TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH VARIASI PARAMETER PIDTERHADAP RESPONS DAN STABILITAS SISTEM KENDALI MOTOR DC BERBASIS SIMULASI MATLAB/SIMULINK

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S.T)
Pada Program Studi Teknik Elektro Falkutas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun Oleh :

RENDI PRATAMA P ANHAR

2207220062

UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: Rendi Pratama P Anhar
NPM	: 22072200622
Program Studi	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Analisis Pengaruh Variasi Parameter PID Terhadap Respons Dan Stabilitas Sistem Kendali Motor DC Berbasis Simulasi Matlab/Simulink
Bidang ilmu	: Sistem kontrol

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, Oktober 2026

Mengetahui dan menyetujui:
Dosen Pembimbing

Rahmat Fauzi Siregar, S.T., M.T.

Dosen Pembanding I/Penguji	Dosen Pembanding II/Penguji
Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T.	Dr. Rohana, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Elektro
Ketua

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Rendi Pratama P Anhar

Tempat/Tgl Lahir : Medan, 04 Mei 2003

NPM : 2207220062

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul:

"ANALISIS PENGARUH VARIASI PARAMETER PID TERHADAP RESPONS DAN STABILITAS SISTEM KENDALI MOTOR DC BERBASIS SIMULASI MATLAB/SIMULINK"

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, Oktober 2026
Saya yang menyatakan,



Rendi Pratama P Anhar

Abstrak

Motor DC merupakan aktuator elektromekanik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri yang membutuhkan pengaturan kecepatan dan posisi secara presisi. Penggunaan pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan metode yang umum digunakan untuk menjaga kinerja sistem agar sesuai dengan nilai acuan (setpoint). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd) terhadap respons transien dan stabilitas sistem kendali kecepatan serta posisi sudut motor DC. Penelitian dilakukan secara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink dengan pendekatan *One-Factor-at-a-Time* (OFAT), di mana satu parameter divariasikan dari 0,5x hingga 1,5x nilai *baseline*, sementara parameter lainnya dipertahankan konstan. Parameter kinerja yang dievaluasi meliputi *rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*, *steady-state error*, serta karakteristik kestabilan berdasarkan analisis *pole*. Hasil pengujian pada sistem kendali kecepatan (orde dua) menunjukkan bahwa peningkatan nilai $Kp mempercepat waktu respons sistem, sedangkan peningkatan Ki mampu mempertahankan *steady-state error* di angka nol namun memicu peningkatan *overshoot*. Penambahan parameter Kd terbukti efektif memberikan efek redaman untuk meminimalisasi osilasi. Pada pengujian kendali posisi sudut (orde tiga), sistem menunjukkan kecenderungan osilasi yang lebih tinggi. Namun, peningkatan nilai Kd terbukti sangat efektif menekan lonjakan transien, menurunkan *maximum overshoot* secara signifikan dari 21,65% menjadi 6,98%. Secara keseluruhan, variasi masing-masing parameter PID memberikan pengaruh yang spesifik terhadap letak *pole* dan rasio redaman, yang membuktikan pentingnya penentuan komposisi parameter PID yang tepat untuk mencapai sistem kendali motor DC yang cepat, akurat, dan stabil.

Kata Kunci: Motor DC, Pengendali PID, MATLAB/Simulink, Respons Transien, Stabilitas Sistem, OFAT.

Abstract

DC motors are electromechanical actuators widely used in various industrial applications requiring precise speed and position control. The use of a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is a common method employed to maintain system performance in accordance with the reference value (setpoint). This study aims to analyze the effect of varying the proportional (Kp), integral (Ki), and derivative (Kd) parameters on the transient response and stability of the DC motor's speed and angular position control systems. The research was conducted through simulation using MATLAB/Simulink software with a One-Factor-at-a-Time (OFAT) approach, where one parameter was varied from 0.5x to 1.5x of the baseline value, while the other parameters were held constant. The evaluated performance parameters include rise time, peak time, settling time, maximum overshoot, steady-state error, and stability characteristics based on pole analysis. The test results on the speed control system (second-order) indicate that an increase in the Kp value accelerates the system's response time, while an increase in Ki is able to maintain the steady-state error at zero but triggers an increase in overshoot. The addition of the Kd parameter proved effective in providing a damping effect to minimize oscillation. In the angular position control test (third-order), the system showed a higher tendency for oscillation. However, increasing the Kd value proved highly effective in suppressing transient spikes, significantly reducing the maximum overshoot from 21.65% to 6.98%. Overall, the variation of each PID parameter exerts a specific influence on the pole locations and damping ratio, demonstrating the importance of determining the precise PID parameter composition to achieve a fast, accurate, and stable DC motor control system.

Keywords: DC Motor, PID Controller, MATLAB/Simulink, Transient Response, System Stability, OFAT

KATA PENGHANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala Puji dan Syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "ANALISIS PENGARUH VARIASI PARAMETER PID TERHADAP RESPONS DAN STABILITAS SISTEM KENDALI MOTOR DC BERBASIS SIMULASI MATLAB/SIMULINK" sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU).

Laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, tentunya tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Yang teristimewa kepada Ayah saya Hardiman Nasution dan ibunda tercinta Farida Hanum yang telah memberikan dukungan bagi penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.APd, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Kepada keluarga saya, yang selalu mendoakan, memberikan perhatian, serta kasih sayang yang menjadi sumber kekuatan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Ade Faisal, Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibu Dr. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd selaku Kepala Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Benny Oktorialdi, S.T., M.T, selaku Sekretaris Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Bapak Affandi, S.T., M.T. selaku Wakil Dekan III Bidang Kemahasiswaan Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Bapak Rahmat Fauzi Siregar S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah membantu menyelesaikan serta memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

9. Teruntuk Sahabat Sahabat saya Dan orang orang yang selalu memberi support. Terimakasih atas dukungan, bantuan dan motivasi dalam penyelesaian skripsi dan kebersamaannya selama di kuliah ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan maupun dalam susunan kalimat sehingga penulis menerima kritikan dan saran yang sifatnya membangun demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengharapkan semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca. Akhirnya kepada Allah SWT penulis serahkan segala ketercapaian dan keberhasilan yang sepenuhnya.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Medan 4 September 2026
Penulis



RENDI PRATAMA P ANHAR

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR iv
DAFTAR ISI vi
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL x
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 5
1.4 Batasan Masalah 5
1.5 Manfaat penelitian 6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 7
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan 7
2.2 Landasan Teori 9
2.2.1 Sistem Kendali 9
2.2.2 Sistem Kendali Loop Tertutup (Closed Loop) 10
2.2.3 Motor Arus Searah (DC) 11
2.2.4 Kendali Sudut (Posisi) Motor DC 13
2.2.5 Pemodelan Matematis Motor DC 14
2.2.6 Pengendali PID 19
2.2.7 Parameter Pengendali PID 23
2.2.8 Respons Step Sistem 25
2.2.9 Karakteristik Redaman Sistem 27
2.2.10 Stabilitas Sistem 30
2.2.11 Simulasi Menggunakan MATLAB/SIMULINK 32
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 33
3.1 Metode Penelitian 33
3.2 Tempat dan waktu Penelitian 33
3.2.1 Tempat Penelitian 34
3.2.2 Waktu Penelitian 34
3.3. Alat Dan Perangkat Penelitian 34

3.3.1 Alat Penelitian 34
3.3.2 Perangkat Penelitian 34
3.4 Diagram Blok Penelitian 35
3.5 Prosedur Penelitian 36
3.5.1 Studi Literatur 36
3.5.2 Menentukan Parameter Motor DC 36
3.5.3 Model Matematis Motor DC 37
3.5.4 Penentuan Fungsi Alih Motor DC 38
3.5.5 Penentuan Nilai Awal Parameter PID 39
3.5.6 Variasi Parameter Menggunakan Metode OFAT 39
3.5.7 Pengambilan Data Hasil Simulasi 40
3.5.8 Analisis Karakteristik Respons Sistem 40
3.5.9 Analisis Karakteristik Redaman Sistem 41
3.5.10 Analisis PID terhadap Peak time dan natural frequency 41
3.5.11 Analisis Stabilitas Sistem 41
3.5.12 Perbandingan dan Evaluasi Hasil Simulasi 42
3.6 Diagram Alir Penelitian 44
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 45
4.1 Pendahuluan 44
4.2 Hasil Pemodelan Matematis 45
4.2.1 Validasi Respon Lingkar terbuka (Open Loop) Motor DC 46
4.3 Analisis Pengaruh Variasi Kp 47
4.4 Analisis Pengaruh Variasi Ki 49
4.5 Analisis Pengaruh Variasi Kd 50
4.6 Analisis Pengaruh Variasi Parameter PID terhadap Respons Sudut (Posisi) Poros Motor DC 52
4.6.1 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Proporsional (Kp) 53
4.6.2 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Integral (Ki) 54
4.6.3 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Derivatif (Kd) 55
4.7
4.7 Analisis Karakteristik Redaman dan Frekuensi Natural 56
4.7.1 Analisis Redaman dan Frekuensi Natural pada Sistem Kendali

Kecepatan (Orde 2) 56
4.7.2 Analisis Redaman dan Frekuensi Natural pada Sistem Kendali Posisi (Orde 3).....58
4.8 Analisis Stabilitas Sistem Berdasarkan Posisi Kutub (Pole) 59
4.8.1 Analisis Stabilitas pada Sistem Kendali Kecepatan (Orde 2).....60
4.8.2 Analisis Stabilitas pada Sistem Kendali Posisi Sudut (Orde 3)...61
4.9 Analisis Sinyal Kendali (Control Effort) 62
4.10 Evaluasi Keseluruhan (Trade-Off Parameter PID) 62
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 64
5.1 Kesimpulan 64
5.2 Saran.....65
DAFTAR PUSTAKA.....66
LAMPIRAN.....68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Kendali Loop Tertutup 11
Gambar 2.2 Skema Motor DC dan Konversi Energi 13
Gambar 2.3 Struktur Pengendali PID 20
Gambar 2.4 Kurva Respons Step Sistem 25
Gambar 2.5 Perbandingan Respons Underdamped, Critically Damped, dan Overdamped 28
Gambar 2.6 Contoh Model Simulink Sistem Kendali Motor DC dengan Pengendali PID 32
Gambar 3.1 Diagram Sistem Kendali Motor DC dengan PID 35
Gambar 3.2 Diagram Blok Penelitian 36
Gambar 3.3 Simulink Tuning PID 39
Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian 44
Gambar 4.1 Kurva Respons Step Sistem dengan Parameter PID Baseline 46
Gambar 4.2 Kurva Respons Step Lingkar Terbuka (Open-Loop) Motor DC 47
Gambar 4.3 Kurva Grafik Variasi Kp 48
Gambar 4.4 Kurva Grafik Variasi Ki 49
Gambar 4.5 Kurva Variasi Nilai Kd 51
Gambar 4.6 Kurva Respons Kendali Posisi Sudut 53
Gambar 4.7 Kurva Parameter Kp (Kendali Posisi) 54
Gambar 4.8 Kurva Parameter Ki (Kendali Posisi) 55
Gambar 4.9 Kurva Parameter Kd (Kendali Posisi) 56
Gambar 4.10 Peta Pole-Zero Kendali Kecepatan 60
Gambar 4.11 Grafik Respons Sinyal Kendali (*Control Effort*) saat *Start-Up* 62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Respons 30
Tabel 2.2 Kondisi Sistem 31
Tabel 2.3 Posisi Pole 32
Tabel 3.1 Parameter Motor DC 37
Tabel 3.2 Karakteristik Redaman 41
Tabel 3.3 Hasil Pengujian 43
Tabel 4.1 Nilai Awal (Baseline) Parameter PID Hasil Tuning MATLAB 46
Tabel 4.2 Karakteristik Respons Waktu Sistem Baseline 47
Tabel 4.3 Pengaruh Variasi Kp 48
Tabel 4.4 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Ki terhadap Respons Kecepatan Motor 49
Tabel 4.5 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Kd 51
Tabel 4.6 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Kp terhadap Kendali Posisi Sudut (Orde 3) 54
Tabel 4.7 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Ki terhadap Kendali Posisi Sudut (Orde 3) 55
Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Kd terhadap Kendali Posisi Sudut (Orde 3) 56
Tabel 4.9 Karakteristik Redaman dan Frekuensi Natural (Kendali Kecepatan) 57
Tabel 4.10 Karakteristik Redaman dan Frekuensi Natural (Kendali Posisi) 58
Tabel 4.11 Letak Pole Dominan dan Status Stabilitas (Kendali Kecepatan) 60
Tabel 4.12 Letak Pole Dominan dan Status Stabilitas (Kendali Posisi) 61

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor DC merupakan salah satu aktuator elektromekanik yang banyak digunakan pada berbagai aplikasi yang membutuhkan pengaturan kecepatan maupun gerakan. Motor DC mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dan memiliki karakteristik yang memungkinkan pengaturan kecepatannya dilakukan melalui sistem kendali. Dalam penerapannya, kecepatan motor perlu dikendalikan agar keluaran dapat mengikuti nilai acuan yang diberikan serta mempertahankan performa ketika terjadi perubahan kondisi sistem. Pengendalian kecepatan motor DC menjadi penting karena perubahan kecepatan dapat memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Penelitian Azeez et al. menunjukkan penerapan pengendali PID untuk pengaturan kecepatan motor DC menggunakan MATLAB/Simulink, sedangkan Fajar dan Rusimamto menunjukkan bahwa penggunaan PID dapat menghasilkan kecepatan motor yang lebih konstan dibandingkan sistem tanpa PID. [1], [10]

Dalam sistem kendali kecepatan motor DC, keluaran motor tidak selalu dapat mencapai nilai setpoint secara langsung dan ideal. Respons sistem dapat memiliki waktu pencapaian tertentu serta mengalami overshoot, keterlambatan menuju keadaan tunak, atau kesalahan antara keluaran dan nilai acuan. Oleh karena itu, performa sistem kendali perlu dianalisis berdasarkan karakteristik respons transien dan keadaan tunaknya. Beberapa parameter yang dapat digunakan untuk mengevaluasi respons sistem meliputi rise time, settling time, maximum overshoot, dan steady-state error. Rashid dan Hussain, misalnya, menggunakan parameter settling time, rise time, persentase overshoot, dan steady-state error untuk membandingkan performa beberapa metode tuning PID pada pengendalian kecepatan motor DC. [2], [5]

Selain pengaturan kecepatan, dalam banyak aplikasi industri modern seperti lengan robot dan sistem penjejak, pengendalian posisi atau sudut poros motor DC secara presisi merupakan hal yang sangat krusial. Penambahan variabel posisi sudut (θ) sebagai keluaran sistem mengubah orde plant menjadi lebih tinggi dibandingkan

kendali kecepatan murni, sehingga memengaruhi perilaku transien, kestabilan, serta respons sistem secara keseluruhan terhadap variasi parameter PID [1]. Oleh karena itu, penelitian ini juga memperluas cakupan analisis tidak hanya pada aspek kecepatan, tetapi juga mengevaluasi respons sudut (posisi) motor DC akibat variasi parameter pengendali PID.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengendalikan sistem motor DC adalah pengendali Proportional–Integral–Derivative (PID). Pengendali PID terdiri atas tiga komponen utama, yaitu proporsional, integral, dan derivatif, yang direpresentasikan oleh parameter penguatan (Kp), (Ki), dan (Kd). Ketiga komponen tersebut menghasilkan sinyal kendali berdasarkan karakteristik error antara nilai acuan dan keluaran sistem. Penerapan PID pada motor DC telah dilakukan melalui pendekatan simulasi maupun implementasi, termasuk penggunaan MATLAB/Simulink dan metode tuning untuk memperoleh parameter pengendali yang sesuai. Ma'arif et al. menggunakan pemodelan identifikasi sistem dan fitur PID Tuning pada MATLAB untuk memperoleh pengendalian kecepatan sudut motor DC, sedangkan Rahayu et al. menggunakan metode Particle Swarm Optimization untuk melakukan tuning parameter PID pada motor DC. [1], [4], [14]

Nilai (Kp), (Ki), dan (Kd) merupakan bagian penting dalam menentukan karakteristik respons sistem kendali. Perubahan nilai (Kp) dapat mengubah besarnya respons pengendali terhadap error, sedangkan (Ki) berhubungan dengan akumulasi error dan kemampuan sistem dalam mengurangi kesalahan keadaan tunak. Sementara itu, (Kd) merespons perubahan error dan dapat memengaruhi karakteristik transien serta peredaman respons. Oleh karena itu, perubahan nilai masing-masing parameter PID dapat menghasilkan perubahan pada karakteristik keluaran motor DC. Penelitian Rahayu et al., Aliansyah et al., dan Suryatini et al. menunjukkan bahwa proses tuning dan perubahan parameter PID berkaitan dengan perubahan performa sistem pengendalian motor DC. [4], [6], [12]

Selain mengevaluasi performa menggunakan parameter kuantitatif (respons waktu), bentuk respons sistem juga mengindikasikan karakteristik redaman sistem, seperti kondisi underdamped, critically damped, maupun overdamped. Lebih jauh lagi, stabilitas dan tingkat redaman suatu sistem kendali linear secara matematis sangat ditentukan oleh letak kutub (pole) dan nol (zero) pada bidang-s (s-plane).

Perubahan nilai parameter PID secara langsung akan menggeser posisi pole sistem tertutup (closed-loop). Analisis pergerakan pole (Pole-Zero Map) ini sering kali tidak dieksplorasi secara rinci bersamaan dengan karakteristik waktu (time response), padahal posisi pole memberikan informasi yang esensial mengenai laju peluruhan (decay rate), frekuensi osilasi, serta kestabilan asimtotik dari sistem kendali. [6]

Penelitian terdahulu telah membahas pengendalian motor DC menggunakan PID dengan berbagai metode penalaan. Rahayu et al. menggunakan metode Particle Swarm Optimization untuk memperoleh parameter PID pada pengendalian motor DC, sedangkan Aliansyah et al. menggunakan algoritma genetika untuk melakukan tuning parameter PID pada pengendalian kecepatan motor DC. Afrawira et al. membandingkan metode Ziegler–Nichols dan trial and error dalam penalaan PID, sementara Suryatini et al. membahas optimasi parameter PID menggunakan Particle Swarm Optimization. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan metode tuning dan nilai parameter PID memiliki hubungan dengan karakteristik performa sistem, seperti rise time, settling time, dan overshoot. [4], [6], [7], [12]

Meskipun penelitian mengenai pengendalian motor DC berbasis PID telah banyak dilakukan, sebagian penelitian terdahulu lebih berorientasi pada pencarian kombinasi parameter PID yang menghasilkan performa optimal melalui metode tuning atau algoritma optimasi. Penelitian Rashid dan Hussain, misalnya, membandingkan beberapa metode tuning dan menggunakan algoritma genetika untuk memperoleh parameter PID yang memberikan performa terbaik berdasarkan rise time, settling time, overshoot, dan steady-state error. [5] Penelitian Ma'arif et al. juga berfokus pada pemodelan identifikasi sistem dan tuning PID untuk memperoleh respons pengendalian motor DC yang baik. [14] Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, masih terdapat ruang untuk melakukan analisis yang secara khusus memisahkan pengaruh perubahan parameter (Kp), (Ki), dan (Kd) terhadap karakteristik respons sistem. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan tidak hanya untuk memperoleh parameter PID yang optimal, tetapi juga untuk memahami pengaruh masing-masing parameter terhadap respons dan stabilitas sistem.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan dengan judul "ANALISIS PENGARUH VARIASI PARAMETER PID TERHADAP RESPONS DAN STABILITAS SISTEM KENDALI MOTOR DC BERBASIS SIMULASI MATLAB/SIMULINK" Penelitian dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan membangun model sistem kendali motor DC berbasis closed-loop dan pengendali PID. Variasi parameter dilakukan menggunakan pendekatan one-factor-at-a-time, yaitu satu parameter PID divariasikan sementara parameter lainnya dipertahankan pada nilai tertentu. Setiap perubahan parameter akan diamati melalui respons keluaran motor terhadap masukan step dan dievaluasi berdasarkan rise time, settling time, maximum overshoot, dan steady-state error. Selain itu, bentuk respons yang dihasilkan akan dianalisis untuk melihat perubahan karakteristik redaman dan kestabilan sistem. Melalui pendekatan tersebut, penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai pengaruh masing-masing parameter (Kp), (Ki), dan (Kd) terhadap performa dan stabilitas sistem kendali motor DC.

1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang menjadi fokus dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi nilai konstanta Kp,Ki,Kd terhadap karakteristik respons sistem kendali motor DC?
2. Bagaimana pengaruh variasi parameter PID terhadap karakteristik respons sudut (posisi) poros motor DC?
3. Bagaimana pengaruh variasi parameter PID terhadap rise time, settling time, maximum overshoot, dan steady-state error?
4. Bagaimana pengaruh variasi parameter PID terhadap karakteristik redaman sistem kendali motor DC yang ditinjau berdasarkan kondisi underdamped, critically damped, dan overdamped?

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang jelas mengenai peran parameter PID dalam sistem kendali motor DC. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi nilai konstanta Kp,Ki,Kd terhadap karakteristik respons sistem kendali motor DC
2. Menganalisis pengaruh variasi parameter PID terhadap karakteristik respons sudut (posisi) poros motor DC
3. Menganalisis pengaruh variasi parameter PID terhadap rise time, settling time, maximum overshoot, dan steady-state error
4. Menganalisis pengaruh variasi parameter PID terhadap karakteristik redaman sistem kendali motor DC yang ditinjau berdasarkan kondisi underdamped, critically damped, dan overdamped.

Tujuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi kinerja pengendali PID serta memberikan gambaran hubungan antara variasi parameter PID dan perilaku sistem kendali motor DC.

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian dilakukan menggunakan simulasi pada perangkat lunak MATLAB/Simulink, tanpa implementasi langsung pada perangkat keras (hardware).
2. Objek penelitian dibatasi pada model matematis motor DC yang digunakan dalam simulasi.
3. Pengendali yang digunakan hanya Proportional-Integral-Derivative (PID) tanpa membandingkan dengan metode kendali lain seperti Fuzzy Logic, LQR, MPC, atau Sliding Mode Control.
4. Parameter yang dianalisis hanya variasi nilai konstanta Proportional (Kp), Integral (Ki), dan Derivative (Kd).
5. Analisis difokuskan pada karakteristik respons sistem yang meliputi: Rise Time, Settling Time, Maximum Overshoot, Steady-State Error, serta karakteristik respons Underdamped, Critically Damped, dan Overdamped.
6. Gangguan sistem (disturbance) dan perubahan parameter motor di luar skenario simulasi tidak menjadi fokus penelitian.
7. Penelitian tidak membahas metode optimasi atau algoritma tuning PID, seperti Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Genetic Algorithm, Fuzzy PID, maupun metode optimasi lainnya.

8. Hasil penelitian dibatasi pada analisis hubungan antara variasi parameter PID dengan respons dan stabilitas sistem berdasarkan hasil simulasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. **Manfaat Teoritis**

   Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem kendali, khususnya terkait pemahaman pengaruh variasi parameter PID terhadap respons dan stabilitas sistem kendali motor DC.

2. **Manfaat Praktis**

   Bagi akademisi dan mahasiswa, penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dan bahan pembelajaran dalam memahami karakteristik pengendali PID pada sistem kendali motor DC berbasis simulasi.

   Bagi praktisi di bidang otomasi dan industri, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan awal dalam menentukan parameter PID untuk meningkatkan kinerja dan stabilitas sistem kendali motor DC.

3. **Manfaat Metodologis**

   Penelitian ini memberikan gambaran penerapan metode simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink sebagai sarana analisis dan evaluasi kinerja sistem kendali motor DC dengan pengendali PID.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Tinjauan pustaka Relevan merupakan tahapan penting dalam penelitian yang bertujuan untuk memperoleh landasan teori yang sesuai dengan permasalahan yang dikaji. Proses ini dilakukan dengan menelusuri dan mengkaji berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan, kemudian menggunakannya sebagai dasar pendukung agar penelitian yang dilakukan memiliki kekuatan ilmiah yang lebih baik. Tinjauan pustaka mencakup kegiatan pengidentifikasian secara sistematis, penelusuran, serta analisis terhadap berbagai dokumen yang memuat informasi Relevan dengan fokus penelitian.

Penelitian mengenai sistem kendali motor DC menggunakan pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan, baik melalui simulasi MATLAB/Simulink maupun implementasi pada perangkat keras. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa parameter Kp, Ki, dan Kd memiliki pengaruh terhadap karakteristik respons kecepatan motor DC, seperti rise time, settling time, overshoot, dan steady-state error. Salah satu penelitian yang relevan dilakukan oleh Azeez et al. yang membahas pengendalian kecepatan motor DC menggunakan PID berbasis MATLAB/Simulink. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pengendali PID dapat digunakan untuk meningkatkan respons pengendalian kecepatan motor DC, sehingga MATLAB/Simulink dapat digunakan sebagai lingkungan untuk menganalisis karakteristik respons sistem [1]. Hasil tersebut juga didukung oleh penelitian lain yang menggunakan MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi pengendalian motor DC dengan PID.

Aliansyah et al. melakukan penelitian mengenai tuning parameter PID pada pengontrolan kecepatan motor DC menggunakan algoritma genetika. Penelitian tersebut menggunakan parameter Kp, Ki, dan Kd sebagai parameter pengendali dan mengevaluasi respons sistem berdasarkan rise time, settling time, overshoot, serta steady-state error. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan nilai parameter PID berpengaruh terhadap karakteristik respons sistem motor DC [2].

Rahayu et al. melakukan penelitian mengenai tuning PID pada motor DC menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Penelitian tersebut

memanfaatkan MATLAB/Simulink untuk memperoleh parameter PID dan mengevaluasi performa sistem berdasarkan rise time, settling time, dan overshoot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan parameter PID berpengaruh terhadap respons sistem dan dapat digunakan untuk memperoleh karakteristik respons yang lebih baik [3].

Penelitian lainnya mengenai pengendalian motor DC dengan PID juga menunjukkan bahwa parameter PID berkaitan langsung dengan kemampuan sistem dalam mengikuti nilai setpoint. Ariyansyah dan Ma'arif menerapkan pengendali PID pada motor DC untuk menjaga kestabilan kecepatan terhadap setpoint. Penelitian tersebut menggunakan Kp, Ki, dan Kd sebagai parameter pengendali dan melakukan pengujian terhadap respons motor DC [4]

Selain penelitian yang berfokus pada penalaan parameter, terdapat penelitian yang menggunakan simulasi MATLAB untuk menganalisis pengaruh parameter PID terhadap respons motor DC. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa perubahan parameter pengendali dapat menghasilkan perubahan pada settling time, overshoot, dan karakteristik respons motor DC. Hal ini menunjukkan bahwa variasi parameter PID dapat dijadikan pendekatan untuk mempelajari hubungan antara parameter pengendali dan perilaku dinamis sistem [5].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa pengendali PID telah banyak diterapkan pada sistem pengaturan kecepatan motor DC dan parameter Kp, Ki, dan Kd merupakan bagian penting yang menentukan karakteristik respons sistem. Sebagian penelitian terdahulu lebih menitikberatkan pada pencarian nilai parameter PID yang optimal menggunakan metode tuning atau optimasi, seperti algoritma genetika dan Particle Swarm Optimization [2], [3]. Sementara itu, penelitian ini tidak berfokus pada perbandingan metode optimasi, tetapi pada analisis pengaruh variasi masing-masing parameter Kp, Ki, dan Kd terhadap respons dan stabilitas sistem kendali motor DC berbasis simulasi MATLAB/Simulink**.**

Perbedaan tersebut menjadi dasar penelitian ini untuk melakukan variasi parameter PID secara terpisah menggunakan pendekatan One-Factor-at-a-Time (OFAT). Setiap perubahan parameter akan dianalisis berdasarkan karakteristik respons berupa rise time, peak time, settling time, maximum overshoot, dan steady-

state error, serta karakteristik sistem berupa damping ratio, natural frequency, dan posisi pole. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih terarah mengenai hubungan antara perubahan masing-masing parameter PID dengan perubahan respons dan stabilitas sistem kendali motor DC.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori dalam penelitian ini mencakup konsep sistem kendali, sistem kendali loop tertutup, motor arus searah (DC), pemodelan matematis dan fungsi alih motor DC, pengendali PID beserta parameter Kp, Ki, dan Kd, karakteristik respons sistem, karakteristik redaman, serta stabilitas sistem berdasarkan posisi pole. Selain itu, dibahas pula penggunaan MATLAB/Simulink sebagai perangkat simulasi untuk membangun model dan menganalisis respons sistem.

2.2.1 Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan suatu sistem yang dirancang untuk mengatur atau mempertahankan suatu besaran keluaran agar sesuai dengan nilai yang diinginkan. Dalam sistem kendali, proses pengaturan dilakukan dengan memberikan masukan tertentu kepada sistem sehingga keluaran yang dihasilkan dapat mencapai kondisi yang diharapkan. Secara umum, sistem kendali terdiri atas masukan (input), proses atau plant, keluaran (output), serta elemen pengendali yang digunakan untuk memengaruhi karakteristik respons sistem [1], [3].

Berdasarkan hubungan antara masukan dan keluaran, sistem kendali dapat diklasifikasikan menjadi sistem kendali open-loop dan closed-loop. Pada sistem open-loop, keluaran sistem tidak digunakan sebagai informasi umpan balik untuk menentukan tindakan pengendalian. Sebaliknya, pada sistem closed-loop, keluaran sistem diukur dan dibandingkan dengan nilai referensi sehingga diperoleh sinyal kesalahan (error) yang digunakan oleh pengendali untuk menghasilkan aksi kendali [1], [4].

Dalam sistem kendali umpan balik, sinyal kesalahan diperoleh dari selisih antara sinyal referensi dan sinyal keluaran yang telah diukur melalui elemen umpan balik. Secara matematis, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{2.1}$$

dimana:

e(t) : sinyal kesalahan

r(t) : sinyal referensi

(y(t)) : keluaran sistem

Pada penelitian ini, sistem kendali digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC. Motor DC berperan sebagai *plant*, sedangkan pengendali PID digunakan untuk menghasilkan sinyal kendali berdasarkan perbedaan antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual motor. Dengan demikian, perubahan parameter pengendali (Kp), (Ki), dan (Kd) dapat memengaruhi karakteristik respons sistem, seperti *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error*. Analisis terhadap perubahan karakteristik tersebut menjadi dasar dalam penelitian untuk mengetahui pengaruh variasi parameter PID terhadap respons dan stabilitas sistem kendali motor DC [2], [3].

2.2.2 Sistem Kendali Loop Tertutup (*Closed-Loop*)

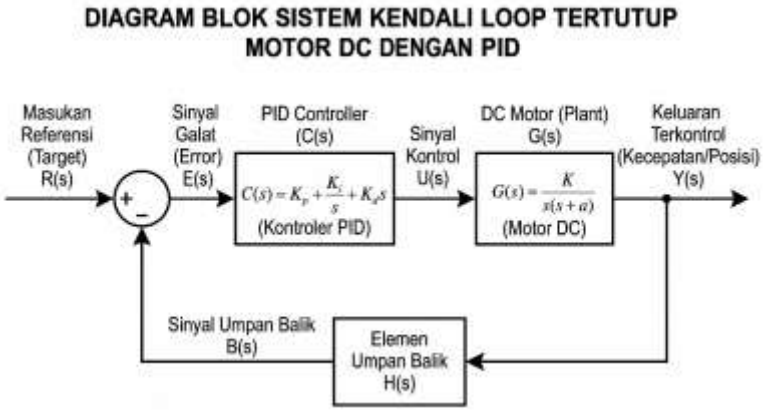
Sistem kendali *closed-loop* pada penelitian ini terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu referensi (setpoint)**,** summing point**,** pengendali PID**,** plant motor DC**,** sensor/umpan balik**,** dan keluaran sistem.

A. Pengertian Closed Lopp

Sistem kendali loop tertutup (*closed-loop control system*) merupakan sistem kendali yang menggunakan sinyal keluaran untuk dibandingkan dengan sinyal referensi melalui mekanisme umpan balik (*feedback*). Hasil perbandingan tersebut menghasilkan sinyal kesalahan (*error*) yang digunakan sebagai dasar bagi pengendali dalam menentukan sinyal kendali yang diberikan kepada sistem atau *plant*. Penggunaan umpan balik memungkinkan sistem melakukan koreksi terhadap perbedaan antara keluaran aktual dan keluaran yang diinginkan [1], [3].

Pada penelitian ini, sistem kendali motor DC menggunakan konfigurasi loop tertutup dengan kecepatan motor sebagai keluaran yang diukur dan dibandingkan dengan nilai referensi. Pengendali PID menerima sinyal kesalahan antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual motor, kemudian menghasilkan sinyal kendali untuk mengatur motor DC. Konfigurasi tersebut memungkinkan pengaruh variasi parameter (Kp), (Ki), dan (Kd) terhadap respons sistem dianalisis berdasarkan *rise*

time, *settling time*, *maximum overshoot*, *steady-state error*, serta karakteristik kestabilannya [2], [3].



Gambar 2.1 diagram blok sistem kendali loop

2.2.3 Motor Arus Searah (DC)

Motor arus searah (*Direct Current* atau DC) merupakan salah satu jenis mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk gerak rotasi. Motor DC banyak digunakan pada sistem penggerak dan sistem kendali karena hubungan antara tegangan masukan dan kecepatan putar dapat dianalisis serta dikendalikan dengan relatif mudah. Dalam sistem kendali, motor DC dapat digunakan sebagai *plant* yang menerima sinyal kendali berupa tegangan dan menghasilkan keluaran berupa kecepatan atau posisi poros motor [1], [3].

Dalam penelitian ini digunakan model motor arus searah (DC) dengan pengaturan tegangan armatur (*armature-controlled DC motor*). Pada konfigurasi ini, tegangan yang diberikan pada rangkaian armatur digunakan sebagai masukan untuk mengatur kecepatan motor, sedangkan kecepatan sudut motor digunakan sebagai keluaran sistem. Model motor DC mempertimbangkan parameter elektrik berupa resistansi armatur Ra dan induktansi armatur La, serta parameter elektromekanik berupa konstanta torsi Kt, konstanta gaya gerak listrik lawan Ke, momen inersia J, dan koefisien gesekan viskos BB. Penggunaan model motor DC dengan parameter tersebut mengacu pada model motor yang digunakan dalam penelitian Moshayedi *et al.* [16].

A. Prinsip Kerja Motor DC

Prinsip kerja motor DC didasarkan pada interaksi antara medan magnet dan arus listrik pada penghantar. Ketika kumparan jangkar (armature) dialiri arus listrik dan berada dalam medan magnet, akan timbul gaya elektromagnetik yang menghasilkan torsi pada poros motor. Besarnya torsi elektromagnetik berkaitan dengan arus jangkar, sehingga perubahan arus akan memengaruhi kemampuan motor dalam menghasilkan torsi dan menggerakkan beban [1], [4].

Pada motor DC, tegangan yang diberikan pada rangkaian jangkar tidak seluruhnya digunakan untuk menghasilkan gerakan mekanik. Sebagian tegangan digunakan untuk mengatasi resistansi rangkaian jangkar, sebagian digunakan untuk membentuk perubahan arus pada induktansi jangkar, dan sebagian lainnya berkaitan dengan gaya gerak listrik lawan (*back electromotive force* atau *back EMF*). Ketika motor berputar, *back EMF* yang dihasilkan akan berlawanan dengan tegangan sumber sehingga memengaruhi arus jangkar motor [1], [3].

Secara umum, hubungan antara tegangan masukan, arus jangkar, *back EMF*, dan parameter rangkaian elektrik motor dapat dinyatakan melalui persamaan:

$$V\alpha(t) = Ri\alpha(t) + L\frac{dia(t)}{dt} + eb(t) \quad (2.1)$$

Dimana :

Va(t) : tegangan armatur (V),

R : resistansi armatur (Ω),

ia(t) : arus armatur (A),

L : induktansi armatur (H),

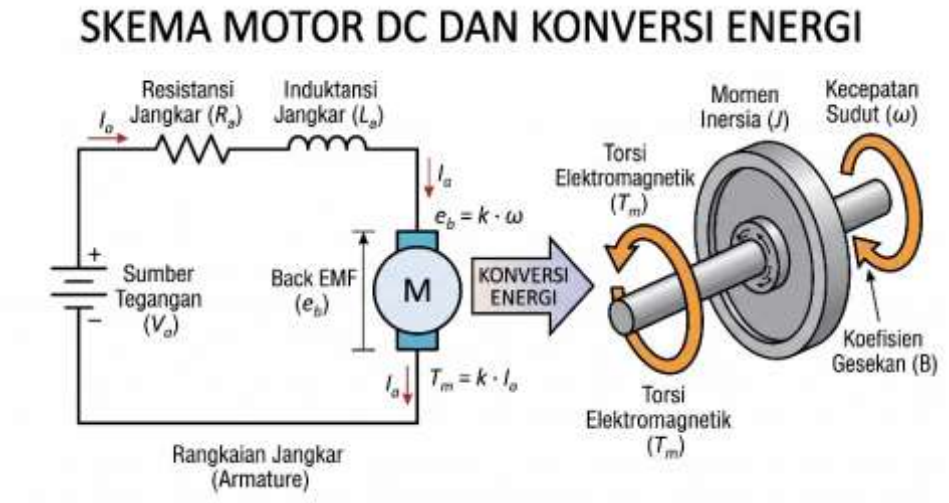
eb(t) : tegangan *back EMF* (V).

Selain hubungan elektrik, motor DC memiliki hubungan mekanik antara torsi elektromagnetik, momen inersia, kecepatan sudut, dan gesekan mekanik. Torsi yang dihasilkan motor digunakan untuk mengatasi beban dan perubahan gerak rotasi motor. Oleh karena itu, karakteristik elektrik dan mekanik motor perlu dipertimbangkan secara bersamaan dalam proses pemodelan matematis [1], [3].

Untuk motor DC yang digunakan sebagai *plant* pada sistem kendali, tegangan jangkar dapat dipandang sebagai masukan (*input*), sedangkan kecepatan sudut poros motor merupakan keluaran (*output*). Hubungan tersebut dapat digambarkan dalam bentuk diagram blok yang menunjukkan proses perubahan sinyal tegangan

menjadi kecepatan motor. Model ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk merancang sistem kendali PID dan menganalisis respons sistem terhadap perubahan parameter pengendali.

Dalam penelitian ini, motor DC digunakan sebagai objek yang dikendalikan menggunakan pengendali PID. Kecepatan motor dibandingkan dengan nilai referensi untuk menghasilkan sinyal kesalahan. Pengendali PID kemudian mengolah sinyal kesalahan tersebut dan menghasilkan tegangan kendali yang diberikan kepada motor. Dengan konfigurasi tersebut, perubahan parameter (Kp), (Ki), dan (Kd) dapat diamati pengaruhnya terhadap karakteristik respons dan stabilitas sistem kendali motor DC.



Gambar 2.2 Skema Motor DC

2.2.4 Kendali Sudut (Posisi) Motor DC

Dalam aplikasi sistem kendali modern, selain pengaturan kecepatan putar, pengendalian posisi atau sudut poros motor DC (*DC motor position control*) secara presisi merupakan aspek yang sangat penting, misalnya pada sistem lengan robot, katup otomatis, dan mekanisme penjejak. [1], [3].

Secara prinsip, motor DC dapat dikendalikan posisinya dengan memanfaatkan hubungan matematis antara kecepatan sudut ($\omega(t)$) dan posisi sudut ($\theta(t)$). Kecepatan sudut merupakan turunan pertama dari posisi sudut terhadap waktu. Sebaliknya, posisi sudut merupakan hasil integral dari kecepatan sudut terhadap waktu. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan domain waktu sebagai berikut:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(T)dT \quad (2.1)$$

Apabila persamaan tersebut ditransformasikan ke dalam domain Laplace dengan kondisi awal bernilai nol, maka hubungan antara posisi sudut Θ(s) dan kecepatan sudut Ω(s) dinyatakan sebagai:

$$\Theta(s) = \frac{1}{s}\Omega(s) \quad (2.2)$$

Oleh karena itu, ketika model matematis motor DC yang sebelumnya berupa fungsi alih kecepatan berorde dua dikembangkan menjadi sistem kendali posisi (sudut), fungsi alih *plant* motor DC akan mengalami penambahan komponen integrator $\frac{1}{s}$ pada bagian penyebutnya. Hal ini menyebabkan orde sistem meningkat menjadi orde tiga:

$$G(s) = \frac{Kt}{s((L_a s+R_a)(J_s+B)KeKt)} \quad (2.3)$$

Dimana :

S : Variabel kompleks Laplace.

Kt : Konstanta torsi motor.

Ke : Konstanta GGL balik (*back-emf*).

Ra : Resistansi armatur

La : induktansi lilitan armatur.

J : Momen inersia rotor.

B : Koefisien gesekan viskos.

2.2.5 Pemodelan Matematis Motor DC

Pemodelan matematis motor DC dilakukan untuk memperoleh hubungan matematis antara tegangan masukan armatur dan kecepatan sudut motor. Model motor DC dibentuk berdasarkan persamaan elektrik dan mekanik yang menggambarkan hubungan antara tegangan armatur, arus armatur, gaya gerak listrik lawan (*back electromotive force*), torsi elektromagnetik, kecepatan sudut, momen inersia, dan gesekan viskos. Parameter motor yang digunakan dalam penelitian mengacu pada model yang digunakan oleh Moshayedi *et al*. [16].

Pemodelan matematis merupakan proses penyusunan representasi matematis dari suatu sistem fisik berdasarkan hubungan antara variabel masukan, variabel keluaran, serta parameter yang memengaruhi perilaku sistem. Dalam sistem

kendali, pemodelan matematis diperlukan untuk memperoleh hubungan antara masukan dan keluaran sehingga karakteristik dinamis sistem dapat dianalisis sebelum sistem diterapkan secara nyata [1], [3].

Pada motor DC, pemodelan matematis dilakukan dengan mempertimbangkan dua bagian utama, yaitu rangkaian elektrik pada sisi jangkar dan sistem mekanik pada bagian rotasi motor. Rangkaian elektrik menggambarkan hubungan antara tegangan jangkar, arus jangkar, resistansi, induktansi, dan *back EMF*. Sementara itu, model mekanik menggambarkan hubungan antara torsi elektromagnetik, momen inersia, gesekan, dan kecepatan sudut motor [1], [4].

Kedua model tersebut saling berhubungan. Arus jangkar menghasilkan torsi elektromagnetik yang menyebabkan poros motor berputar. Ketika poros berputar, motor menghasilkan *back EMF* yang memengaruhi arus jangkar. Hubungan timbal balik antara bagian elektrik dan mekanik tersebut membentuk karakteristik dinamis motor DC yang selanjutnya dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi alih [1], [3].

Dalam penelitian ini, model matematis motor DC digunakan sebagai *plant* pada sistem kendali loop tertutup. Tegangan jangkar (Va(t)) digunakan sebagai masukan motor, sedangkan kecepatan sudut (ω(t)) digunakan sebagai keluaran. Model tersebut kemudian dikombinasikan dengan pengendali PID untuk menganalisis pengaruh variasi parameter (Kp), (Ki), dan (Kd) terhadap karakteristik respons serta stabilitas sistem.

Pemodelan matematis motor DC pada penelitian ini dibagi menjadi model rangkaian elektrik, model mekanik, transformasi Laplace, dan fungsi alih motor DC. Tahapan tersebut digunakan untuk memperoleh model matematis yang dapat diimplementasikan pada MATLAB/SIMULINK

A. Model Rangkaian Elektrik

Model rangakaian elektrik motor DC digunakan untuk menggambarkan hubungan antara tegangan masukan pada jangkar dengan arus yang mengalir pada kumparan jangkar. Pada model motor DC yang dikendalikan melalui tegangan jangkar, rangkaian elektrik terdiri atas sumber tegangan jangkar (Va(t)), resistansi jangkar (Ra), induktansi jangkar (La), dan *back electromotive force* (eb(t)) [1], [4].

Berdasarkan hukum tegangan Kirchhoff (*Kirchhoff's Voltage Law*), jumlah tegangan pada rangkaian jangkar dapat dinyatakan sebagai:

$$\mathrm{Va(t)} = R_a\ i_a(\mathrm{t}) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(\mathrm{t}) \quad (2.1)$$

Hubungan antara *back electromotive force* (*back EMF*) dengan kecepatan sudut motor dinyatakan sebagai:

$$e_b(t) = K_e\omega(t) \quad (2.2)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.2) ke dalam Persamaan (2.1), diperoleh:

$$V_a(\mathrm{t}) = R_a\ i_a(\mathrm{t}) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_e\omega(t) \quad (2.3)$$

Untuk hubungan antara torsi elektromagnetik dan arus jangkar, persamaannya adalah:

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (2.4)$$

Dimana :

Va(t) : tegangan jangkar motor (V)

ia(t) : arus jangkar (A)

Ra : resistansi jangkar (Ω)

La : induktansi jangkar (H)

eb(t) : *back EMF* (V)

Ke : konstanta *back EMF* (V·s/rad)

ω(t) : kecepatan sudut motor (rad/s)

Tm(t) :torsi elektromagnetik (N·m)

Kt : konstanta torsi motor (N·m/A)

Persamaan tersebut merupakan persamaan dasar sisi elektrik motor DC yang menunjukkan adanya hubungan antara tegangan masukan, arus jangkar, dan kecepatan sudut motor [1], [3].

B. Model Mekanik

Model mekanik motor DC digunakan untuk menggambarkan hubungan antara torsi elektromagnetik yang dihasilkan motor dengan gerakan rotasi pada poros motor. Pada sistem mekanik motor DC, parameter utama yang digunakan adalah torsi motor (Tm(t)), momen inersia rotor (J), koefisien gesekan viskos (B), dan kecepatan sudut motor (ω(t)). Hubungan antara parameter tersebut digunakan untuk memperoleh karakteristik dinamis mekanik motor DC [1], [3].

Berdasarkan hukum Newton untuk gerak rotasi, persamaan keseimbangan torsi pada motor DC dapat dituliskan sebagai:

$$T_m(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} B\omega(t) \quad (2.5)$$

Hubungan antara torsi elektromagnetik dengan arus jangkar motor dinyatakan sebagai:

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (2.6)$$

Dengan menggabungkan Persamaan (2.5) dan Persamaan (2.6), diperoleh:

$$K_t i_a(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} B\omega(t) \quad (2.7)$$

Dimana :

(Tm(t)) : torsi elektromagnetik motor (N·m)

(J) : momen inersia rotor (kg·m²)

(B) : koefisien gesekan viskos (N·m·s/rad)

((t)) : kecepatan sudut motor (rad/s)

(Kt) : konstanta torsi motor (N·m/A)

(ia(t)) : arus jangkar motor (A)

Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa arus jangkar menghasilkan torsi elektromagnetik melalui konstanta torsi (Kt). Torsi tersebut digunakan untuk menghasilkan percepatan rotasi rotor dan mengatasi gesekan mekanik pada motor. Model mekanik ini selanjutnya akan digabungkan dengan model rangkaian elektrik untuk memperoleh fungsi alih motor DC [1], [4].

C. Transformasi Laplace

Transformasi Laplace merupakan metode matematis yang digunakan untuk mengubah persamaan diferensial dalam domain waktu menjadi persamaan aljabar dalam domain (s). Dalam analisis sistem kendali, transformasi Laplace digunakan untuk mempermudah proses pemodelan dan memperoleh fungsi alih suatu sistem [1], [3].

Pada pemodelan motor DC, transformasi Laplace dilakukan dengan asumsi kondisi awal sistem bernilai nol. Berdasarkan Persamaan (2.3):

$$V_a(\mathrm{t}) = R_a\, i_a(\mathrm{t}) + L_a\frac{di_a(t)}{dt} + K_e\omega(t) \quad (2.8)$$

Setelah dilakukan transformasi Laplace, diperoleh:

$$V_a(\mathrm{s}) = R_a\, i_a(\mathrm{s}) + L_a s I_a(s) + K_e\Omega(s) \quad (2.9)$$

Selanjutnya, Persamaan (2.7) pada model mekanik:

$$K_t i_a(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} B\omega(t) \quad (2.7)$$

ditransformasikan ke domain Laplace sehingga menjadi:

$$K_t I_a(s) = Js\Omega(\mathrm{s}) + \mathrm{B}\Omega(\mathrm{s}) \quad (2.10)$$

Dimana :

Va(t) : tegangan jangkar motor dalam domain waktu (V)

Va(s) : tegangan jangkar motor dalam domain Laplace (V)

ia(t) : arus jangkar motor dalam domain waktu (A)

Ia(s) : arus jangkar motor dalam domain Laplace (A)

Ra : resistansi rangkaian jangkar (Ω)

La : induktansi rangkaian jangkar (H)

eb(t) : *back EMF* dalam domain waktu (V)

Ke : konstanta *back EMF* motor (V·s/rad)

ω(t) : kecepatan sudut motor dalam domain waktu (rad/s)

Ω(s) : kecepatan sudut motor dalam domain Laplace (rad/s)

Kt : konstanta torsi motor (N·m/A)

JJ : momen inersia rotor (kg·m²)

B : koefisien gesekan viskos (N·m·s/rad)

S : variabel kompleks dalam domain Laplace.

Kedua persamaan tersebut digunakan sebagai dasar untuk memperoleh fungsi alih motor DC. Dengan mengeliminasi variabel arus jangkar (Ia(s)), hubungan antara tegangan masukan (Va(s)) dan kecepatan sudut keluaran (ω(s)) dapat diperoleh [1], [4].

D. Fungsi Alih Motor DC

Fungsi alih merupakan perbandingan antara keluaran dan masukan suatu sistem dalam domain Laplace dengan kondisi awal dianggap sama dengan nol [1], [3]. Pada pemodelan motor DC, fungsi alih digunakan untuk menggambarkan hubungan antara tegangan jangkar sebagai masukan dengan kecepatan sudut motor sebagai keluaran.

Dari persamaan mekanik diperoleh:

$$Ia(s) = \frac{(Js+b)\Omega(s)}{Kt} \quad (2.11)$$

Selanjutnya, persamaan tersebut disubstitusikan ke persamaan elektrik:

$$Va(s) = (La + R)\frac{(Js+b)\Omega(s)}{Kt} + Ke\Omega(s) \quad (2.12)$$

Dengan mengelompokkan (ω(s)), diperoleh:

$$Va(s) = \left[\frac{(La+R)(Js+b)}{Kt} + Ke\right]\Omega(s) \quad (2.13)$$

Sehingga fungsi alih dari tegangan armatur terhadap kecepatan sudut motor adalah:

$$Gm(s) = \frac{\Omega(s)}{Va(s)} = \frac{Kt}{(L_aB+R_aJ)s+R_aB+KeKt} \quad (2.14)$$

Dimana :

Va(s) : tegangan jangkar motor.

Ω(s) : yaitu kecepatan sudut motor.

Kt : konstanta torsi motor.

Ke : konstanta *back EMF*.

Ra : resistansi jangkar.

La : induktansi jangkar.

J : momen inersia rotor.

B : koefisien gesekan viskos.

2.2.6 Pengendali PID

Pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan salah satu metode pengendalian umpan balik yang banyak digunakan untuk mengatur respons suatu sistem. Pengendali PID menghasilkan sinyal kendali berdasarkan tiga aksi pengendalian, yaitu proporsional, integral, dan derivatif. Ketiga aksi tersebut masing-masing memiliki parameter Kp, Ki, dan Kd yang dapat disesuaikan untuk memperoleh karakteristik respons sistem yang diinginkan [2], [3].Secara umum, pengendali PID menerima sinyal kesalahan antara nilai referensi dan keluaran sistem. Sinyal kesalahan tersebut kemudian diproses melalui aksi proporsional, integral, dan derivatif untuk menghasilkan sinyal kendali.

Sinyal kendali PID dalam domain waktu dinyatakan sebagai:

$$u(t) = Kpe(t) + Ki\int_0^t e(\tau)d\tau + Kd\frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana :

u(t) : sinyal kendali,

Kp : konstanta proporsional,

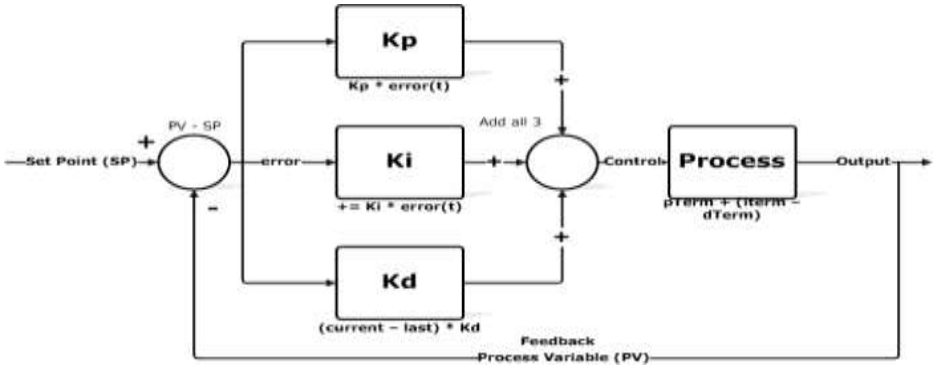
Ki : konstanta integral,

Kd : konstanta derivatif,

e(t) : sinyal error.

Dalam penelitian ini, pengendali PID digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor DC. Nilai kecepatan yang diinginkan digunakan sebagai sinyal referensi, kemudian dibandingkan dengan kecepatan aktual motor untuk menghasilkan sinyal kesalahan. Pengendali PID selanjutnya mengolah sinyal kesalahan tersebut sehingga dihasilkan sinyal kendali yang diberikan kepada motor DC.

Variasi nilai Kp, Ki, dan Kd menjadi bagian utama dalam penelitian ini karena perubahan masing-masing parameter dapat menyebabkan perubahan karakteristik respons sistem. Karakteristik tersebut selanjutnya dianalisis berdasarkan *rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*, *steady-state error*, dan karakteristik kestabilan sistem [2], [3].



Gambar 2.3 Struktur Pengendali PID

A. Pengendali Propotional

Pengendali proporsional (*Proportional Controller*) merupakan bagian dari pengendali PID yang menghasilkan sinyal kendali yang besarnya sebanding dengan sinyal kesalahan (*error*) antara nilai referensi dan keluaran sistem. Aksi proporsional memberikan respons langsung terhadap besar kecilnya kesalahan yang terjadi pada sistem [2], [3].

Nilai (Kp) menentukan besarnya penguatan terhadap sinyal kesalahan. Semakin besar nilai (Kp), semakin besar sinyal kendali yang dihasilkan untuk nilai kesalahan yang sama. Peningkatan (Kp) pada umumnya dapat mempercepat respons sistem, tetapi nilai (Kp) yang terlalu besar dapat meningkatkan *overshoot* dan menyebabkan sistem menjadi lebih berosilasi atau bahkan tidak stabil [2], [3].Sebaliknya, nilai (Kp) yang terlalu kecil dapat menyebabkan respons sistem menjadi lebih lambat dan kemampuan sistem dalam mengikuti nilai referensi menjadi berkurang. Pengendali proporsional juga tidak selalu mampu menghilangkan *steady-state error* secara sempurna karena aksi pengendalian hanya bergantung pada nilai kesalahan saat ini [1], [2].

B. Pengendali Integral

Pengendali integral (*Integral Controller*) merupakan bagian dari pengendali PID yang menghasilkan sinyal kendali berdasarkan akumulasi sinyal kesalahan terhadap waktu. Aksi integral digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) yang masih terdapat pada sistem [2], [3].Aksi integral bekerja dengan mengakumulasikan kesalahan yang terjadi selama proses pengendalian. Oleh karena itu, meskipun nilai kesalahan relatif kecil, kesalahan tersebut tetap akan terakumulasi selama masih terdapat *error*. Hal tersebut menyebabkan aksi integral dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam mencapai nilai referensi dan mengurangi *steady-state error* [1], [2].

Peningkatan nilai (Ki) menyebabkan aksi integral menjadi lebih kuat sehingga kesalahan keadaan tunak dapat dikurangi dengan lebih cepat. Namun, nilai (Ki) yang terlalu besar dapat menyebabkan respons sistem menjadi lebih berosilasi, meningkatkan *overshoot*, dan memperpanjang waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai kondisi stabil [2], [3].Sebaliknya, nilai (Ki) yang terlalu kecil menyebabkan proses penghilangan *steady-state error* berlangsung lebih lambat. Oleh karena itu, pemilihan nilai (Ki) perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kemampuan mengurangi kesalahan keadaan tunak dan karakteristik transien sistem.

C. Pengendali Derivatif

Pengendali derivatif (*Derivative Controller*) merupakan bagian dari pengendali PID yang menghasilkan sinyal kendali berdasarkan laju perubahan

sinyal kesalahan terhadap waktu. Aksi derivatif digunakan untuk memberikan efek prediktif terhadap perubahan kesalahan sehingga dapat membantu mengurangi kecenderungan osilasi dan *overshoot* pada respons sistem [2], [3].

Aksi derivatif merespons perubahan kesalahan, bukan nilai kesalahan itu sendiri. Oleh karena itu, ketika perubahan kesalahan berlangsung cepat, aksi derivatif menghasilkan sinyal kendali yang lebih besar. Sebaliknya, ketika kesalahan berada pada kondisi konstan, kontribusi aksi derivatif menjadi kecil atau bernilai nol [2], [3].

Peningkatan nilai (Kd) pada umumnya dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam meredam perubahan respons yang cepat sehingga *overshoot* dan osilasi dapat berkurang. Aksi derivatif juga dapat membantu memperbaiki karakteristik transien sistem dan meningkatkan kestabilan respons. Namun, nilai (Kd) yang terlalu besar dapat membuat pengendali sangat sensitif terhadap perubahan cepat maupun gangguan pada sinyal kesalahan [2].

C. Fungsi Alih PID

Pengendali PID merupakan kombinasi dari tiga aksi pengendalian, yaitu proporsional, integral, dan derivatif. Ketiga aksi tersebut bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan sinyal kendali yang dapat memperbaiki karakteristik respons sistem. Aksi proporsional memberikan respons terhadap besar kesalahan, aksi integral mengakumulasi kesalahan terhadap waktu, sedangkan aksi derivatif merespons perubahan kesalahan terhadap waktu [2], [3].

Fungsi alih PID dapat di tuliskan dalam bentuk Pecahan Tunggal sebagai :

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + Ki}{s} \quad (2.1)$$

Dimana :

(Kp) : konstanta proporsional

(Ki) : konstanta integral

(Kd) : konstanta derivatif

(C(s)) : fungsi alih pengendali PID

(s) : variabel kompleks Laplace

Bentuk tersebut menunjukkan bahwa parameter (Kp), (Ki), dan (Kd) secara langsung menentukan karakteristik pengendali PID. Perubahan nilai ketiga

parameter tersebut akan mengubah respons sistem ketika pengendali PID diterapkan pada *plant* motor DC [2], [3].

2.2.7 Parameter Pengendali PID

Parameter pengendali PID terdiri dari Kp, Ki, dan Kd. Ketiga parameter tersebut menentukan karakteristik aksi pengendalian dan secara langsung memengaruhi respons sistem. Perubahan nilai parameter PID dapat menyebabkan perubahan pada kecepatan respons, *overshoot*, waktu menuju kondisi tunak, serta *steady-state error* [2], [3].

Dalam penelitian ini, variasi Kp, Ki, dan Kd digunakan sebagai variabel pengendalian untuk mengetahui pengaruhnya terhadap respons dan stabilitas sistem kendali motor DC. Parameter respons yang diamati meliputi *rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error*.

A. Pengaruh Kp

Parameter proporsional Kp menentukan besar penguatan yang diberikan terhadap sinyal kesalahan. Semakin besar nilai Kp, semakin besar pula sinyal kendali yang dihasilkan untuk nilai kesalahan yang sama. Peningkatan Kp pada umumnya dapat mempercepat respons sistem karena pengendali memberikan aksi yang lebih kuat terhadap kesalahan [2], [3].

Namun, peningkatan Kp yang terlalu besar dapat menyebabkan *overshoot* dan osilasi meningkat. Kondisi tersebut dapat mengurangi margin kestabilan sistem. Sebaliknya, nilai Kp yang terlalu kecil dapat menghasilkan respons yang lambat dan menyebabkan sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai nilai referensi [1], [2].Pada sistem kendali motor DC, perubahan Kp akan diamati berdasarkan perubahan *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error*. Analisis tersebut digunakan untuk mengetahui nilai Kp yang menghasilkan karakteristik respons yang sesuai dengan tujuan pengendalian.

B. Pengaruh Ki

Parameter integral Ki menentukan besarnya penguatan pada aksi integral pengendali PID. Aksi integral bekerja dengan mengakumulasikan sinyal kesalahan terhadap waktu sehingga dapat memberikan aksi kendali selama masih terdapat kesalahan pada sistem. Oleh karena itu, parameter Ki memiliki peranan penting dalam mengurangi atau menghilangkan *steady-state error* [2], [3].

Semakin besar nilai Ki, semakin kuat aksi integral yang diberikan terhadap kesalahan sistem. Peningkatan Ki dapat mempercepat proses pengurangan *steady-state error*. Namun, nilai Ki yang terlalu besar dapat menyebabkan *overshoot* dan osilasi meningkat serta dapat memperpanjang *settling time* [1], [2].Sebaliknya, nilai Ki yang terlalu kecil menyebabkan proses akumulasi kesalahan berlangsung lebih lambat sehingga sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi tunak. Oleh karena itu, pemilihan nilai Ki harus mempertimbangkan keseimbangan antara kemampuan menghilangkan *steady-state error* dan kestabilan respons sistem.

C. Pengaruh Kd

Parameter derivatif Kd menentukan besarnya aksi pengendalian yang diberikan berdasarkan laju perubahan sinyal kesalahan. Berbeda dengan aksi proporsional yang merespons besar kesalahan dan aksi integral yang mengakumulasi kesalahan, aksi derivatif merespons perubahan kesalahan terhadap waktu. Oleh karena itu, aksi derivatif dapat memberikan efek prediktif terhadap perubahan respons sistem [2], [3].

Peningkatan nilai Kd pada umumnya dapat meningkatkan redaman sistem sehingga kecenderungan terjadinya *overshoot* dan osilasi dapat dikurangi. Selain itu, aksi derivatif dapat membantu memperbaiki karakteristik transien dan meningkatkan kestabilan respons sistem. Namun, nilai Kd yang terlalu besar dapat menyebabkan pengendali menjadi sangat sensitif terhadap perubahan cepat pada sinyal kesalahan maupun gangguan [2].Sebaliknya, nilai Kd yang terlalu kecil memberikan efek redaman yang lebih rendah sehingga sistem dapat memiliki kecenderungan osilasi yang lebih besar. Oleh karena itu, nilai Kd perlu dipilih secara tepat agar respons sistem memiliki keseimbangan antara kecepatan respons dan kestabilan.

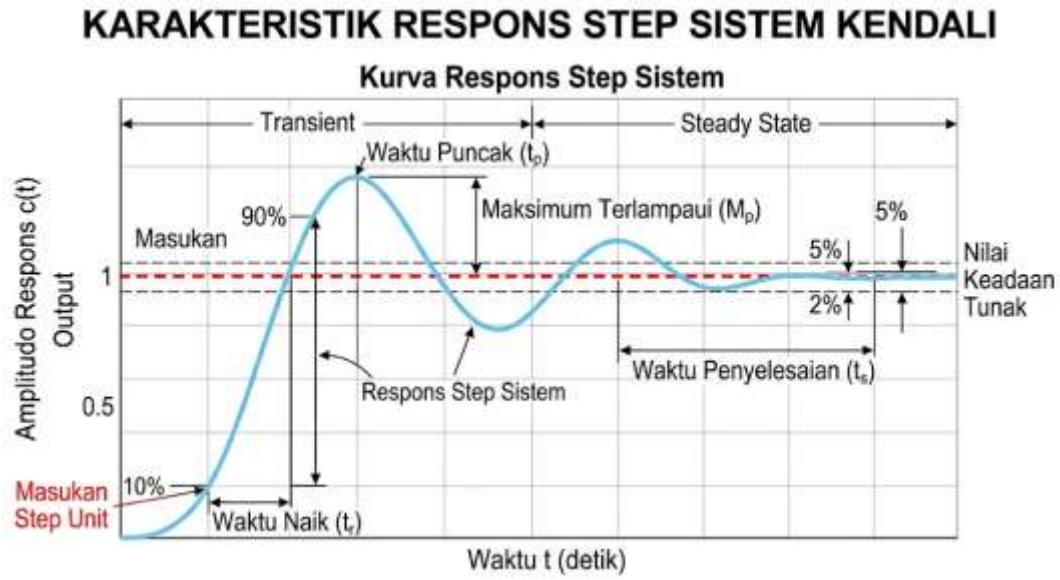
2.2.8 Respons Step Sistem

Pada sistem kendali, masukan step memberikan perubahan nilai masukan secara tiba-tiba dari satu kondisi ke kondisi lainnya. Respons yang dihasilkan oleh sistem kemudian diamati untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai nilai referensi dan mempertahankan kondisi tersebut. Karakteristik respons step

dapat digunakan untuk mengevaluasi kecepatan respons, tingkat osilasi, *overshoot*, waktu mencapai kondisi tunak, dan kesalahan keadaan tunak [1], [4].

Respons step merupakan respons keluaran suatu sistem ketika diberikan masukan berbentuk fungsi step. Pengujian respons step merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam analisis sistem kendali untuk mengetahui karakteristik transien dan keadaan tunak suatu sistem [1], [3].

Pada sistem kendali, masukan step memberikan perubahan nilai masukan secara tiba-tiba dari satu kondisi ke kondisi lainnya. Respons yang dihasilkan oleh sistem kemudian diamati untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai nilai referensi dan mempertahankan kondisi tersebut. Karakteristik respons step dapat digunakan untuk mengevaluasi kecepatan respons, tingkat osilasi, *overshoot*, waktu mencapai kondisi tunak, dan kesalahan keadaan tunak [1], [4].



Gambar 2.4 Kurva Respons Step Sistem

A. Rise Time

Rise time (tr) merupakan waktu yang diperlukan respons sistem untuk meningkat dari persentase rendah menuju persentase tinggi dari nilai akhir respons. Pada sistem kendali, *rise time* digunakan sebagai salah satu indikator kecepatan respons sistem dalam mencapai nilai yang diinginkan [1], [3].

Semakin kecil nilai *rise time*, semakin cepat sistem mencapai daerah sekitar nilai referensi. Sebaliknya, nilai *rise time* yang besar menunjukkan bahwa respons sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai nilai yang diinginkan [1], [4].Pada

sistem kendali motor DC dengan PID, perubahan nilai (Kp), (Ki), dan (Kd) dapat menyebabkan perubahan *rise time*. Peningkatan (Kp), misalnya, pada kondisi tertentu dapat mempercepat respons karena penguatan terhadap sinyal kesalahan menjadi lebih besar. Namun, pengaruh parameter PID terhadap *rise time* tetap bergantung pada kombinasi ketiga parameter dan karakteristik *plant* motor DC [2], [3].

B. Peak Time

Peak time (tp) merupakan waktu yang diperlukan oleh respons sistem untuk mencapai nilai puncak pertama setelah sistem diberikan masukan step. Parameter ini digunakan untuk mengetahui seberapa cepat sistem mencapai respons maksimum pada kondisi transien [1], [3].

Semakin kecil *peak time*, semakin cepat sistem mencapai nilai puncak respons. Namun, *peak time* perlu dianalisis bersama parameter respons lainnya karena respons yang sangat cepat dapat disertai *overshoot* atau osilasi yang lebih besar [1], [4].

C. Settling Time

Settling time (ts) merupakan waktu yang diperlukan respons sistem untuk mencapai dan tetap berada dalam batas toleransi tertentu di sekitar nilai akhir (*steady-state value*) [1], [3]. Parameter ini digunakan untuk mengetahui seberapa cepat sistem mencapai kondisi tunak.

Pada analisis sistem kendali, batas toleransi yang umum digunakan adalah **±2%** atau **±5%** dari nilai akhir respons. Dalam penelitian ini, batas **±2%** digunakan sebagai acuan *settling time*.

Semakin kecil nilai *settling time*, semakin cepat sistem mencapai kondisi tunak. Namun, nilai *settling time* harus dianalisis bersama *rise time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error* karena peningkatan kecepatan respons tidak selalu menghasilkan sistem yang lebih stabil [1], [4].

D. Maximum Overshoot

Maximum overshoot (Mp) merupakan besarnya nilai maksimum yang dilewati oleh respons sistem terhadap nilai akhir atau nilai keadaan tunak. Parameter ini digunakan untuk mengetahui seberapa besar respons sistem melampaui nilai yang diinginkan selama kondisi transien [1], [3].

Nilai *maximum overshoot* yang semakin besar menunjukkan bahwa respons sistem semakin jauh melewati nilai yang diinginkan. *Overshoot* yang terlalu besar dapat menunjukkan bahwa sistem memiliki redaman yang rendah dan kecenderungan osilasi yang lebih tinggi Dalam sistem kendali presisi seperti motor DC lengan robot, nilai overshoot yang diizinkan (standar ketetapan) umumnya berada di bawah 5% hingga 10% Overshoot di atas nilai ini dianggap dapat merusak komponen mekanis akibat sentakan yang terlalu agresif. [1], [4].

E. Steady State Error

Steady-state error (ess) merupakan selisih antara nilai referensi yang diinginkan dengan nilai keluaran sistem ketika sistem telah mencapai kondisi tunak. Parameter ini digunakan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengikuti nilai referensi pada keadaan tunak [1], [3].

Semakin kecil nilai *steady-state error*, semakin baik kemampuan sistem dalam mengikuti nilai referensi. Nilai *steady-state error* yang mendekati nol menunjukkan bahwa keluaran sistem semakin mendekati nilai yang diinginkan. Nilai ketetapan teoritis yang paling ideal adalah 0%. Kehadiran aksi integral (Ki) pada PID diwajibkan untuk mencapai target ketetapan matematis angka 0 ini agar aktuator benar-benar akurat sesuai dengan setpoint acuan. [1], [4].

Pada pengendali PID, aksi integral memiliki peranan penting dalam mengurangi *steady-state error* karena aksi integral mengakumulasi kesalahan selama proses pengendalian. Namun, perubahan Kp, Ki, dan Kd secara keseluruhan dapat memengaruhi nilai kesalahan keadaan tunak dan karakteristik respons sistem [2], [3].

2.2.9 Karakteristik Redaman Sistem

Karakteristik redaman digunakan untuk menjelaskan bagaimana sistem merespons setelah mengalami perubahan masukan, khususnya berkaitan dengan kecenderungan sistem mengalami osilasi atau langsung menuju kondisi tunak. Karakteristik ini sangat berkaitan dengan *damping ratio* (ζ) dan *natural frequency* (ωn) [1], [3].

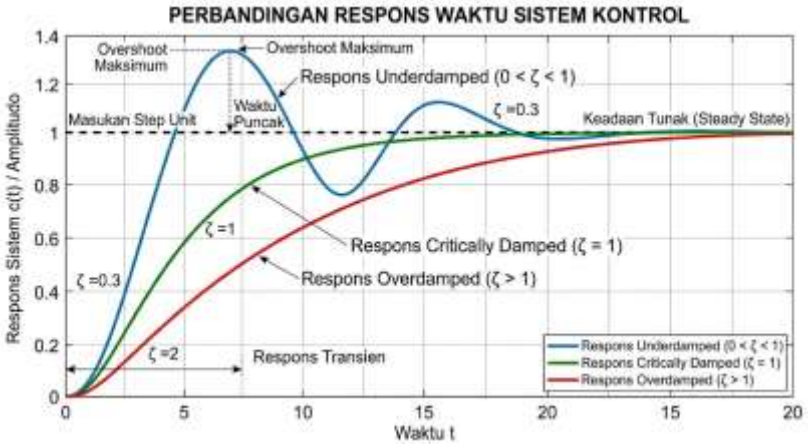
Nilai *damping ratio* menentukan bentuk respons transien sistem. Berdasarkan nilai ζ, sistem dapat dikategorikan menjadi [1], [4]:

untuk kondisi underdamped : $0 < \zeta < 1$

untuk kondisi critically damped : $\zeta = 1$

untuk kondisi overdamped. : $\zeta > 1$

kondisi tanpa redaman (*undamped*). : $\zeta = 0$



Gambar 2.5 Perbandingan Respons Underdamped, Critically Damped, dan Overdamped

A. Damping Ratio

Damping ratio (ζ) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat redaman relatif pada suatu sistem. Parameter ini digunakan untuk menentukan karakteristik respons transien sistem, terutama kecenderungan sistem untuk mengalami osilasi dan *overshoot* [1], [3].

Semakin kecil nilai *damping ratio* pada daerah $0 < \zeta < 1$, semakin besar kecenderungan sistem mengalami osilasi dan *overshoot*. Sebaliknya, peningkatan *damping ratio* dapat mengurangi osilasi dan *overshoot*, meskipun respons sistem dapat menjadi lebih lambat [1], [4].

B. Natural Frequency

Natural frequency (ωn) atau frekuensi natural merupakan parameter yang menunjukkan karakteristik kecepatan alami suatu sistem dalam merespons perubahan masukan. Pada sistem orde dua, ωn bersama dengan *damping ratio* ζ menentukan karakteristik respons transien sistem [1], [3].

Nilai ωn yang lebih besar pada umumnya menunjukkan kemampuan sistem untuk memberikan respons yang lebih cepat. Namun, karakteristik respons tidak hanya ditentukan oleh ωn, tetapi juga dipengaruhi oleh nilai ζ [1], [4].

C. Under Damped

Kondisi *underdamped* merupakan kondisi sistem ketika nilai *damping ratio* berada di antara nol dan satu. Pada kondisi ini, sistem memiliki redaman tetapi belum cukup besar untuk menghilangkan osilasi pada respons transien [1], [3].

Pada kondisi *underdamped*, respons sistem umumnya memiliki karakteristik berupa *overshoot*, osilasi, dan waktu *settling* tertentu. Semakin kecil nilai ζ\zeta, semakin kuat kecenderungan sistem mengalami osilasi dan *overshoot*. Sebaliknya, semakin mendekati ζ = 1, osilasi semakin berkurang [1], [4].

D. Critically Damped

Kondisi *critically damped* merupakan kondisi ketika sistem memiliki nilai *damping ratio* sama dengan satu. Pada kondisi ini, sistem tidak mengalami osilasi dan dapat mencapai kondisi tunak dengan cepat tanpa menghasilkan *overshoot* [1], [3].Pada kondisi *critically damped*, respons sistem menuju nilai akhirnya tanpa mengalami osilasi maupun *overshoot*. Kondisi ini memberikan kompromi antara kecepatan respons dan kestabilan karena sistem dapat mencapai kondisi tunak tanpa adanya osilasi yang berlebihan [1], [4].

E. Over Damped

Kondisi *overdamped* merupakan kondisi sistem ketika nilai *damping ratio* lebih besar dari satu. Pada kondisi ini, redaman sistem cukup besar sehingga respons tidak mengalami osilasi maupun *overshoot*. Namun, respons sistem cenderung lebih lambat dalam mencapai nilai akhirnya [1], [3].

Respons *overdamped* umumnya memiliki karakteristik berupa respons yang lebih lambat dibandingkan kondisi *critically damped*. Semakin besar nilai *damping ratio*, kecenderungan osilasi semakin kecil, tetapi waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai nilai akhir dapat menjadi lebih lama.

F. Hubungan Damping Ratio dengan Respons

Damping ratio (ζ) memiliki hubungan yang erat dengan bentuk dan karakteristik respons transien suatu sistem. Nilai ζ\zeta menentukan seberapa besar sistem mengalami osilasi, *overshoot*, dan seberapa cepat sistem menuju kondisi tunak [1], [3].

Secara umum, hubungan antara nilai *damping ratio* dan karakteristik respons sistem dapat dikategorikan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Karakteristik Respons

Kondisi	Nilai ζ\zeta	Karakteristik Respons
Undamped	ζ = 0	Sistem mengalami osilasi terus-menerus
Underdamped	0 < ζ < 1	Mengalami osilasi dan *overshoot*
Critically damped	ζ = 1	Tidak berosilasi dan respons cepat
Overdamped	ζ > 1	Tidak berosilasi, tetapi respons lebih lambat

perubahan karakteristik redaman akan memengaruhi parameter respons sistem seperti *peak time*, *settling time*, dan *maximum overshoot*. Oleh karena itu, *damping ratio* menjadi salah satu parameter penting dalam menganalisis respons dan stabilitas sistem kendali motor DC [1], [4].

2.2.10 Stabilitas Sistem

Stabilitas merupakan salah satu karakteristik penting dalam sistem kendali yang menunjukkan kemampuan sistem untuk menghasilkan respons yang terbatas dan menuju kondisi yang dapat dipertahankan setelah diberikan masukan atau gangguan. Sistem yang stabil akan menghasilkan keluaran yang tetap terbatas ketika diberikan masukan yang terbatas [1], [3].

Dalam sistem kendali, stabilitas dapat dianalisis melalui posisi *pole* fungsi alih pada bidang kompleks atau bidang-ss. Posisi *pole* tersebut menentukan perilaku respons sistem terhadap waktu, termasuk apakah respons akan meredam, berosilasi, atau semakin meningkat [1], [4].

A. Pole Sistem

Pole sistem merupakan nilai ss yang menyebabkan penyebut fungsi alih sistem menjadi nol. Jika fungsi alih sistem dinyatakan sebagai:

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \tag{2.1}$$

maka *pole* sistem diperoleh dari persamaan:

$$D(s) = 0 \tag{2.2}$$

maka *pole* sistem diperoleh dari:

$$s1{,}2 = \zeta\omega n \pm j\omega n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{2.3}$$

Posisi *pole* pada bidang-ss digunakan untuk menentukan karakteristik dan kestabilan sistem. *Pole* dengan bagian real negatif menunjukkan respons yang cenderung mereda terhadap waktu, sedangkan *pole* dengan bagian real positif menunjukkan respons yang cenderung meningkat dan dapat menyebabkan sistem tidak stabil [1], [3].

Dimana :

G(s) : fungsi alih sistem.

N(s) : pembilang fungsi alih sistem.

D(s) : penyebut fungsi alih atau persamaan karakteristik sistem.

ss : variabel kompleks dalam domain Laplace.

s1,s2 : *pole* sistem orde dua.

ζ : *damping ratio* atau rasio redaman.

Ωn : *natural frequency* atau frekuensi natural sistem, dalam rad/s.

J : satuan imajiner, dengan $j = \sqrt{-1}$

B. Kriteria Stabilitas Berdasrkan pole

Kestabilan sistem dapat ditentukan berdasarkan posisi *pole* pada bidang-ss. Untuk sistem Linear Time-Invariant (LTI), sistem dikatakan stabil apabila seluruh *pole* sistem berada pada bagian kiri bidang-ss, yaitu memiliki bagian real negatif Jika suatu *pole* dinyatakan sebagai:

$$s = \sigma + j\omega \quad (2.4)$$

maka kestabilan sistem ditentukan berdasarkan nilai bagian real σ.

Secara umum, kriteria tersebut dapat dirangkum Pada Tabel 2.2 sebagai berikut:

Tabel 2.2 Kondisi sistem

Posisi Pole	Kondisi Sistem	Karakteristik
Re(s) < 0	Stabil	Respons mereda menuju kondisi tunak
Re(s) = 0	Batas kestabilan	Respons dapat berosilasi terus-menerus
Re(s) > 0	Tidak stabil	Respons semakin meningkat

C. Hubungan Pole Dengan Respons

Posisi *pole* pada bidang-ss memiliki hubungan langsung dengan karakteristik respons sistem terhadap masukan. Letak *pole* menentukan apakah respons sistem akan mereda, berosilasi, atau semakin meningkat terhadap waktu. Oleh karena itu, analisis posisi *pole* dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamis dan

kestabilan sistem kendali [1], [3]. Hubungan antara *pole* dengan karakteristik respons dapat ditunjukkan Pada Tabel 2.3 sebagai berikut:

Tabel 2.3 Posisi Pole

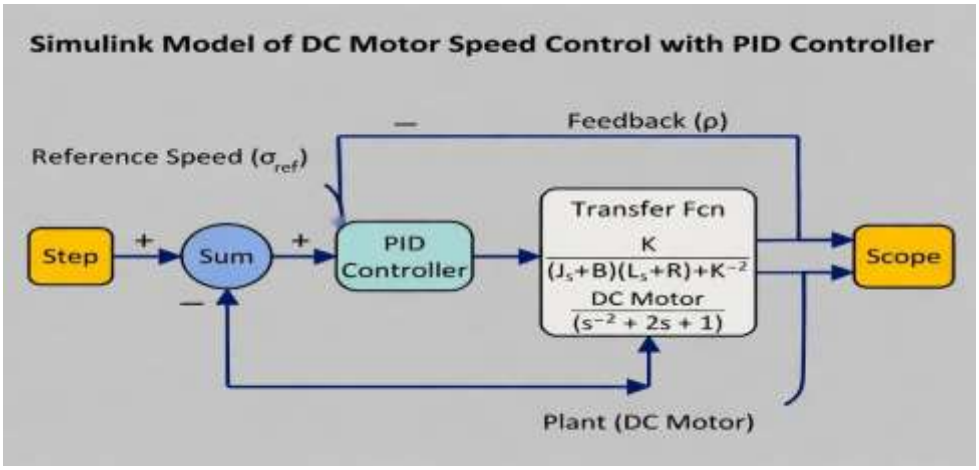
Posisi Pole	Karakteristik Respons
Pole real negatif	Respons mereda tanpa osilasi
Pole kompleks dengan bagian real negatif	Respons berosilasi tetapi amplitudonya mereda
Pole pada sumbu imajiner	Osilasi berlangsung terus-menerus
Pole dengan bagian real positif	Respons semakin meningkat atau tidak stabil

perubahan parameter sistem yang menyebabkan perubahan posisi *pole* juga akan memengaruhi karakteristik respons. *Pole* yang semakin jauh ke kiri pada bidang-ss umumnya menunjukkan respons yang lebih cepat mereda, sedangkan *pole* yang mendekati sumbu imajiner menunjukkan respons yang lebih lambat mereda dan memiliki kecenderungan osilasi yang lebih tinggi [1], [3].

2.2.11 Simulasi menggunakan MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink merupakan perangkat lunak yang banyak digunakan untuk pemodelan, simulasi, dan analisis sistem kendali. Simulink menyediakan blok-blok siap pakai seperti *Transfer Function*, *PID Controller*, *Step Input*, dan *Scope* yang memudahkan pembangunan model sistem kendali motor DC.

Melalui simulasi, pengaruh variasi parameter PID terhadap karakteristik respons dapat diamati secara visual dan kuantitatif menggunakan fungsi *stepinfo* pada MATLAB. Pendekatan simulasi ini memungkinkan analisis dilakukan secara aman, murah, dan fleksibel tanpa memerlukan perangkat keras fisik.



Gambar 2.6 Contoh Model Simulink Sistem Kendali Motor DC

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan simulasi. Penelitian dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter pengendali Proportional,Integral,Derivative (PID), yaitu Kp, Ki, dan Kd, terhadap respons dan karakteristik sistem kendali kecepatan motor DC.

Pendekatan kuantitatif digunakan karena hasil penelitian dinyatakan dalam bentuk data numerik yang diperoleh dari hasil simulasi. Data tersebut berupa nilai *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error*. Selain itu, analisis karakteristik redaman dan stabilitas dilakukan berdasarkan *damping ratio* dan lokasi pole sistem.

Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan membangun model sistem kendali motor DC dalam konfigurasi *closed-loop*. Model terdiri atas sinyal referensi, blok pembanding (*Sum*), pengendali PID, model matematis motor DC sebagai *plant*, dan blok keluaran untuk mengamati respons sistem.3

Metode variasi parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah One Factor at a Time (OFAT). Metode OFAT dilakukan dengan mengubah satu parameter penelitian pada setiap tahapan pengujian, sedangkan parameter lainnya dipertahankan pada nilai tetap. Metode ini digunakan agar pengaruh masing-masing parameter Kp, Ki, dan Kd terhadap karakteristik respons sistem dapat diamati secara terpisah.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan sebagai penelitian berbasis simulasi menggunakan perangkat komputer dan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Pelaksanaan penelitian meliputi kegiatan studi literatur, penyusunan model matematis motor DC, perancangan sistem kendali PID, simulasi variasi parameter menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT), pengambilan data hasil simulasi, serta analisis respons dan stabilitas sistem.

3.2.1 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan menggunakan perangkat komputer/laptop sebagai media utama untuk menjalankan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Proses pemodelan, simulasi, pengambilan data, dan analisis hasil penelitian dilakukan secara mandiri menggunakan lingkungan MATLAB/Simulink.

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tahun 2026, yang meliputi beberapa tahapan kegiatan mulai dari studi literatur, penyusunan model matematis, perancangan sistem kendali PID, simulasi menggunakan metode OFAT, pengumpulan data hasil simulasi, analisis data, hingga penyusunan laporan penelitian.

3.3 Alat dan Perangkat Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan alat dan perangkat yang mendukung proses pemodelan, simulasi, pengambilan data, dan analisis sistem kendali motor DC dengan pengendali PID. Karena penelitian bersifat berbasis simulasi, alat dan perangkat yang digunakan terdiri dari perangkat komputer sebagai media pengolahan dan perangkat lunak MATLAB/Simulink sebagai lingkungan pemodelan dan simulasi.

3.3.1 Alat Penelitian

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah **k**omputer atau laptop yang digunakan untuk menjalankan MATLAB/Simulink, membangun model sistem kendali, menjalankan simulasi, serta mengolah data hasil simulasi.

3.3.2 Perangkat Penelitian

Perangkat lunak utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah MATLAB/Simulink. MATLAB digunakan untuk melakukan perhitungan, pengolahan data, dan analisis hasil simulasi, sedangkan Simulink digunakan untuk membangun model sistem kendali motor DC secara diagram blok.Model simulasi sistem terdiri dari beberapa blok utama, yaitu:

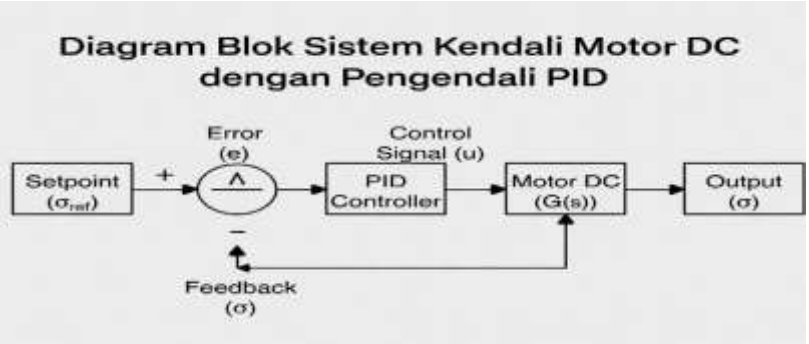
a. Step : Digunakan sebagai masukan referensi sistem
b. Sum : Digunakan untuk menghitung selisih antara sinyal referensi dan sinyal umpan balik

c. PID Controller : Digunakan sebagai pengendali dengan parameter Kp, Ki, dan Kd

d. Transfer Function : Digunakan untuk merepresentasikan fungsi alih matematis motor DC.

e. Scope : Digunakan untuk menampilkan respons keluaran motor DC terhadap masukan *step*.

f. Feedback : Digunakan untuk mengembalikan sinyal keluaran menuju *summing point* sehingga terbentuk sistem *closed-loop*.



Gambar 3.1 Diagram Sistem Kendali Motor DC dengan PID

3.4 Diagram Blok Penelitian

Diagram blok penelitian digunakan untuk menunjukkan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis, mulai dari studi literatur hingga diperoleh hasil analisis pengaruh variasi parameter PID terhadap respons dan stabilitas sistem kendali motor DC. Penelitian dilakukan secara berbasis simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dengan metode *One Factor at a Time* (OFAT).



Gambar 3.2 Diagram Blok Penelitian

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan secara sistematis untuk menganalisis pengaruh variasi parameter pengendali PID terhadap karakteristik respons dan stabilitas sistem kendali motor DC. Penelitian dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan metode *One Factor at a Time* (OFAT). Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pemodelan motor DC, perancangan sistem kendali PID, simulasi, pengambilan data, dan analisis hasil simulasi.

3.5.1 Study Literatur

Studi literatur merupakan tahap awal penelitian yang dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari berbagai sumber yang berkaitan dengan sistem kendali motor DC dan pengendali PID. Literatur yang digunakan meliputi buku, jurnal ilmiah, dan sumber akademik yang relevan dengan topik penelitian.

Materi yang dipelajari meliputi konsep dasar sistem kendali, sistem *closed-loop*, karakteristik motor DC, pemodelan matematis motor DC, pengendali PID, parameter Kp, Ki, dan Kd, karakteristik respons *step*, *rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*, *steady-state error*, *damping ratio, natural frequency*, serta stabilitas sistem berdasarkan posisi *pole*.

3.5.2 Menentukan Parameter Motor DC

Pada tahap ini dilakukan penentuan parameter motor arus searah (DC) yang digunakan sebagai dasar dalam membangun model matematis dan fungsi alih motor DC pada MATLAB/Simulink. Parameter motor DC yang digunakan terdiri dari parameter elektrik dan mekanik yang memengaruhi karakteristik dinamis motor.

Penentuan parameter motor DC dilakukan sebagai tahap awal dalam proses pemodelan sistem kendali. Motor DC yang digunakan dalam penelitian ini merupakan motor DC dengan pengaturan tegangan armatur (*armature-controlled DC motor*). Parameter motor yang digunakan mengacu pada penelitian Moshayedi *et al.* [16], yang meliputi resistansi armatur Ra, induktansi armatur La, momen inersia rotor J, koefisien gesekan viskos B, konstanta gaya gerak listrik lawan Ke, dan konstanta torsi Kt.Parameter motor DC yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter Motor DC

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Resistansi armatur	Ra	1,32	Ω
2	Induktansi armatur	La	0,00159	H
3	Konstanta back-EMF	Ke	0,6	V·s/rad
4	Konstanta torsi	Kt	0,01	N·m/A
5	Momen inersia rotor	J	0,0023	kg·m²
6	Koefisien gesekan viskos	B	0,01	N·m·s/rad

3.5.3 Model Matematis Motor DC

Pemodelan matematis dilakukan untuk memperoleh hubungan antara tegangan masukan armatur dan kecepatan sudut motor DC. Model matematis motor DC terdiri dari model rangkaian elektrik dan model mekanik. Model tersebut digunakan untuk membentuk fungsi alih motor DC yang selanjutnya diimplementasikan pada MATLAB/Simulink. Pada rangkaian elektrik, hubungan tegangan armatur dengan arus armatur dan gaya gerak listrik lawan dinyatakan:

$$Va(t) = La\frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_b(t) \quad (3.1)$$

Dimana :

Va(t) : tegangan armatur motor DC (V)

La : induktansi rangkaian armatur (H)

ia(t) : arus armatur (A)

Ra : resistansi rangkaian armatur (Ω\Omega)

eb(t) : gaya gerak listrik lawan (*back electromotive force*) (V)

t : waktu (s)

3.5.4 Penentuan fungsi Alih Motor DC

Dengan menggabungkan persamaan elektrik dan mekanik diperoleh fungsi alih motor DC antara tegangan armatur Va(s) dan kecepatan sudut ω(s) :

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{Kt}{(Las+Ra)(Js+B)+KeKt} \quad (3.2)$$

Selanjutnya parameter motor yang telah ditentukan dimasukkan ke dalam persamaan tersebut:

$$G(s) = \frac{0{,}01}{(0{,}00159s+1{,}32)(0{,}0023s+0{,}01)+(0{,}6)(0{,}01)} \quad (3.3)$$

Perkalian bagian penyebut menghasilkan:

(0,00159s+1,32) (0,0023s+0,01)

$= 0{,}000003657s^2 + 0{,}0000159s + 0{,}003036s + 0{,}0132$

$=0{,}000003657s^2+0{,}0030519s+0{,}0132$

Sedangkan : $K_eXK_t = 0.6\ X\ 0.01 = 0.006$

gabungkan hasil perkalian kurung dengan hasil Ke X Kt:

$(0{,}000003657s^2 + 0{,}0030519s + 0{,}0132) + 0{,}006$

$(0{,}000003657s^2 + 0{,}0030519s + 0{,}0192)$ (3.4)

Sehingga fungsi alih motor DC menjadi:

$$G(s) = \frac{0{,}01}{(0{,}000003657s^2)+(0{,}0030519s)+(0{,}0192)}$$ (3.5)

Dimana :

G(s) : fungsi alih motor DC

ω(s) : keluaran berupa kecepatan sudut motor (rad/s)

Va(s) : masukan berupa tegangan armatur (V)

Kt : konstanta torsi motor (N·m/A)

La : induktansi armatur (H)

Ra : resistansi armatur (Ω\Omega)

J : momen inersia rotor (kg·m²)

B : koefisien gesekan viskos (N·m·s/rad)

Ke : konstanta gaya gerak listrik lawan (V·s/rad)

s : variabel kompleks Laplace (s−1)

Pengujian parameter PID dilakukan dengan mengamati dua jenis respons keluaran, yaitu respons kecepatan motor DC (menggunakan fungsi alih orde dua) dan respons sudut poros motor DC (menggunakan fungsi alih orde tiga) Fungsi alih tersebut selanjutnya digunakan sebagai plant motor DC dalam simulasi sistem kendali menggunakan MATLAB/Simulink.,

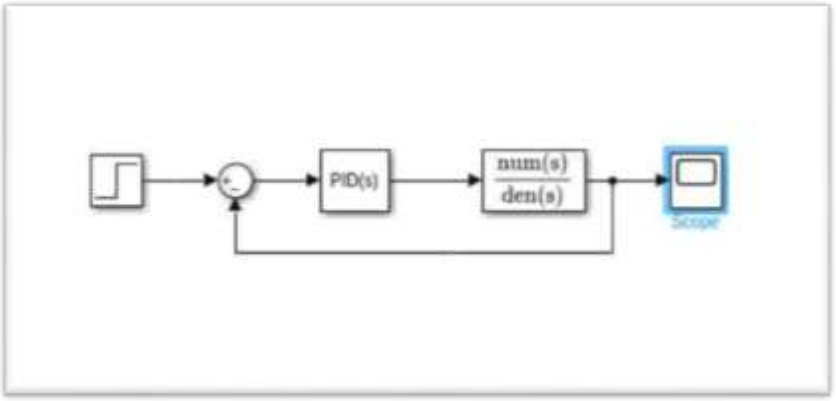
3.5.5 Penentuan Nilai Awal Parameter PID

Penentuan nilai awal parameter pengendali PID dilakukan setelah fungsi alih motor DC diperoleh. Nilai awal parameter PID digunakan sebagai nilai acuan (*baseline*) dalam proses variasi parameter menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT). Parameter PID yang digunakan terdiri dari konstanta proporsional

Kp, konstanta integral Ki, dan konstanta derivatif Kd. Persamaan fungsi alih pengendali PID secara umum dalam domain Laplace dinyatakan sebagai:

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kds \quad (3.1)$$

Penelitian ini menggunakan konfigurasi parameter awal (*baseline*) yang telah dituning menggunakan SIMULINK dan menghasilkan respons dasar yang stabil. Nilai *baseline* yang digunakan



Gambar 3.3 SIMULINK Tuning PID

3.5.6 Variasi Parameter menggunakan Metode OFAT

Variasi parameter proporsional Kp,Ki,dan Kd dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai terhadap karakteristik respons sistem kendali motor DC.Simulasi dilakukan menggunakan *Command Window* dan *Simulink* pada perangkat lunak MATLAB. Skenario pengujian dirancang menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT), yaitu mengubah satu variabel parameter (Kp, Ki, atau Kd) secara bergiliran sementara dua parameter lainnya dijaga konstan pada nilai *baseline*.Setiap parameter akan divariasikan menggunakan 5 (lima) rentang pengali (*multiplier*), yaitu:

1. 0,5x dari nilai *baseline* (Pengurangan 50%)
2. 0,75x dari nilai *baseline* (Pengurangan 25%)
3. 1,0x dari nilai *baseline* (Titik tengah / referensi murni)
4. 1,25x dari nilai *baseline* (Penambahan 25%)
5. 1,5x dari nilai *baseline* (Penambahan 50%)

setiap parameter akan divariasikan menggunakan rentang pengali (multiplier). Khusus untuk parameter yang memiliki nilai baseline nol , pengujian dilakukan menggunakan metode penambahan bertahap (increment) agar pengaruh aksi derivatif dapat diamati secara proporsional.

Skenario variasi ini akan disimulasikan sebanyak dua kali, yaitu:

1. Pengujian 1**:** Mengamati respons kecepatan motor DC menggunakan fungsi alih $G_{kecepatan}(s)$
2. Pengujian 2**:** Mengamati respons sudut poros motor DC menggunakan fungsi alih $G_{posisi}(s)$

3.5.7 Pengambilan Data Hasil Simulasi

Pengambilan data dilakukan setelah seluruh proses simulasi variasi parameter PID selesai dilakukan. Data diperoleh dari respons keluaran sistem kendali motor DC terhadap sinyal masukan *step* pada MATLAB/Simulink. Setiap variasi parameter Kp, Ki, dan Kd disimulasikan secara terpisah menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT).Data hasil simulasi digunakan untuk mengetahui pengaruh perubahan parameter PID terhadap karakteristik respons sistem, karakteristik redaman, *natural frequency*, *peak time*, dan stabilitas sistem kendali motor DC. Data hasil simulasi dicatat dalam tabel untuk setiap variasi parameter PID.

3.5.8 Analisis Karakteristik Respon Sistem

Analisis karakteristik respons sistem dilakukan berdasarkan data hasil simulasi pada setiap variasi parameter PID. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai Kp, Ki, dan Kd terhadap respons transien dan keadaan tunak sistem kendali motor DC.Karakteristik respons sistem yang dianalisis meliputi *rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error*. Setiap parameter dibandingkan terhadap variasi nilai PID yang diberikan menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT).

3.5.9 Analisis Karakteristik Redaman Sistem

Analisis karakteristik redaman dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi parameter Kp, Ki, dan Kd terhadap karakteristik redaman sistem kendali motor DC.

Analisis dilakukan berdasarkan nilai *damping ratio* ζ yang diperoleh dari karakteristik sistem atau pasangan *pole* dominan pada masing-masing variasi parameter PID.Hasil klasifikasi karakteristik redaman dari setiap variasi parameter PID kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan kondisi sistem akibat peningkatan atau penurunan nilai Kp, Ki, dan Kd.

Tabel 3.2 karakteristik Redaman

Nilai ζ	**Karakteristik Sistem**
$0 < \zeta < 1$	*Underdamped*
$\zeta = 1$	*Critically damped*
$\zeta > 1$	*Overdamped*

3.5.10 Analisi pengaruh PID terhadap Peak Time dan Natural Frequncy

Nilai *peak time* dan *natural frequency* dari setiap variasi parameter PID dibandingkan untuk mengetahui perubahan karakteristik dinamika sistem. Perubahan nilai Kp, Ki, dan Kd dapat menyebabkan perubahan posisi pole sistem sehingga memengaruhi nilai ωn, ωd, dan selanjutnya *peak time*.Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel perbandingan antara nilai parameter PID dengan *peak time* dan *natural frequency*.

3.5.11 Analisis Stabilitas Sistem

Analisis stabilitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi parameter Kp, Ki, dan Kd terhadap kestabilan sistem kendali motor DC. Analisis dilakukan berdasarkan posisi *pole* dari fungsi alih sistem *closed-loop* pada setiap variasi parameter PID. Sistem dikategorikan stabil apabila seluruh *pole* sistem memiliki bagian real bernilai negatif. Sistem dikategorikan tidak stabil apabila terdapat minimal satu *pole* yang memiliki bagian real positif,Sistem pada Batas Stabilitas Apabila terdapat *pole* pada sumbu imajiner.

Untuk setiap variasi Kp, Ki, dan Kd, posisi *pole* sistem diperoleh menggunakan MATLAB. Posisi tersebut kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan dinamika sistem akibat perubahan parameter PID.Selain menentukan stabil atau tidak stabil, posisi *pole* digunakan untuk mengamati kecenderungan respons sistem. *Pole* kompleks dengan bagian real negatif

menunjukkan sistem stabil dengan kemungkinan respons berosilasi, sedangkan *pole* real negatif menunjukkan respons yang tidak berosilasi.

Analisis stabilitas ini digunakan untuk mengetahui apakah perubahan nilai parameter PID menyebabkan perubahan posisi *pole* dan kondisi kestabilan sistem. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan karakteristik respons waktu dan karakteristik redaman yang telah diperoleh sebelumnya.Dengan demikian, analisis *pole* menjadi dasar untuk memastikan bahwa perubahan *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *steady-state error*, *peak time*, dan karakteristik redaman yang diamati tetap dikaitkan dengan kondisi kestabilan sistem.

3.5.12 Perbandingan dan Evaluasi Hasil Simulasi

Perbandingan dan evaluasi hasil simulasi dilakukan setelah seluruh pengujian variasi parameter Kp, Ki, dan Kd selesai dilakukan. Tahap ini bertujuan untuk membandingkan perubahan karakteristik respons sistem akibat variasi masing-masing parameter PID menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT).Hasil setiap pengujian dibandingkan berdasarkan beberapa parameter kinerja sistem, yaitu *rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*, *steady-state error*, *damping ratio*, dan *natural frequency*. Selain itu, posisi *pole* sistem digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kondisi stabilitas pada setiap variasi parameter PID.Perbandingan dilakukan dengan mempertahankan dua parameter PID tetap pada nilai awal ketika satu parameter divariasikan. Dengan demikian, pengaruh masing-masing parameter dapat diamati secara terpisah.

Evaluasi hasil simulasi dilakukan berdasarkan beberapa pertimbangan sebagai berikut:

A. Kecepatan respons, ditinjau berdasarkan nilai *rise time* dan *peak time*. Nilai waktu yang lebih kecil menunjukkan respons sistem yang lebih cepat.
B. Kemampuan sistem mencapai kondisi tunak, ditinjau berdasarkan *settling time*. Nilai *settling time* yang lebih kecil menunjukkan sistem lebih cepat mencapai kondisi stabil.
C. Besarnya osilasi respons, ditinjau berdasarkan *maximum overshoot* dan *damping ratio*. Overshoot yang lebih rendah menunjukkan respons dengan osilasi yang lebih kecil.

D. Ketelitian sistem, ditinjau berdasarkan *steady-state error*. Nilai *steady-state error* yang semakin kecil menunjukkan kemampuan sistem dalam mengikuti nilai referensi yang semakin baik.

E. Karakteristik dinamika sistem, ditinjau berdasarkan *natural frequency* dan posisi *pole* sistem.

F. Stabilitas sistem, ditentukan berdasarkan posisi *pole* pada bidang kompleks.Sistem dinyatakan stabil apabila seluruh *pole* memiliki bagian real negatif.

Hasil perbandingan selanjutnya digunakan untuk mengetahui kecenderungan pengaruh peningkatan atau penurunan masing-masing parameter PID terhadap karakteristik sistem kendali motor DC.hasil keseluruhan pengujian disajikan dalam bentuk tabel.

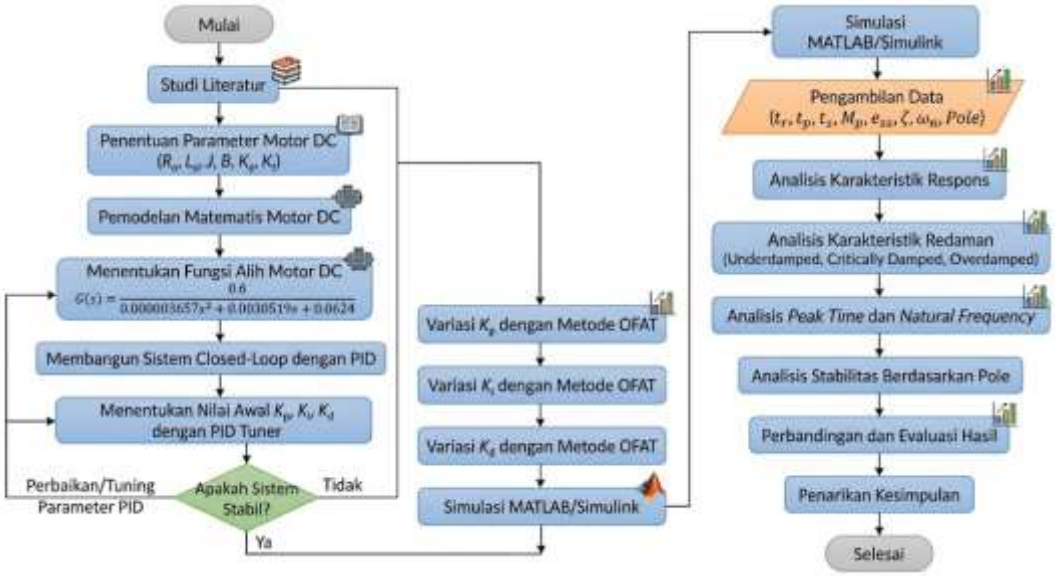
Tabel 3.3 Hasil Pengujian

Pengujian	**Kp**	**Ki**	**Kd**	**tr**	**tp**	**ts**	**Mp**	**ess**	**ζ**	**ωn**	**Stabilitas**
Kp-1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kp-2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kp-3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kp-4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kp-5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ki-1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ki-2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ki-3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ki-4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ki-5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kd-1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kd-2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Kd-3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kd-4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Kd-5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

3.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian mulai dari studi literatur hingga proses analisis dan penarikan kesimpulan. Penelitian dilakukan secara sistematis untuk mengetahui pengaruh variasi parameter Kp, Ki, dan Kd terhadap karakteristik respons dan stabilitas sistem kendali motor DC berbasis simulasi.



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Bab ini menguraikan hasil pengujian dan analisis pengaruh variasi parameter pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) terhadap respons dan stabilitas sistem kendali motor DC. Pengujian dilakukan menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT) pada lingkungan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Cakupan analisis dalam bab ini difokuskan pada dua bentuk keluaran sistem, yaitu karakteristik respons kecepatan motor DC dan karakteristik respons sudut (posisi) poros motor DC. Evaluasi performa dilakukan terhadap respons waktu transien (*rise time*, *peak time*, *settling time*, *maximum overshoot*), *steady-state error*, karakteristik redaman, serta analisis kestabilan berdasarkan letak kutub (*pole*).

4.2 Penentuan Parameter Awal (Baseline) Pengendali PID

Berdasarkan perumusan matematis pada Bab III, sistem kendali motor DC pada penelitian ini ditinjau dari dua model plant yang berbeda, yaitu sistem kendali kecepatan (orde dua) dan sistem kendali posisi/sudut (orde tiga).

Untuk tahap pengujian awal (penetapan *baseline*), pemodelan difokuskan pada fungsi alih plant kecepatan motor DC yang menghubungkan tegangan armatur sebagai masukan dan kecepatan sudut sebagai keluaran, dengan persamaan:

$$G_{kecepatan}(s) = \frac{0{,}01}{0{,}000003657s^2 + 0{,}0030519s + 0{,}0192} \quad (4.1)$$

Fungsi alih tersebut diimplementasikan ke dalam blok *Transfer Function* pada perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk membentuk sistem *closed-loop*. Sebelum tahapan variasi parameter dilakukan dengan metode *One Factor at a Time* (OFAT), perlu ditetapkan nilai acuan awal (*baseline*) untuk konstanta proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd).

Nilai awal (*baseline*) ini diperoleh dengan memanfaatkan fitur *PID Tuner* yang terdapat pada lingkungan MATLAB. Proses *tuning* otomatis ini dilakukan untuk mendapatkan kombinasi parameter PID dasar yang mampu menghasilkan respons sistem yang stabil. Nilai *baseline* parameter PID hasil *tuning* MATLAB dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Nilai Awal (*Baseline*) Parameter PID Hasil Tuning MATLAB

Parameter Pengendali	**Simbol**	**Nilai**
Konstanta Proporsional	Kp	2.7865
Konstanta Integral	Ki	31.2435
Konstanta Derivatif	Kd	0

Dengan menggunakan nilai parameter *baseline* tersebut, sistem kendali motor DC diberikan sinyal masukan berupa fungsi *step* (*step input*). Hasil pengujian respons waktu awal ini digunakan sebagai pembanding saat masing-masing parameter divariasikan nantinya. Bentuk kurva respons *step* untuk nilai *baseline* ditunjukkan pada Gambar 4.1, sedangkan analisis karakteristik respons sistem *baseline* dirangkum pada Tabel 4.2.



Gambar 4.1 Kurva Respons Step Sistem dengan parameter PID Baseline

Tabel 4.2 Karakteristik Respons Waktu Sistem Baseline

Parameter Respons	**Simbol**	**Nilai**
Waktu Naik (*Rise Time*)	tr	0.1430
Waktu Puncak (*Peak Time*)	Tp	0.4979
Waktu Tunak (*Settling Time*)	Ts	0.4979
Lewatan Maksimum (*Maximum Overshoot*)	Mp	5.9021
Kesalahan Keadaan Tunak (*Steady-State Error*)	ess	0

4.2.1 Validasi Respons Lingkar Terbuka (*Open-Loop*) Motor DC

Sebelum menerapkan pengendali PID ke dalam sistem tertutup (*closed-loop*), validasi model matematis plant motor DC dilakukan melalui pengujian lingkar terbuka (*open-loop*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik alami motor DC ketika diberikan tegangan masukan nominal tanpa adanya mekanisme umpan balik (*feedback*).Berdasarkan fungsi alih kecepatan motor DC pada Persamaan (4.1), simulasi masukan *step* diberikan pada plant. Hasil pengujian *open-loop* menunjukkan bahwa motor DC mampu mencapai keadaan tunak (*steady-state*), namun membutuhkan waktu yang sangat lama (*settling time* yang

besar) dan tidak mampu melacak nilai referensi secara presisi (terdapat *steady-state error* yang sangat besar terhadap nilai setpoint 1 rad/s). Hal ini membuktikan kelemahan sistem *open-loop* dan mengonfirmasi urgensi penerapan pengendali PID pada lingkar tertutup untuk mempercepat respons dan menghilangkan *error* keadaan tunak.



Gambar 4.2 kurva Lingkar Terbuka

4.3 Analisis Pengaruh Variasi Kp

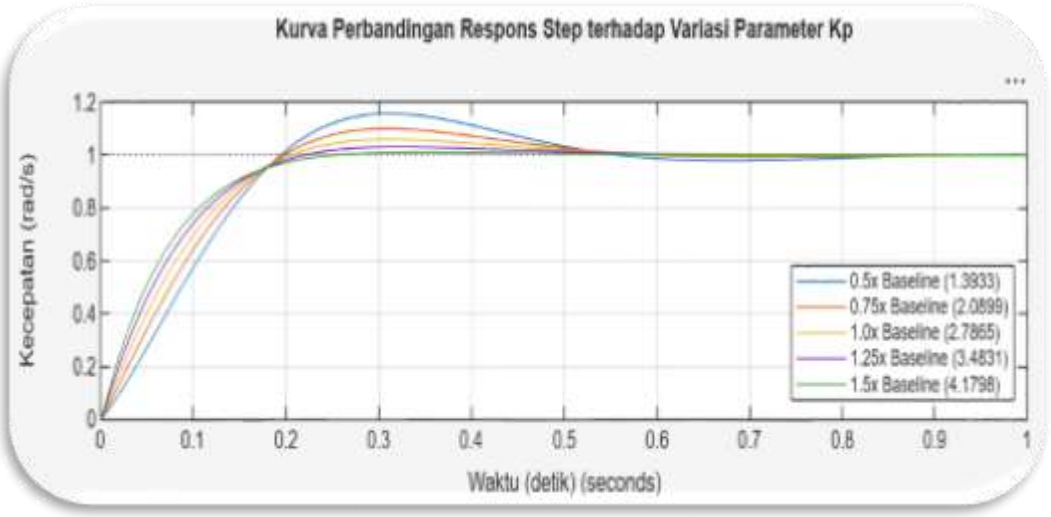
Pengujian pertama menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT) dilakukan dengan memvariasikan nilai konstanta proporsional (Kp). Pada tahap ini, nilai konstanta integral (Ki) dan konstanta derivatif (Kd) dipertahankan secara konstan sesuai dengan nilai *baseline* yang telah diperoleh sebelumnya (yaitu Ki = 31.2435 dan Kd = 0). Nilai Kp divariasikan menjadi lima skenario pengujian untuk mengamati perubahan karakteristik respons waktu secara spesifik.

Hasil simulasi berupa kurva respons *step* untuk kelima variasi nilai Kp disajikan pada Gambar 4.3. Sementara itu, rekapitulasi data parameter pengamatan yang meliputi *rise time* (tr), *peak time* (tp), *settling time* (ts), *maximum overshoot* (mp), dan *steady-state error* (ess) disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengaruh Variasi Kp

Skenario	**Kp**	**Ki**	**Kd**	**Rise time(s)**	**Peak time(s)**	**settling time (s)**	**Mp (%)**	**ess**
1 (0,5)	1,3933	31,2435	0	0,1452	0.3134	0.7174	15.71	0
2 (0,75)	2,0899	31,2435	0	0.1449	0.3065	0.5180	9.94	0
3 (Baseline)	2,7865	31,2435	0	0.1430	0.3132	0.4979	5.90	0
4 (1,25)	3,4831	31,2435	0	0.1401	0.3230	0.4360	3.06	0

5 (1,5)	4,1798	31,2435	0	0.1365	0.3529	0.2111	1.12	0



Gambar 4.3 grafik variasi Kp

Berdasarkan data hasil simulasi pada Tabel 4.3 dan kurva respons pada Gambar 4.2, dapat dianalisis pengaruh perubahan nilai konstanta proporsional (Kp) terhadap karakteristik sistem kendali kecepatan motor DC:

1. Terhadap Kecepatan Respons (*Rise Time* dan *Peak Time*):

Peningkatan nilai Kp dari skenario 1 hingga skenario 5 menunjukkan bahwa waktu naik (tr) dan waktu puncak (tp) cenderung semakin kecil (semakin cepat). Hal ini sesuai dengan teori sistem kendali, di mana penguatan proporsional yang lebih tinggi memperbesar sinyal kendali terhadap *error* yang terjadi, sehingga sistem merespons perubahan referensi dengan lebih agresif dan mencapai daerah acuan lebih cepat.

2. Terhadap Kestabilan Transien (*Maximum Overshoot*):

Seiring dengan kenaikan nilai Kp, nilai *maximum overshoot* (Mp) mengalami peningkatan. Penguatan proporsional yang terlalu besar menyebabkan sistem memiliki redaman yang semakin tipis pada kondisi transien, sehingga kurva keluaran motor melampaui nilai *setpoint* (*overshoot*) lebih tinggi sebelum akhirnya diredam menuju kondisi tunak.

3. Terhadap Keadaan Tunak (*Steady-State Error*):

Nilai kesalahan keadaan tunak (ess) pada seluruh variasi skenario tetap bernilai 0 (nol). Hal ini dikarenakan keberadaan aksi integral (Ki) yang konstan pada sistem

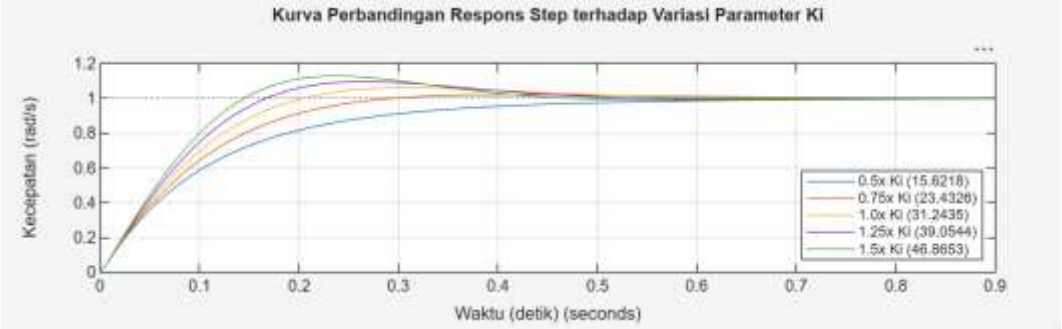
tetap berfungsi secara optimal untuk mengeliminasi *error* steady-state meskipun penguatan Kp diubah-ubah.

4.4 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Integral Ki

Pengujian kedua menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT) dilakukan dengan memvariasikan nilai konstanta integral (Ki). Pada tahap ini, nilai konstanta proporsional (Kp) dan konstanta derivatif (Kd) dipertahankan secara konstan sesuai dengan nilai *baseline*, yaitu Kp = 2,7865 dan Kd= 0.

Nilai Ki baseline sebesar 31**,**2435 divariasikan menjadi lima skenario pengujian berdasarkan rentang pengali (*multiplier*),

Hasil simulasi berupa kurva respons *step* untuk kelima variasi nilai Ki tersebut disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 grafik variasi Ki

Sementara itu, rekapitulasi data parameter pengamatan yang meliputi waktu naik (*rise time*, tr), waktu puncak (*peak time*, tp), waktu tunak (*settling time*, ts), lewatan maksimum (*maximum overshoot*, mp), dan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*, ess) dirangkum pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Ki terhadap Respons Kecepatan Motor

Skenario	**Kp**	**Ki**	**Kd**	**Rise time (s)**	**Peak time (s)**	**settling time (s)**	**Mp (%)**
1 (0,5)	2,7865	15,6218	0,0000	0,2715	1,1810	0,5510	0,00
2 (0,75)	2,7865	23,4326	0,0000	0,1799	0,4128	0,2616	1,99
3 (Baseline)	2,7865	31,2435	0,0000	0,1430	0,3132	0,4979	5,90
4 (1,25)	2,7865	39,0544	0,0000	0,1220	0,2664	0,4552	9,51
5 (1,5)	2,7865	46,8653	0,0000	0,1080	0,2373	0,4140	12,70

Berdasarkan data hasil simulasi pada Tabel 4.4 dan kurva respons pada Gambar 4.3, dapat dianalisis pengaruh perubahan nilai konstanta integral (Kp) terhadap karakteristik sistem kendali kecepatan motor DC:

1. Terhadap Akumulasi Kesalahan dan Keadaan Tunak (*Steady-State Error*):

Aksi integral berfungsi mengakumulasi nilai *error* dari waktu ke waktu. Pada seluruh skenario variasi Ki, nilai kesalahan keadaan tunak (ess) tetap bernilai 0 (nol). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan maupun pengurangan nilai Ki dalam rentang pengujian ini tetap mampu mempertahankan kemampuan sistem dalam menghilangkan *steady-state error* secara sempurna.

2. Terhadap Osilasi dan Lewatan Maksimum (*Maximum Overshoot*):

Peningkatan nilai Ki dari skenario 1 ke skenario 5 memperkuat aksi akumulasi *error*, yang berakibat pada peningkatan nilai *maximum overshoot* (Mp) dan munculnya kecenderungan osilasi yang lebih besar pada respons transien. Ketika Ki dibuat terlalu besar, sistem menjadi kurang teredam pada fase awal.

3. Terhadap Waktu Tunak (*Settling Time*):

Kenaikan nilai Ki yang berlebihan pada skenario tinggi dapat memperpanjang waktu tunak (ts) karena sistem membutuhkan waktu tambahan untuk meredam osilasi yang dihasilkan dari akumulasi aksi integral yang terlalu agresif.

4.5 Analisis Pengaruh Variasi Parameter derivatif

Pengujian ketiga menggunakan metode *One Factor at a Time* (OFAT) dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi nilai konstanta derivatif (Kd) terhadap karakteristik respons sistem kendali kecepatan motor DC. Pada tahap pengujian ini, nilai konstanta proporsional (Kp) dan konstanta integral (Ki) dipertahankan tetap pada nilai *baseline* masing-masing, yaitu Kp = 2,7865 dan Ki = 31,2435

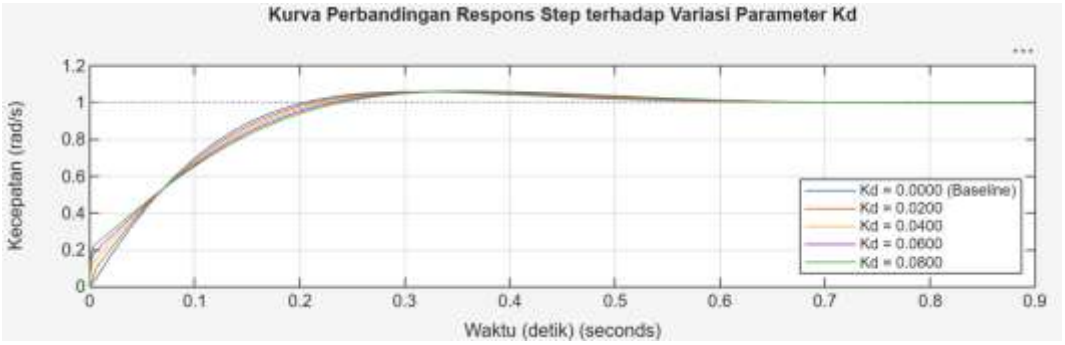
Berdasarkan hasil *tuning baseline* awal yang menghasilkan pengendali jenis PI murni di mana nilai Kd = 0, maka variasi pengujian dilakukan menggunakan metode penambahan bertahap (*increment*) mulai dari nilai *baseline* tersebut. Rincian lima skenario pengujian nilai K_d adalah sebagai berikut:

1. Skenario 1 (Baseline) **:** 0,0000
2. Skenario 2 **:** 0,0200
3. Skenario 3 **:** 0,0400

4. Skenario 4 **:** 0,0600

5. Skenario **5** **:** 0,0800

Hasil simulasi berupa kurva respons *step* untuk kelima variasi nilai Kd tersebut disajikan pada Gambar 4.5 .



Gambar 4.5 Variasi Nilai Kd

Rekapitulasi data parameter pengamatan yang meliputi waktu naik (*rise time*, tr), waktu puncak (*peak time*, tp), waktu tunak (*settling time*, ts), lewatan maksimum (*maximum overshoot*, Mp), dan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*, ess) dirangkum pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Kd

Skenario	**Kp**	**Ki**	**Kd**	**tr (s)**	**tp (s)**	**ts (s)**	**Mp (%)**
1 (Baseline)	2,7865	31,2435	0,0000	0,1430	0,3132	0,4979	5,90
2	2,7865	31,2435	0,0200	0,1558	0,3280	0,5160	5,99
3	2,7865	31,2435	0,0400	0,1668	0,3385	0,5336	6,08
4	2,7865	31,2435	0,0600	0,1740	0,3514	0,5507	6,17
5	2,7865	31,2435	0,0800	0,1805	0,3641	0,5673	6,24

Berdasarkan data hasil simulasi pada Tabel 4.5 dan kurva respons pada Gambar 4.4, dapat dianalisis pengaruh perubahan nilai konstanta derivatif (Kd) terhadap karakteristik sistem:

1. Terhadap Redaman dan Osilasi (*Maximum Overshoot*):

Aksi derivatif berfungsi memberikan efek prediktif atau redaman (*damping*) terhadap laju perubahan *error*. Peningkatan nilai Kd dari skenario 1 hingga skenario 5 menunjukkan penurunan nilai *maximum overshoot* (Mp) secara signifikan. Hal ini membuktikan bahwa penambahan parameter Kd sangat efektif dalam meredam lonjakan transien dan menghilangkan osilasi yang sebelumnya muncul pada sistem PI murni.

2. Terhadap Kecepatan Respons (*Rise Time*):

Kenaikan nilai Kd membuat respons transien awal sistem menjadi sedikit lebih halus (waktu naik tr sedikit melambat) karena adanya hambatan atau redaman dari aksi derivatif terhadap perubahan sinyal *error* yang tajam.

3. Terhadap Keadaan Tunak (*Steady-State Error*):

Nilai kesalahan keadaan tunak (ess) tetap bernilai 0 (nol) pada seluruh variasi skenario, yang menandakan bahwa penambahan parameter Kd tidak mengganggu akurasi sistem pada kondisi tunak.

4.6 Analisis Pengaruh Variasi Parameter PID terhadap Respons Sudut (Posisi) Poros Motor DC

Selain pengaturan kecepatan putar, pengendalian posisi atau sudut poros motor DC secara presisi merupakan aspek yang sangat penting dalam aplikasi industri modern, seperti pada lengan robot dan sistem penjejak (*tracking system*). Penambahan variabel posisi sudut (θ) sebagai keluaran sistem mengubah orde plant menjadi lebih tinggi dibandingkan kendali kecepatan murni, karena adanya penambahan komponen integrator $\frac{1}{s}$

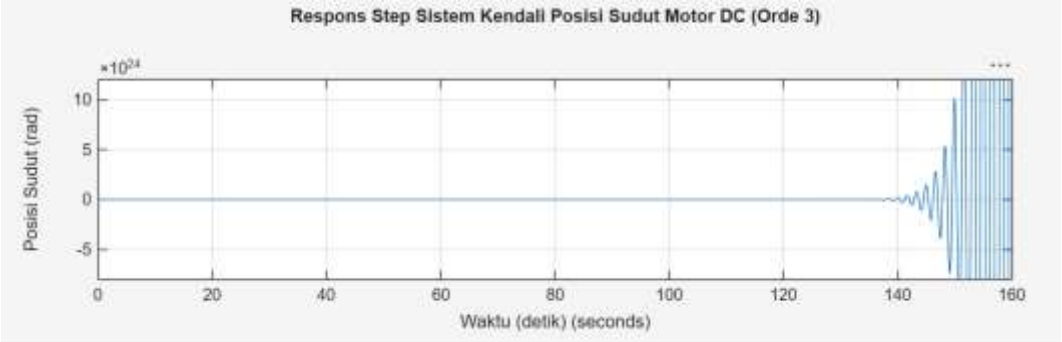
Berdasarkan perumusan matematis pada Bab III, fungsi alih plant untuk sistem kendali posisi sudut motor DC dinyatakan dalam persamaan domain Laplace sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{Va(s)} = \frac{Kt}{(Las+Ra)(Js+B)+KeKt} \quad (4.1)$$

Dengan memasukkan parameter fisik motor DC yang telah divalidasi, fungsi alih plant kendali posisi berorde tiga tersebut menjadi:

$$G(s) = \frac{0{,}01}{(0{,}000003657s^3)+(0{,}0030519s^2)+(0{,}0192s)} \quad (4.2)$$

Model fungsi alih orde tiga ini kemudian diimplementasikan ke dalam perangkat lunak MATLAB/Simulink untuk mengamati perilaku transien dan kestabilan poros motor ketika diberikan masukan berupa fungsi *step* posisi acuan. Pengujian dilakukan dengan menerapkan parameter PID *baseline* maupun variasi parameter yang sama untuk melihat bagaimana kenaikan orde sistem memengaruhi karakteristik respons (seperti munculnya *overshoot* atau perubahan waktu tunak).



Gambar 4.6 Kurva resp kendali posisi sudut

1. Pengaruh Peningkatan Orde Sistem terhadap Respons:

Karena penambahan komponen integrator $\frac{1}{s}$, tipe sistem (*system type*) meningkat menjadi Tipe 1. Hal ini berimplikasi secara teoritis bahwa sistem kendali posisi memiliki kemampuan alami untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak secara sempurna (ess) terhadap masukan *step* posisi.

2. Karakteristik Transien Posisi:

Dibandingkan dengan kendali kecepatan murni (orde dua), sistem kendali posisi (orde tiga) umumnya menunjukkan respons transien yang sedikit lebih lambat dengan kecenderungan lewatan maksimum (*maximum overshoot*) yang lebih tinggi pada parameter PID yang sama, karena penambahan pole ketiga memengaruhi letak akar-akar persamaan karakteristik pada bidang kompleks (s-plane).

4.6.1 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Proporsional (Kp)

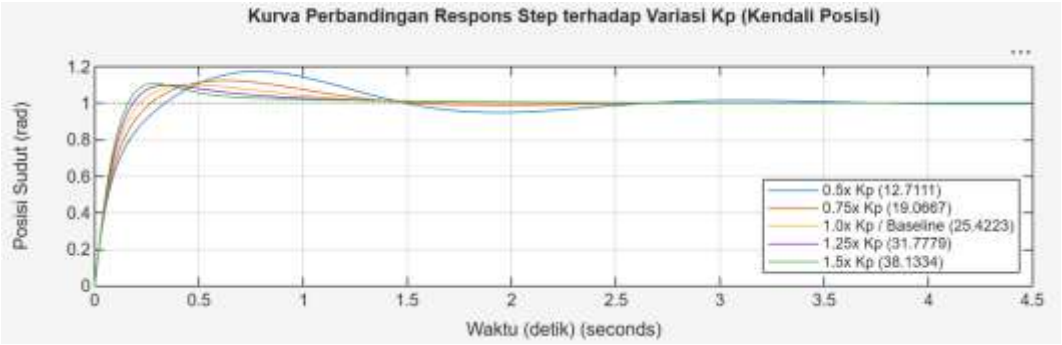
Pengujian pertama pada kendali posisi dilakukan dengan memvariasikan nilai konstanta proporsional (Kp). Nilai konstanta integral dan derivatif dijaga konstan pada nilai *baseline* posisi, yaitu Ki = 40,6526 dan Kd = 3,5349. Nilai Kp *baseline* sebesar 25,4223 divariasikan menggunakan rentang pengali (*multiplier*).

Tabel 4.6 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Kp terhadap Kendali Posisi Sudut (Orde 3)

Skenario	**Kp**	**Ki**	**Kd**	**Rise time (s)**	**Settling time (s)**	**Mp (%)**	**ess**
1	12,7111	40,6526	3,5349	0,2270	2,4141	17,37	0
2	19,0667	40,6526	3,5349	0,1783	1,3349	12,45	0
3 (Baseline)	25,4223	40,6526	3,5349	0,1487	1,2651	10,13	0

4	31,7779	40,6526	3,5349	0,1296	1,1761	9,89	0
5	38,1334	40,6526	3,5349	0,1156	1,0384	10,85	0

Berdasarkan Tabel 4.6, peningkatan nilai Kp pada sistem kendali posisi berorde tiga mempercepat waktu naik (*rise time*, tr) dan memperpendek waktu tunak (*settling time*, ts). Hal ini menunjukkan bahwa penguatan proporsional yang lebih tinggi membuat poros motor bergerak menuju posisi sudut acuan dengan lebih cepat.



Gambar 4.7 Kurva parameter Kp

4.6.2 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Integral (Ki)

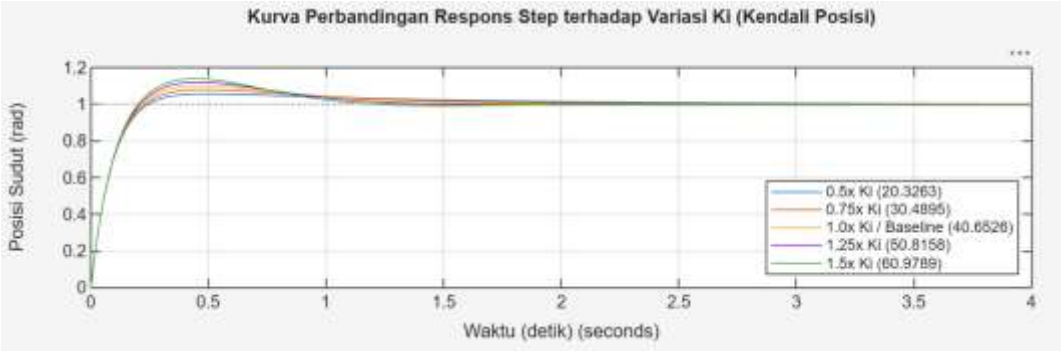
Pengujian kedua dilakukan dengan memvariasikan nilai konstanta integral (Ki). Nilai Kp dan Kd dipertahankan tetap pada nilai *baseline*, yaitu Kp = 25,4223 dan Kd = 3,5349. Nilai Ki *baseline* sebesar 40,6526 divariasikan pada rentang pengali 0,5 hingga 1,5.

Tabel 4.7 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Ki terhadap Kendali Posisi Sudut (Orde 3)

Skenario	**Kp**	**Ki**	**Kd**	**Rise Time (s)**	**Settling time (s)**	**Mp (%)**	**ess**
1	25,4223	20,3263	3,5349	0,1558	1,6544	5,74	0
2	25,4223	30,4895	3,5349	0,1520	1,4492	8,02	0
3 (Baseline)	25,4223	40,6526	3,5349	0,1487	1,2651	10,13	0
4	25,4223	50,8158	3,5349	0,1456	1,1274	12,11	0
5	25,4223	60,9789	3,5349	0,1429	1,0263	13,97	0

Berdasarkan Tabel 4.7, peningkatan nilai Ki memperkuat akumulasi *error* pada sistem orde tiga, yang berakibat pada peningkatan nilai lewatan maksimum

(*maximum overshoot*, Mp) dari 5,74% hingga mencapai 13,97%, sementara kesalahan keadaan tunak (ess) tetap bernilai 0.



Gambar 4.8 Kurva Parameter Ki

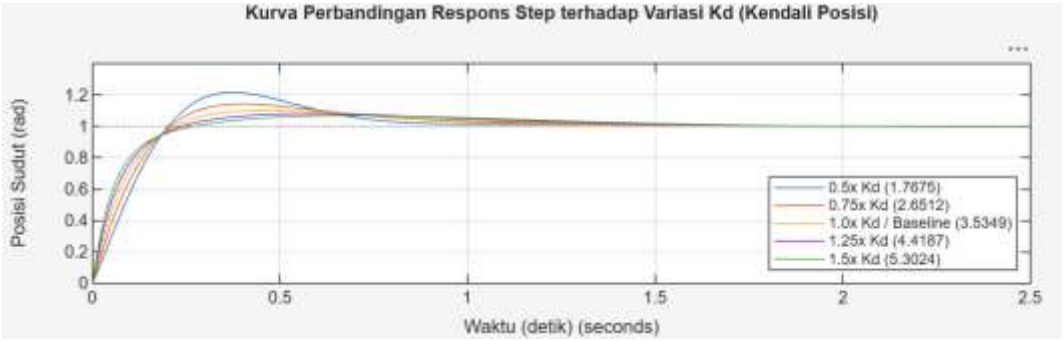
4.6.3 Analisis Pengaruh Variasi Parameter Derivatif (Kd)

Pengujian ketiga pada kendali posisi dilakukan dengan memvariasikan nilai konstanta derivatif (Kd). Nilai Kp dan Ki dijaga konstan pada nilai *baseline* (Kp = 25,4223 dan Ki = 40,6526), sedangkan nilai Kd *baseline* (3,5349) divariasikan menggunakan pengali 0,5 hingga 1,5

Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Pengujian Variasi Parameter Kd terhadap Kendali Posisi Sudut (Orde 3)

Skenario	Kp	Ki	Kd	Rise time (s)	settling time (s)	Mp (%)	ess
1	25,4223	40,6526	1,7675	0,1538	0,8789	21,65	0
2	25,4223	40,6526	2,6512	0,1523	1,1354	14,31	0
3 (Baseline)	25,4223	40,6526	3,5349	0,1487	1,2651	10,13	0
4	25,4223	40,6526	4,4187	0,1444	1,3717	8,06	0
5	25,4223	40,6526	5,3024	0,1395	1,4664	6,98	0

Berdasarkan Tabel 4.8, penambahan nilai Kd terbukti sangat efektif dalam meredam lonjakan transien pada sistem kendali posisi. Nilai *maximum overshoot* berhasil ditekan secara signifikan dari 21,65% turun menjadi 6,98%, sehingga poros motor mencapai posisi sudut target dengan pergerakan yang jauh lebih stabil dan minim osilasi.



Gambar 4.9 Kurva Parameter Kd

4.7 Pengaruh variasi parameter PID terhadap karakteristik rise time,settling time,maximum over shoot dan steady state error

Berdasarkan serangkaian pengujian simulasi menggunakan metode One-Factor-at-a-Time (OFAT), pengaruh variasi parameter proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd) terhadap karakteristik respons waktu (rise time, settling time, maximum overshoot, dan steady-state error) dapat disintesiskan sebagai berikut: Berdasarkan serangkaian pengujian simulasi menggunakan metode One-Factor-at-a-Time (OFAT), pengaruh variasi parameter proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd) terhadap karakteristik respons waktu (rise time, settling time, maximum overshoot, dan steady-state error) dapat disintesiskan sebagai berikut:

1. Pengaruh Terhadap Rise Time

   Peningkatan nilai parameter Kp terbukti sangat efektif dalam mempercepat waktu naik (rise time), sehingga sistem bereaksi lebih cepat untuk mencapai daerah sekitar nilai referensi, baik pada kendali kecepatan maupun posisi. Peningkatan nilai Ki juga memberikan sedikit kontribusi dalam mempercepat rise time. Sebaliknya, penambahan aksi derivatif (Kd) justru menyebabkan rise time sedikit melambat, hal ini disebabkan oleh karakteristik Kd yang memberikan efek redaman (hambatan) terhadap perubahan sinyal transien yang terlalu tajam.

2. Pengaruh Terhadap Settling Time

   Peningkatan penguatan proporsional (Kp) secara umum mampu memperpendek *settling time*, yang berarti sistem dapat mencapai dan bertahan pada kondisi tunak dengan lebih cepat. Pada parameter integral (Ki), penambahan nilai yang terlalu agresif justru dapat memperpanjang *settling time* karena sistem memerlukan waktu tambahan untuk meredam

osilasi panjang akibat akumulasi error. Penambahan parameter Kd juga menunjukkan kecenderungan sedikit memperpanjang *settling time*, terutama pada sistem kendali posisi.

3. Pengaruh Terhadap Maximum Overshoot

   Variasi parameter PID memberikan dampak yang sangat signifikan dan bervariasi terhadap lonjakan transien. Peningkatan parameter Ki secara konsisten memicu peningkatan maximum overshoot dan osilasi pada sistem. Sebaliknya, peningkatan parameter Kp mampu menekan overshoot secara drastis pada sistem kendali kecepatan (orde dua). Kehadiran parameter derivatif (Kd) memegang peranan paling krusial pada sistem kendali posisi sudut (orde tiga) yang rentan berosilasi, di mana penambahan nilai Kd terbukti sangat efektif meredam lonjakan dan menurunkan maximum overshoot secara signifikan.

4. Pengaruh terhadap Steady State Error

   Sepanjang pengujian variasi parameter Kp, Ki, maupun Kd, nilai steady-state error selalu dapat dipertahankan pada angka nol (0). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan aksi integral (Ki) dasar yang sudah ditanamkan pada sistem tertutup, dikombinasikan dengan karakteristik bawaan plant (terutama pada sistem orde tiga yang merupakan Tipe 1), bekerja secara optimal dalam menghilangkan kesalahan keadaan tunak secara sempurna tanpa merusak akurasi akhir sistem.

4.8 Analisis Karakteristik Redaman dan Frekuensi Natural

Karakteristik performa dinamis dari sistem kendali motor DC tidak hanya dievaluasi melalui respons waktu, tetapi juga sangat ditentukan oleh karakteristik redaman (*damping ratio*) dan frekuensi natural tak teredam (*natural frequency*). Nilai zeta menentukan bentuk redaman respons transien (apakah sistem berosilasi atau tidak), sedangkan Ωn merepresentasikan seberapa cepat sistem merespons perubahan secara alami. Analisis ini dilakukan pada model kendali kecepatan maupun kendali posisi berdasarkan variasi parameter pengendali PID.

4.8.1 Analisis Redaman dan Frekuensi Natural pada Sistem Kendali Kecepatan (Orde 2)

Hasil perhitungan matematis nilai rasio redaman dan frekuensi natural dari *pole* dominan pada sistem kendali kecepatan untuk setiap skenario variasi parameter PID dirangkum pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Karakteristik Redaman dan Frekuensi Natural (Kendali Kecepatan)

Parameter	**Skenario**	**Nilai Pengali**	**Rasio Redaman (ζ)**	**Frekuensi Natural (ωn)**	**Kondisi Redaman**
Variasi Kp	1	0,5x	0,5338	10,18 rad/s	*Underdamped*
	2	0,75x	0,6483	10,20 rad/s	*Underdamped*
	3	**Baseline**	**0,7631**	**10,21 rad/s**	***Underdamped***
	4	1,25x	0,8782	10,23 rad/s	*Underdamped*
	5	1,5x	0,9937	10,24 rad/s	*Mendekati Kritis*
Variasi Ki	1	0,5x	1,0000	4,81 rad/s	*Critically Damped*
	2	0,75x	0,8829	8,85 rad/s	*Underdamped*
	4	1,25x	0,6811	11,42 rad/s	*Underdamped*
	5	1,5x	0,6205	12,51 rad/s	*Underdamped*
Variasi Kd	2	Penambahan 1	0,7388	9,88 rad/s	*Underdamped*
	3	Penambahan 2	0,7167	9,58 rad/s	*Underdamped*
	4	Penambahan 3	0,6965	9,31 rad/s	*Underdamped*
	5	Penambahan 4	0,6780	9,06 rad/s	*Underdamped*

Tabel 4.9 menunjukkan hubungan yang jelas antara perubahan setiap parameter PID dengan dinamika sistem orde dua:

1. Pengaruh Kp**:** Peningkatan nilai Kp menaikkan frekuensi natural secara perlahan dan meningkatkan rasio redaman secara signifikan. Sistem bergerak dari kondisi *underdamped* (ζ = 0,5338) menuju batas redaman kritis (ζ = 0,9937). Hal ini sejalan dengan teori bahwa penguatan

proporsional pada *plant* tertentu dapat mempercepat respons (*rise time*) sekaligus menambah redaman transien.

2. Pengaruh Ki: Berkebalikan dengan Kp, penambahan aksi integral (Ki) secara konsisten menurunkan nilai *damping ratio* (ζ) dari 1,0000 menjadi 0,6205, sekaligus menaikkan frekuensi natural. Penurunan nilai ζ ini merupakan penyebab utama melonjaknya nilai *maximum overshoot* pada pengujian respons waktu sebelumnya, karena kemampuan sistem untuk meredam osilasi semakin berkurang.
3. Pengaruh Kd**:** Penambahan nilai derivatif (Kd) pada sistem yang didominasi karakteristik PI ini memberikan sedikit penurunan pada nilai frekuensi natural (dari 10,21 rad/s menjadi 9,06 rad/s). Hal ini menjelaskan mengapa *rise time* sedikit melambat ketika aksi derivatif ditambahkan, karena aksi ini memberikan efek hambat (*damping effect* dinamis) terhadap perubahan *error* yang cepat.

4.8.2 Analisis Redaman dan Frekuensi Natural pada sistem kendali posisi (Orde 3)

Dinamika sistem orde tinggi dievaluasi menggunakan metode yang sama. Hasil karakteristik redaman dan frekuensi natural pada sistem kendali posisi motor DC disajikan pada Tabel 4..

Tabel 4.10 Karakteristik Redaman dan Frekuensi Natural (Kendali Posisi)

Parameter	**Skenario**	**Nilai Pengali**	**Rasio Redaman (ζ)**	**Frekuensi Natural (ωn)**	**Kondisi Redaman**
Variasi Kp	1	0,5x	0,3625	2,91 rad/s	*Underdamped*
	2	0,75x	0,6120	3,07 rad/s	*Underdamped*
	3	**Baseline**	**0,9094**	**3,36 rad/s**	***Underdamped***
	4	1,25x	1,0000	1,76 rad/s	*Critically Damped*
	5	1,5x	1,0000	1,29 rad/s	*Critically Damped*
Variasi Ki	1	0,5x	1,0000	1,00 rad/s	*Critically Damped*
	2	0,75x	1,0000	1,87 rad/s	*Critically Damped*
	4	1,25x	0,7744	3,70 rad/s	*Underdamped*
	5	1,5x	0,6746	4,00 rad/s	*Underdamped*

Variasi Kd	1	0,5x	1,0000	2,15 rad/s	*Critically Damped*
	2	0,75x	1,0000	2,61 rad/s	*Critically Damped*
	4	1,25x	0,8099	2,87 rad/s	*Underdamped*
	5	1,5x	0,7457	2,59 rad/s	*Underdamped*

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa sistem kendali posisi (orde tiga) memiliki rentang margin kestabilan yang lebih kompleks:

1. Peningkatan Kp memperbaiki nilai redaman (ζ) hingga mencapai batas kritis (ζ = 1,0000). Namun, pada penguatan ekstrem (Skenario 5), frekuensi natural justru menurun tajam menjadi 1,29 rad/s, yang mengindikasikan hilangnya kecepatan respons alami sistem jika Kp terlalu besar pada orde tiga.
2. Peningkatan Ki terbukti sangat agresif dalam menurunkan margin redaman. Nilai ζ anjlok dari 1,0000 menjadi 0,6746. Fenomena ini secara matematis mengonfirmasi temuan pada kurva respons waktu bahwa aksi integral yang berlebihan pada sistem posisi memicu osilasi yang parah dan *overshoot* yang sangat tinggi.
3. Penambahan parameter Kd menghadirkan fenomena kompensasi dinamis. Meskipun rasio redaman dominan dari *pole* menurun (dari 1,0000 ke 0,7457), namun pada kenyataannya penambahan Kd mampu memangkas lonjakan *overshoot* (Tabel 4.10). Hal ini membuktikan bahwa pada orde tinggi, aksi derivatif tidak hanya bertumpu pada letak *pole*, melainkan memberikan tambahan titik *zero* pada sistem yang secara efektif menyerap energi lonjakan transien tanpa merusak ketelitian *steady-state*.

4.9 Analisis Stabilitas Sistem Berdasarkan Posisi Kutub (*Pole*)

Kestabilan suatu sistem kendali linier secara mutlak ditentukan oleh letak akar-akar persamaan karakteristik atau kutub (*pole*) pada bidang kompleks (*s-plane*). Berdasarkan teori kendali, sebuah sistem dinyatakan stabil secara asimtotik apabila seluruh *pole* sistem tertutup (*closed-loop*) berada di sebelah kiri sumbu imajiner, yang ditandai dengan nilai bagian *real* yang negatif (Re(s) < 0). Sebaliknya, jika terdapat minimal satu *pole* yang berada di sebelah kanan sumbu imajiner (Re(s) > 0), maka sistem tersebut dipastikan tidak stabil.analisis letak *pole* dilakukan pada dua model sistem yang berbeda, yaitu sistem kendali kecepatan

(orde dua) dan sistem kendali posisi sudut (orde tiga), dengan memvariasikan parameter Kp, Ki, dan Kd menggunakan metode *One-Factor-at-a-Time* (OFAT).

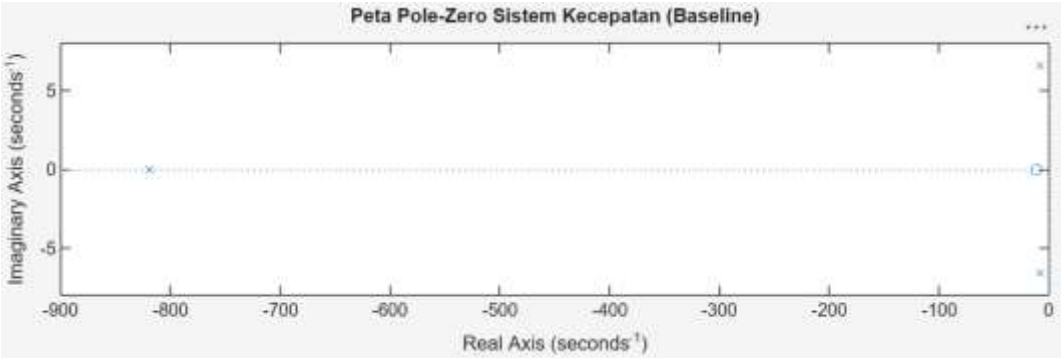
4.9.1 Analisis Stabilitas pada Sistem Kendali Kecepatan (Orde 2)

Berdasarkan hasil simulasi pengujian pada sistem kendali kecepatan motor DC, letak *pole* dominan untuk setiap variasi parameter pengendali PID dirangkum pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4.11 Letak Pole Dominan dan Status Stabilitas (Kendali Kecepatan)

Parameter	Skenario Pengujian	Letak Pole Dominan	Status Stabilitas
Variasi Kp	Skenario 1 (0,5x)	-5,44 ± j8,61	Stabil
	Skenario 2 (0,75x)	-6,61 ± j7,77	Stabil
	Skenario 3 (Baseline)	**-7,79 ± j6,60**	**Stabil**
	Skenario 4 (1,25x)	-8,98 ± j4,89	Stabil
	Skenario 5 (1,5x)	-10,18 ± j1,15	Stabil
Variasi Ki	Skenario 1 (0,5x)	-4,81 ± j0,00	Stabil
	Skenario 2 (0,75x)	-7,81 ± j4,15	Stabil
	Skenario 4 (1,25x)	-7,78 ± j8,36	Stabil
	Skenario 5 (1,5x)	-7,76 ± j9,81	Stabil
Variasi Kd	Skenario 2	-7,30 ± j6,66	Stabil
	Skenario 3	-6,87 ± j6,68	Stabil
	Skenario 4	-6,48 ± j6,68	Stabil
	Skenario 5	-6,14 ± j6,66	Stabil

Berdasarkan Tabel 4.11, dapat dianalisis bahwa pada seluruh skenario variasi parameter PID, letak *pole* dominan selalu memiliki bagian *real* yang bernilai negatif (berkisar antara -4,81 hingga -10,18). Hal ini membuktikan bahwa variasi parameter Kp, Ki, dan Kd dalam rentang pengujian ini tidak merusak margin kestabilan absolut sistem, sehingga sistem kendali kecepatan motor DC dijamin beroperasi dalam keadaan stabil secara asimtotik.



Gambar 4.10 Peta Pole-Zero kendali kecepatan

Gambar 4.9 memperlihatkan peta letak *pole* dan *zero* (*pole-zero map*) pada kondisi *baseline*. Posisi tanda silang (x) yang seluruhnya berada di area sebelah kiri angka nol pada sumbu *real* secara visual mengonfirmasi bahwa tidak ada akar persamaan karakteristik yang menyeberang ke area kanan (daerah tidak stabil).

4.9.2 Analisis Stabilitas pada Sistem Kendali Posisi Sudut (Orde 3)

Pada sistem kendali posisi, penambahan komponen integrator dari *plant* menyebabkan sistem lingkar terbuka (*open-loop*) memiliki *pole* yang terletak tepat di titik origin (s = 0). Namun, ketika sistem diubah menjadi lingkar tertutup (*closed-loop*) dengan pengendali PID, seluruh letak *pole* bergeser menuju area stabil. Hasil letak *pole* dominan pada kendali posisi ditunjukkan pada Tabel 4.12

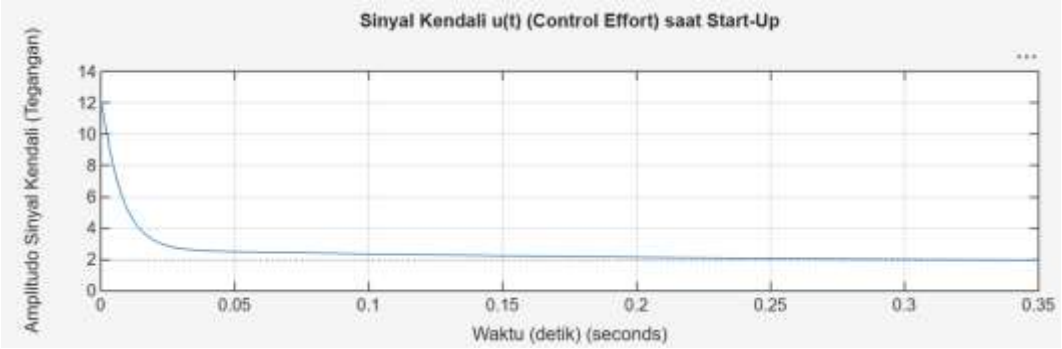
Tabel 4.12 Letak Pole Dominan dan Status Stabilitas (Kendali Posisi)

Parameter	**Skenario Pengujian**	**Letak Pole Dominan**	**Status Stabilitas**
Variasi Kp	Skenario 1 (0,5x)	-1,05 ± j2,71	Stabil
	Skenario 2 (0,75x)	-1,88 ± j2,43	Stabil
	Skenario 3 (Baseline)	**-3,06 ± j1,40**	**Stabil**
	Skenario 4 (1,25x)	-1,76 ± j0,00	Stabil
	Skenario 5 (1,5x)	-1,29 ± j0,00	Stabil
Variasi Ki	Skenario 1 (0,5x)	-1,00 ± j0,00	Stabil
	Skenario 2 (0,75x)	-1,87 ± j0,00	Stabil
	Skenario 4 (1,25x)	-2,86 ± j2,34	Stabil
	Skenario 5 (1,5x)	-2,70 ± j2,95	Stabil
Variasi Kd	Skenario 1 (0,5x)	-2,15 ± j0,00	Stabil
	Skenario 2 (0,75x)	-2,61 ± j0,00	Stabil
	Skenario 4 (1,25x)	-2,33 ± j1,69	Stabil
	Skenario 5 (1,5x)	-1,93 ± j1,73	Stabil

Meskipun sistem berorde tiga memiliki kerentanan osilasi (*overshoot*) yang jauh lebih tinggi dibandingkan sistem orde dua pada area transien, Tabel 4.11 membuktikan bahwa secara matematis sistem ini tetap mempertahankan stabilitas absolutnya. Seluruh bagian *real* dari *pole* dominan bernilai negatif (berada di area LHP). Terlihat bahwa penambahan aksi integral (Ki) yang terlalu besar (Skenario 4 dan 5 pada variasi Ki) memicu peningkatan nilai komponen imajiner (mencapai j2,95) yang merepresentasikan tingginya osilasi, namun tidak sampai mendorong *pole* masuk ke area positif. Dengan demikian, penerapan pengendali PID terbukti mampu menarik akar-akar persamaan dari batas kritis origin ke daerah operasi yang aman dan stabil.

4.10 Analisis Sinyal Kendali (*Control Effort*)

Analisis pada sub-bab sebelumnya berfokus pada respons keluaran kecepatan dan posisi sudut motor. Namun, dalam implementasi perangkat keras di dunia nyata, karakteristik sinyal kendali u(t) yang dihasilkan oleh PID dan diumpankan ke armatur motor (dalam bentuk tegangan) harus diperhatikan untuk menghindari kejenuhan (*saturation*) atau kerusakan aktuator.Berdasarkan hasil simulasi sinyal kendali, terlihat bahwa peningkatan nilai parameter proporsional (Kp) dan derivatif (Kd) secara ekstrem menghasilkan lonjakan sinyal kendali (*control spike*) yang sangat tinggi pada saat *start-up* (t = 0). Aksi derivatif merespons laju perubahan error yang terjadi secara instan (fenomena *derivative kick*), sehingga memaksa sistem mengeluarkan tegangan kendali yang sangat besar. Jika lonjakan tegangan ini melebihi batas tegangan nominal motor DC, maka pada implementasi nyatanya aktuator akan mengalami saturasi, yang dapat menyebabkan performa motor melenceng dari hasil simulasi linier, atau bahkan memicu *overheating*. Oleh karena itu, pemilihan Kp dan Kd tidak boleh hanya mengejar *rise time* yang cepat atau *overshoot* yang kecil, melainkan harus dibatasi oleh kapasitas tegangan maksimal (batas saturasi) dari motor DC yang digunakan.



Gambar 4.11 Grafik Respons Sinyal Kendali (*Control Effort*) saat *Start-Up*

4.11 Evaluasi Keseluruhan (*Trade-Off* Parameter PID)

Berdasarkan seluruh pengujian variasi parameter menggunakan metode *One-Factor-at-a-Time* (OFAT) pada sistem kendali kecepatan maupun posisi sudut motor DC, dapat disintesiskan bahwa tidak ada satupun parameter PID tunggal yang mampu menyempurnakan seluruh kriteria performa secara bersamaan. Penentuan nilai PID selalu melibatkan kompromi teknis (*trade-off*):

1. Peran Kp**:** Peningkatan Kp terbukti efektif dalam mempercepat respons sistem (*rise time* mengecil), namun kompromi nya adalah penurunan batas redaman yang memicu peningkatan lonjakan transien (*maximum overshoot*).
2. Peran Ki**:** Kehadiran Ki mutlak diperlukan untuk mengeliminasi kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*). Namun, aksi akumulasi error ini memberikan efek negatif yang sangat signifikan terhadap margin stabilitas transien, terutama pada sistem orde tiga (posisi), di mana Ki yang besar memicu osilasi yang parah dan *settling time* yang memanjang.
3. Peran Kd**:** Penambahan Kd berfungsi sebagai kompensator dinamis (redaman) yang sangat efektif untuk memangkas *overshoot* dan mengembalikan kestabilan yang dirusak oleh Ki. Akan tetapi, kompromi dari nilai Kd yang besar adalah munculnya lonjakan tegangan sesaat (*derivative kick*) pada sinyal kendali yang berisiko menyebabkan saturasi pada perangkat keras motor DC.Oleh karena itu, komposisi (tuning) PID yang ideal untuk motor DC adalah mencari titik keseimbangan harmonis antara Kp yang cukup untuk mengejar kecepatan respons, Ki yang memadai untuk menghapus *error* tunak tanpa memicu osilasi berlebih, serta Kd yang proporsional untuk memberikan redaman tanpa merusak aktuator.

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan, simulasi *One-Factor-at-a-Time* (OFAT), dan analisis data terhadap pengaruh variasi parameter pengendali PID pada sistem kendali motor DC, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. **Pengaruh terhadap Karakteristik Respons Kecepatan Motor DC:**

Peningkatan nilai konstanta proporsional (Kp) terbukti mempercepat respons sistem (menurunkan *rise time*), namun secara bersamaan meningkatkan lonjakan transien (*maximum overshoot*). Penggunaan konstanta integral (Ki) mutlak diperlukan karena secara konsisten mampu menjaga *steady-state error* tetap bernilai nol, meskipun nilai Ki yang terlalu besar akan memperlama *settling time* akibat osilasi. Di sisi lain, penambahan konstanta derivatif (Kd) berfungsi sebagai kompensator redaman yang sangat efektif untuk memangkas *overshoot* yang dihasilkan oleh parameter Kp dan Ki.

2. **Pengaruh terhadap Sistem Kendali Posisi Sudut (Orde Tiga):**

Pada pengendalian posisi sudut poros motor (sistem orde tiga), penambahan komponen integrator bawaan dari *plant* menyebabkan sistem memiliki kerentanan osilasi alami yang jauh lebih tinggi dibandingkan kendali kecepatan. Dalam kondisi ini, parameter Kd memegang peranan yang sangat krusial, di mana penambahan nilai Kd terbukti mampu menekan *maximum overshoot* secara signifikan (dari 21,65% menjadi 6,98%) sehingga poros motor mencapai posisi sudut referensi dengan pergerakan yang jauh lebih stabil.

3. **Pengaruh terhadap Redaman dan Stabilitas (Letak Pole):**

Seluruh variasi parameter PID yang diuji tidak merusak kestabilan absolut sistem, dibuktikan dengan letak seluruh *pole* dominan *closed-loop* yang tetap berada di sebelah kiri sumbu imajiner (*Left-Half Plane* / bagian real negatif). Peningkatan Kp dan Kd cenderung memperbaiki rasio redaman (ζ) dan menggeser sistem dari kondisi *underdamped* menuju kondisi batas kritis (*critically damped*). Sebaliknya, dominasi Ki secara agresif menurunkan rasio redaman dan menarik pole mendekati sumbu imajiner (memperbesar osilasi).

4. Sintesis Sinyal Kendali (*Trade-Off*):

Tidak ada parameter PID tunggal yang mampu mengoptimalkan seluruh spesifikasi waktu secara bersamaan tanpa mengorbankan performa lainnya (*trade-off*). Nilai Kd yang terlalu besar, meskipun bagus untuk menekan *overshoot*, akan memicu fenomena *derivative kick* (lonjakan ekstrem pada sinyal tegangan kendali di awal *start-up*) yang pada implementasi nyatanya dapat menyebabkan saturasi atau kerusakan pada aktuator motor DC.

5.2 Saran

Berdasarkan batasan masalah dan temuan selama pelaksanaan penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Implementasi pada Perangkat Keras (*Hardware*)

Penelitian ini sepenuhnya berbasis simulasi matematis ideal. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mengimplementasikan rancangan PID ini secara langsung pada perangkat keras mikrokontroler dan motor DC fisik, agar efek saturasi tegangan, gangguan nyata (*disturbance*), dan kebisingan sensor (*sensor noise*) dapat dievaluasi secara riil.

2. Penerapan Algoritma Optimasi Cerdas (Tuning Lanjut)

Mengingat sulitnya mendapatkan kombinasi Kp, Ki, dan Kd yang ideal secara manual/OFAT, disarankan untuk menggunakan algoritma kecerdasan buatan seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO), Algoritma Genetika (GA), atau *Fuzzy-PID* guna mendapatkan hasil *tuning* parameter yang paling optimal secara otomatis.

3. Penambahan Filter Derivatif dan Sistem *Anti-Windup*

Untuk mengatasi lonjakan sinyal kendali tegangan (*derivative kick*) dan bahaya akumulasi error berlebih (*integral windup*), implementasi pengendali PID ke depannya harus selalu menyertakan blok *Low-Pass Filter* pada parameter derivatif dan blok *Anti-Windup* pada parameter integral.

DAFTAR PUSTAKA

[1] H. A. Azeez, M. H. A. Jalil @ Zainuddin, and L. O. Afolabi, "DC Motor Speed Control and Real-Time Evaluation using PID Controller," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 180–189, 2024.

[2] A. N. Aliansyah, N. Nurhayati, S. N. Jaya, L. Pagiling, W. O. S. N. Alam, and M. N. A. Nur, "Analisis Tuning Parameter PID Menggunakan Algoritma Genetika pada Pengontrolan Kecepatan Motor DC," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 21, no. 2, pp. 287–296, 2022, doi: 10.24843/MITE.2022.v21i02.P17.

[3] R. Fajar and P. W. Rusimamto, "Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC Menggunakan PID Controller," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 135–143, 2024, doi: 10.26740/jte.v13n2.p135-143.

[4] R. Afrawira, R. F. Gumilang, S. Amalia, and S. Bandri, "Analisa Perbandingan Pengendali PID pada Motor DC Menggunakan Metode Ziegler-Nichols dan Trial and Error," *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 5, no. 3, pp. 210–218, 2023, doi: 10.38035/rrj.v5i3.758.

[5] F. Suryatini, A. S. Sunarya, and Q. K. 'Amilin, "Optimasi kendali PID kecepatan motor DC dengan metode tuning particle swarm optimization," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 5, no. 1, pp. 57–66, 2025, doi: 10.35313/jitel.v5.i1.2025.57-66.

[6] M. R. Firdaus, T. A. Berbudi, S. Nurrahma, G. Izzaulhaq, and I. Hudati, "Identifikasi Sistem Motor DC dan Penerapan Kendali PID, LQR, dan Servo Tipe 1 Berbasis Arduino-MATLAB," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.22146/juliet.v4i1.81918.

[7] C. J. Ujam and A. D. Adeniyi, "Developing and Simulating a Model using Proportional Integral Derivative (PID) on Matlab/Simulink for Speed Control of DC Motor," *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, vol. 4, no. 2, pp. 17–21, 2024, doi: 10.62225/2583049X.2024.4.2.2431.

[8] R. Sheıkh Debes and T. Kara, "Design and Simulation of a PID Neural Network Controller for PMDC Motor Speed and Position Control," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 44, pp. 46–50, 2022, doi: 10.31590/ejosat.1222247.

[9] H. F. Jabbar, S. M. Obaid, and Q. N. Abduljaleel, “Speed Control of Separately Excited DC Motor with PID Controller,” *Journal of Al-Ma'moon College*, vol. 2, no. 38, 2022.

[10] S. Balamurugan and A. Umarani, “Study of Discrete PID Controller for DC Motor Speed Control Using MATLAB,” in *Proc. 2020 Int. Conf. Comput. Inf. Technol. (ICCIT)*, 2020, pp. 358–363, doi: 10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213780.

[11] M. Nassim and A. Amroun, “Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller,” *arXiv preprint arXiv:2108.05450*, 2021.

[12] M. R. Firdaus, T. A. Berbudi, S. Nurrahma, G. Izzaulhaq, and I. Hudati, “Identifikasi Sistem Motor DC dan Penerapan Kendali PID, LQR, dan Servo Tipe 1 Berbasis Arduino-MATLAB,” *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023, doi: 10.22146/juliet.v4i1.81918.

[13] S. Nurrahma, T. A. Berbudi, M. R. Firdaus, G. Izzaulhaq, and I. Hudati, “Implementasi Kontrol PID pada Kopel Motor DC dengan Menggunakan Filter Kalman,” *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023, doi: 10.22146/juliet.v4i1.82150.

[14] D. Lumban Gaol and E. R. Siregar, “Analisis Perbandingan Kontrol P, PI, dan PID pada Pengaturan Kecepatan Motor DC Berbasis Simulasi MATLAB,” *Jurnal Ilmiah Nusantara*, vol. 3, no. 1, 2026, doi: 10.61722/jinu.v3i1.7558.

[15] B. Supriyo, M. A. Nisha, K. D. D. Lestari, and V. S. Kartika, “Design and Development of Gain Scheduling PID and Fuzzy-PID Control for DC Motor Speed Based on MATLAB Simulink,” *JAICT*, 2026.

[16] A. J. Moshayedi, J. Li, N. Sina, X. Chen, L. Liao, M. Gheisari, and X. Xie, “Simulation and validation of optimized PID controller in AGV (Automated Guided Vehicles) model using PSO and BAS algorithms,” *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2022, Art. no. 7799654, 2022, doi: 10.1155/2022/7799654.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama	: Rendi Pratama P Anhar
Tempat/Tanggal Lahir	: Medan,04 Mei 2003
Umur	: 23 Tahun
Agama	: Islam
Status	: Belum Kawin
Tinggi Badan/Berat Badan	: 163/70
Kewarganegaraan	: Indonesia
Alamat	: Jalan Gardu Pln Dusun VII
No Hp	: 0895603549381
Latar Belakang Pendidikan	
Tk Halimatusakdiah	: 2008-2009
MIS PARMIYATU WASSAADAH	: 2009-2015
Mtsn 1 Medan	: 2015-2018
SMK N 1 Percut Sei Tuan	: 2018-2021
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara	: 2022-2026