, serta distribusi beban yang tidak selalu merata pada setiap *load cell*. Meskipun demikian, seluruh sensor memiliki nilai rata-rata akurasi yang tinggi, yaitu 99,51% - 99,95%, sehingga masih mampu mengukur berat dengan baik. Sementara itu, pengujian total *platform* menghasilkan rata-rata *error* absolut sebesar 43,14 gram dengan rata-rata akurasi 99,70%. Nilai *error* yang lebih besar terjadi karena pengukuran merupakan hasil gabungan empat *load cell* pada beban yang lebih besar, sehingga *error* dari masing-masing sensor ikut terakumulasi. Namun, karena persentase *error* hanya 0,30%, sistem penimbangan secara keseluruhan tetap memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan layak digunakan pada AGV.



Gambar 4. 4 Grafik linearitas sensor *load cell*

Gambar 4.4 menunjukkan grafik linearitas akurasi *load cell* berdasarkan hasil pengujian. Berdasarkan perhitungan regresi linear terhadap data pada Tabel 4.5, diperoleh persamaan regresi linear $y = 1,00870x - 39,40766$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,999972. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa hubungan antara hasil pembacaan load cell dan berat referensi memiliki tingkat kesesuaian linear yang sangat tinggi. Nilai kemiringan (*slope*) sebesar 1,00870 yang mendekati nilai ideal 1 menunjukkan bahwa perubahan hasil pembacaan load cell

memiliki hubungan yang hampir proporsional terhadap perubahan berat referensi. Dengan demikian, sistem penimbangan menggunakan gabungan empat load cell menunjukkan karakteristik linearitas yang sangat baik pada rentang pengujian yang dilakukan.

C. Pengujian *Repeatability* (Presisi)

Pengujian *repeatability* (presisi) dilakukan untuk mengetahui konsistensi pembacaan *load cell* ketika mengukur beban yang sama secara berulang. Pada pengujian ini digunakan beban referensi sebesar 2.038 gram yang diukur sebanyak enam kali pada setiap *load cell* seperti tampak pada Gambar 4.5. Hasil pengujian kemudian dianalisis berdasarkan nilai *error* dan akurasi yang diperoleh.



Gambar 4. 5 Hasil Pengujian *Repeatability Load cell* (Beban Referensi: 2038 Gram)

Di bawah ini merupakan data-data yang didapat setelah melakukan percobaan sebanyak enam kali secara berulang dengan beban referensi yang sama pada masing masing *load cell* untuk mendapatkan nilai akurasi:

Load cell 1 (kiri depan)

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian *Repeatability Load cell* 1 (Beban Referensi: 2038 Gram)

No	Berat Referensi (g)	Hasil <i>Load cell</i> (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	2.038	2.040	2	0,10%	99,90%
2	2.038	2.037	1	0,05%	99,95%
3	2.038	2.037	1	0,05%	99,95%
4	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
5	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
6	2.038	2.040	2	0,10%	99,90%

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
	Rata-rata		1	0,05%	99,95%

Berdasarkan tabel 4.6 hasil pengujian *repeatability* pada *load cell* kiri depan menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat konsistensi yang sangat baik. Dari enam kali pengukuran, nilai yang terbaca berada pada rentang 2.037 - 2.040 gram dengan selisih pembacaan maksimum 2 gram. Rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 1 gram atau 0,05%, sedangkan rata-rata akurasi mencapai 99,95%. Perbedaan pembacaan yang kecil ini disebabkan oleh toleransi sensor dan variasi pengukuran yang masih berada dalam batas wajar, sehingga *load cell* 1 dapat dikatakan memiliki presisi yang baik.

Load cell 2 (kanan Depan)

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian *Repeatability* Load cell 2 (Beban Referensi: 2038 Gram)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	2.038	2.036	2	0,10%	99,90%
2	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
3	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
4	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
5	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
6	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
	Rata-rata		0,333333	0,02%	99,98%

Berdasarkan Tabel 4.7 hasil pengujian *repeatability* pada *load cell* kanan depan menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat konsistensi yang sangat baik. Dari enam kali pengukuran, lima pengukuran menghasilkan nilai yang dengan berat referensi, sedangkan satu pengukuran memiliki selisih 2 gram. Rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 0,33 gram atau 0,02%, dengan rata-rata akurasi mencapai 99,98%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *load cell* 2 memiliki presisi yang sangat baik karena menghasilkan pembacaan yang konsisten dengan variasi pengukuran yang sangat kecil.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian *Repeatability Load cell 3* (Beban Referensi: 2038 Gram)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	2.038	2.035	3	0,15%	99,85%
2	2.038	2.035	3	0,15%	99,85%
3	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
4	2.038	2.037	1	0,05%	99,95%
5	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
6	2.038	2.038	0	0,00%	100,00%
Rata-rata			1,16666667	0,06%	99,94%

Berdasarkan Tabel 4.8 hasil pengujian *repeatability* pada *load cell* kiri belakang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat konsistensi yang baik. Dari enam kali pengukuran, hasil pembacaan berada pada rentang 2.035 – 2.038 gram, dengan selisih pembacaan maksimum 3 gram. Rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 1,17 gram atau 0,06%, sedangkan rata-rata akurasi mencapai 99,94%. Perbedaan pembacaan yang kecil tersebut masih berada dalam batas yang wajar dan menunjukkan bahwa *load cell 3* mampu memberikan hasil pengukuran yang cukup stabil dan memiliki presisi yang baik

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian *Repeatability Load cell 4* (Beban Referensi: 2038 Gram)

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	2.038	2.037	1	0,05%	99,95%
2	2.038	2.040	2	0,10%	99,90%
3	2.038	2.040	2	0,10%	99,90%
4	2.038	2.040	2	0,10%	99,90%
5	2.038	2.040	2	0,10%	99,90%

No	Berat Referensi (g)	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
6	2.038	2.039	1	0,05%	99,95%
Rata-rata			1,666667	0,08%	99,92%

Berdasarkan Tabel 4.9 hasil pengujian *repeatability* pada *load cell* kanan belakang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat konsistensi yang baik. Dari enam kali pengukuran, hasil pembacaan berada pada rentang 2.037 – 2.040 gram, dengan selisih pembacaan maksimum 2 gram. Rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 1,67 gram atau 0,08%, sedangkan rata-rata akurasi mencapai 99,92%. Perbedaan pembacaan yang didapat masih dalam batas yang wajar dan menunjukkan bahwa *load cell* 4 mampu memberikan hasil pengukuran yang stabil serta memiliki presisi yang baik.

Setelah dilakukan pengujian *repeatability* pada masing-masing *load cell*, pengujian dilanjutkan pada gabungan empat *load cell* (total *platform*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat konsistensi pembacaan sistem secara keseluruhan ketika beban yang sama ditempatkan pada beberapa posisi berbeda di atas *platform*. Beban referensi yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Berat referensi pengujian *repeatability*

Berikut adalah hasil dari pengujian *repeatability* gabungan 4 *load cell* yang diuji dengan beban referensi 5.631 gram yang diletakkan pada beberapa posisi berbeda ditas *platform*.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian *Repeatability* (Presisi) gabungan 4 Load cell (Beban Referensi: 5631 Gram)

No	Berat Referensi (g)	Letak beban	Hasil Load cell (g)	Error (g)	Error (%)	Akurasi (%)
1	5.631	Tengah	5.603	28	0,49 %	99,51 %
2	5.631	Depan kanan	5.588	43	0,76 %	99,24 %
3	5.631	Depan kiri	5.603	28	0,49 %	99,51 %
4	5.631	Belakang kiri	5.615	16	0,28 %	99,72 %
5	5.631	Belakang kanan	5.604	27	0,47 %	99,53 %
6	5.631	Belakang	5.652	21	0,37 %	99,63 %
7	5.631	Depan	5.627	4	0,07 %	99,93 %
8	5.631	Tengah	5.635	4	0,07 %	99,93 %
Rata-rata			5.616	21,375	0,38%	99,62%
Standar Deviasi			20,85623	13,2010	-	-

Berdasarkan Tabel 4.10, hasil pengujian *repeatability* pada gabungan empat *load cell* (total *platform*) dilakukan sebanyak delapan kali menggunakan beban referensi 5.631 gram yang ditempatkan pada beberapa posisi, yaitu tengah, depan kanan, depan kiri, belakang kiri, dan belakang kanan. Hasil pengukuran menunjukkan nilai pembacaan berada pada rentang 5.588–5.652 gram, dengan *error* sebesar 4–43 gram. *Error* terbesar terjadi saat beban diletakkan di depan kanan (43 gram), sedangkan *error* terkecil diperoleh saat beban berada di depan (4 gram). Hal ini menunjukkan bahwa posisi peletakan beban memengaruhi distribusi

gaya yang diterima oleh masing-masing *load cell*, sehingga menghasilkan perbedaan nilai pembacaan. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh rata-rata *error* sebesar 21,38 gram, rata-rata persentase *error* sebesar 0,38%, dan rata-rata akurasi sebesar 99,62%. Selain itu, nilai standar deviasi sebesar 20,86 gram menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran masih tergolong kecil dibandingkan beban referensi. Dengan demikian, sistem penimbangan gabungan empat *load cell* mampu memberikan hasil pengukuran yang konsisten dan memiliki presisi yang baik meskipun posisi beban pada *platform* berubah.

D. Pengujian *Zero-Band* (Min 200 g)

Pengujian *zero-band* dilakukan untuk memastikan sistem hanya menampilkan hasil pengukuran ketika beban yang diberikan telah mencapai batas minimum yang ditentukan. Pada penelitian ini, nilai *threshold* ditetapkan sebesar 200 gram. Beban yang berada di bawah nilai tersebut akan dianggap sebagai kondisi tanpa beban sehingga pembacaan sistem ditampilkan 0 gram, sedangkan beban yang sama atau melebihi 200 gram akan diproses dan ditampilkan sebagai hasil pengukuran. Hasil pengujian *zero-band* ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil pengujian *zero-band*

No	Beban Aktual (g)	Pembacaan Sistem (g)	<i>Zero-band</i> Aktif?	Keterangan
1	56	0	Ya	Di bawah <i>threshold</i> 200 g
2	103	0	Ya	Di bawah <i>threshold</i> 200 g
3	147	0	Ya	Di bawah <i>threshold</i> 200 g
4	210	206	Tidak	Diatas <i>threshold</i> (terbaca)
5	353	353	Tidak	Diatas <i>threshold</i> (terbaca)

Berdasarkan Tabel 4.11 sistem berhasil menerapkan fungsi *zero-band* sesuai dengan nilai *threshold* yang telah ditetapkan. Pada pengujian dengan beban 56 gram, 103 gram, dan 147 gram, sistem menampilkan pembacaan 0 gram karena beban masih berada di bawah batas minimum 200 gram. Sementara itu, pada beban 210 gram dan 353 gram, sistem mulai menampilkan hasil pengukuran sebesar 206 gram dan 353 gram, yang menunjukkan bahwa fungsi *zero-band* tidak lagi aktif. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fitur *zero-band* bekerja sesuai dengan perancangan, yaitu mengabaikan pembacaan pada beban yang sangat kecil sehingga dapat mengurangi pengaruh *noise* atau gangguan pembacaan sensor.

Dengan demikian, sistem hanya memproses beban yang telah memenuhi batas minimum, sehingga hasil pengukuran menjadi lebih stabil dan akurat.

4.2.2 Pengujian Sensor MPU6050

Sensor MPU6050 merupakan sensor yang menggabungkan *accelerometer* dan *gyroscope* untuk mendeteksi orientasi serta pergerakan. Pada penelitian ini, sensor digunakan untuk memperoleh data *pitch*, *roll*, dan *yaw* sebagai informasi orientasi AGV. Pengujian sensor MPU6050 dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan sudut *pitch*, *roll*, dan *yaw* setelah proses kalibrasi. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa data orientasi yang dihasilkan sensor sesuai dengan kondisi sebenarnya sehingga dapat digunakan sebagai masukan pada sistem kendali AGV.

A. Pengujian Sudut *Pitch* dan *Roll*

Pengujian *pitch* dan *roll* dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi sensor MPU6050 dalam mengukur sudut kemiringan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap sudut referensi pada beberapa variasi kemiringan. Pengujian sudut kemiringan dilakukan dengan menempatkan sensor MPU6050 pada *platform* AGV, kemudian *platform* dimiringkan secara bertahap pada beberapa sudut referensi, yaitu 0°, 5°, 10°, 15°, dan 20°. Sudut referensi ditentukan menggunakan busur derajat sebagai acuan kemiringan *platform*. Pada setiap sudut referensi, *platform* diposisikan hingga mencapai sudut yang ditentukan, kemudian pembacaan sudut dari sensor MPU6050 dicatat setelah kondisi pembacaan relatif stabil. Pengujian dilakukan pada arah *roll* dan *pitch* secara terpisah untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi kemiringan pada masing-masing sumbu. Nilai sudut yang terbaca oleh sensor kemudian dibandingkan dengan sudut referensi untuk memperoleh nilai *error* dan akurasi pembacaan sensor.

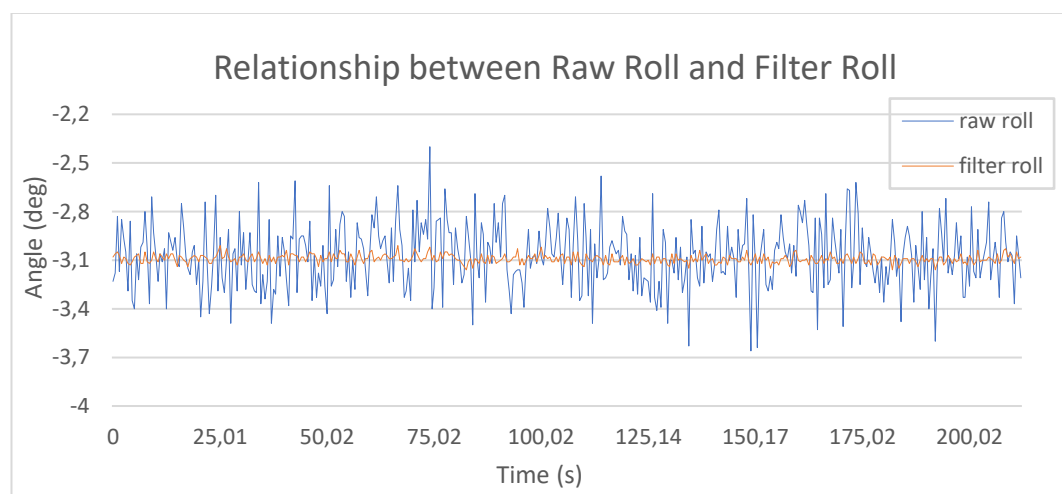
Prosedur pengujian dilakukan melalui beberapa tahapan. Pertama, sensor MPU6050 dipasang pada *platform* AGV dengan posisi sumbu sensor disesuaikan terhadap sumbu *roll* dan *pitch* kendaraan. Kedua, sensor dinyalakan dan dilakukan proses kalibrasi untuk memperoleh pembacaan awal pada kondisi datar. Ketiga,

platform AGV ditempatkan pada kondisi datar sebagai sudut referensi 0°. Selanjutnya, *platform* dimiringkan secara bertahap hingga mencapai sudut referensi 5°, 10°, 15°, dan 20°. Pada setiap variasi sudut, pembacaan sensor dicatat setelah nilai yang ditampilkan relatif stabil. Pengujian dilakukan secara terpisah untuk arah *roll* dan *pitch*. Data hasil pembacaan kemudian dibandingkan dengan sudut referensi untuk menghitung *error* dan persentase akurasi sensor. Hasil pengukuran sudut *roll* pada setiap variasi sudut referensi dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil pengujian *roll*

No	Sudut Referensi <i>Roll</i> (°)	Pembacaan Sensor (°)	<i>Error</i> (°)	<i>Error</i> (%)	Akurasi (%)
1	0	0,4	0,4	-	-
2	5	4,9	0,1	2%	98,00%
3	10	9,8	0,2	2%	98,00%
4	15	14,4	0,6	4%	96,00%
5	20	19,80	0,2	1%	99,00%
Rata-rata			0,3	2,25%	97,75%

Berdasarkan Tabel 4.12, pembacaan *roll* menunjukkan hasil yang mendekati sudut referensi pada setiap pengujian. Rata-rata *error* yang diperoleh sebesar 0,3° dengan rata-rata akurasi 97,75%. Perbedaan pembacaan yang kecil disebabkan oleh karakteristik sensor dan *noise* yang masih muncul, namun tidak memengaruhi kemampuan sensor dalam mengukur sudut kemiringan. Pada sudut referensi 0°, persentase *error* dan akurasi tidak dihitung karena nilai referensi digunakan sebagai pembagi dalam perhitungan persentase *error* sehingga menghasilkan pembagian dengan nol. Oleh karena itu, nilai tersebut dinyatakan dengan tanda “-”.



Gambar 4. 7 Grafik perbandingan data raw *roll* dan filter *roll*

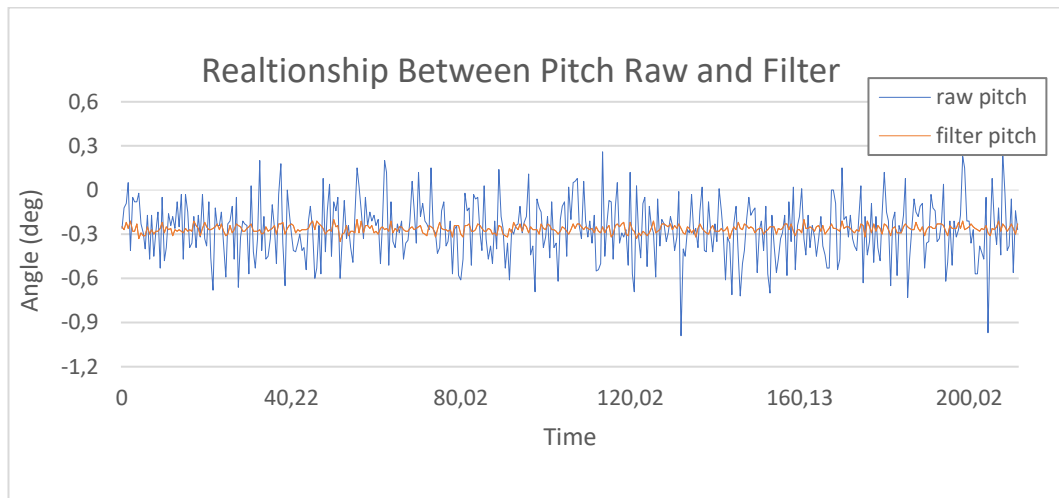
Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan data *raw roll* dan *filter roll* yang diperoleh selama pengujian berlangsung. Terlihat bahwa data *raw roll* mengandung fluktuasi *noise* yang cukup tinggi, sedangkan data *filter roll* menghasilkan kurva yang lebih halus dan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa proses filterisasi yang diterapkan pada pembacaan sensor MPU6050 berhasil meredam *noise* secara efektif tanpa menghilangkan informasi sudut kemiringan yang sesungguhnya.

Pengujian *pitch* dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pengujian *roll*, tetapi *platform* AGV dimiringkan terhadap sumbu *pitch*. Variasi sudut referensi yang digunakan adalah 0°, 5°, 10°, 15°, dan 20°. Pada setiap sudut referensi, pembacaan sudut *pitch* dari sensor MPU6050 dicatat setelah kondisi pembacaan relatif stabil. Hasil pembacaan kemudian dibandingkan dengan sudut referensi untuk memperoleh nilai *error* dan akurasi. Hasil pengujian *pitch* dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian *Pitch*

No	Sudut Referensi <i>Pitch</i> (°)	Pembacaan Sensor (°)	<i>Error</i> (°)	<i>Error</i> (%)	Akurasi (%)
1	0	0,1	0,1	-	-
2	5	5,14	0,14	2,8	97,20
3	10	9,91	0,09	0,9	99,10
4	15	15,02	0,02	0,13	99,87
5	20	20,02	0,02	0,10	99,90
Rata-rata			0,074	0,98	99,02

Berdasarkan Tabel 4.13, hasil pengujian *pitch* menunjukkan rata-rata *error* sebesar 0,074° dengan rata-rata akurasi 99,02%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu membaca sudut kemiringan dengan tingkat ketelitian yang tinggi. *Error* yang relatif kecil menunjukkan bahwa proses kalibrasi berhasil meningkatkan akurasi pembacaan sensor.



Gambar 4. 8 Grafik perbandingan data raw *pitch* dan filter *pitch*

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan data *raw pitch* dan *filter pitch* selama pengujian berlangsung. Terlihat bahwa data *raw pitch* mengandung fluktuasi *noise* yang cukup besar dengan amplitudo yang tidak menentu, sedangkan data *filter pitch* menghasilkan kurva yang jauh lebih halus dan konsisten mengikuti tren perubahan sudut yang sebenarnya. Hal ini membuktikan bahwa proses filterisasi pada sensor MPU6050 bekerja secara efektif dalam meredam gangguan *noise* sehingga data sudut *pitch* yang digunakan sebagai masukan kendali sistem AGV memiliki kualitas yang lebih baik dan dapat diandalkan.

B. Pengujian Akurasi Yaw

Pengujian *yaw* dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan sudut arah oleh sensor MPU6050. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap beberapa sudut referensi yang telah ditentukan. Hasil pengujian akurasi *yaw* ditampilkan pada Tabel 4.14

Tabel 4. 14 pengujian akurasi *yaw*

No	Sudut Referensi (°)	Baca Yaw (°)	Error (°)	Error (%)	Akurasi (%)
1	30	29,97	0,03	0,1%	99,90%
2	45	45,05	0,05	0,1%	99,90%
3	60	59,58	0,42	0,7%	99,30%
4	90	90,01	0,01	0,01%	99,98%
5	120	119,17	0,83	0,7%	99,30%
6	150	149,32	0,68	0,5%	99,50%
7	180	179,1	0,9	0,5%	99,50%
Rata-rata			0,4171	0,37%	99,63%

Berdasarkan Tabel 4.14 pembacaan *yaw* memiliki rata-rata *error* sebesar $0,42^\circ$ dengan rata-rata persentase *error* 0,37% dan rata-rata akurasi 99,63%. *Error* terbesar terjadi pada sudut 120° , sedangkan *error* terkecil terjadi pada sudut 90° . Secara keseluruhan, sensor mampu memberikan pembacaan sudut arah yang akurat sehingga dapat digunakan sebagai acuan orientasi AGV.

C. Pengujian *Drift Yaw* Jangka Panjang

Pengujian *drift yaw* jangka panjang dilakukan untuk mengetahui kestabilan pembacaan sudut *yaw* ketika sensor berada dalam kondisi diam. Pengujian dilakukan sebelum dan sesudah proses kalibrasi untuk mengevaluasi efektivitas kalibrasi dalam mengurangi terjadinya *drift*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Pengujian *Drift* Jangka Panjang

Durasi Diam	<i>Drift</i> Tanpa Kalibrasi ($^\circ$)	<i>Drift</i> Sesudah Kalibrasi ($^\circ$)
0 detik	-0.74	0
10 detik	-11.54	-0.02
30 detik	-33.1	-0.01
60 detik	-65.23	0.03
120 detik	-108.13	0.1
150 detik	-151.06	0.08
200 detik	144.38	0.07

Berdasarkan Tabel 4.15, sebelum kalibrasi nilai *yaw* mengalami perubahan yang cukup besar seiring bertambahnya waktu, yang menunjukkan adanya *drift* pada sensor. Setelah dilakukan kalibrasi, perubahan pembacaan berkurang secara signifikan dan berada pada rentang $-0,02^\circ$ hingga $0,10^\circ$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses kalibrasi berhasil meningkatkan kestabilan pembacaan *yaw*, sehingga data orientasi yang dihasilkan lebih konsisten dan dapat digunakan untuk mendukung sistem navigasi AGV.

4.2.3 Pengujian Driver Motor dan Roda *Mecanum*

Pengujian driver motor dan roda *mecanum* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem penggerak dalam mengendalikan kecepatan putaran motor sesuai dengan perintah yang diberikan. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap motor dapat beroperasi secara konsisten sehingga menghasilkan pergerakan AGV yang stabil. Pengujian dilakukan melalui beberapa skenario, meliputi pengujian respon RPM terhadap PWM dan pengujian lainnya yang berkaitan dengan performa sistem penggerak.

A. Pengujian Respon RPM vs PWM

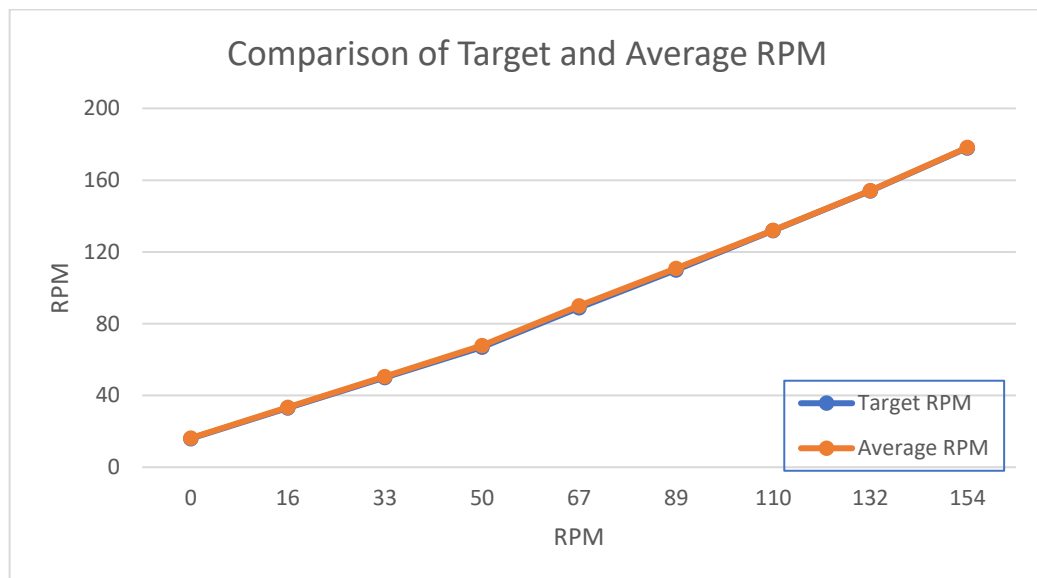
Pengujian respon RPM terhadap PWM dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) yang diberikan oleh driver motor dengan kecepatan putaran motor DC. Pada pengujian ini, nilai PWM divariasikan mulai dari 25 hingga 255, kemudian kecepatan putaran setiap motor diukur menggunakan *rotary encoder* dan divalidasi lagi menggunakan tachometer sebagai pembanding. Hasil pengukuran dibandingkan dengan nilai RPM target untuk mengetahui tingkat kesalahan (*error*) sistem. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Pengujian respon RPM terhadap PWM

PWM (0– 255)	RPM Target	RPM Aktual motor 1	RPM Aktual motor 2	RPM Aktual motor 3	RPM Aktual motor 4	RPM Rata- Rata	Error (%)
25	16	16	16.5	16	16.5	16,25	1,56%
50	33	33	33.8	33	33.8	33,40	1,21%
75	50	50.1	51.1	50.1	51.1	50,60	1,20%
100	67	67	68.7	67	68.6	67,83	1,23%
130	89	89.9	90	89.9	90	89,95	1,07%
160	110	108.4	112.4	108.3	114.2	110,83	0,75%
190	132	129.3	135	128.4	136.	132,18	0,13%
220	154	149.6	158	150.1	159	154,18	0,11%
255	178	173.7	182.8	172.9	183.5	178,23	0,12%

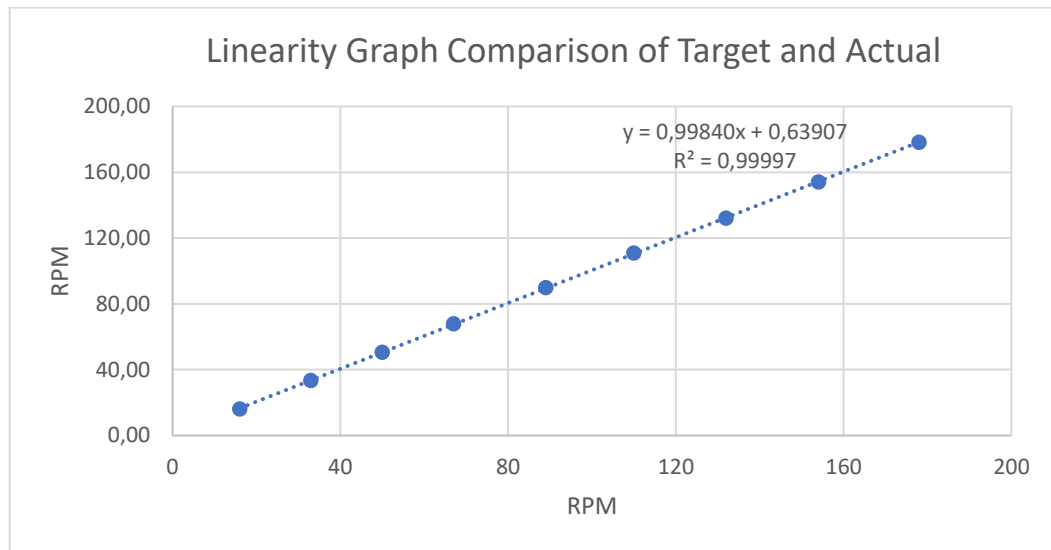
Berdasarkan Tabel 4.16, hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar nilai PWM yang diberikan, maka RPM rata-rata keempat motor juga semakin meningkat. RPM rata-rata yang dihasilkan berada sangat dekat dengan nilai RPM

target pada setiap variasi PWM, sehingga menunjukkan bahwa driver motor mampu mengendalikan kecepatan motor dengan baik. Nilai *error* yang diperoleh berkisar antara 0,11% hingga 1,56%. *Error* terbesar terjadi pada PWM 25 sebesar 1,56%, sedangkan *error* terkecil diperoleh pada PWM 220 sebesar 0,11%. *Error* yang muncul dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik masing-masing motor, toleransi pembacaan *rotary encoder*, serta respons driver motor terhadap perubahan nilai PWM. Meskipun demikian, seluruh nilai *error* berada di bawah 2%, sehingga menunjukkan bahwa sistem penggerak memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mengatur kecepatan putaran motor.



Gambar 4. 9 Grafik perbandingan antara nilai RPM target dan RPM rata-rata aktual keempat motor

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan antara nilai RPM *target* dan RPM rata-rata aktual keempat motor pada setiap variasi nilai PWM yang diuji. Terlihat bahwa kurva RPM rata-rata aktual mengikuti kurva RPM *target* secara konsisten di seluruh rentang pengujian, yang mengindikasikan bahwa sistem penggerak mampu merespons perubahan nilai PWM dengan baik dan proporsional.



Gambar 4. 10 Grafik linearitas perbandingan antara RPM target dan RPM aktual rata-rata

Gambar 4.10 menunjukkan grafik linearitas perbandingan antara RPM *target* dan RPM aktual rata-rata. Dari grafik tersebut diperoleh persamaan regresi linier $y = 0,99840x + 0,63907$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,99997. Nilai R^2 yang sangat mendekati 1 menunjukkan bahwa hubungan antara RPM *target* dan RPM aktual bersifat sangat linier dengan tingkat kesesuaian mencapai 99,997%. Nilai *slope* sebesar 0,99840 yang mendekati nilai ideal 1 mengindikasikan bahwa RPM aktual hampir identik dengan RPM *target* yang diberikan. Dengan demikian, sistem kendali kecepatan motor pada AGV ini memiliki karakteristik linearitas yang sangat baik dan dapat diandalkan untuk operasional secara keseluruhan.

B. Pengujian 8 Arah Gerak *Mecanum*

Pengujian 8 arah gerak dilakukan untuk memverifikasi kemampuan roda *mecanum* dalam menghasilkan gerakan multiarah sesuai perintah yang diberikan melalui antarmuka web. Setiap arah gerak diuji dengan mengamati kesesuaian arah aktual terhadap perintah yang diberikan serta mencatat kondisi yang terjadi selama pengujian berlangsung. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Pengujian 8 Arah Gerak *Mecanum*

No	Perintah Arah	Arah Aktual Terukur	Keterangan
1	Maju	Maju lurus	Keempat roda berputar maju, AGV bergerak lurus stabil
2	Mundur	Mundur lurus	Keempat roda berputar mundur

No	Perintah Arah	Arah Aktual Terukur	Keterangan
3	Geser Kiri	Geser kiri	Gerakan menyamping ke kiri, cenderung bergeser dari sumbu
4	Geser Kanan	Geser kanan	Gerakan menyamping ke kanan, cenderung bergeser dari sumbu
5	Diagonal Kiri-Depan	Diagonal $\pm 40^\circ$	Sudut sedikit kurang dari 45° , namun masih dalam batas toleransi
6	Diagonal Kanan-Depan	Diagonal kanan-depan	Gerakan 45° ke kanan-depan sesuai perintah, terkadang selip karena kontur lantai
7	Rotasi CW	Rotasi searah jarum jam	Berputar ditempat searah jarum jam
8	Rotasi CCW	Rotasi berlawanan jarum jam	Berputar ditempat berlawanan jarum jam

Berdasarkan Tabel 4.17, 7 dari 8 arah gerak berhasil dieksekusi sesuai perintah. Satu kondisi yang belum sepenuhnya sesuai adalah geser kiri, di mana terdapat perbedaan nilai RPM antara roda bagian kiri dan kanan yang menyebabkan AGV sedikit bergerak maju saat melakukan gerakan lateral. Untuk mengetahui distribusi kecepatan putar keempat roda pada setiap arah gerak secara lebih rinci, hasil pengukuran RPM ditampilkan pada Tabel 4.17

Tabel 4.17 menampilkan nilai RPM aktual keempat roda pada setiap perintah arah gerak yang diuji. Data ini digunakan untuk menganalisis pola distribusi kecepatan roda *mecanum* dan mengidentifikasi penyebab deviasi yang terjadi pada pengujian tertentu.

Tabel 4. 18 Data gerak motor berdasarkan perintah gerakan

Gerak	Roda 1 (RPM)	Roda 2 (RPM)	Roda 3 (RPM)	Roda 4 (RPM)
Maju	53,8	53	53,8	53
Mundur	-55	-55	-55	-55
Geser Kiri	-55	55	52	-52,9
Geser Kanan	55	-55	-55	55
Diagonal Kiri Depan	0	55	55	0
Diagonal Kanan Depan	55	-2,3	2,3	50,4
Rotasi CW (clockwise)	55	-55	55	-55
Rotasi CCW (counterclockwise)	-55	55	-55	55

Berdasarkan Tabel 4.18, terlihat bahwa pola distribusi RPM keempat roda pada setiap arah gerak secara umum sesuai dengan prinsip kerja roda *mecanum*. Pada

gerak maju dan mundur, keempat roda berputar dengan nilai RPM yang hampir seragam sehingga AGV bergerak lurus tanpa deviasi. Pada gerak rotasi CW dan CCW, pola RPM simetris antara roda kiri dan kanan menghasilkan rotasi di tempat yang presisi. Penyimpangan yang teridentifikasi terjadi pada geser kiri, di mana roda 3 dan 4 menghasilkan RPM yang lebih rendah dibandingkan roda 1 dan 2, yaitu 52 dan -52,9 RPM berbanding -55 dan 55 RPM. Selisih sebesar 3 RPM ini menyebabkan gaya lateral tidak seimbang sehingga AGV cenderung sedikit bergerak maju saat perintah geser kiri diberikan. Pada gerak diagonal kanan-depan, nilai RPM roda 2 dan 3 yang mendekati nol (-2,3 dan 2,3 RPM) sesuai dengan prinsip bahwa hanya dua roda yang aktif mendorong pada gerakan diagonal. Secara keseluruhan, sistem roda *mecanum* pada AGV ini mampu menghasilkan variasi gerak multiarah yang diperlukan, dengan satu kondisi yang masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut.

C. Pengujian Kinerja Kontrol PID Motor

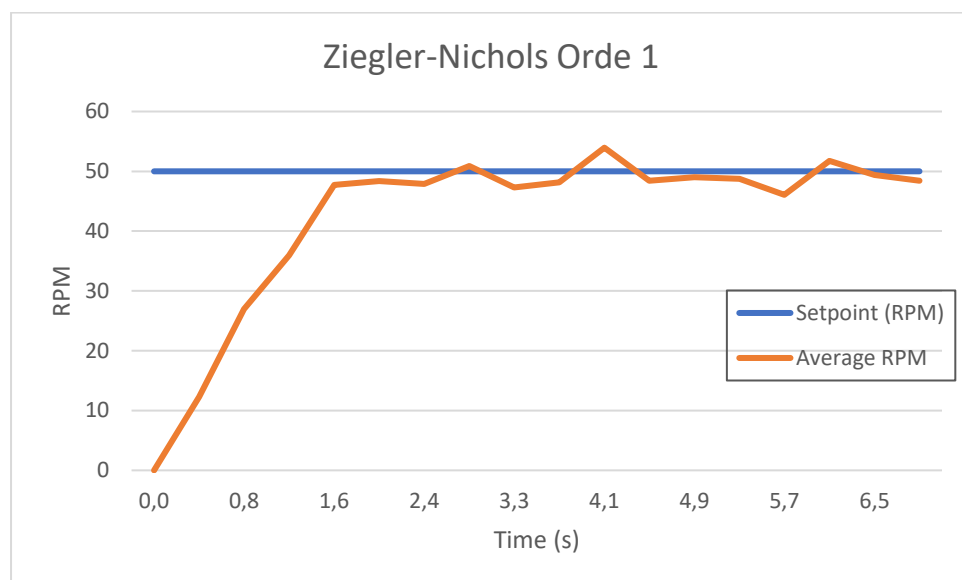
Pengujian kinerja kontrol PID dilakukan untuk mengetahui kemampuan pengendali dalam mengatur kecepatan putaran motor DC agar sesuai dengan nilai yang diinginkan. Sebelum pengujian respons dilaksanakan, terlebih dahulu ditentukan nilai konstanta awal PID menggunakan metode *Ziegler-Nichols* orde 1 berdasarkan parameter dan karakteristik (L dan T) yang didapatkan dari grafik respons transien open-loop. Berdasarkan hasil perhitungan parameter penalaan awal menggunakan metode *Ziegler-Nichols* orde 1 yang telah dilakukan sebelumnya, pengujian implementasi kendali PID secara closed-loop kemudian diterapkan pada sistem penggerak motor AGV. Data hasil pengujian respons kecepatan motor terhadap *setpoint* 50 RPM dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Hasil pengujian PID metode *Ziegler-Nichols* orde 1

Time (s)	Setpoint (RPM)	Average RPM (output)
0,0	50	0,0
0,4	50	12,3
0,8	50	27,0
1,2	50	36,0
1,6	50	47,7
2,0	50	48,4
2,4	50	47,9

Time (s)	Setpoint (RPM)	Average RPM (output)
2,9	50	50,9
3,3	50	47,3
3,7	50	48,2
4,1	50	54,0
4,5	50	48,4
4,9	50	49,0
5,3	50	48,8
5,7	50	46,1

Berdasarkan data pada Tabel 4.19, keluaran RPM masih menunjukkan ketidakstabilan dan *error* yang relatif tinggi. Data tersebut selanjutnya direpresentasikan dalam bentuk kurva respons transien. Grafik respons kendali PID menggunakan parameter awal Ziegler-Nichols orde 1 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Grafik hasil konstanta PID menggunakan Ziegler-Nichols orde 1

Berdasarkan kurva respons transien pada Gambar 4.11, terlihat bahwa penggunaan parameter awal dari metode *Ziegler-Nichols orde 1* mampu membawa kecepatan motor mencapai nilai *setpoint* 50 RPM dengan cepat. Namun, respons sistem masih menunjukkan adanya fluktuasi (*undershoot* dan *overshoot*) serta osilasi kecil di sekitar nilai referensi akibat karakteristik gain yang masih terlalu agresif. Oleh karena itu, parameter ini perlu disempurnakan lebih lanjut melalui metode *trial and error* pada tahapan berikutnya agar diperoleh kestabilan sistem yang optimal tanpa osilasi.

. Penentuan dilakukan secara bertahap dengan mengamati perilaku sistem pada setiap perubahan nilai konstanta, kemudian nilai yang menghasilkan respons paling stabil ditetapkan sebagai parameter akhir. Riwayat proses penentuan konstanta PID ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Riwayat Penentuan Konstanta PID dengan metode Ziegler-Nichols orde 1 dan fine-tuning

No	Kp	Ki	Kd	Permasalahan	Perbaikan
1	4,78	4,59	1,24	Menggunakan parameter awal dari metode Ziegler-Nichols (open-loop). Respons motor mencapai <i>setpoint</i> dengan sangat cepat, namun terjadi lonjakan (<i>overshoot</i>) yang tinggi dan osilasi parah karena nilai gain pengendali terlalu agresif.	Nilai Kp, Ki, dan Kd diturunkan secara bertahap untuk meredam osilasi dan stabilitas transien.
2	2,50	1,20	0,40	Osilasi mulai berkurang, namun respons transien masih cukup bergejolak dan belum mencapai kestabilan penuh di sekitar <i>setpoint</i> .	Nilai K_p dan K_i kembali dikurangi, sementara komponen K_d disesuaikan untuk meredam respons cepat.
3	1,50	0,30	0,15	Respons menjadi jauh lebih halus dan stabil, tetapi waktu naik (<i>rise time</i>) sedikit melambat saat diberi beban.	Menaikkan sedikit Kp dan menurunkan komponen integral serta derivatif untuk menemukan titik optimal.
4	1,20	0,06	0,05	Respons kecepatan motor tercapai dengan cepat, stabil, akurat, tanpa osilasi, serta tahan terhadap gangguan transien.	Nilai konstanta ditetapkan sebagai parameter akhir sistem

Berdasarkan Tabel 4.20, proses penentuan konstanta PID dilakukan melalui empat tahap iterasi. Pada iterasi pertama, penentuan parameter awal menggunakan metode Ziegler-Nichols orde 1 menghasilkan nilai $K_p = 4,78$, $K_i = 4,59$, dan $K_d =$

1,24. Ketika parameter teoritis ini diimplementasikan langsung pada sistem, respon motor memang cepat namun menimbulkan lonjakan (*overshoot*) dan osilasi yang cukup tinggi akibat nilai gain penguat yang terlalu agresif. Oleh karena itu, pada percobaan kedua dan ketiga, dilakukan penyesuaian (*fine-tuning*) secara *trial and error* dengan menurunkan nilai K_p , K_i , dan K_d secara bertahap untuk meredam osilasi tersebut. Pada percobaan keempat, diperoleh nilai konstanta optimal yaitu $K_p = 1,20$, $K_i = 0,06$, dan $K_d = 0,05$, sehingga dicapai respon kecepatan yang cepat dan stabil, dengan osilasi yang sangat kecil serta memiliki *steady-state error* yang sangat kecil. Nilai konstanta pada iterasi keempat kemudian ditetapkan sebagai parameter akhir sistem. Parameter PID yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Parameter Konstanta PID tiap Motor

Parameter	Nilai
K_p	1,20
K_i	0,06
K_d	0,05
Metode Tuning	Trial and Error

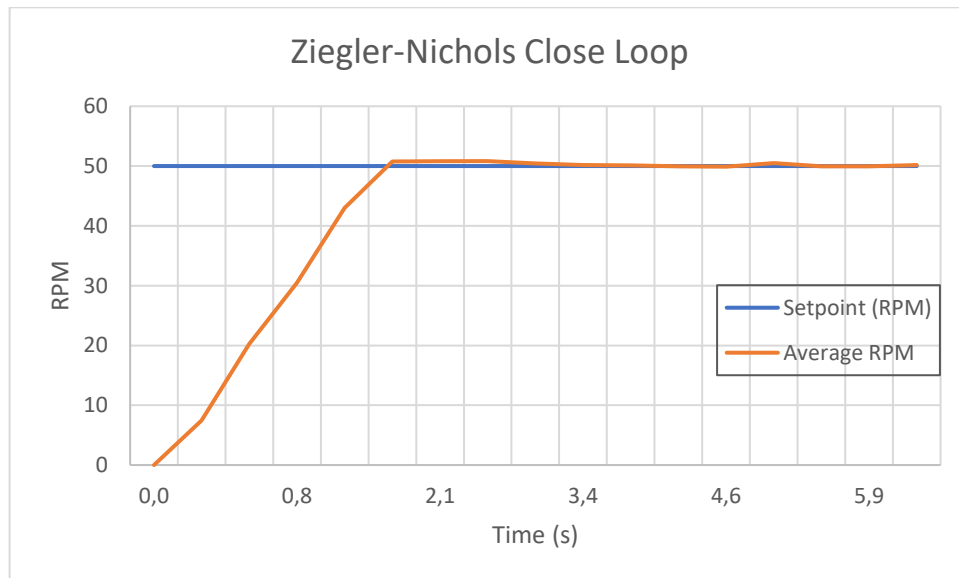
Berdasarkan Tabel 4.21, nilai konstanta PID yang digunakan adalah $K_p = 1,20$, $K_i = 0,06$, dan $K_d = 0,05$. Nilai tersebut diperoleh melalui proses *trial and error* hingga menghasilkan respons kecepatan yang stabil. Penggunaan parameter yang sama pada keempat motor bertujuan untuk memperoleh karakteristik pengendalian yang seragam sehingga setiap motor dapat bekerja secara sinkron. Data hasil pengujian menggunakan parameter PID hasil *trial and error* dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4. 22 Data pengujian parameter konstanta PID

Time (s)	Setpoint (RPM)	Average RPM
0,0	50	0,0
0,0	50	7,5
0,4	50	20,2
0,8	50	30,5
1,3	50	43,0
1,7	50	50,8
2,1	50	50,8
2,5	50	50,8
2,9	50	50,5
3,4	50	50,2

Time (s)	Setpoint (RPM)	Average RPM
3,8	50	50,1
4,2	50	50,0
4,6	50	49,9

Berdasarkan data pada Tabel 4.22, performa kendali kecepatan motor menunjukkan kemampuan tracking yang lebih stabil terhadap *setpoint*. Grafik respons closed-loop menggunakan parameter PID hasil fine-tuning dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Grafik hasil metode Ziegler-Nichols Close Loop

Berdasarkan kurva respons transien pada Gambar 4.12, terlihat bahwa setelah dilakukan penyempurnaan parameter melalui trial and error, sistem kendali PID menunjukkan performa yang optimal. Kecepatan putar motor mampu mencapai nilai *setpoint* 50 RPM dengan waktu naik (*rise time*) yang cepat, memiliki lonjakan (*overshoot*) yang sangat kecil atau hampir nihil, serta mencapai kondisi tunak (*steady-state*) secara mulus tanpa adanya osilasi maupun getaran. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi metode penalaan awal Ziegler-Nichols yang disempurnakan dengan fine-tuning berhasil menghasilkan karakteristik kendali kecepatan motor *mecanum* AGV yang andal dan stabil.

Setelah parameter PID ditentukan, dilakukan pengujian respons step pada setiap motor dengan *setpoint* 50 RPM. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa pengendali berdasarkan parameter *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Hasil pengujian respons step PID tiap Motor (*setpoint* 50 RPM)

Motor	Posisi	Rise time (ms)	Overshoot (%)	Settling time (ms)	Steady-state Error (%)
Motor 1	Kiri Depan	1668	2,17	18115	0,03
Motor 2	Kanan Depan	1678	3,38	17633	0,01
Motor 3	Kiri Belakang	1705	4,62	19584	0,01
Motor 4	Kanan Belakang	1652	2,9	15841	0,01
Rata-rata Keempat Motor		1676	3,27	17793	0,015

Berdasarkan Tabel 4.23, pengendali PID mampu mengatur kecepatan keempat motor menuju *setpoint* 50 RPM dengan performa yang baik. Rata-rata *rise time* yang diperoleh sebesar 1676 ms, yang menunjukkan waktu yang dibutuhkan motor untuk mencapai kecepatan yang diinginkan relatif cepat. Nilai *overshoot* rata-rata sebesar 3,27%, sehingga kenaikan kecepatan tidak melewati *setpoint* secara signifikan. Selain itu, diperoleh rata-rata *settling time* sebesar 17793 ms (atau sekitar 17,79 s), yang menunjukkan waktu yang diperlukan sistem hingga mencapai kondisi stabil penuh. Nilai *steady-state error* rata-rata sebesar 0,015%, sehingga kecepatan akhir motor sangat mendekati dan akurat terhadap nilai *setpoint*. Perbedaan respons pada setiap motor dipengaruhi oleh karakteristik fisik motor *mecanum*, toleransi pembacaan *rotary encoder*, serta gesekan pada sistem mekanik. Meskipun demikian, seluruh parameter menunjukkan bahwa kontrol PID mampu menghasilkan respons yang stabil dan akurat, sehingga layak digunakan sebagai pengendali kecepatan motor pada AGV.

4.2.4 Pengujian Logika Fuzzy Mamdani

Pengujian Logika Fuzzy Mamdani dilakukan untuk memverifikasi bahwa sistem mampu menghasilkan nilai RPM yang sesuai berdasarkan kombinasi masukan beban dan sudut kemiringan AGV. Pengujian dilakukan dengan memberikan sembilan variasi kombinasi masukan yang mewakili seluruh *rule* yang telah ditetapkan. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Pengujian Logika Fuzzy Mamdani

No	Beban (Kg)	Kemiringan (°)	RPM Teori	RPM Aktual	Error (RPM)	Error (%)	Rule
1	1,5	0,3	70	70,11	0,11	0,16%	R1 : Cepat

No	Beban (Kg)	Kemiringan (°)	RPM Teori	RPM Aktual	Error (RPM)	Error (%)	Rule
2	1,5	6,6	47,8	49,03	1,23	2,57%	R2 : Sedang
3	1,5	10,91	30	30,05	0,05	0,17%	R3 : Lambat
4	11,3	0,4	50	50,14	0,14	0,28%	R4 : Sedang
5	11,3	7,0	46,5	46,72	0,22	0,47%	R5 : Sedang
6	11,5	11,29	30	30,08	0,08	0,27%	R6 : Lambat
7	15,4	0,6	50	50,14	0,14	0,28%	R7 : Sedang
8	15,5	7,0	30	30,19	0,19	0,63%	R8 : Lambat
9	15,2	11,7	30	30,04	0,04	0,13%	R9 : Lambat

Berdasarkan Tabel 4.24, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem Logika Fuzzy Mamdani mampu menghasilkan *setpoint* RPM yang sesuai dengan kombinasi masukan beban dan sudut kemiringan AGV. Pada kondisi beban ringan sebesar 1,5 kg dengan kemiringan 0,3°, sistem menghasilkan RPM aktual sebesar 70,11 RPM terhadap RPM teori sebesar 70 RPM pada *Rule* R1 (Cepat), dengan *error* sebesar 0,11 RPM atau 0,16%. Ketika sudut kemiringan meningkat menjadi 6,6° dan 10,91°, sistem secara adaptif menurunkan kecepatan melalui *Rule* R2 (Sedang) dan R3 (Lambat), dengan *error* masing-masing sebesar 1,23 RPM (2,57%) dan 0,05 RPM (0,17%). Pola serupa juga terlihat pada kondisi beban sedang dan berat. Pada beban 11,3 kg dengan kemiringan 0,4°, sistem menghasilkan RPM aktual sebesar 50,14 RPM dari RPM teori 50 RPM dengan *error* 0,14 RPM atau 0,28%. Pada kondisi R5, yaitu beban 11,3 kg dan kemiringan 7,0°, diperoleh RPM aktual sebesar 46,72 RPM dari RPM teori 46,5 RPM dengan *error* 0,22 RPM atau 0,47%. Sementara itu, pada kondisi beban 11,5 kg dengan kemiringan 11,29°, sistem menghasilkan 30,08 RPM dari RPM teori 30 RPM dengan *error* 0,08 RPM atau 0,27%.

Pada beban berat, kondisi R7 dengan beban 15,4 kg dan kemiringan 0,6° menghasilkan RPM aktual sebesar 50,14 RPM terhadap RPM teori 50 RPM dengan

error 0,14 RPM atau 0,28%. Selanjutnya, pada R8 dengan beban 15,5 kg dan kemiringan 7,0°, diperoleh RPM aktual 30,19 RPM dari RPM teori 30 RPM dengan *error* 0,19 RPM atau 0,63%. Pada R9 dengan beban 15,2 kg dan kemiringan 11,7°, diperoleh RPM aktual 30,04 RPM dari RPM teori 30 RPM dengan *error* terkecil, yaitu 0,04 RPM atau 0,13%. Secara keseluruhan, *error* persentase pengujian berada pada rentang 0,13% hingga 2,57%, dengan *error* terbesar terjadi pada kondisi R2. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keluaran RPM aktual mengikuti *setpoint* yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani dengan selisih yang relatif kecil pada seluruh kondisi pengujian.

Pengujian Logika Fuzzy Mamdani dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam menghasilkan *setpoint* kecepatan berdasarkan kombinasi masukan beban dan sudut kemiringan AGV. *Setpoint* RPM yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani selanjutnya digunakan sebagai referensi kecepatan pada kontrol PID motor. Oleh karena itu, pengujian tidak hanya mengamati perubahan nilai *setpoint* akibat perubahan kondisi beban dan kemiringan, tetapi juga mengamati kemampuan motor dalam mengikuti *setpoint* tersebut berdasarkan nilai RPM aktual yang diperoleh dari encoder. Hasil pengujian respons terhadap perubahan *setpoint* fuzzy ditunjukkan pada Tabel 4.25.

Tabel 4. 25 Respons PID terhadap Perubahan *Setpoint* Fuzzy

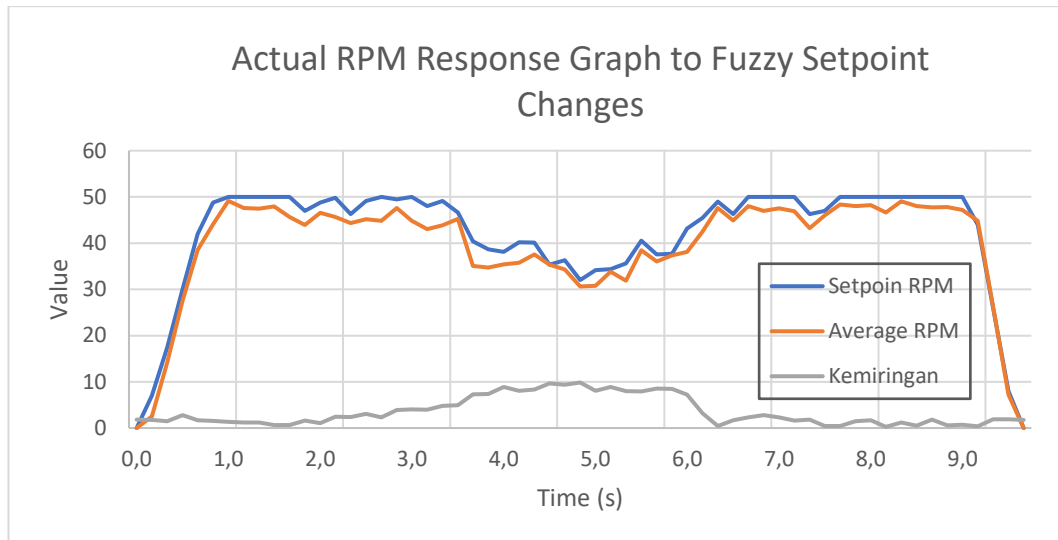
Time(s)	Berat (kg)	Kemiringan (°)	Setpoint RPM	Average RPM	Average (m/s)	Error (%)
0,00	11.798	1,79	0	0,0	0,000	-
0,33	12	1,5	17,5	14,2	0,067	18,86%
0,66	11.837	1,72	42	38,5	0,181	8,33%
1,00	11.887	1,35	50	49,2	0,232	1,70%
1,34	11.864	1,2	50	47,5	0,224	5,10%
1,66	11.872	0,64	50	45,7	0,215	8,70%
1,99	11.797	1,03	48,8	46,6	0,219	4,56%
2,33	12	2,36	46,3	44,4	0,209	4,21%
2,84	11.813	3,89	49,5	47,6	0,224	3,89%
3,16	11.826	3,97	48	43,1	0,203	10,31%
3,49	11.794	4,91	46,6	45,3	0,213	2,84%
3,83	11.854	7,39	38,7	34,7	0,163	10,34%
4,28	11.797	8,03	40,2	35,7	0,168	11,13%
4,49	11.799	9,62	35,35	35,3	0,166	0,07%
4,83	11.805	9,85	32	30,7	0,145	4,22%

Time(s)	Berat (kg)	Kemiringan (°)	Setpoint RPM	Average RPM	Average (m/s)	Error (%)
5,17	11.788	8,88	34,4	33,9	0,160	1,60%
5,34	11.779	7,97	35,65	31,9	0,150	10,66%
5,67	12	8,53	37,55	36,0	0,170	4,06%
5,83	11.852	8,49	37,7	37,4	0,176	0,86%
6,16	11.903	3,22	45,45	42,5	0,200	6,49%
6,50	11.896	1,66	46,3	44,9	0,211	3,02%
6,84	11.932	2,79	50	47,0	0,221	6,10%
7,16	12.051	1,62	50	46,9	0,221	6,25%
7,49	12	0,43	47	46,0	0,217	2,13%
7,83	11.936	1,47	50	48,0	0,226	4,00%
8,34	11.893	1,17	50	49,1	0,231	1,90%
8,83	11.864	0,56	50	47,8	0,225	4,40%
9,16	11.927	0,39	44	44,8	0,211	1,88%
9,33	12.007	1,87	26	26,3	0,124	1,15%
9,50	11.929	1,87	8	7,3	0,034	9,38%
9,67	11.857	1,75	0	0,0	0,000	-

Berdasarkan Tabel 4.25, perubahan kondisi beban dan kemiringan menyebabkan perubahan *setpoint* RPM yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani. *Setpoint* tersebut kemudian digunakan sebagai referensi pada kontrol PID, sehingga nilai Average RPM menunjukkan respons kecepatan motor terhadap *setpoint* yang diberikan. Pada awal pengujian, ketika kondisi masukan menghasilkan *setpoint* 0 RPM, nilai Average RPM juga berada pada 0 RPM. Ketika *setpoint fuzzy* meningkat, nilai Average RPM mengikuti perubahan tersebut, yang menunjukkan bahwa kontrol PID mampu merespons perubahan *setpoint* yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani. Sebagai contoh, pada saat *setpoint* sebesar 14,2 RPM, Average RPM yang diperoleh sebesar 14,2 RPM. Pada perubahan *setpoint* berikutnya menjadi 42 RPM, Average RPM mencapai 38,5 RPM, sedangkan ketika *setpoint* meningkat menjadi 50 RPM, Average RPM mencapai 49,2 RPM. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa kontrol kecepatan mampu mengikuti *setpoint fuzzy*, meskipun pada beberapa kondisi masih terdapat selisih antara *setpoint* dan RPM aktual.

Untuk memperjelas respons kontrol PID terhadap perubahan nilai *setpoint* yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani, hubungan antara *setpoint* dan Average RPM terhadap waktu direpresentasikan dalam bentuk grafik. Grafik ini

digunakan untuk mengamati perubahan nilai referensi yang diberikan oleh *fuzzy* serta respons kecepatan aktual motor selama proses pengujian. Grafik respons RPM terhadap perubahan *setpoint fuzzy* ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Grafik Respons RPM Aktual terhadap Perubahan *Setpoint Fuzzy*

Berdasarkan Gambar 4.13, terlihat bahwa Average RPM memberikan respons terhadap perubahan *setpoint* yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani. Pada saat *setpoint* meningkat, Average RPM juga mengalami peningkatan hingga mendekati nilai referensi. Sebaliknya, ketika nilai *setpoint* menurun akibat perubahan kondisi kemiringan, Average RPM turut mengalami penurunan. Perbedaan antara kurva *setpoint* dan Average RPM menunjukkan adanya *error* selama proses pengendalian. Pada kondisi perubahan *setpoint* yang berlangsung relatif cepat, terlihat adanya selisih antara nilai referensi dan kecepatan aktual motor. Hal tersebut menunjukkan adanya respons transien pada sistem akibat karakteristik motor, beban mekanis, dan waktu yang diperlukan kontrol PID untuk menyesuaikan kecepatan motor terhadap *setpoint* baru. Meskipun demikian, perubahan Average RPM menunjukkan bahwa kontrol PID memberikan respons terhadap perubahan referensi yang dihasilkan oleh Logika Fuzzy Mamdani.