

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Sistem Kalibrator Kecepatan Putar

Pengujian sistem kalibrator tachometer dilakukan untuk mengevaluasi kinerja alat yang telah dirancang dalam menghasilkan nilai putaran yang stabil dan akurat. Pengujian dilakukan secara bertahap untuk mengetahui pengaruh penerapan kontrol PID, Moving Average Filter, dan Exponential Moving Average (EMA) terhadap performa sistem. Parameter yang diamati meliputi kemampuan sistem dalam mengikuti nilai setpoint, kestabilan putaran motor, serta tingkat akurasi hasil pembacaan RPM dibandingkan dengan tachometer standar.

Pada penelitian ini dilakukan tiga tahap pengujian sistem. Setiap pengujian menggunakan metode kontrol yang berbeda sebagai tahap pengembangan sistem hingga diperoleh performa terbaik.

4.2 Pengujian Menggunakan PID

4.2.1 Tujuan Pengujian Menggunakan PID

Pengujian sistem menggunakan kontrol PID dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengendalikan kecepatan putaran motor DC agar dapat mengikuti nilai setpoint yang diberikan. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi respon sistem terhadap perubahan setpoint serta mengetahui pengaruh kontrol PID dalam mengurangi error dan meningkatkan kestabilan putaran motor dibandingkan sistem tanpa kontrol umpan balik.

4.2.2 Metode Kontrol Pengujian Menggunakan PID

Pada pengujian ini sistem menggunakan metode kontrol Proportional Integral Derivative (PID) sebagai pengendali utama kecepatan putaran motor DC. Nilai RPM yang diperoleh dari sensor optocoupler digunakan sebagai sinyal umpan balik untuk menghitung error antara nilai aktual dan setpoint. Error tersebut kemudian diproses oleh kontrol PID untuk menghasilkan sinyal PWM yang digunakan sebagai masukan driver motor. Pengujian dilakukan pada beberapa

variasi setpoint RPM untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan kecepatan putaran yang diinginkan.

4.2.3 Pengujian Sebelum Menggunakan PID

Sebelum menerapkan kontrol PID, dilakukan pengujian awal untuk mengetahui karakteristik sistem dalam kondisi tanpa kendali umpan balik (open-loop). Pada kondisi ini motor DC hanya dikendalikan menggunakan nilai PWM tetap yang diperoleh dari hasil percobaan awal tanpa adanya proses koreksi terhadap error antara nilai RPM aktual dan setpoint. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data pembandingan sehingga pengaruh penerapan kontrol PID terhadap performa sistem dapat dianalisis secara lebih jelas.

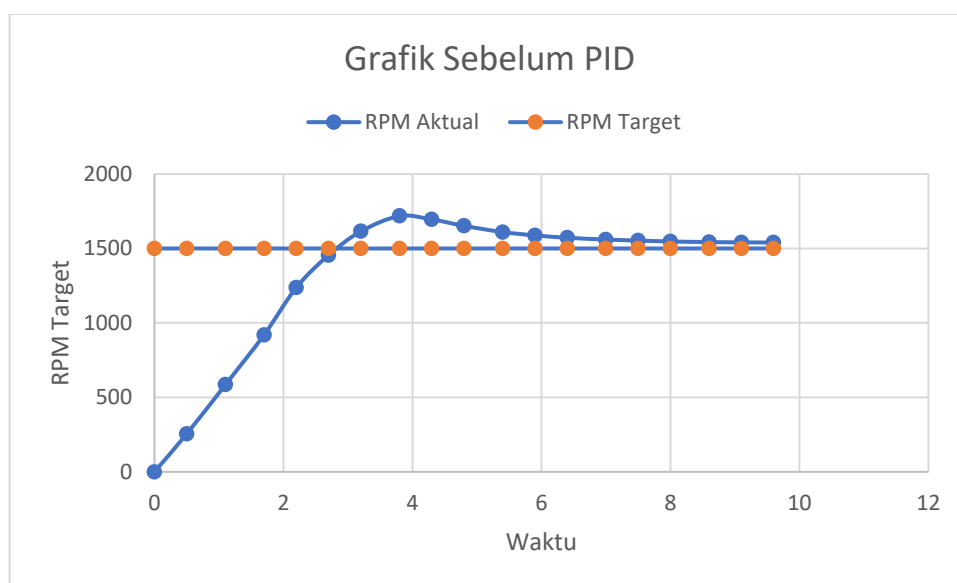
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Sebelum Menggunakan PID

Target RPM	Aktual Alat (RPM)	Tachometer (RPM)	Error Aktual Alat	Error Aktual Tacho
100	165	162	65%	62%
200	248	245	24%	23%
300	342	339	14%	13%
400	438	435	10%	9%
500	552	548	10%	10%
600	648	645	8%	8%
700	751	747	7%	7%
800	845	840	6%	5%
900	956	950	6%	6%
1000	1065	1058	7%	6%
2000	2175	2168	9%	8%
3000	3210	3202	7%	7%
4000	4258	4247	6%	6%
5000	5320	5308	6%	6%

Berdasarkan Tabel 4.1 terlihat bahwa nilai error terbesar terjadi pada setpoint 100 RPM. Kondisi ini disebabkan karena motor DC bekerja pada daerah kecepatan rendah sehingga torsi awal (starting torque) dan gaya gesek statis (static friction) masih memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap putaran motor. Pada kondisi tersebut perubahan kecil pada sinyal PWM akan menghasilkan perubahan kecepatan yang relatif besar sehingga sistem menjadi lebih sulit mempertahankan putaran secara stabil. Selain itu, resolusi pembacaan sensor optocoupler pada kecepatan rendah menghasilkan jumlah pulsa yang lebih sedikit

dalam setiap periode sampling sehingga kesalahan pembacaan relatif menjadi lebih besar dibandingkan pada putaran tinggi. Akibatnya persentase error pada 100 RPM menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian pada kecepatan yang lebih besar.

Seiring meningkatnya kecepatan putaran motor, jumlah pulsa yang diterima sensor optocoupler dalam setiap interval sampling juga semakin banyak sehingga perhitungan RPM menjadi lebih akurat. Selain itu, pengaruh gaya gesek awal terhadap putaran motor semakin kecil sehingga kontrol PID mampu bekerja lebih optimal. Oleh karena itu nilai error cenderung menurun pada pengujian 500 RPM hingga 5000 RPM.



Gambar 4. 1 Grafik Respon Sistem Sebelum Menggunakan PID

Berdasarkan Gambar 4.1 terlihat bahwa sistem tanpa menggunakan kontrol PID belum mampu mengikuti nilai setpoint sebesar 1500 RPM dengan baik. Pada awal pengujian, nilai RPM aktual meningkat secara bertahap hingga melewati nilai referensi dan mencapai kondisi *overshoot* sekitar 1700 RPM. Setelah mengalami *overshoot*, putaran motor mulai menurun secara perlahan menuju nilai target.

Selain itu, proses menuju kondisi tunak membutuhkan waktu yang relatif lama karena sistem masih mengalami perubahan nilai RPM sebelum akhirnya mendekati setpoint. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem belum memiliki mekanisme pengendalian yang mampu mengoreksi error secara otomatis sehingga respon yang dihasilkan masih dipengaruhi oleh karakteristik alami motor DC.

Kondisi ini menyebabkan performa sistem dari sisi kestabilan maupun keakurasian masih belum optimal.

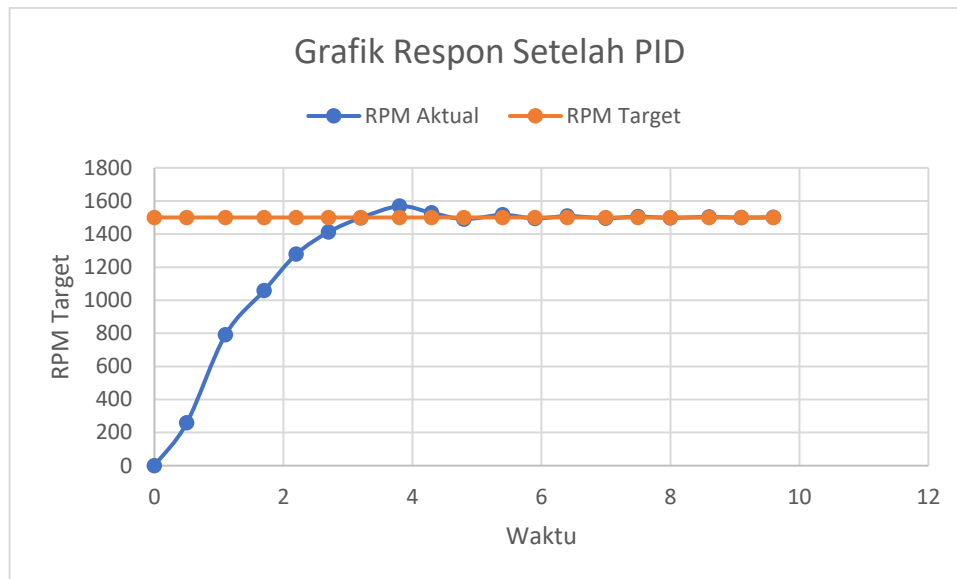
4.2.4 Pengujian Setelah Menggunakan PID

Setelah karakteristik sistem tanpa kontrol diketahui, selanjutnya dilakukan pengujian menggunakan kontrol PID. Pada pengujian ini nilai RPM aktual dari sensor optocoupler digunakan sebagai umpan balik untuk menghitung error terhadap setpoint. Error tersebut kemudian diproses oleh kontrol PID untuk menghasilkan sinyal PWM yang mampu mempertahankan kecepatan motor sesuai target yang ditentukan.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Setelah Menggunakan PID

Target	Aktual	Tacho	Error Aktual	Error Tacho
100	163,3333	162,4667	63,33%	62,47%
200	238,3333	237,1667	19,17%	18,58%
300	314,6667	312,8	4,89%	4,27%
400	401,6667	399,7667	0,42%	-0,06%
500	496	496,2667	-0,80%	-0,75%
600	600,6667	597,8	0,11%	-0,37%
700	697,6667	697,4333	-0,33%	-0,37%
800	810,3333	810,3333	1,29%	1,29%
900	927	923,1	3,00%	2,57%
1000	1039,333	1036	3,93%	3,60%
2000	2092,333	2083,667	4,62%	4,18%
3000	3100,667	3091,667	3,36%	3,06%
4000	4115,667	4099,333	2,89%	2,48%
5000	5083	5062,333	1,66%	1,25%

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa penggunaan kontrol PID mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam mengikuti nilai setpoint RPM. Nilai RPM aktual cenderung lebih mendekati target dibandingkan kondisi tanpa kontrol PID. Walaupun pada RPM rendah masih ditemukan overshoot, besar penyimpangannya relatif lebih terkendali dibandingkan sistem open-loop.



Gambar 4. 2 Grafik Respon Sistem Setelah Menggunakan PID

Berdasarkan Gambar 4.2 terlihat bahwa setelah kontrol PID diterapkan, respon sistem mengalami peningkatan dibandingkan kondisi tanpa pengendali. RPM aktual mampu mencapai nilai target dengan lebih cepat dan overshoot yang terjadi menjadi lebih kecil dibandingkan sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa parameter PID yang diperoleh melalui proses tuning mampu memperbaiki karakteristik respon sistem.

Setelah mencapai daerah setpoint, RPM aktual segera kembali mendekati nilai referensi dan mempertahankan kondisi tersebut dengan fluktuasi yang relatif kecil. Meskipun masih terdapat sedikit osilasi pada awal respon, amplitudonya jauh lebih rendah dibandingkan kondisi sebelum menggunakan PID. Dengan demikian, penerapan kontrol PID berhasil meningkatkan kecepatan respon sekaligus mengurangi error menuju kondisi steady state.

4.2.5 Analisis Pengujian Menggunakan PID

Berdasarkan grafik respon sistem setelah penerapan kontrol PID, dapat diamati bahwa sistem mampu meningkatkan performa dibandingkan kondisi sebelum menggunakan PID. Pada kondisi tanpa pengendali, nilai RPM aktual mengalami overshoot yang cukup besar setelah mencapai setpoint, kemudian memerlukan waktu yang relatif lama untuk kembali menuju kondisi stabil. Setelah

kontrol PID diterapkan, respon sistem menjadi lebih terkontrol sehingga perubahan kecepatan motor menuju nilai referensi berlangsung lebih baik.

Karakteristik respon transien menunjukkan bahwa sistem memiliki *rise time* yang relatif cepat karena RPM aktual mampu mencapai daerah sekitar setpoint dalam waktu yang singkat. Hal ini menunjukkan bahwa aksi proportional mampu mempercepat respon motor terhadap perubahan nilai referensi sehingga proses pencapaian kecepatan target menjadi lebih efisien.

Selain itu, nilai *overshoot* mengalami penurunan dibandingkan kondisi sebelum menggunakan PID. Walaupun masih terlihat sedikit melewati nilai setpoint pada awal respon, amplitudo overshoot sudah jauh lebih kecil sehingga sistem tidak mengalami lonjakan kecepatan yang berlebihan. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter PID yang diperoleh melalui metode trial and error mampu mengurangi kecenderungan sistem untuk berosilasi.

Nilai *settling time* juga menjadi lebih singkat dibandingkan sistem tanpa PID. Setelah terjadi overshoot kecil, RPM aktual segera kembali mendekati nilai target dan mempertahankan kondisi tersebut dengan fluktuasi yang relatif kecil. Dengan demikian, kontrol PID mampu mempercepat proses pencapaian keadaan tunak (*steady state*).

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol PID berhasil memperbaiki karakteristik respon transien sistem. Perbaikan tersebut ditunjukkan oleh berkurangnya overshoot, lebih cepatnya settling time, serta semakin kecilnya steady-state error dibandingkan kondisi sebelum menggunakan kontrol PID.

4.2.6 Pembahasan Pengujian Menggunakan PID

Berdasarkan seluruh hasil pengujian menggunakan kontrol PID dapat diketahui bahwa sistem mampu mengikuti perubahan nilai setpoint dengan baik. Nilai RPM aktual bergerak menuju nilai target secara bertahap dan menunjukkan kemampuan pengendali dalam melakukan koreksi terhadap error yang terjadi selama proses pengaturan kecepatan motor.

Dibandingkan sistem tanpa pengendali, penggunaan PID menghasilkan respon yang lebih cepat dan lebih stabil. Fluktuasi kecepatan setelah mencapai

setpoint juga mengalami penurunan sehingga nilai RPM aktual lebih mudah dipertahankan di sekitar nilai referensi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sinyal PWM yang dihasilkan oleh pengendali PID mampu mengkompensasi perubahan beban maupun gangguan pada sistem.

Walaupun demikian, hasil pengujian masih menunjukkan adanya fluktuasi kecil pada pembacaan RPM akibat noise sensor optocoupler dan variasi putaran motor. Oleh karena itu, diperlukan metode filtering agar pembacaan RPM menjadi lebih halus tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam merespon perubahan kecepatan. Tahap berikutnya dilakukan dengan menambahkan Moving Average Filter (MA) sebagai metode penyaringan sinyal sebelum diproses lebih lanjut.

4.3 Pengujian Kestabilan Sistem

4.3.1 Tujuan Pengujian Kestabilan Sistem

Pengujian kestabilan sistem dilakukan untuk mengetahui pengaruh penerapan Moving Average Filter terhadap kestabilan pembacaan RPM yang diperoleh dari sensor optocoupler. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan filter dalam mengurangi noise, memperhalus data sensor, dan meningkatkan kestabilan sistem kontrol PID.

4.3.2 Pengembangan Sistem pada Pengujian Kestabilan Sistem

Pada pengujian ini sistem menggunakan kontrol PID yang dikombinasikan dengan Moving Average Filter sebagai metode penyaringan data sensor. Data RPM hasil pembacaan sensor optocoupler diolah menggunakan Moving Average Filter dengan ukuran jendela tertentu sehingga fluktuasi data dapat dikurangi sebelum digunakan sebagai masukan sistem kontrol.

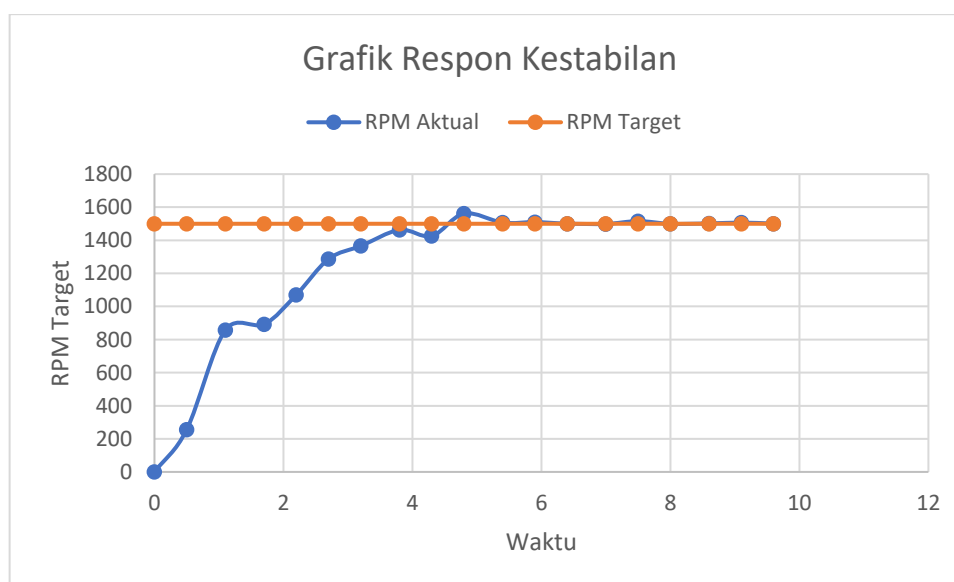
4.3.3 Hasil Pengujian Kestabilan Sistem

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai target RPM, RPM aktual sistem, dan pembacaan tachometer setelah diterapkan Moving Average Filter. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kestabilan Sistem

Target	Actual Rata	Sel Tr-A	Persentase Error	Tacho Rata"	Sel A-Tc	Persentase Error
500	459	41	8,200%	458,6	1,15	0,2505%
600	576,5	23,5	3,917%	575,3	1,2	0,2082%
700	690,5	9,5	1,357%	688,6	1,9	0,2752%
800	775,5	24,5	3,063%	773,7	1,8	0,2321%
900	860,5	39,5	4,389%	858,2	2,3	0,2673%
1000	987,5	12,5	1,250%	984,1	3,4	0,3443%
1500	1481,5	18,5	1,233%	1476	5,5	0,3712%
2000	1980,5	19,5	0,975%	1972,5	8	0,4039%
2500	2477,5	22,5	0,900%	2468,5	9	0,3633%
3000	2996	4	0,133%	2984,5	11,5	0,3838%
3500	3511	-11	-0,314%	3497	14	0,3987%
4000	3984,5	15,5	0,388%	3969,5	15	0,0037646

Data hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai RPM aktual memiliki penyimpangan yang lebih kecil dibandingkan pengujian sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan Moving Average Filter mampu meningkatkan kestabilan pembacaan sensor dan mengurangi fluktuasi yang dapat mempengaruhi kinerja kontrol PID.



Gambar 4. 3 Grafik Respon Kestabilan Sistem

Berdasarkan Gambar 4.3 terlihat bahwa kombinasi kontrol PID dan *Moving Average Filter* menghasilkan respon sistem yang lebih stabil dibandingkan penggunaan PID saja. RPM aktual mampu mengikuti nilai target dengan baik,

sementara fluktuasi setelah mencapai setpoint menjadi lebih kecil sehingga kurva respon terlihat lebih halus.

Penggunaan *Moving Average Filter* mampu mereduksi noise yang berasal dari pembacaan sensor optocoupler dengan melakukan proses perataan terhadap beberapa data sebelumnya. Akibatnya, perubahan nilai RPM menjadi lebih konsisten dan tidak mengalami lonjakan secara tiba-tiba. Walaupun respon awal sedikit lebih lambat akibat proses averaging, secara keseluruhan sistem menunjukkan peningkatan kestabilan tanpa mengurangi kemampuan mengikuti nilai referensi.

4.3.4 Analisis Pengujian Kestabilan Sistem

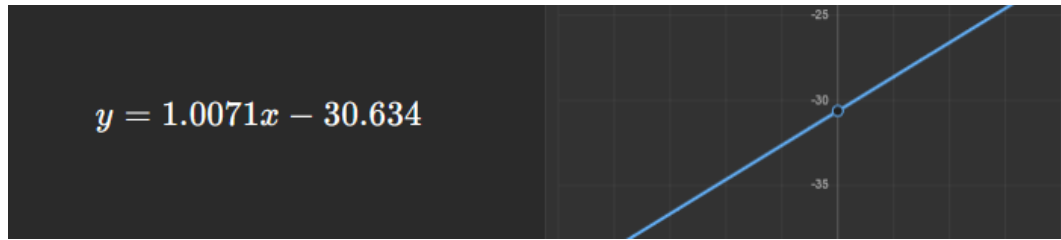
Hasil setelah penerapan *Moving Average Filter*, terlihat bahwa nilai RPM aktual mengalami perubahan yang lebih halus dibandingkan pengujian menggunakan PID saja. Fluktuasi yang sebelumnya masih muncul setelah sistem mencapai setpoint menjadi lebih kecil sehingga respon sistem terlihat lebih stabil.

Moving Average Filter bekerja dengan menghitung rata-rata dari beberapa data pembacaan sebelumnya sehingga noise yang berasal dari sensor optocoupler dapat direduksi. Akibatnya, perubahan nilai RPM yang ditampilkan menjadi lebih konsisten dan tidak mengalami lonjakan secara tiba-tiba.

Walaupun proses averaging menyebabkan respon awal sedikit lebih lambat dibandingkan PID tanpa filter, pengaruh tersebut tidak terlalu signifikan terhadap performa sistem. Sebaliknya, keuntungan yang diperoleh berupa peningkatan kestabilan pembacaan RPM sehingga nilai aktual dapat dipertahankan lebih dekat terhadap nilai target.

Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan *Moving Average Filter* mampu meningkatkan kualitas sinyal hasil pembacaan sensor sehingga sistem menjadi lebih stabil dalam mempertahankan putaran motor.

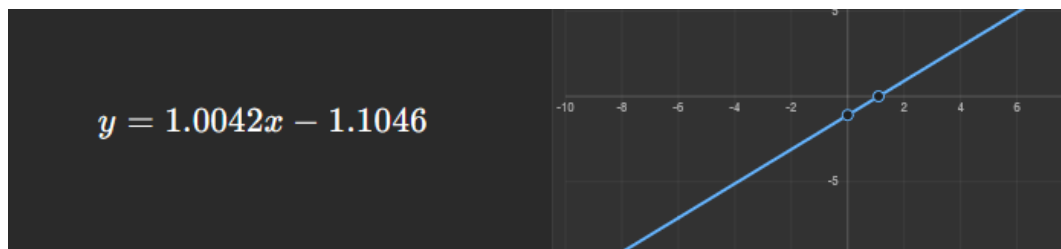
Hubungan target RPM dan RPM aktual menghasilkan persamaan regresi:



dengan nilai:

$$R^2 = 0.9998$$

Sedangkan hubungan tachometer dan RPM aktual menghasilkan:



dengan:

$$R^2 = 1$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem telah memiliki linearitas yang sangat baik. Overshoot RPM rendah juga mengalami penurunan signifikan dibanding pengujian pertama.

4.3.5 Pembahasan Pengujian Kestabilan Sistem

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan kombinasi kontrol PID dan Moving Average Filter, sistem menunjukkan peningkatan kestabilan dibandingkan penggunaan PID saja. Nilai RPM aktual tetap mampu mengikuti nilai setpoint dengan baik, namun fluktuasi setelah mencapai kondisi tunak menjadi lebih kecil.

Penggunaan Moving Average Filter memberikan efek penyaringan terhadap noise pembacaan sensor sehingga sinyal yang diterima pengendali menjadi lebih halus. Hal tersebut membuat proses koreksi yang dilakukan oleh PID menjadi lebih konsisten sehingga perubahan PWM yang diberikan ke motor juga menjadi lebih stabil.

Secara keseluruhan, kombinasi PID dan Moving Average Filter berhasil meningkatkan kestabilan sistem tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam

mengikuti nilai referensi. Oleh karena itu, metode ini menjadi tahap pengembangan yang lebih baik dibandingkan penggunaan PID secara tunggal.

4.4 Pengujian Keakurasian Sistem

4.4.1 Tujuan Pengujian Keakurasian Sistem

Pengujian keakurasian sistem dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian alat kalibrator tachometer yang telah dikembangkan dengan menerapkan kombinasi kontrol PID, Moving Average Filter, dan Exponential Moving Average (EMA). Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan hasil pembacaan sistem terhadap tachometer standar pada berbagai titik pengukuran RPM.

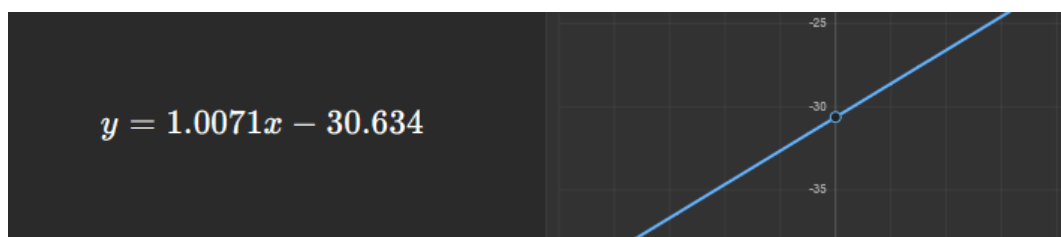
4.4.2 Pengembangan Sistem pada Pengujian Keakurasian Sistem

Pada pengujian ini sistem menggunakan kontrol PID yang dikombinasikan dengan Moving Average Filter dan Exponential Moving Average (EMA). Moving Average Filter digunakan untuk mengurangi noise pembacaan sensor, sedangkan EMA digunakan untuk memperhalus perubahan data RPM sehingga diperoleh pembacaan yang lebih stabil tanpa mengurangi sensitivitas sistem terhadap perubahan kecepatan putaran.

Untuk RPM rendah digunakan persamaan:



Sedangkan RPM tinggi menggunakan:



4.4.3 Hasil Pengujian Keakurasian Sistem

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai target RPM, hasil pembacaan sistem, dan hasil pembacaan tachometer standar pada berbagai titik pengukuran. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.4.

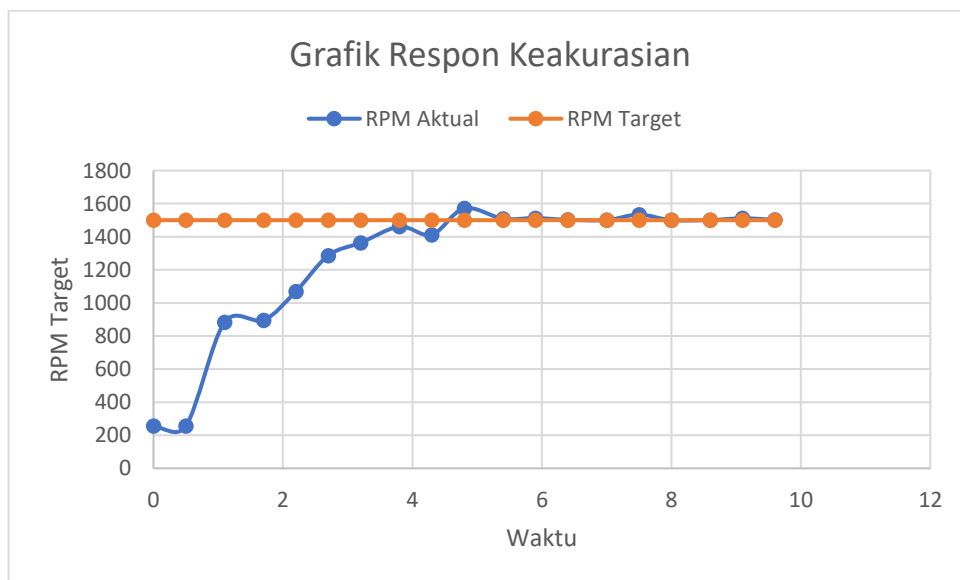
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Keakurasian Sistem

Target	Actual 1	Actual 2	Actual 3	Rata Rata Actual	Stdev	Error	Akurasi
100	148	127	155	143,3333333	14,571662	43,333%	56,667%
200	200	199	201	200	1	0,000%	100,000%
300	301	301	303	301,6666667	1,154700538	0,556%	99,444%
400	403	404	403	403,3333333	0,577350269	0,833%	99,167%
500	504	502	505	503,6666667	1,527525232	0,733%	99,267%
600	604	602	604	603,3333333	1,154700538	0,556%	99,444%
700	703	701	706	703,3333333	2,516611478	0,476%	99,524%
800	795	800	797	797,3333333	2,516611478	0,333%	99,667%
900	896	898	897	897	1	0,333%	99,667%
1000	1000	999	1000	999,6666667	0,577350269	0,033%	99,967%
1500	1500	1500	1500	1500	0	0,000%	100,000%
2000	2000	1999	2000	1999,6666667	0,577350269	0,017%	99,983%
2500	2505	2506	2507	2506	1	0,240%	99,760%
3000	3014	3016	3018	3016	2	0,533%	99,467%
3500	3528	3530	3531	3529,6666667	1,527525232	0,848%	99,152%
4000	4041	4040	4040	4040,3333333	0,577350269	1,008%	98,992%

Tacho 1	Tacho 2	Tacho 3	Rata Rata Tacho	Stdev	Error	Akurasi
149,4	127,2	157,9	144,8333333	15,85128807	44,833%	55,167%
200,7	199,7	200,5	200,3	0,529150262	0,150%	99,850%
299,9	300,2	302,9	301	1,652271164	0,333%	99,667%
402,3	404,4	403,6	403,4333333	1,059874206	0,858%	99,142%
504,2	502,7	505,6	504,1666667	1,450287328	0,833%	99,167%

604,2	602,7	603,1	603,3333333	0,776745347	0,556%	99,444%
703,2	701,3	705,6	703,3666667	2,154839515	0,481%	99,519%
794,6	800,3	797,5	797,4666667	2,850146195	0,317%	99,683%
896,5	898,1	896,9	897,1666667	0,8326664	0,315%	99,685%
999,9	998,9	998,3	999,0333333	0,808290377	0,097%	99,903%
1493	1495	1494	1494	1	0,400%	99,600%
1994	1992	1993	1993	1	0,350%	99,650%
2495	2496	2497	2496	1	0,160%	99,840%
3004	3004	3006	3004,666667	1,154700538	0,156%	99,844%
3514	3516	3517	3515,666667	1,527525232	0,448%	99,552%
4025	4024	4025	4024,666667	0,577350269	0,617%	99,383%

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa sebagian besar titik pengukuran memiliki nilai error yang sangat kecil. Nilai pembacaan sistem dan tachometer standar menunjukkan kesesuaian yang sangat baik sehingga dapat disimpulkan bahwa alat yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang tinggi.



Gambar 4. 4 Grafik Respon Keakurasian Sistem

Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat bahwa kombinasi kontrol PID, *Moving Average Filter*, dan *Exponential Moving Average* menghasilkan respon sistem yang paling baik dibandingkan metode sebelumnya. RPM aktual mampu mencapai nilai

target dengan cepat dan mempertahankan posisinya sangat dekat dengan nilai referensi. Fluktuasi yang muncul setelah kondisi tunak juga menjadi sangat kecil.

Penerapan Exponential Moving Average memberikan bobot yang lebih besar terhadap data terbaru sehingga sistem tetap responsif terhadap perubahan kecepatan sekaligus mampu meredam noise hasil pembacaan sensor. Oleh karena itu, kurva respon yang dihasilkan tampak lebih halus dan lebih mendekati garis setpoint. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode filtering bersama kontrol PID mampu menghasilkan respon sistem yang cepat, stabil, dan memiliki tingkat keakurasian yang paling tinggi.

Tabel 4. 5 Analisis Transien Keakurasian

Parameter	Nilai
Delay Time (Td)	≈ 1,0 s
Rise Time (Tr)	≈ 3,2 s
Peak Time (Tp)	4,8 s
Maximum Overshoot (Mp)	4,77%
Settling Time (Ts)	4,8 s
Steady State Error (Ess)	0,17%

Berdasarkan hasil pengujian pada set point 1500 RPM menggunakan sensor optocoupler mode nonkontak, sistem mampu mencapai nilai referensi dengan respon yang cukup cepat dan stabil. Sistem memiliki delay time sekitar 1,0 detik dan rise time sebesar 3,2 detik untuk mencapai 90% nilai set point. Nilai puncak respon terjadi pada detik ke-4,8 dengan RPM maksimum sebesar 1571,6 RPM sehingga menghasilkan overshoot sebesar 4,77%. Setelah mengalami overshoot, sistem kembali menuju kondisi stabil dan memasuki daerah toleransi $\pm 5\%$ pada detik ke-4,8. Nilai steady-state error sebesar 0,17% menunjukkan bahwa pengendali PID mampu mempertahankan kecepatan motor sangat dekat dengan set point yang ditentukan sehingga sistem memiliki tingkat akurasi dan kestabilan yang baik.

4.4.4 Analisis Pengujian Keakurasian Sistem

Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi PID, Moving Average Filter, dan EMA mampu menghasilkan nilai RPM aktual yang paling mendekati nilai

target. Setelah mencapai kondisi steady state, selisih antara RPM aktual dan RPM target menjadi sangat kecil sehingga tingkat error pembacaan dapat diminimalkan.

Exponential Moving Average memberikan bobot yang lebih besar terhadap data terbaru sehingga sistem tetap responsif terhadap perubahan kecepatan namun tetap mampu meredam fluktuasi pembacaan sensor. Kombinasi kedua metode filtering menghasilkan sinyal yang lebih bersih dibandingkan hanya menggunakan Moving Average.

Walaupun pada awal pengujian masih terlihat proses percepatan menuju setpoint, setelah sistem mencapai kondisi stabil nilai RPM aktual mampu mempertahankan kedekatannya terhadap nilai target dengan penyimpangan yang sangat kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode filtering yang digunakan berhasil meningkatkan kualitas pembacaan sensor.

Dengan demikian, grafik respon keakurasian membuktikan bahwa kombinasi PID, Moving Average Filter, dan Exponential Moving Average mampu menghasilkan performa sistem yang lebih baik dibandingkan metode sebelumnya.

4.4.5 Pembahasan Pengujian Keakurasian Sistem

Berdasarkan seluruh hasil pengujian, penerapan Exponential Moving Average setelah Moving Average Filter memberikan peningkatan terhadap kualitas pembacaan RPM. Nilai RPM aktual menjadi lebih dekat dengan nilai referensi sehingga error pengukuran semakin kecil.

EMA mampu mempertahankan keseimbangan antara kecepatan respon dan proses filtering. Data terbaru tetap memiliki pengaruh besar terhadap hasil perhitungan sehingga sistem tidak kehilangan kemampuan mengikuti perubahan kecepatan, namun fluktuasi akibat noise tetap dapat ditekan.

Kombinasi PID, Moving Average Filter, dan Exponential Moving Average menghasilkan sistem yang memiliki respon cepat, kestabilan tinggi, serta tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode sebelumnya. Oleh karena itu kombinasi ketiga metode tersebut dipilih sebagai metode terbaik pada penelitian ini.

4.5 Analisis Perbandingan Ketiga Pengujian

Setelah dilakukan pengujian terhadap tiga metode pengendalian, yaitu PID, PID dengan Moving Average Filter, serta PID dengan kombinasi Moving Average Filter dan Exponential Moving Average, diperoleh perbedaan karakteristik respon pada setiap metode. Perbandingan dilakukan berdasarkan respon sistem, tingkat kestabilan, dan tingkat keakuratan pembacaan RPM. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui metode yang memberikan performa paling baik sebagai media kalibrator tachometer portable.

4.5.1 Perbandingan Metode Kontrol

Dari hasil pengujian respon sistem diketahui bahwa kontrol PID mampu mempercepat pencapaian nilai setpoint dibandingkan kondisi tanpa pengendali. Namun, masih terdapat overshoot dan sedikit fluktuasi ketika sistem memasuki kondisi tunak.

Setelah Moving Average Filter ditambahkan, respon sistem tetap mampu mengikuti setpoint dengan baik, sementara fluktuasi setelah mencapai keadaan tunak menjadi lebih kecil. Penambahan EMA selanjutnya mampu mempertahankan respon yang cepat sekaligus menghasilkan kurva respon yang lebih halus.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kombinasi PID, Moving Average Filter, dan EMA memberikan respon sistem terbaik karena mampu mencapai setpoint dengan cepat disertai overshoot yang kecil dan kondisi tunak yang lebih stabil.

4.5.2 Perbandingan Hasil Sistem

Dari aspek kestabilan, penggunaan PID telah mampu mempertahankan putaran motor di sekitar nilai target, namun pembacaan RPM masih menunjukkan fluktuasi kecil akibat noise sensor. Setelah diterapkan Moving Average Filter, fluktuasi tersebut berkurang secara signifikan sehingga pembacaan menjadi lebih stabil.

Penambahan EMA semakin memperhalus hasil filtering sehingga perubahan RPM menjadi lebih konsisten. Nilai aktual mampu dipertahankan di

sekitar setpoint dalam waktu yang lebih lama tanpa terjadi perubahan yang signifikan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi PID, Moving Average Filter, dan EMA memberikan tingkat kestabilan terbaik dibandingkan metode lainnya..

4.5.3 Pengaruh Filter terhadap Sistem

Perbandingan tingkat keakurasian menunjukkan bahwa penggunaan PID telah mampu mengurangi error dibandingkan sistem tanpa pengendali. Namun demikian, selisih antara RPM aktual dan target masih terlihat pada beberapa titik pengujian.

Setelah ditambahkan Moving Average Filter, error pembacaan semakin kecil karena noise sensor berhasil direduksi. Penerapan EMA selanjutnya mampu meningkatkan kualitas hasil filtering sehingga nilai RPM aktual menjadi paling mendekati nilai target.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa metode PID yang dikombinasikan dengan Moving Average Filter dan Exponential Moving Average memberikan tingkat keakurasian tertinggi sehingga paling sesuai digunakan pada sistem kalibrator tachometer portable yang dikembangkan.

4.6 Kesimpulan Hasil Pengujian

Berdasarkan seluruh hasil pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol PID mampu meningkatkan performa sistem dibandingkan kondisi tanpa pengendali. Hal ini ditunjukkan oleh respon sistem yang lebih cepat, overshoot yang lebih kecil, settling time yang lebih singkat, serta steady-state error yang menurun.

Penambahan Moving Average Filter berhasil meningkatkan kestabilan pembacaan RPM dengan mereduksi fluktuasi akibat noise sensor optocoupler. Selanjutnya, penerapan Exponential Moving Average setelah Moving Average Filter menghasilkan pembacaan RPM yang lebih halus sekaligus tetap responsif terhadap perubahan kecepatan.

Secara keseluruhan, kombinasi *PID, Moving Average Filter, dan Exponential Moving Average* memberikan performa terbaik karena mampu menghasilkan

respon sistem yang cepat, kestabilan putaran yang tinggi, serta tingkat keakurasian pembacaan RPM yang paling baik. Oleh karena itu, kombinasi ketiga metode tersebut dinilai paling sesuai untuk diterapkan pada media kalibrator tachometer portable berbasis Arduino Uno yang dikembangkan dalam penelitian ini.