

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini membahas hasil pengujian sistem penggerak dan integrasi LiDAR yang telah dibuat pada Bab III. Pengujian dimulai dari pemeriksaan *encoder* dan karakteristik motor, kemudian dilanjutkan ke penentuan parameter awal PI, penalaan, dan pengujian saat sistem dijalankan sebagai satu kesatuan. Fokus kinerja kendali PI tetap pada *rise time*, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*. *Loop* kendali pada STM32 berjalan setiap 10 ms, sedangkan telemetri direkam setiap 50 ms. Pada pengendali tingkat atas, YDLIDAR diuji dari kontinuitas akuisisi *scan* dan disiapkan format pengujian ketelitian jarak mentah. Tahap *teach* dievaluasi dari perekaman rute dan *occupancy grid*, sedangkan fungsi *local scan matching* diverifikasi dari peta referensi, parameter algoritma, status aktivasi, dan data koreksi *pose* yang tersedia.

4.1 Pengujian Komponen dan Subsistem

4.1.1 Pengujian rotary *encoder* dan pembacaan kecepatan

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan jumlah pencacahan *encoder* dalam satu putaran roda sesuai dengan nilai teoritis pada Persamaan (2.4). Roda diangkat dari rantai, tanda acuan dipasang pada roda dan pada rangka, kemudian pencacah direset melalui antarmuka. Roda diputar satu putaran penuh secara manual sampai kedua tanda kembali bertemu, lalu nilai pencacah dibaca. Pengujian diulang lima kali untuk roda kiri dan lima kali untuk roda kanan, seluruhnya pada arah putar yang sama sehingga pencacahan tercatat pada Total *Tick CW*.

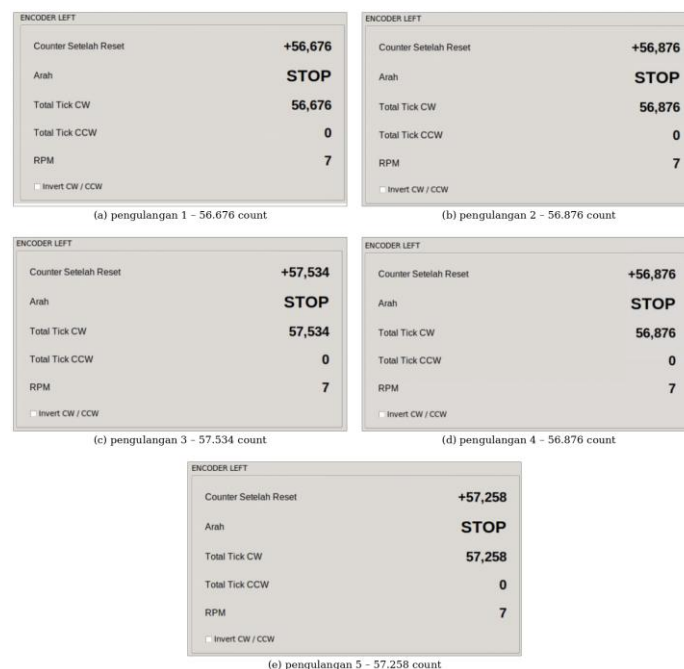
Nilai teoritis diperoleh dari resolusi *encoder* 200 PPR yang dibaca pada mode kuadratur empat kali dan rasio *gearbox* 1:71,2, sehingga satu putaran roda setara dengan 56.960 *count*. Hasil pembacaan beserta simpangannya terhadap nilai teoritis ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil verifikasi pencacahan encoder untuk satu putaran roda

Pengulangan	Count roda kiri	Simpangan kiri (%)	Count roda kanan	Simpangan kanan (%)
1	56.676	-0,50	56.609	-0,62
2	56.876	-0,15	57.069	+0,19

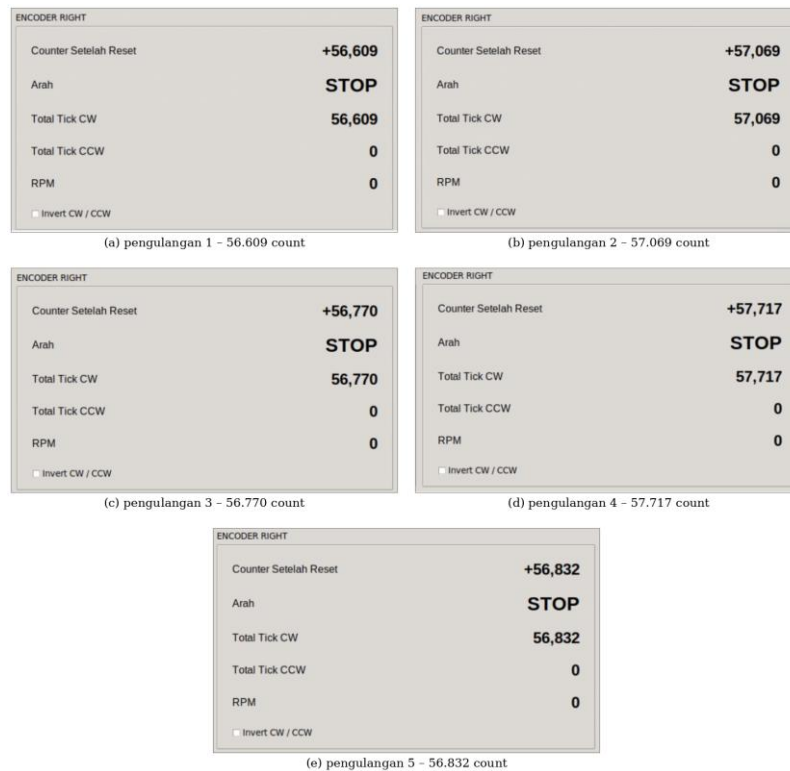
Pengulangan	Count roda kiri	Simpangan kiri (%)	Count roda kanan	Simpangan kanan (%)
3	57.534	+1,01	56.770	-0,33
4	56.876	-0,15	57.717	+1,33
5	57.258	+0,52	56.832	-0,22
Rata-rata	57.044	+0,15	56.999	+0,07
Simpangan baku	346	0,61	434	0,76

Dokumentasi pembacaan pencacah untuk setiap pengulangan ditunjukkan pada Gambar 4.1 untuk roda kiri dan Gambar 4.2 untuk roda kanan. Tangkapan layar diambil tepat setelah tanda roda kembali sejajar dengan tanda rangka, dengan status arah sudah menunjukkan *STOP* dan Total Tick CCW bernilai nol, sehingga nilai pada Counter Setelah Reset benar berasal dari satu putaran pada satu arah.



Gambar 4. 1 Pembacaan pencacah encoder roda kiri pada lima pengulangan satu putaran roda

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)



Gambar 4. 2 Pembacaan pencacah encoder roda kanan pada lima pengulangan satu putaran roda

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Rata-rata pencacahan roda kiri sebesar 57.044 *count* dan roda kanan sebesar 56.999 *count*, atau menyimpang +0,15% dan +0,07% terhadap nilai teoritis. Simpangan rata-rata yang jauh di bawah 1% menunjukkan resolusi 56.960 *count* per putaran roda berlaku pada perangkat yang direalisasikan, sehingga konversi pencacahan menjadi kecepatan putar pada Persamaan (2.5) dapat digunakan tanpa faktor koreksi. Kedua roda juga memberikan hasil yang setara, sehingga tidak ditemukan perbedaan resolusi antara jalur *encoder* kiri dan kanan.

Sebaran antarpengulangan lebih besar daripada simpangan rata-ratanya, yaitu 346 *count* atau 0,61% pada roda kiri dan 434 *count* atau 0,76% pada roda kanan, dengan rentang 858 *count* dan 1.108 *count*. Simpangan tiap pengulangan tidak menunjukkan kecenderungan yang searah, sehingga sebaran ini bersifat acak dan bukan kesalahan sistematis pada rasio *gearbox*. Sumber sebaran yang paling mungkin adalah ketidaktepatan penyelarasan tanda roda terhadap tanda rangka pada pemutaran manual, karena selisih 0,6% hanya setara dengan pergeseran sudut sekitar dua derajat pada roda berdiameter 0,15 m.

Terhadap kendali kecepatan, simpangan rata-rata sebesar 0,15% pada roda kiri setara dengan sekitar 0,012 RPM pada *setpoint* pengujian 8 RPM, dan 0,07% pada roda kanan setara dengan sekitar 0,006 RPM. Kedua nilai berada jauh di bawah pita toleransi $\pm 5\%$ yang

digunakan untuk menilai *settling time* pada subbab 2.5.4, bahkan lebih kecil daripada kuantisasi satu *count* pada periode kendali 10 ms, sehingga *error* resolusi *encoder* tidak berpengaruh berarti terhadap hasil pengujian PI.

Pada pembacaan setelah roda berhenti, kolom RPM roda kiri menampilkan nilai 7 RPM sedangkan roda kanan menampilkan 0 RPM, meskipun status arah kedua roda sudah *STOP*. Nilai tak nol pada roda kiri diperkirakan berasal dari sisa perhitungan jendela pencuplikan terakhir saat roda masih diputar. Pemastian perilaku ini dilakukan bersama pengujian pembacaan kecepatan pada Tabel 4.2, karena bias pembacaan pada keadaan diam akan terbawa sebagai *error* pada *closed loop*.

Pengujian berikutnya membandingkan kecepatan hasil perhitungan *encoder* dengan pembacaan *tachometer* optik LUTRON DT-2234BL. Stiker reflektif dipasang pada roda, motor dijalankan pada *duty cycle* tetap, dan pembacaan diambil setelah kecepatan mencapai keadaan stabil. Kecepatan *encoder* dihitung sebagai rata-rata empat puluh cuplikan terakhir agar riak pembacaan ikut diredam. Pengujian dilakukan pada enam nilai *duty cycle* untuk masing-masing motor, yaitu 20% sampai 45% dengan langkah 5%. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Perbandingan kecepatan hasil encoder dan tachometer

Motor	<i>Duty cycle</i> (%)	RPM <i>encoder</i>	RPM <i>tachometer</i>	Selisih (RPM)	Selisih (%)
Kiri	20	14,248	14,5	-0,252	-1,74
Kanan	20	8,109	8,1	0,009	0,11
Kiri	25	23,876	23,9	-0,024	-0,10
Kanan	25	19,906	20,0	-0,094	-0,47
Kiri	30	31,954	32,3	-0,346	-1,07
Kanan	30	28,682	28,9	-0,218	-0,75
Kiri	35	38,992	39,0	-0,008	-0,02
Kanan	35	37,014	37,2	-0,186	-0,50
Kiri	40	45,844	46,0	-0,156	-0,34
Kanan	40	43,982	44,1	-0,118	-0,27
Kiri	45	52,868	53,1	-0,232	-0,44
Kanan	45	50,995	51,1	-0,105	-0,21

Seluruh dua belas pasangan data menunjukkan selisih yang kecil. Selisih rata-rata sebesar $-0,144$ RPM atau $-0,48\%$ dengan simpangan baku $0,108$ RPM, sedangkan selisih mutlak terbesar hanya $0,346$ RPM. Dinyatakan dalam persen, selisih terbesar adalah $1,74\%$ dan terjadi pada motor kanan saat *duty cycle* 20%. Titik tersebut merupakan kecepatan paling rendah yang diuji, yaitu sekitar 8 RPM, sehingga selisih mutlak yang kecil menghasilkan persentase yang relatif besar. Pada seluruh titik lainnya selisih berada di bawah $1,1\%$.

Selisih yang konsisten di bawah 2% menunjukkan konversi pencacahan *encoder* menjadi kecepatan putar melalui Persamaan (2.5) sudah tepat, dan nilai CPR 56.960 yang diverifikasi pada Tabel 4.1 berlaku pada seluruh rentang kecepatan kerja. Tanda selisih yang hampir seluruhnya negatif menunjukkan pembacaan *encoder* cenderung sedikit lebih rendah daripada *tachometer*, namun besarnya tidak berubah terhadap kecepatan sehingga tidak menunjukkan kesalahan skala melainkan pembulatan satu angka desimal pada tampilan *tachometer*.

Dokumentasi pembacaan *tachometer* pada seluruh titik pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Dokumentasi pembacaan tachometer optik pada dua belas titik pengujian

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

4.1.2 Karakteristik motor dalam kondisi *open loop*

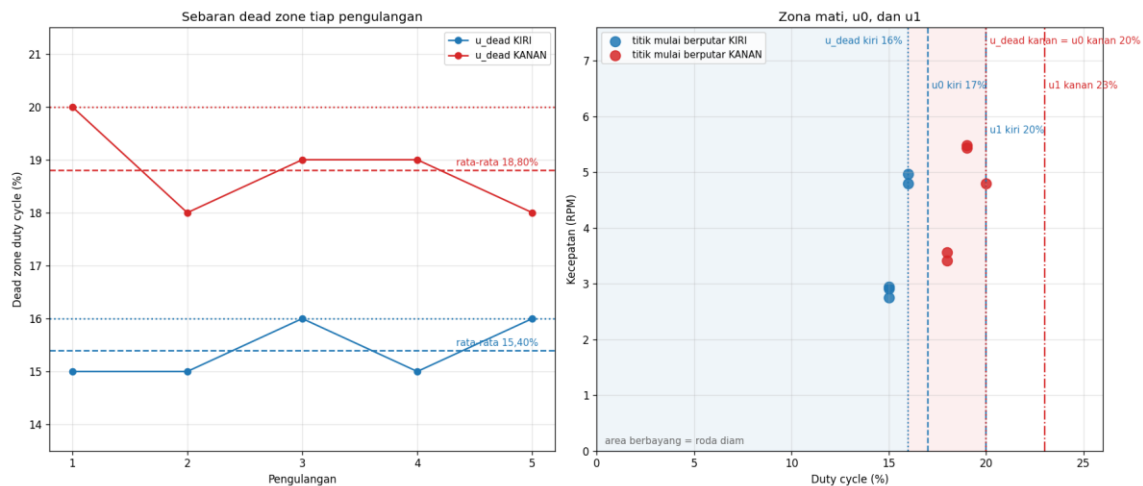
Pengujian ini dilakukan untuk menentukan ambang duty cycle ketika roda mulai berputar, yang selanjutnya dinyatakan sebagai u_{dead} . Nilai tersebut menjadi acuan pemilihan

titik kerja pada pengujian respons step. Pengujian dilakukan ketika robot berada di lantai dengan beban normal. Duty cycle dinaikkan dari 0% dengan langkah satu poin persentase sampai pembacaan kecepatan melampaui 1 RPM. Setiap titik pengujian ditahan sampai kecepatan stabil, dengan periode perekaman data 50 ms. Pengujian diulang sebanyak lima kali untuk setiap motor. Hasil pengukuran ambang duty cycle kedua motor ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil pengujian pencarian *dead zone duty cycle*

Pengulangan	u_dead kiri (%)	RPM awal kiri	u_dead kanan (%)	RPM awal kanan
1	15	2,75	20	4,80
2	15	2,91	18	3,56
3	16	4,97	19	5,49
4	15	2,95	19	5,44
5	16	4,80	18	3,41
Rata-rata	15,40	—	18,80	—
Median	15,0	—	19,0	—
Simpangan baku	0,55	—	0,84	—
Rentang	15–16	—	18–20	—

Ambang duty cycle motor kiri berada pada rentang 15–16%, sedangkan motor kanan berada pada rentang 18–20%. Rata-rata ambang motor kiri sebesar 15,40% dan motor kanan sebesar 18,80%, dengan selisih 3,40 poin persentase. Simpangan baku hasil pengulangan masing-masing sebesar 0,55 dan 0,84 poin persentase. Sebaran nilai pengukuran serta titik kerja yang dipilih ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Sebaran dead zone tiap pengulangan dan penetapan u_0 serta u_1 kedua motor

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Perbedaan ambang tersebut menunjukkan bahwa kedua sisi penggerak mempunyai kebutuhan masukan yang berbeda untuk mulai berputar pada kondisi pengujian. Hal ini juga terlihat pada pengujian duty cycle tetap sebesar 20%, ketika motor kiri menghasilkan kecepatan 14,248 RPM dan motor kanan menghasilkan kecepatan 8,109 RPM. Dengan demikian, pemberian duty cycle yang sama belum menghasilkan kecepatan roda yang sama.

Meskipun kedua sisi menggunakan modul driver BTS7960 dengan tipe yang sama, hasil pengujian menunjukkan bahwa respons penggerak kiri dan kanan berbeda. Pada kondisi beban pengujian, sisi kanan memerlukan duty cycle yang lebih besar untuk mulai berputar dan menghasilkan kecepatan yang mendekati sisi kiri. Temuan ini menjadi dasar penentuan titik kerja setiap motor secara terpisah.

Data penelitian membuktikan adanya perbedaan respons kedua sisi penggerak, tetapi belum menetapkan penyebabnya pada satu komponen tertentu. Data yang tersedia belum mencakup pengukuran arus motor, tegangan terminal, dan suhu driver secara bersamaan maupun hasil uji tukar driver. Oleh sebab itu, perbedaan duty cycle dijelaskan sebagai karakteristik gabungan motor, gearbox, beban, dan jalur penggerak; penyebabnya belum dapat ditetapkan khusus pada kedua modul BTS7960.

Nilai maksimum ambang mulai berputar digunakan sebagai acuan pemilihan titik kerja, yaitu 16% untuk motor kiri dan 20% untuk motor kanan. Berdasarkan respons yang terukur, u_0 dipilih sebesar 17% untuk motor kiri dan 20% untuk motor kanan. Nilai tersebut

menghasilkan kecepatan stabil awal masing-masing sebesar 7,708 RPM dan 7,676 RPM, mendekati setpoint pengujian 8 RPM.

Pada motor kanan, nilai u_0 sama dengan ambang maksimum yang tercatat. Oleh karena itu, pemilihannya didasarkan pada keberhasilan mencapai putaran stabil selama pengujian, bukan jaminan bahwa nilai tersebut berada di atas seluruh kemungkinan ambang pada kondisi yang berbeda. Nilai u_1 kemudian ditetapkan tiga poin persentase di atas u_0 , sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Penetapan u_0 dan u_1 untuk pengujian respons step

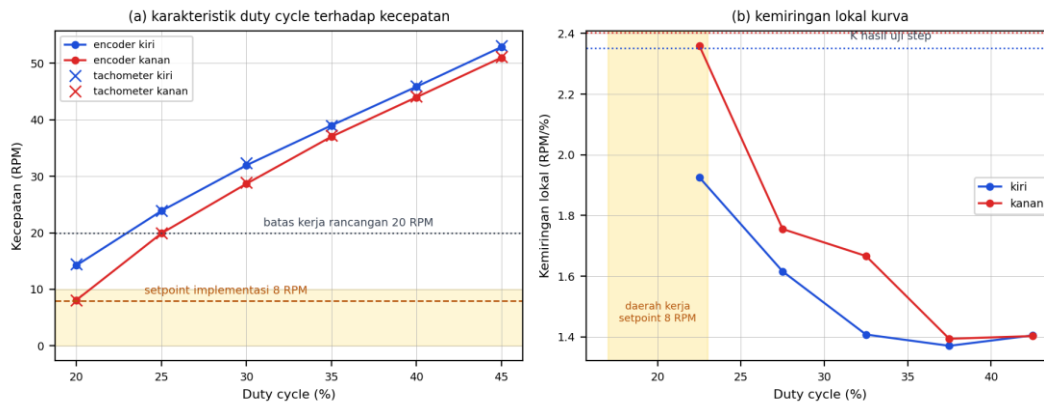
Parameter	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
u_{dead} hasil pengukuran	16,0	20,0	%
u_0 (<i>duty cycle</i> dengan kecepatan stabil $\approx$ setpoint 8 RPM)	17,0	20,0	%
$u_1 = u_0 + 3$	20,0	23,0	%
$\Delta u = u_1 - u_0$	3,0	3,0	%

Kedua nilai u_1 berada di bawah batas *duty cycle* 45% yang diterapkan pada firmware. Batas tersebut membatasi perintah PWM, tetapi tidak dengan sendirinya membuktikan bahwa arus motor selalu berada di bawah batas driver. Arus motor juga dipengaruhi kecepatan, beban, dan kondisi motor. Nilai u_0 dan u_1 pada Tabel 4.4 digunakan dalam identifikasi respons step pada bagian 4.2.1.

Karakteristik *duty cycle* terhadap kecepatan diperoleh dari pengujian yang sama dengan Tabel 4.2. Motor dijalankan pada enam nilai *duty cycle* tetap sampai mencapai kondisi stabil. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Karakteristik *duty cycle* terhadap kecepatan pada open loop

<i>Duty cycle</i> (%)	RPM motor kiri	RPM motor kanan	Selisih kiri terhadap kanan (RPM)
20	14,248	8,109	6,139
25	23,876	19,906	3,970
30	31,954	28,682	3,272
35	38,992	37,014	1,978
40	45,844	43,982	1,862
45	52,868	50,995	1,873



Gambar 4. 5 Karakteristik duty cycle terhadap kecepatan dan kemiringan lokal kurva

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Panel (a) Gambar 4.5 memperlihatkan kecenderungan yang serupa antara pembacaan encoder dan tachometer. Pada duty cycle 25%, kecepatan motor kanan sebesar 19,906 RPM, sedangkan motor kiri sebesar 23,876 RPM. Hasil tersebut kembali menunjukkan bahwa duty cycle untuk mencapai kecepatan tertentu perlu ditentukan secara terpisah pada setiap motor.

Setpoint pengujian kendali PI ditetapkan sebesar 8 RPM, dengan titik kerja duty cycle sekitar 17% pada motor kiri dan 20% pada motor kanan. Titik kerja ini berada pada daerah kecepatan rendah yang berdekatan dengan ambang mulai berputar. Pada daerah tersebut, perbedaan respons kedua sisi penggerak perlu diperhatikan dalam penentuan parameter kendali.

Selisih kecepatan kedua motor secara umum mengecil pada duty cycle yang lebih tinggi, dari 6,139 RPM pada duty cycle 20% menjadi 1,873 RPM pada duty cycle 45%. Pola tersebut konsisten dengan adanya perbedaan karakteristik penggerak yang lebih terlihat pada daerah kecepatan rendah, tetapi belum memisahkan kontribusi gesekan, karakteristik motor, dan rugi jalur daya secara kuantitatif.

Panel (b) Gambar 4.5 menunjukkan bahwa hubungan duty cycle terhadap kecepatan tidak mempunyai kemiringan yang tetap. Kemiringan lokal motor kiri berubah dari 1,926 RPM per poin persentase pada rentang 20–25% menjadi 1,370 RPM per poin persentase pada rentang 35–40%. Pada rentang yang sama, kemiringan motor kanan berubah dari 2,359 menjadi 1,394 RPM per poin persentase.

Perubahan kemiringan tersebut mendukung perlunya identifikasi penguatan proses pada daerah kerja yang sesuai dengan setpoint pengujian. Pengujian respons step dilakukan pada rentang 17–20% untuk motor kiri dan 20–23% untuk motor kanan. Dengan demikian, penguatan proses yang diperoleh digunakan sebagai pendekatan lokal di sekitar setpoint 8 RPM. Apabila setpoint atau kondisi beban berubah, kesesuaian penguatan proses dan parameter kendali perlu dievaluasi kembali.

4.2 Penentuan Parameter Awal dan Pengujian Kendali PI

4.2.1 Pengujian respons *step open loop*

Pengujian respons *step open loop* dilakukan untuk memperoleh data yang diperlukan metode Ziegler–Nichols pertama. Pengendali PI dinonaktifkan dan *duty cycle* diatur langsung melalui perintah PWM. Nilai u_0 dan u_1 mengacu pada Tabel 4.4, yaitu 17% dan 20% untuk motor kiri serta 20% dan 23% untuk motor kanan. Setiap pengujian merekam 6 detik keadaan stabil awal pada u_0 , lalu *duty cycle* dinaikkan ke u_1 dan ditahan 10 detik. Perekaman dilakukan melalui telemetri berperiode 50 ms, sedangkan *loop* kendali beserta perhitungan RPM pada mikrokontroler tetap berjalan pada periode 10 ms. Kondisi pengujian adalah robot berada di lantai dengan beban normal, dan pengujian diulang lima kali untuk setiap motor.

Data hasil pengujian motor kiri ditunjukkan pada Tabel 4.6 dan motor kanan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 6 Data respons step open loop motor kiri

Parameter	Ul. 1	Ul. 2	Ul. 3	Ul. 4	Ul. 5	Satuan
u_0	17	17	17	17	17	%
u_1	20	20	20	20	20	%
y_0	7,756	7,720	7,712	7,654	7,699	RPM
y_1	14,762	14,733	14,773	14,757	14,777	RPM
t_0	6,032	6,032	6,042	6,038	6,035	s
t_a	6,112	6,087	6,109	6,046	6,096	s
t_b	6,282	6,261	6,295	6,245	6,269	s
Δu	3	3	3	3	3	%
Δy	7,007	7,013	7,061	7,103	7,079	RPM
K	2,336	2,338	2,354	2,368	2,360	RPM/%

Parameter	Ul. 1	Ul. 2	Ul. 3	Ul. 4	Ul. 5	Satuan
L	0,0798	0,0546	0,0669	0,0085	0,0614	s
T	0,1698	0,1738	0,1855	0,1988	0,1733	s

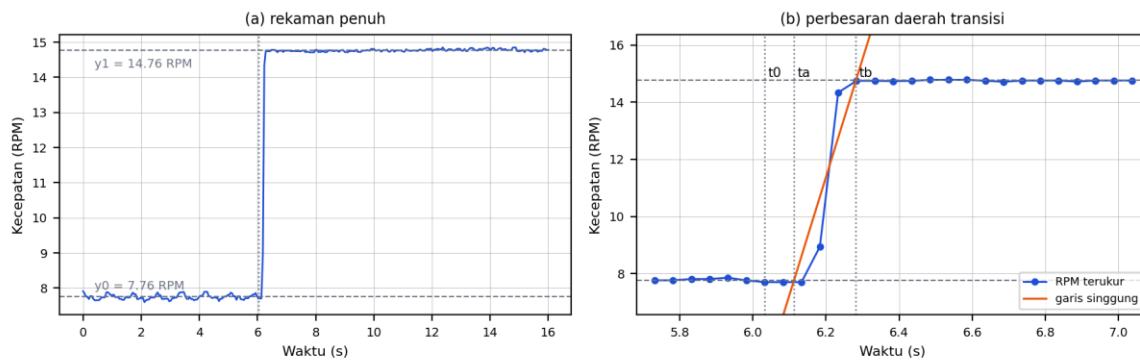
Tabel 4. 7 Data respons *step open loop* motor kanan

Parameter	Ul. 1	Ul. 2	Ul. 3	Ul. 4	Ul. 5	Satuan
u0	20	20	20	20	20	%
u1	23	23	23	23	23	%
y0	7,614	7,649	7,682	7,655	7,783	RPM
y1	14,832	14,737	14,941	15,036	14,888	RPM
t0	6,057	6,036	6,026	6,032	6,027	s
ta	6,114	6,085	6,181	6,094	6,139	s
tb	6,299	6,293	6,355	6,301	6,306	s
Δu	3	3	3	3	3	%
Δy	7,219	7,088	7,259	7,382	7,105	RPM
K	2,406	2,363	2,420	2,461	2,368	RPM/%
L	0,0572	0,0494	0,1545	0,0620	0,1113	s
T	0,1848	0,2082	0,1740	0,2068	0,1676	s

4.2.2 Identifikasi parameter K, L, dan T

Nilai K diperoleh dari Persamaan (2.9), sedangkan L dan T diperoleh dari garis singgung pada bagian kurva yang paling curam. Kemiringan garis singgung dihitung melalui regresi linier jendela geser terhadap data terukur. Titik potong garis singgung dengan garis y_0 menghasilkan t_a dan titik potong dengan garis y_1 menghasilkan t_b . Contoh hasil pengujian motor kiri ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan motor kanan pada Gambar 4.7.

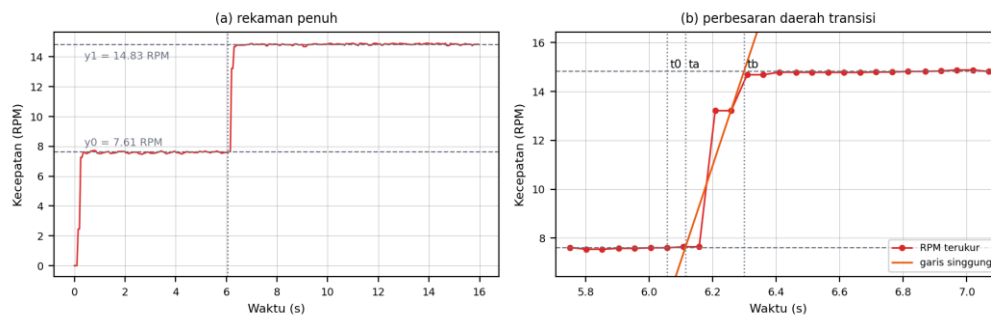
Motor kiri | $u_0 = 17\%$, $u_1 = 20\%$, $K = 2.336 \text{ RPM/\%}$, $L = 0.080 \text{ s}$, $T = 0.170 \text{ s}$



Gambar 4. 6 Respons step open loop motor kiri beserta garis singgung dan penandaan t_0 , t_a , serta t_b

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Motor kanan | $u_0 = 20\%$, $u_1 = 23\%$, $K = 2.406 \text{ RPM/\%}$, $L = 0.057 \text{ s}$, $T = 0.185 \text{ s}$

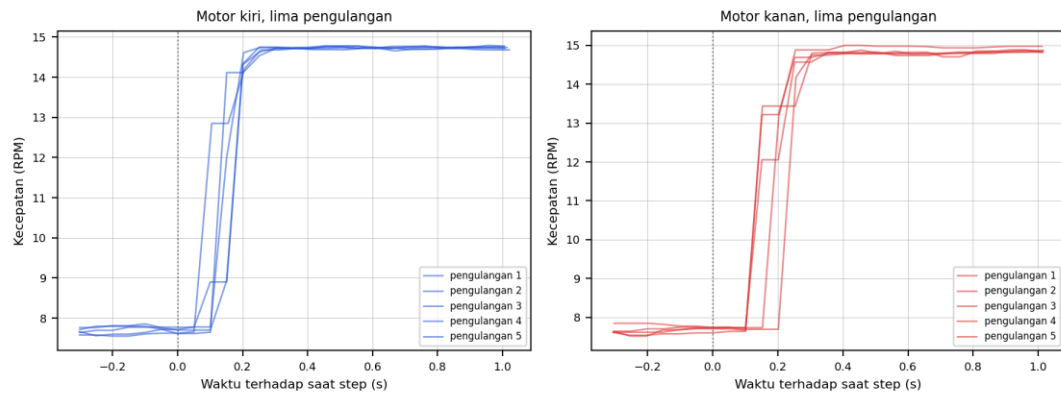


Gambar 4. 7 Respons step open loop motor kanan beserta garis singgung dan penandaan t_0 , t_a , serta t_b

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Panel (a) pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 memperlihatkan rekaman penuh selama 16 detik. Keadaan stabil sebelum dan sesudah *step* terbentuk dengan jelas dan riak kecepataannya kecil, sehingga y_0 dan y_1 dapat dibaca dengan yakin. Panel (b) merupakan perbesaran daerah transisi. Pada panel tersebut terlihat bahwa seluruh peralihan dari y_0 menuju y_1 hanya ditempuh dalam waktu kurang dari 0,3 detik, sehingga hanya tercakup oleh sekitar lima sampai enam titik cuplikan.

Sebaran respons kelima pengulangan kedua motor ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Sebaran respons step lima pengulangan motor kiri dan motor kanan

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Tabel 4. 8 Rangkuman hasil identifikasi parameter K, L, dan T

Parameter	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
y0 rata-rata	7,708	7,676	RPM
y1 rata-rata	14,761	14,887	RPM
K rata-rata	2,351	2,403	RPM/%
Simpangan baku K	0,014	0,040	RPM/%
L rata-rata	0,0542	0,0869	s
Simpangan baku L	0,0272	0,0449	s
T rata-rata	0,1802	0,1883	s
Simpangan baku T	0,0119	0,0186	s

Penguatan proses kedua motor sangat berulang. Motor kiri menghasilkan K sebesar 2,351 RPM/% dengan simpangan baku 0,014 RPM/%, sedangkan motor kanan menghasilkan 2,403 RPM/% dengan simpangan baku 0,040 RPM/%. Simpangan baku yang berada di bawah 2% dari nilai rata-rata menunjukkan hubungan antara *duty cycle* dan kecepatan pada daerah kerja tersebut bersifat tetap. Selisih K kedua motor hanya 2,3%, jauh lebih kecil daripada selisih *dead zone* pada bagian 4.1.2, sehingga perbedaan kedua motor lebih terletak pada ambang mulai berputar daripada pada penguatan prosesnya.

Konstanta waktu kedua motor juga berdekatan, yaitu 0,180 detik untuk motor kiri dan 0,188 detik untuk motor kanan. Nilai tersebut menunjukkan sistem penggerak merespons sangat cepat terhadap perubahan *duty cycle*.

Sebaliknya, waktu tunda L tidak dapat ditentukan dengan ketelitian yang sama. Nilai L yang terbaca berkisar antara 0,0085 detik sampai 0,1545 detik, dengan simpangan baku 0,027 detik pada motor kiri dan 0,045 detik pada motor kanan, yaitu sekitar setengah dari nilai rata-ratanya. Penyebabnya terlihat pada panel (b) Gambar 4.6: periode perekaman telemetri 50 ms hampir sama besar dengan waktu tunda yang hendak diukur, sehingga titik potong t_a dan t_b jatuh di antara dua cuplikan yang berdekatan dan pergeseran satu cuplikan saja sudah mengubah L secara berarti. Selain itu L yang terbaca merupakan waktu tunda ekuivalen seluruh rantai pengukuran, karena di dalamnya termuat jendela pencacahan *encoder* 10 ms, *low pass filter* kecepatan $y[k] = (3 y[k-1] + n[k]) / 4$ yang menambah tertinggal kira-kira tiga periode kendali, serta penundaan pengiriman telemetri dan pencatatan waktu pada sisi pengendali tingkat atas. Karena L yang terbaca lebih kecil daripada dua kali periode perekaman, sesuai ketentuan pada subbab 2.6.2 dan bagian 3.1.7 nilai tersebut dilaporkan sebagai batas atas, dan K_p serta K_i yang dihitung darinya diperlakukan sebagai nilai awal penalaan, bukan sebagai parameter akhir.

4.2.3 Perhitungan nilai awal K_p dan K_i

Perhitungan nilai awal K_p menggunakan Persamaan (2.10), yaitu K_p sama dengan 0,9 dikali T dibagi hasil kali K dan L . Karena L berada pada penyebut, ketidakpastian L langsung terbawa ke K_p dan selanjutnya ke K_i melalui Persamaan (2.11) dan Persamaan (2.12). Hasil perhitungan tiap pengulangan ditunjukkan pada Tabel 4.9 untuk motor kiri dan Tabel 4.10 untuk motor kanan.

Tabel 4. 9 Hasil perhitungan Ziegler–Nichols tiap pengulangan motor kiri

Parameter	Ul. 1	Ul. 2	Ul. 3	Ul. 4	Ul. 5	Satuan
K_p	0,8195	1,2250	1,0600	8,9015	1,0770	%/RPM
T_i	0,2659	0,1819	0,2228	0,0283	0,2044	s
K_i	3,0819	6,7347	4,7569	314,9293	5,2699	%/(RPM·s)

Tabel 4. 10 Hasil perhitungan Ziegler–Nichols tiap pengulangan motor kanan

Parameter	Ul. 1	Ul. 2	Ul. 3	Ul. 4	Ul. 5	Satuan
K_p	1,2072	1,6043	0,4189	1,2192	0,5724	%/RPM
T_i	0,1906	0,1646	0,5144	0,2065	0,3706	s
K_i	6,3327	9,7478	0,8143	5,9030	1,5447	%/(RPM·s)

Tabel 4.9 memperlihatkan bahwa nilai K_p motor kiri berkisar antara 0,8195 dan 8,9015, sedangkan K_i berkisar antara 3,0819 dan 314,9293. Rentang K_i tersebut mencapai seratus kali lipat meskipun kelima pengujian dilakukan pada kondisi yang sama dan menghasilkan K serta T yang hampir identik. Tabel 4.10 menunjukkan gejala yang sama pada motor kanan dengan K_i antara 0,8143 dan 9,7478. Sebaran sebesar itu berasal seluruhnya dari ketidakpastian L , bukan dari perubahan perilaku motor.

Nilai awal K_p dan K_i ditetapkan dari rata-rata hasil kelima pengulangan. Perata-rataan dilakukan terhadap parameter identifikasi K , L , dan T terlebih dahulu, kemudian hasil rata-rata tersebut disubstitusikan ke Persamaan (2.10) sampai Persamaan (2.12). Urutan ini dipilih karena perata-rataan langsung terhadap K_p dan K_i tiap pengulangan akan didominasi oleh satu pengulangan yang menghasilkan L sangat kecil. Sebagai pembanding, rata-rata langsung K_i motor kiri mencapai 66,95 sedangkan hasil perhitungan dari rata-rata K , L , dan T sebesar 7,04. Nilai yang diambil adalah yang kedua, karena mewakili perilaku motor dan bukan satu pengulangan yang menyimpang.

Substitusi untuk motor kiri menggunakan K sebesar 2,3508 RPM/%, L sebesar 0,0542 s, dan T sebesar 0,1802 s menghasilkan K_p sebesar 0,9 dikali 0,1802 dibagi hasil kali 2,3508 dan 0,0542, yaitu 1,2719 %/RPM. Waktu integral T_i sebesar 3,33 dikali 0,0542, yaitu 0,1807 s, sehingga K_i sebesar 1,2719 dibagi 0,1807, yaitu 7,0407 %/(RPM·s). Perhitungan motor kanan dilakukan dengan cara yang sama. Hasil lengkap kedua motor ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Nilai awal PI hasil Ziegler–Nichols metode pertama

Parameter	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
K	2,3508	2,4035	RPM/%
L	0,0542	0,0869	s
T	0,1802	0,1883	s
K_p	1,2719	0,8113	%/RPM
T_i	0,1807	0,2893	s
K_i	7,0407	2,8039	%/(RPM·s)
K_d	0	0	—

Nilai pada Tabel 4.11 merupakan nilai awal, bukan parameter akhir. Ketidakpastian pada L yang dibahas pada bagian 4.2.2 terbawa ke K_p dan K_i , sehingga sesuai ketentuan subbab

2.6.2 kedua nilai tersebut diperlakukan sebagai titik berangkat penalaan. Perbedaan nilai antara kedua motor juga wajar, karena motor kanan memiliki L rata-rata yang lebih besar sehingga menghasilkan K_p yang lebih kecil. Kedua nilai dimasukkan ke *firmware* melalui antarmuka sebagaimana dibahas pada bagian 4.2.4, kemudian responsnya diuji dan disesuaikan melalui penalaan halus pada bagian 4.2.6.

4.2.4 Penerapan parameter PI pada STM32

Nilai awal K_p dan K_i hasil metode Ziegler–Nichols pada Tabel 4.11 dimasukkan ke *firmware* melalui perintah PIDCFG pada antarmuka. Konfigurasi dikirim secara terpisah untuk motor kiri dan motor kanan, dengan parameter berupa K_p , K_i , K_d , batas duty cycle, dan duty cycle awal. *Firmware* menerapkan parameter yang dikirim melalui antarmuka, sedangkan penerimaan konfigurasi dikonfirmasi melalui balasan ACK.

Setpoint kecepatan dikirim melalui perintah PIDSTART. Sesuai implementasi pada bagian 3.4.3, pengiriman ulang setpoint ketika kendali sudah aktif tidak mengosongkan akumulator integral. Parameter K_d ditetapkan sebesar nol sehingga pengendali yang digunakan merupakan kendali PI.

Loop kendali dijalankan setiap 10 ms. Keluaran pengendali dibatasi antara 0% dan batas atas duty cycle yang ditentukan melalui antarmuka. Akumulator integral dibatasi pada $\pm 100 \text{ RPM}\cdot\text{s}$ sebagai pembatasan anti-windup.

Duty cycle awal ditentukan sebagai feedforward titik kerja berdasarkan hasil identifikasi open loop di sekitar setpoint 8 RPM. Penentuannya menggunakan hubungan perubahan kecepatan terhadap perubahan duty cycle yang telah dijelaskan melalui penguatan proses pada Persamaan (2.9). Selisih kecepatan awal terhadap setpoint digunakan untuk memperkirakan tambahan duty cycle di sekitar titik kerja hasil pengujian.

Pada motor kiri, duty cycle 17% menghasilkan kecepatan stabil awal 7,708 RPM. Dengan penguatan proses 2,3508 RPM per poin persentase, tambahan duty cycle yang diperlukan sekitar 0,124 poin persentase, sehingga nilai feedforward diperkirakan sebesar 17,124%. Pada motor kanan, duty cycle 20% menghasilkan kecepatan stabil awal 7,676 RPM. Penguatan proses sebesar 2,4035 RPM per poin persentase menghasilkan perkiraan tambahan duty cycle 0,135 poin persentase, sehingga nilai feedforward sebesar 20,135%.

Pembulatan dilakukan mengikuti resolusi pengaturan sebesar 0,1%. Selisih initial duty kedua motor sebesar 3,0 poin persentase merupakan kompensasi titik kerja berdasarkan

respons penggerak yang terukur. Nilai tersebut berbeda dari ambang mulai berputar karena dihitung untuk menghasilkan kecepatan di sekitar 8 RPM.

Sesuai implementasi pengendali, initial duty menjadi suku feedforward pada keluaran PI. Aksi proporsional dan integral kemudian memberikan koreksi berdasarkan selisih antara setpoint dan kecepatan aktual. Dengan demikian, initial duty tidak hanya berfungsi sebagai perintah sesaat ketika motor mulai bergerak, tetapi menjadi bagian dari perhitungan keluaran kendali selama PI aktif.

Perbedaan initial duty kiri dan kanan diperlukan karena kedua sisi penggerak mempunyai karakteristik masukan–keluaran yang berbeda, sebagaimana ditunjukkan pada bagian 4.1.2. Sasaran pengendalian adalah kesamaan kecepatan roda, sehingga nilai duty cycle kedua motor tidak harus sama. Parameter awal yang diterapkan sebelum penalaan halus dirangkum pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Parameter kendali PI yang diterapkan pada STM32F411CEU6

Parameter	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
K _p yang dimasukkan	1,2719	0,8113	%/RPM
K _i yang dimasukkan	7,0407	2,8039	%/(RPM·s)
K _d	0	0	—
Batas bawah <i>duty cycle</i>	0	0	%
Batas atas <i>duty cycle</i>	40,0	40,0	%
<i>Duty cycle</i> awal (<i>feedforward</i>)	17,10	20,10	%
Periode <i>loop</i> kendali	10	10	ms
Batas akumulator <i>anti-windup</i>	±100	±100	RPM·s
Status perintah konfigurasi	ACK,PIDCFG,L	ACK,PIDCFG,R	—

Nilai K_p dan K_i pada Tabel 4.12 merupakan parameter awal hasil identifikasi Ziegler–Nichols. Responsnya selanjutnya diuji dan diperbaiki melalui penalaan halus pada bagian 4.2.6. Parameter akhir yang dipilih adalah $K_p = 0,80$ dan $K_i = 2,80$ untuk motor kiri, serta $K_p = 1,10$ dan $K_i = 4,40$ untuk motor kanan, dengan initial duty masing-masing sebesar 17,1% dan 20,1%.

4.2.5 Pengujian respons kecepatan motor dengan kendali PI

Pengujian *closed loop* dilakukan dari kondisi motor berhenti menuju *setpoint* 8 RPM. Setiap pengujian dimulai dengan *STOP* dan *PIDRESET*, lalu data awal direkam sekitar 0,8 detik sebelum *setpoint* diberikan. Respons motor direkam pada 20 Hz. Dari perc1 sampai perc18, Percobaan 7 tidak berisi sampel sehingga tidak ikut dihitung. Total data yang dapat dianalisis adalah 17 percobaan. Selain empat ukuran respons utama, selisih kecepatan stabil kiri dan kanan juga diperhatikan karena robot memakai penggerak diferensial.

Dari seluruh hasil penalaan, lima percobaan yang paling layak dibandingkan lebih lanjut adalah Percobaan 10, 11, 12, 17, dan 18. Kelimanya dipilih karena responsnya sudah stabil dan datanya lengkap, tetapi masing-masing masih memiliki karakter yang berbeda. Percobaan 10 paling baik untuk keseragaman kecepatan akhir, sedangkan Percobaan 18 paling baik dalam menekan *overshoot* motor kiri. Percobaan lain tetap ditampilkan sebagai pembandingan. Hasil di luar lima kandidat tersebut ditempatkan pada Lampiran.

Tabel 4. 13 Karakteristik respons Percobaan 10 pada *setpoint* 8 RPM

Karakteristik	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
<i>Rise time</i> (tr)	0,056	0,068	s
<i>Maximum overshoot</i> (Mp)	59,8	32,1	%
<i>Settling time</i> (ts)	0,601	2,249	s
Kecepatan stabil (yss)	7,946	7,958	RPM
<i>steady state error</i> (ess)	0,67	0,53	%

Percobaan 10 dipakai sebagai acuan untuk pengujian berikutnya. Alasannya sederhana: setelah transien awal selesai, kecepatan roda kiri dan kanan paling dekat dengan *setpoint* dan selisih keduanya juga paling kecil. *Overshoot* roda kiri memang masih cukup besar, sehingga Percobaan 18 tetap disimpan sebagai pembandingan karena lonjakan awalnya lebih rendah.

4.2.6 Penalaan halus parameter PI

Penalaan dilakukan bertahap pada *setpoint* yang sama, yaitu 8 RPM. Nilai *Kp* dan *Ki* diubah sedikit demi sedikit, lalu bentuk responsnya dibandingkan dari *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*. Lima kandidat utama dirangkum pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15, sedangkan grafik lengkapnya ditampilkan pada Gambar 4.9 sampai Gambar 4.13. Percobaan lain tetap disimpan di Lampiran agar proses penalaan dapat ditelusuri tanpa membuat pembahasan utama terlalu panjang.

Tabel 4. 14 Lima percobaan penalaan parameter PI motor kiri

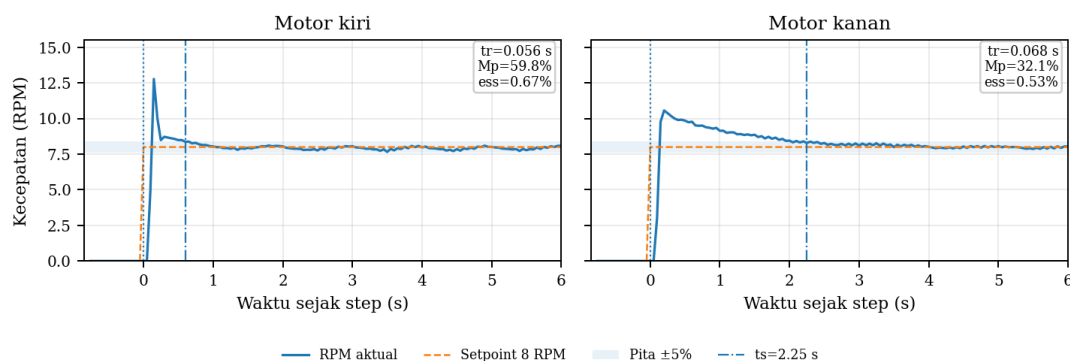
Iterasi	Kp	Ki	tr (s)	Mp (%)	ts (s)	ess (%)
Percobaan 10	0,80	2,80	0,056	59,8	0,601	0,67
Percobaan 11	0,82	2,90	0,026	51,2	0,650	2,24
Percobaan 12	0,84	3,00	0,050	69,5	0,700	2,35
Percobaan 17	0,92	3,50	0,037	65,1	0,649	2,28
Percobaan 18	0,94	3,70	0,120	16,0	0,650	1,58

Tabel 4. 15 Lima percobaan penalaan parameter PI motor kanan

Iterasi	Kp	Ki	tr (s)	Mp (%)	ts (s)	ess (%)
Percobaan 10	1,10	4,40	0,068	32,1	2,249	0,53
Percobaan 11	1,12	4,60	0,040	31,2	2,949	0,75
Percobaan 12	1,15	4,70	0,047	32,2	2,099	2,15
Percobaan 17	1,26	5,40	0,062	32,1	2,200	1,07
Percobaan 18	1,28	5,60	0,036	33,1	2,300	0,91

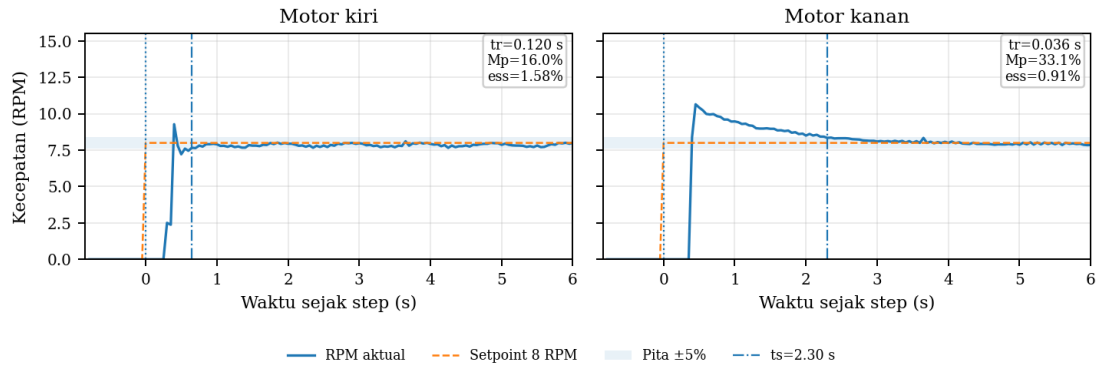
Pada motor kiri, Percobaan 18 paling baik dalam menekan *overshoot*, yaitu 16,0%, tetapi respons awalnya lebih lambat dibanding Percobaan 10. Pada motor kanan, kelima kandidat masih menunjukkan *overshoot* yang hampir sama, sekitar 31-33%. Percobaan 10 memberi *steady state error* paling kecil pada sisi kanan dan juga menghasilkan kecepatan akhir kiri-kanan yang paling rapat. Pada Percobaan 10, kecepatan stabil motor kiri sebesar 7,946 RPM dan motor kanan 7,958 RPM. Selisihnya hanya 0,012 RPM, sehingga percobaan ini paling cocok dijadikan parameter utama untuk gerak lurus.

Respons kecepatan Percobaan 10 pada setpoint 8 RPM



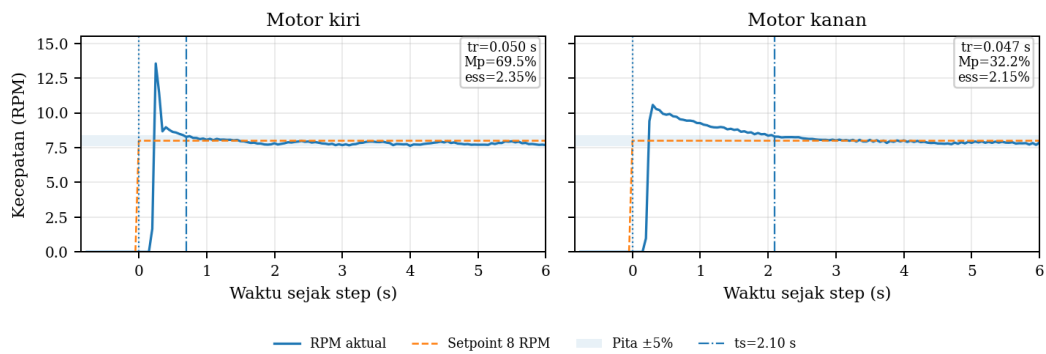
Gambar 4. 9 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 10)

Respons kecepatan Percobaan 18 pada setpoint 8 RPM



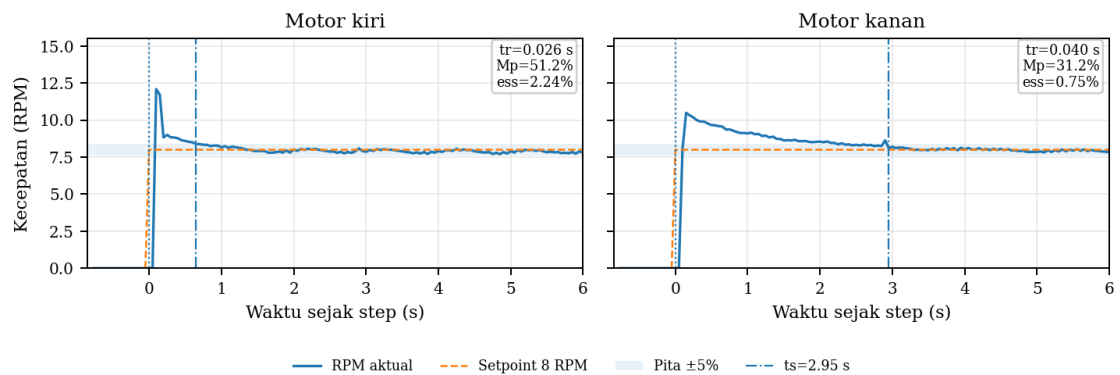
Gambar 4. 10 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 18)

Respons kecepatan Percobaan 12 pada setpoint 8 RPM



Gambar 4. 11 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 12)

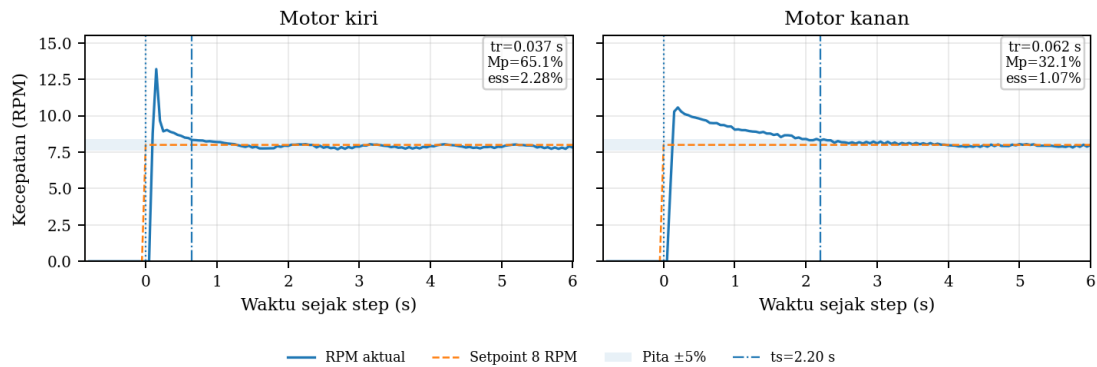
Respons kecepatan Percobaan 11 pada setpoint 8 RPM



Gambar 4. 12 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 11)

(Sumber: Dokumentasi pribadi.)

Respons kecepatan Percobaan 17 pada setpoint 8 RPM



Gambar 4. 13 Respons kecepatan motor kiri dan kanan pada setpoint 8 RPM (Percobaan 17)

Tabel 4. 16 Perbandingan parameter awal Ziegler–Nichols dan parameter utama

Parameter	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
Kp awal (ZN1)	1,2719	0,8113	%/RPM
Ki awal (ZN1)	7,0407	2,8039	%/(RPM·s)
Kp parameter utama	0,8000	1,1000	%/RPM
Ki parameter utama	2,8000	4,4000	%/(RPM·s)
<i>Initial duty</i> parameter utama	17,10	20,10	%
Kd	0	0	—

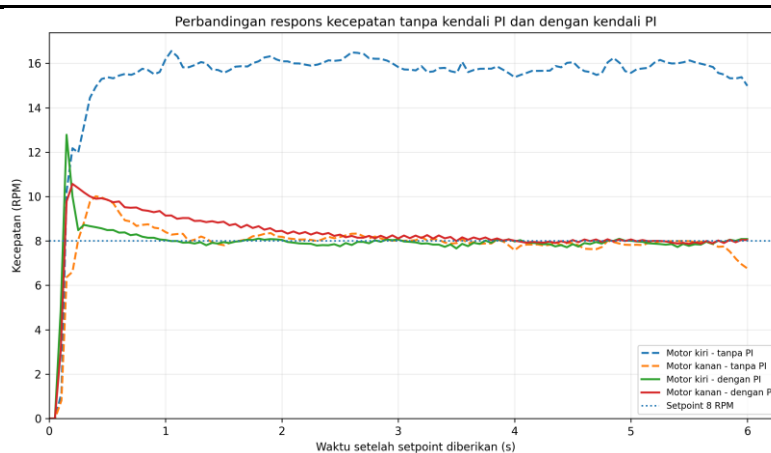
Untuk pengujian sistem terintegrasi dipakai parameter dari Percobaan 10, yaitu $K_p = 0,80$ dan $K_i = 2,80$ pada motor kiri, serta $K_p = 1,10$ dan $K_i = 4,40$ pada motor kanan. *Initial duty* atau *duty cycle* awal (*feedforward*) yang dipakai adalah 17,10% untuk motor kiri dan 20,10% untuk motor kanan. K_d tetap 0 karena pengendali yang digunakan adalah PI. Parameter ini dipilih bukan karena paling cepat di semua sisi, tetapi karena hasil akhirnya paling seimbang antara akurasi kecepatan dan keseragaman kedua roda.

4.2.7 Perbandingan kinerja tanpa kendali dan dengan kendali PI

Pengujian ini dilakukan untuk melihat perbedaan respons kecepatan motor ketika sistem dijalankan tanpa koreksi PI dan setelah kendali PI diaktifkan. Kedua kondisi diuji pada *setpoint* 8 RPM. Kondisi dengan PI menggunakan parameter utama dari Percobaan 10 karena parameter tersebut digunakan pada pengujian sistem terintegrasi. Agar metode perhitungannya konsisten dengan pembahasan sebelumnya, kecepatan stabil dihitung dari rata-rata 12 sampel terakhir pada masing-masing pengujian. Pada pengujian tanpa PI, *duty cycle* keluaran tidak dicatat sebagai variabel evaluasi, sehingga perbandingan difokuskan pada kecepatan aktual, *steady state error*, dan keseragaman kecepatan kedua roda.

Tabel 4. 17 Perbandingan kinerja tanpa kendali dan dengan kendali PI

Besaran	Tanpa PI	Dengan PI	Satuan
Kecepatan stabil motor kiri	15,668	7,946	RPM
Kecepatan stabil motor kanan	7,634	7,958	RPM
<i>steady state error</i> motor kiri	95,85	0,67	%
<i>steady state error</i> motor kanan	4,58	0,53	%
Selisih RPM kedua roda	8,034	0,012	RPM
Kiri: Kp 0,80; Ki 2,80; <i>initial</i> duty 17,10%			
Parameter kendali	PI tidak diaktifkan	Kanan: Kp 1,10; Ki 4,40; <i>initial</i> duty 20,10%	—



Gambar 4. 14 Respons tanpa PI dan dengan PI pada setpoint 8 RPM

(Sumber: Hasil pengujian penelitian.)

Perbedaan paling jelas terlihat pada motor kiri. Tanpa PI, kecepatan motor kiri setelah fase awal berada di sekitar 15–16 RPM, padahal *setpoint* hanya 8 RPM. Kecepatan stabilnya tercatat 15,668 RPM dengan *steady state error* 95,85%. Pada saat yang sama, motor kanan berada lebih dekat ke *setpoint*, yaitu 7,634 RPM dengan *error* 4,58%. Akibat perbedaan karakter kedua motor tersebut, selisih kecepatan stabil kiri dan kanan mencapai 8,034 RPM. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemberian perintah yang sama tanpa koreksi umpan balik belum cukup untuk membuat kedua roda bergerak dengan kecepatan yang seragam.

Setelah kendali PI diaktifkan menggunakan parameter utama Percobaan 10, kecepatan stabil motor kiri menjadi 7,946 RPM dan motor kanan 7,958 RPM. *steady state error* turun menjadi 0,67% pada motor kiri dan 0,53% pada motor kanan, sedangkan selisih kecepatan kedua roda tinggal 0,012 RPM. Pada grafik masih terlihat lonjakan ketika motor pertama kali bergerak, tetapi setelah bagian transien tersebut lewat kedua respons berkumpul di sekitar *setpoint*. Hasil ini memperlihatkan bahwa fungsi utama PI pada sistem penggerak bukan hanya

mendekatkan masing-masing motor ke 8 RPM, tetapi juga membuat kecepatan roda kiri dan kanan jauh lebih seragam.

4.2.8 Pengujian ketahanan PI terhadap perubahan beban

Pengujian ketahanan PI terhadap perubahan beban dilakukan sebanyak lima kali pada *setpoint* 8 RPM. Pada setiap pengujian dicatat waktu, *setpoint*, dan kecepatan aktual kedua motor. Penanda waktu saat beban mulai diberikan serta duty cycle keluaran tidak direkam sebagai variabel pengujian, sehingga kedua besaran tersebut tidak dihitung secara numerik agar tidak menghasilkan interpretasi yang tidak didukung data. Analisis difokuskan pada minimum RPM yang teramati setelah fase awal dan kondisi kecepatan pada akhir pengujian.

Tabel 4. 18 Hasil pengujian ketahanan kendali PI terhadap perubahan beban

Besaran	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
Minimum RPM teramati, rata-rata 5 pengujian	5,418 ± 0,448	2,359 ± 1,572	RPM
Penurunan terhadap <i>setpoint</i> 8 RPM	2,582	5,641	RPM
Penurunan terhadap <i>setpoint</i> 8 RPM	32,28	70,51	%
Kecepatan akhir, rata-rata 12 sampel terakhir	8,322 ± 0,402	10,184 ± 1,621	RPM
<i>Error</i> akhir mutlak rata-rata	4,59	27,31	%
Waktu pemberian gangguan	Tidak terekam	Tidak terekam	—
Perubahan <i>duty cycle</i>	Tidak terekam	Tidak terekam	—

Hasil lima pengujian menunjukkan bahwa perubahan beban menyebabkan penurunan kecepatan yang nyata pada kedua sisi, dengan penurunan yang lebih besar pada motor kanan. Rata-rata minimum yang teramati adalah 5,418 RPM pada motor kiri dan 2,359 RPM pada motor kanan, setara penurunan masing-masing 32,28% dan 70,51% dari *setpoint*. Pada akhir pengujian, motor kiri rata-rata kembali mendekati *setpoint* dengan kecepatan 8,322 RPM dan *error* mutlak rata-rata 4,59%, sedangkan motor kanan masih berada pada rata-rata 10,184 RPM dengan *error* mutlak rata-rata 27,31%. Dari lima pengujian, satu pengujian berakhir dengan kedua roda berada di dalam pita ±5% secara bersamaan. Temuan ini menunjukkan bahwa parameter utama mampu mengoreksi perubahan beban pada sisi kiri dengan lebih konsisten, namun penolakan gangguan pada sisi kanan masih perlu diperbaiki. Karena waktu kontak

beban dan duty cycle tidak direkam, waktu pemulihan absolut dan besarnya perubahan sinyal kendali tidak digunakan sebagai dasar kesimpulan.

4.3 Pengujian Sistem Terintegrasi

4.3.1 Pengujian keseragaman kecepatan roda kiri dan kanan

Pengujian keseragaman kecepatan memakai parameter utama dari Percobaan 10 pada *setpoint* 8 RPM. Nilai yang dibandingkan adalah kecepatan stabil setelah respons selesai bertransisi, bukan nilai sesaat ketika motor baru mulai bergerak. Kecepatan stabil dihitung dari rata-rata 12 sampel terakhir pada rekaman.

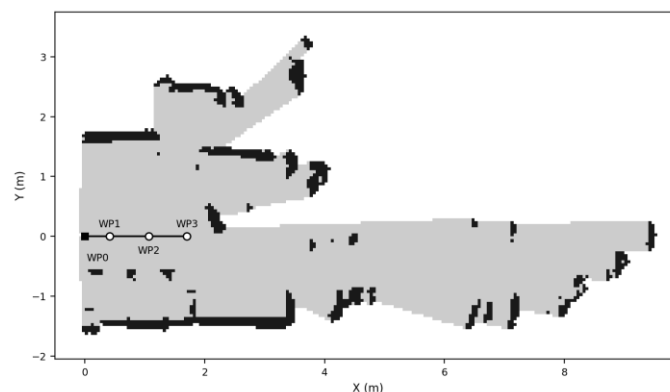
Tabel 4. 19 Keseragaman kecepatan roda kiri dan roda kanan

<i>Setpoint</i> (RPM)	RPM roda kiri	RPM roda kanan	Selisih (RPM)
8,000	7,946	7,958	0,012

Pada *setpoint* 8 RPM, roda kiri berada di 7,946 RPM dan roda kanan 7,958 RPM. Selisih keduanya hanya 0,012 RPM. Hasil ini menunjukkan bahwa setelah kondisi awal lewat, kedua *loop* PI mampu menjaga kecepatan roda pada nilai yang hampir sama. Selisih sekecil ini penting pada robot diferensial karena perbedaan RPM yang terus-menerus akan membuat robot perlahan menyimpang dari arah lurus. Grafik responsnya sudah ditampilkan pada Gambar 4.9 sehingga tidak diulang pada bagian ini.

4.3.2 Pengujian Error Jarak Waypoint pada *Occupancy Grid*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *error* jarak *waypoint* pada *occupancy grid* terhadap jarak referensi yang diukur secara fisik dari Waypoint 0. Berkas peta aktual menyimpan *occupancy grid* berukuran 1200×1200 sel dengan resolusi 0,05 m/sel, 37 sampel *pose* rute, dan tiga *stop waypoint*. Waypoint 0 digunakan sebagai titik awal, sedangkan posisi tiga titik berhenti pada kerangka peta berada pada $x = 0,41394$ m, $1,06528$ m, dan $1,70333$ m dengan $y = 0$ m.



Gambar 4. 15 *Occupancy grid* aktual dan posisi *Waypoint 0* sampai *Waypoint 3*

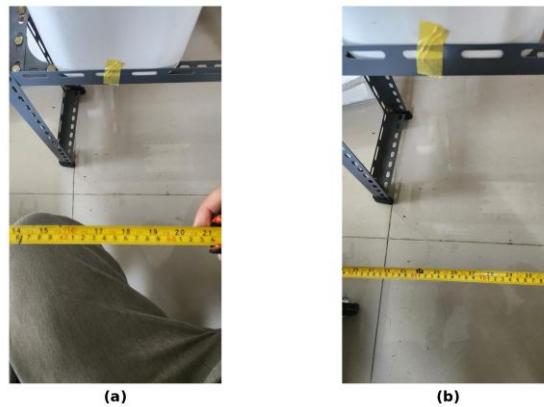
Jarak pada kerangka peta dihitung dari koordinat *Waypoint 0* ke setiap *waypoint* menggunakan jarak Euclidean. Karena lintasan tersimpan lurus dan nilai y seluruh titik sama dengan nol, jarak pada peta sama dengan selisih koordinat x terhadap *Waypoint 0*.

$$d_{\text{map}} = \sqrt{[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]}$$

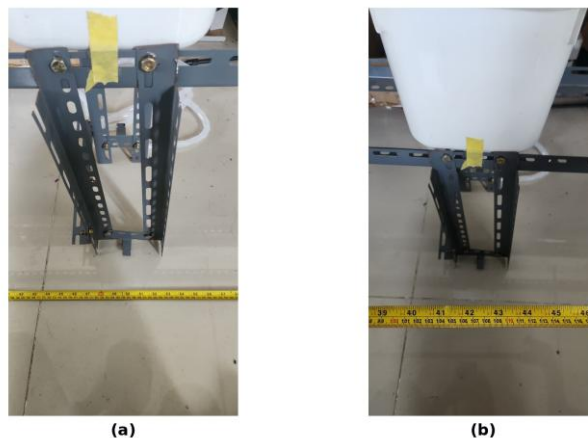
dengan d_i adalah jarak *waypoint* ke- i pada kerangka peta, x_i dan y_i adalah koordinat *waypoint* ke- i , sedangkan x_0 dan y_0 adalah koordinat *Waypoint 0*. *Error* absolut dan *error* persentase dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$e_{\text{abs}} = |d_{\text{map}} - d_{\text{ref}}|$$

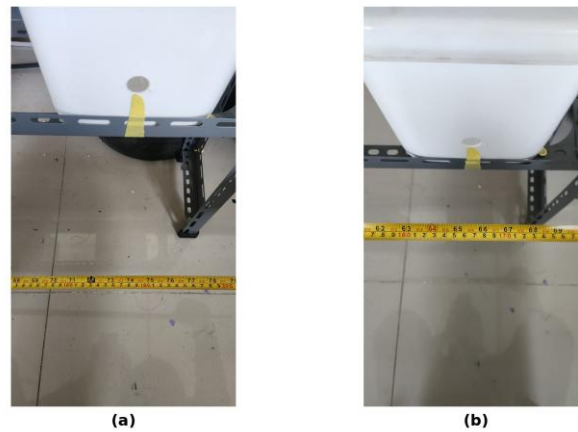
$$e_i = \left(\frac{e_{\text{abs}}}{d_{\text{ref}}}\right) \times 100\%$$



Gambar 4. 16 Dokumentasi pengukuran *Waypoint 1* dari *Waypoint 0*: (a) kamera terhadap *Waypoint 1*; (b) roda terhadap *Waypoint 1*.



Gambar 4. 17 Dokumentasi pengukuran *Waypoint 2* dari *Waypoint 0*: (a) roda terhadap *Waypoint 2*; (b) kamera terhadap *Waypoint 2*.



Gambar 4. 18 Dokumentasi pengukuran *Waypoint 3* dari *Waypoint 0*: (a) dan (b) pengukuran posisi roda terhadap *Waypoint 3*.

Tabel 4. 20 Hasil evaluasi error jarak waypoint pada occupancy grid

<i>Waypoint</i>	Jarak referensi (m)	Jarak pada <i>occupancy grid</i> (m)	<i>Error absolut</i> (m)	<i>Error (%)</i>
WP1	0,33	0,41394	0,08394	25,44
WP2	0,91	1,06528	0,15528	17,06
WP3	1,53	1,70333	0,17333	11,33
Rata-rata	—	—	0,13752	17,94

Hasil pada Tabel 4.20 menunjukkan *error* jarak sebesar 25,44% pada WP1, 17,06% pada WP2, dan 11,33% pada WP3. Rata-rata *error* ketiga *waypoint* adalah 17,94%, sedangkan *error* panjang lintasan total dari WP0 sampai WP3 adalah 11,33% dengan *error* absolut 0,17333 m atau 17,33 cm.

Nilai jarak pada *occupancy grid* berasal dari koordinat *stop waypoint* yang tersimpan bersama peta dan rute *Teach*. Oleh karena itu, *error* pada Tabel 4.20 tidak dinyatakan sebagai *error* sensor LiDAR murni karena masih mencakup pengaruh odometri selama *Teach*, slip roda, penentuan titik referensi fisik, dan transformasi posisi sensor terhadap badan robot.

4.3.3 Pengujian *local LiDAR scan matching* pada tahap *Repeat*

Pengujian *local LiDAR scan matching* dilakukan sebanyak lima percobaan pada tahap *Repeat* dan *Homing*. Setiap percobaan menggunakan peta hasil *Teach* masing-masing sebagai *reference map* untuk proses *scan-to-map*. Kelima peta pada Gambar 4.19 menjadi acuan bagi percobaan yang bersesuaian.

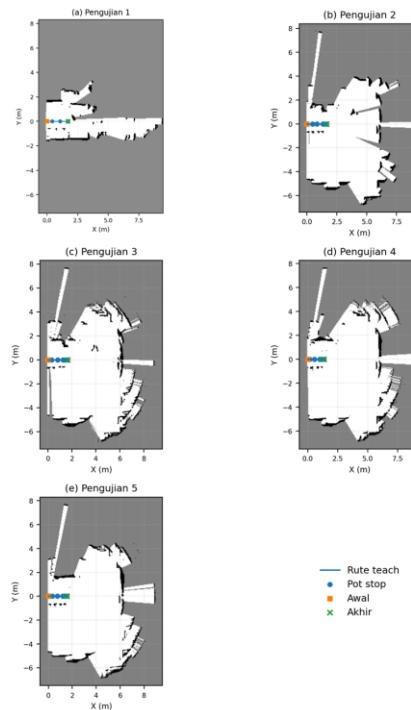
Analisis pada bagian 4.3.3 dan 4.3.4 menggunakan lima rekaman pengujian yang sama. Identitas berkas sumber disajikan pada Lampiran 16, sedangkan kriteria pemilihan data dijelaskan pada Lampiran 17. Cuplikan pasangan data yaw disajikan pada Lampiran 18 dan seluruh CSV sumber tersedia dalam lampiran digital.

Pada proses scan matching, pose hasil odometri encoder digunakan sebagai tebakan awal. Kandidat pose di sekitar tebakan tersebut dievaluasi dengan memproyeksikan titik LiDAR ke occupancy grid. Kandidat dengan skor kecocokan tertinggi dipilih sesuai prinsip pada Persamaan (2.22), kemudian diperiksa melalui quality gate sebelum digunakan sebagai koreksi pose.

Setiap upaya pencocokan dihitung satu kali berdasarkan nomor upaya yang unik pada masing-masing rekaman. Pencatatan telemetri yang hanya mengulang hasil pencocokan sebelumnya tidak dihitung sebagai upaya baru. Penanda dan kolom yang digunakan untuk pemilihan tersebut tercantum pada Lampiran 17.

Status hasil pencocokan dikelompokkan menjadi Accepted, Rejected, dan WAIT. Accepted menunjukkan hasil yang memenuhi kriteria penerimaan, sedangkan Rejected menunjukkan hasil yang tidak memenuhi kriteria kualitas atau batas koreksi. WAIT menunjukkan upaya yang masih menunggu pemenuhan konsensus pada tahap Fine Home.

Jumlah seluruh upaya mencakup hasil Accepted, Rejected, dan WAIT. Pada tabel, N menunjukkan jumlah seluruh upaya, A jumlah Accepted, R jumlah Rejected, dan W jumlah WAIT. Persentase penerimaan menunjukkan proporsi Accepted terhadap seluruh upaya, termasuk WAIT.



Gambar 4. 19 Lima peta yang digunakan pada pengujian *local LiDAR scan matching*: (a) Pengujian 1, (b) Pengujian 2, (c) Pengujian 3, (d) Pengujian 4, dan (e) Pengujian 5

Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.21. Kolom Δ score menyatakan score improvement, yaitu peningkatan skor kandidat terbaik terhadap skor pose prediksi.

Tabel 4. 21 Hasil *local LiDAR scan matching* pada lima percobaan

Percobaan	Attempt	Accepted	Rejected	Accepted (%)	Rata-rata best score	Rata-rata score improvement
1	1.194	803	368	68,57	0,100	0,059
2	1.701	525	1.057	33,19	0,097	0,078
3	1.358	638	615	50,92	0,194	0,116
4	1.266	649	549	54,17	0,216	0,139
5	1.570	414	1.146	26,54	0,114	0,087
Rata-rata	1.417,8	605,8	747,0	46,68	0,144	0,096

Sebanyak 3.029 dari 7.089 upaya pencocokan diterima, sehingga rasio penerimaan gabungan terhadap seluruh upaya sebesar 42,73%. Rata-rata aritmetika rasio penerimaan lima percobaan sebesar 44,55%, dengan nilai tertinggi pada Percobaan 1 sebesar 67,25% dan terendah pada Percobaan 5 sebesar 26,37%. Rata-rata best score dan score improvement antarpercobaan masing-masing sebesar 0,144 dan 0,096.

Rasio gabungan dan rata-rata rasio antarpercobaan mempunyai cara perhitungan yang berbeda. Rasio gabungan dihitung dari jumlah seluruh Accepted dibagi jumlah seluruh upaya, sedangkan rata-rata antarpercobaan memberikan bobot yang sama kepada setiap percobaan.

Apabila hanya upaya berstatus Accepted dan Rejected yang diperhitungkan, rata-rata persentase penerimaan antarpercobaan menjadi 46,68%. Nilai tersebut mengecualikan WAIT sehingga tidak digunakan sebagai persentase penerimaan terhadap seluruh upaya.

Untuk membedakan kondisi operasi, data dikelompokkan menjadi Repeat, Homing track, dan Fine Home berdasarkan konteks pencocokan yang terekam. Homing track mencakup pencocokan selama penelusuran pulang, sedangkan Fine Home merupakan tahap penyelarasan akhir. Rekapitulasi setiap fase ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4. 22 Rekapitulasi scan matching menurut fase pada lima percobaan

Fase	N	A	R	W	Rerata best score	Rerata Δscore
Repeat	3.890	2.166	1.724	0	0,106	0,059
Homing track	2.001	851	1.150	0	0,093	0,053
Fine Home	1.198	12	861	325	0,334	0,282

Seluruh 325 status WAIT berada pada tahap Fine Home. Perbedaan skor dan penerimaan antarfase perlu dibaca bersama perbedaan mekanisme pencarian, batas koreksi, dan kebutuhan konsensus. Best score yang lebih tinggi pada Fine Home tidak langsung menunjukkan error posisi atau yaw yang lebih kecil, karena skor tersebut menyatakan kecocokan terhadap peta, bukan selisih terhadap ground truth eksternal.

Rerata skor pada Tabel 4.22 dihitung atas seluruh upaya unik dalam fase yang bersesuaian. Sementara itu, baris rerata pada Tabel 4.21 dihitung sebagai rata-rata statistik lima percobaan. Perbedaan dasar perhitungan tersebut perlu diperhatikan ketika membandingkan kedua tabel.

Hasil yang tidak memenuhi quality gate tidak langsung digunakan untuk mengubah pose kontrol. Odometri encoder tetap menjadi acuan utama, sedangkan koreksi LiDAR digunakan ketika hasil pencocokan memenuhi kriteria penerimaan.

Pengujian error jarak waypoint pada bagian 4.3.2 dan pengujian scan matching mengevaluasi aspek yang berbeda. Pengujian jarak menggunakan satu sampel peta beserta acuan jarak fisiknya, sedangkan scan matching menggunakan lima peta hasil Teach yang

bersesuaian dengan lima percobaan. Acuan jarak pada satu peta tersebut tidak menjadi ground truth yaw bagi seluruh percobaan.

4.3.4 Pengujian Yaw Kalman LiDAR

Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan *raw yaw offset* hasil local LiDAR *scan matching* dengan *yaw offset* setelah filter Kalman. Analisis menggunakan lima percobaan yang sama dengan bagian 4.3.3. Daftar berkas sumber, kriteria pemilihan, dan cuplikan data pengujian disajikan pada Lampiran 16–18.

Nilai sebelum dan setelah penyaringan dibandingkan pada pembaruan filter yang bersesuaian agar statistik tidak dipengaruhi pencatatan berulang terhadap keadaan filter yang sama. Nama kolom sumber kedua nilai tersebut dicantumkan pada Lampiran 17.

Sampel dipilih dari upaya pencocokan unik yang diterima setelah filter terinisialisasi. Konteks yang digunakan adalah pembaruan YAW5 pada tahap *Repeat* dan *Homing* track. Pasangan data hanya digunakan apabila nilai raw dan Kalman tersedia pada pembaruan yang sama.

Sebanyak 12 hasil *Accepted* pada tahap *Fine Home* tidak memperbarui filter yaw YAW5 sehingga tidak dimasukkan dalam analisis pasangan. Dengan demikian, dari 3.029 hasil *Accepted* diperoleh 3.017 pasangan pembaruan *raw*–Kalman. Jumlah pasangan pada Percobaan 1 sampai Percobaan 5 masing-masing adalah 800, 522, 636, 647, dan 412.

Istilah *raw* dalam pengujian ini mengacu pada *offset yaw* keluaran scan matching yang telah melalui *quality gate* dan pembatasan koreksi $\pm 5^\circ$. Nilai tersebut berbeda dari data jarak mentah LiDAR per *beam*. Statistik dihitung menggunakan seluruh pasangan yang memenuhi kriteria, termasuk pasangan awal ketika filter mulai diinisialisasi.

Evaluasi dilakukan menggunakan nilai rata-rata dan simpangan baku sampel. Rata-rata menunjukkan kecenderungan *offset yaw* selama pengujian, sedangkan simpangan baku menunjukkan besarnya variasi nilai terhadap rata-ratanya. Pada Tabel 4.23, *n* menunjukkan jumlah pasangan dan *s* menunjukkan simpangan baku sampel.

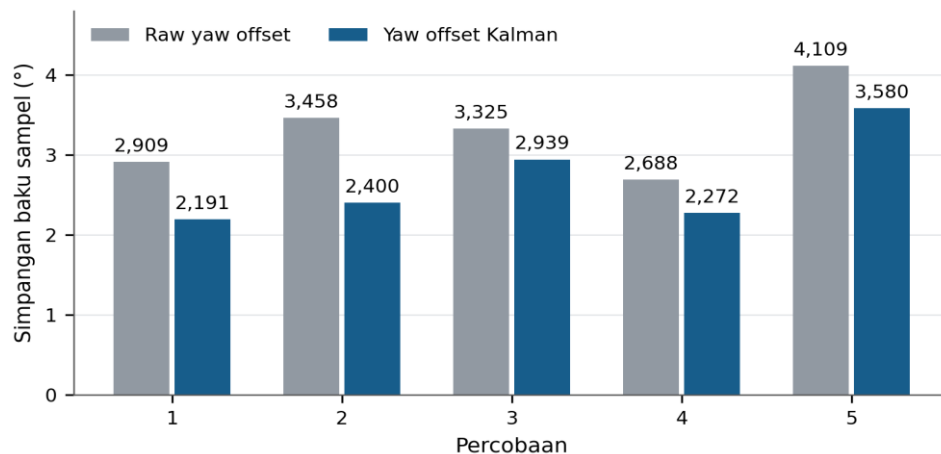
Penurunan simpangan baku dinyatakan sebagai persentase selisih simpangan baku *raw* dan Kalman terhadap simpangan baku *raw* pada percobaan yang sama. Perhitungan menggunakan nilai sebelum pembulatan, kemudian hasilnya ditampilkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Perbandingan *raw yaw offset* dan *yaw offset* hasil filter Kalman

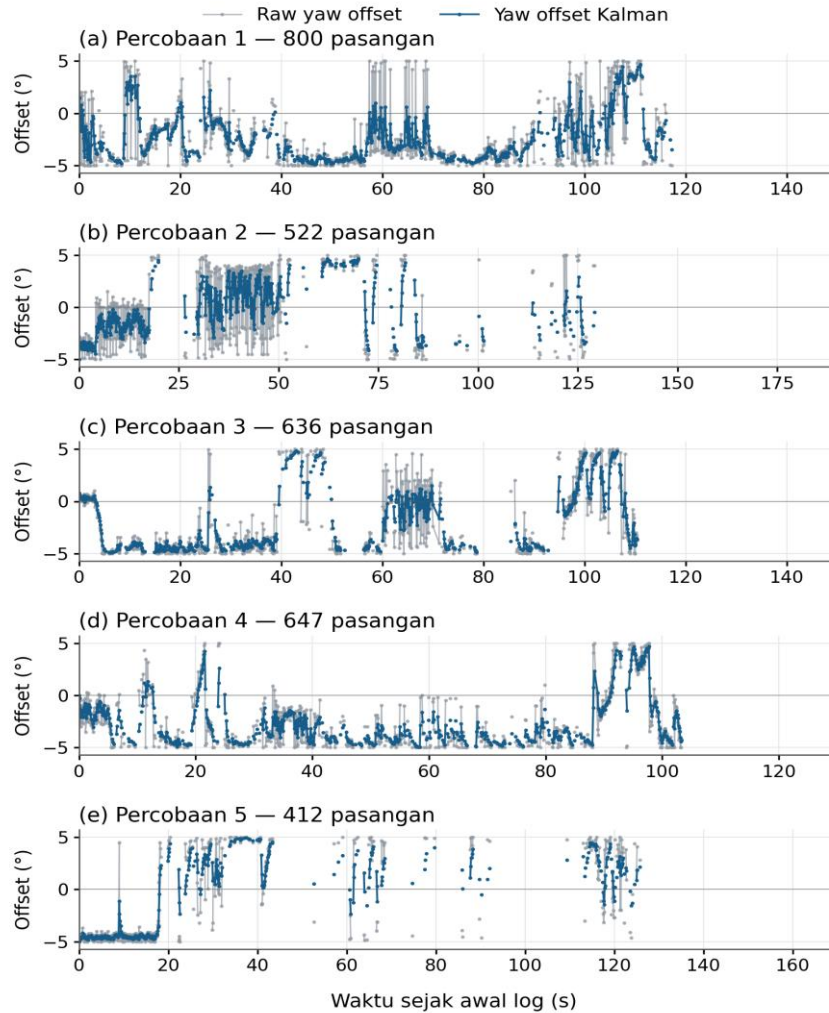
Uji	n	Rerata raw (°)	s raw (°)	Rerata Kalman (°)	s Kalman (°)	Penurunan s (%)
1	800	-2,243	2,909	-2,320	2,191	24,69
2	522	-0,270	3,458	-0,223	2,400	30,60
3	636	-1,869	3,325	-1,873	2,939	11,63
4	647	-2,562	2,688	-2,574	2,272	15,49
5	412	-0,625	4,109	-0,672	3,580	12,89
Rerata 5 uji	—	—	3,298	—	2,676	19,06

Baris terakhir pada Tabel 4.23 merupakan rata-rata aritmetika statistik lima percobaan, bukan statistik dari seluruh sampel yang digabungkan. Rata-rata persentase penurunan sebesar 19,06% dihitung dari kelima persentase penurunan per percobaan. Apabila penurunan dihitung langsung dari dua rerata simpangan baku, hasilnya sebesar 18,85%. Kedua nilai tersebut memiliki dasar perhitungan berbeda sehingga tidak dipertukarkan.

Perbandingan simpangan baku *raw yaw offset* dan *yaw offset* setelah Kalman ditunjukkan pada Gambar 4.20.

**Gambar 4. 20** Perbandingan simpangan baku *raw yaw offset* dan hasil filter Kalman pada lima percobaan

Untuk memperlihatkan perubahan nilai selama pengujian, *raw yaw offset* dan *yaw offset* Kalman juga disajikan terhadap waktu pada Gambar 4.21.



Gambar 4. 21 Raw yaw offset dan yaw offset Kalman terhadap waktu pada (a) Percobaan 1, (b) Percobaan 2, (c) Percobaan 3, (d) Percobaan 4, dan (e) Percobaan 5

Titik pada grafik berasal dari waktu pencatatan event yang memenuhi kriteria pasangan pembaruan. Bagian kosong menunjukkan tidak adanya pasangan pembaruan yang digunakan, termasuk ketika sistem berada pada tahap Fine Home. Bagian tersebut tidak menunjukkan bahwa offset yaw bernilai nol.

Grafik terhadap waktu memperlihatkan bagaimana hasil filter mengikuti perubahan offset yaw dan meredam sebagian variasi antarpembaruan. Penurunan simpangan baku menunjukkan bahwa variasi nilai keluaran filter lebih kecil dibandingkan masukan raw pada pasangan data yang dianalisis.

Pada seluruh percobaan, simpangan baku yaw offset setelah Kalman lebih rendah daripada raw yaw offset. Penurunan terbesar terjadi pada Percobaan 2 sebesar 30,60%, sedangkan penurunan terkecil terjadi pada Percobaan 3 sebesar 11,63%. Rata-rata simpangan

baku antarpercobaan berubah dari $3,298^\circ$ menjadi $2,676^\circ$, dengan rata-rata penurunan per percobaan sebesar 19,06%.

Statistik ini mencakup kondisi robot bergerak dan berhenti selama pengujian, sehingga tidak ditafsirkan sebagai pengukuran noise sensor pada kondisi statis. Nilai rata-rata offset yang berbeda dari nol juga tidak otomatis menunjukkan bias sensor, karena offset yaw merupakan koreksi relatif terhadap prediksi odometri.

Tanpa acuan yaw eksternal yang tersinkron, hasil pengujian mendukung kesimpulan mengenai pengurangan fluktuasi estimasi koreksi yaw. Hasil tersebut belum membuktikan peningkatan akurasi yaw absolut maupun mengukur keterlambatan filter terhadap arah hadap robot yang sebenarnya.

4.4 Analisis Kinerja Sistem

4.4.1 Analisis pencapaian kriteria kinerja

Kinerja utama sistem dinilai dari Percobaan 10 karena parameter inilah yang dipakai pada pengujian terintegrasi. Tabel 4.24 merangkum respons kedua motor pada *setpoint* 8 RPM. Nilai ini dibaca dari data pengujian, bukan dari hasil simulasi

Tabel 4. 24 Ringkasan kinerja kendali PI pada setpoint 8 RPM

Kriteria	Motor kiri	Motor kanan	Satuan
<i>Rise time</i> (t_r)	0,056	0,068	s
<i>Maximum overshoot</i> (M_p)	59,8	32,1	%
<i>Settling time</i> (t_s)	0,601	2,249	s
Kecepatan stabil (y_{ss})	7,946	7,958	RPM
<i>steady state error</i> (e_{ss})	0,67	0,53	%

Respons awal kedua motor masih menunjukkan overshoot, yaitu 59,8% pada motor kiri dan 32,1% pada motor kanan. Setelah respons transien, kecepatan stabil motor kiri sebesar 7,946 RPM dan motor kanan sebesar 7,958 RPM. Selisih kecepatan stabil kedua motor sebesar 0,012 RPM menunjukkan bahwa kedua sisi penggerak dapat mencapai kecepatan akhir yang berdekatan.

Steady state error motor kiri dan kanan masing-masing sebesar 0,67% dan 0,53%. Sementara itu, settling time motor kanan lebih lama daripada motor kiri. Perbedaan ini menunjukkan bahwa keseragaman kecepatan akhir belum diikuti kesamaan karakteristik transien kedua motor.

Pemilihan Percobaan 10 sebagai parameter utama didasarkan pada kedekatan kecepatan stabil terhadap setpoint dan kecilnya selisih kecepatan kedua sisi. Respons awal, terutama overshoot motor kiri dan settling time motor kanan, masih menjadi bagian yang memerlukan pengembangan lebih lanjut.

4.4.2 Analisis sumber *error* dan keterbatasan sistem

Beberapa hal masih memengaruhi bentuk respons dan hasil pemetaan. Sebagian berasal dari perbedaan fisik motor, sebagian dari cara data dibaca dan direkam. Pengaruh yang paling relevan dirangkum pada Tabel 4.25.

Tabel 4. 25 Sumber *error* dan keterbatasan system

Sumber	Yang terlihat pada pengujian	Dampak pada hasil
Karakteristik penggerak kiri dan kanan	Rata-rata ambang mulai berputar sebesar 15,40% dan 18,80%, serta initial duty sebesar 17,1% dan 20,1%	Duty cycle yang sama tidak menghasilkan respons kecepatan yang sama; setiap motor memerlukan pengaturan kendali tersendiri
Kuantisasi encoder	Resolusi teoritis kecepatan sekitar 0,105 RPM per count pada periode kendali 10 ms	Pembacaan kecepatan dapat menunjukkan perubahan diskret, terutama pada kecepatan rendah
Filter kecepatan	Low pass filter mengurangi fluktuasi pembacaan tetapi juga memberikan keterlambatan	Rise time dan waktu tunda yang terukur turut dipengaruhi dinamika pengukuran
Telemetri 50 ms	Data direkam sekitar 20 sampel per detik	Perubahan yang sangat cepat tidak terekam sedetail proses kendali yang berjalan setiap 10 ms
Tegangan baterai, beban, dan lantai	Tidak direkam sebagai variabel terpisah selama rangkaian pengujian	Kontribusi masing-masing faktor terhadap respons motor belum dapat dipisahkan secara kuantitatif
Pemindaian LiDAR	Cakupan sel teramati berbeda pada lima peta referensi	Perbedaan cakupan lingkungan dapat memengaruhi occupancy grid dan kualitas kecocokan scan-to-map
Jarak mentah LiDAR per beam	Nilai jarak setiap beam tidak tersedia dalam log Repeat/Homing yang dianalisis	Error ranging sensor memerlukan pengujian jarak statis dengan acuan independen; Tabel 4.20 mengevaluasi jarak waypoint pada peta
Acuan yaw eksternal	Belum tersedia ground truth yaw yang tersinkron dengan log lima percobaan	Penurunan simpangan baku dapat digunakan untuk menilai variasi koreksi yaw, tetapi belum menentukan akurasi yaw absolut

Perbedaan initial duty kedua motor menunjukkan bahwa titik kerja penggerak kiri dan kanan perlu ditentukan secara terpisah. Data yang tersedia mendukung adanya perbedaan respons gabungan penggerak, tetapi belum memisahkan pengaruh motor, gearbox, distribusi

beban, sambungan listrik, dan modul driver. Oleh karena itu, perbedaan tersebut belum dapat dinyatakan sebagai akibat khusus dari kedua modul BTS7960.

Pengujian PI memberikan data kuantitatif untuk mengevaluasi kendali kecepatan, sedangkan lima pengujian Repeat/Homing memberikan data untuk mengevaluasi integrasi LiDAR. Berdasarkan lima rekaman yang tercantum pada Lampiran 16, scan matching menghasilkan 3.029 Accepted, 3.735 Rejected, dan 325 WAIT dari 7.089 upaya. Rasio penerimaan gabungan terhadap seluruh upaya sebesar 42,73%, sedangkan rata-rata best score dan score improvement antarpercobaan masing-masing sebesar 0,144 dan 0,096.

Analisis terhadap 3.017 pasangan pembaruan yaw menghasilkan rata-rata simpangan baku raw sebesar $3,298^\circ$ dan hasil Kalman sebesar $2,676^\circ$, dengan rata-rata penurunan per percobaan sebesar 19,06%. Hasil ini menunjukkan pengurangan variasi estimasi koreksi yaw pada data yang dianalisis. Nilai tersebut tidak digunakan sebagai ukuran langsung akurasi arah hadap robot.

Peta hasil Teach menjadi acuan internal dalam proses scan-to-map. Acuan jarak fisik pada satu sampel peta mendukung analisis error jarak waypoint, tetapi belum menyediakan ground truth yaw eksternal yang tersinkron bagi kelima percobaan. Encoder tetap digunakan sebagai sumber utama odometri, sedangkan LiDAR memberikan koreksi pose yang dibatasi quality gate.