

Penyetelan PID untuk Pengendalian Kecepatan Motor DC

Dita Dini Rivanda^{1*}, Anggara Trisna Nugraha², dan Rama Arya Sobhita³

¹D3 – Teknik Kelistrikan Kapal, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

^{2,3} Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

Email: dinirivanda23@student.ppns.ac.id^{1*}, anggaranugraha@ppns.ac.id², ramasobhita@student.ppns.ac.id³

Abstrak

Motor DC merupakan salah satu aktuator yang paling sering digunakan baik di bidang pendidikan maupun industri, seperti pada robot, printer 3D, dan berbagai perangkat lainnya. Meskipun kecepatan motor DC tergolong stabil, masih terdapat berbagai kelemahan pada kondisi transien, khususnya ketika terdapat gangguan dari luar. Oleh karena itu, performa sistem masih perlu dioptimalkan agar kecepatan dapat dipertahankan secara konstan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Untuk mencapai kondisi tersebut, diperlukan sistem kendali yang tepat. Agar pengendalian dapat dilakukan secara efektif, maka model sistem yang akurat juga sangat penting. Jika terjadi perubahan pada parameter sistem, maka dinamika sistem yang tidak terdeteksi dalam model akan menimbulkan gangguan yang berfluktuasi. Terdapat berbagai metode kendali yang dapat digunakan untuk mengatur motor DC baik yang bersifat linear maupun non-linear. Namun, banyak referensi yang menggunakan metode kontrol linear terbukti kurang mampu menangani perubahan parameter, sifat non-linear, serta gangguan eksternal secara optimal. PID adalah salah satu metode kontrol non-linear yang umum digunakan dalam pengaturan motor DC. Akan tetapi, jika sistem dimodelkan secara offline, maka PID tidak akan mampu menghasilkan respons keluaran yang optimal. Sebaliknya, jika sistem dikendalikan secara online (real-time), penggunaan PID dapat memberikan perbaikan yang cukup pada perilaku keluaran sistem motor DC. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan respons keluaran sistem secara online dan mengendalikannya secara real-time.

Kata kunci: PID, Motor DC, Pengendalian Kecepatan, Linear, Nonlinear

Abstract

DC motors are widely utilized as actuators in both academic and industrial environments, including robotics, 3D printing, and various automation systems. While their rotational speed is relatively stable, performance issues arise during transient states, particularly when external disturbances are present. To achieve consistent speed and high precision, an effective control strategy is required. Accurate modeling of the system is essential for proper control, especially when parameter variations affect the motor's dynamic behavior, leading to instability. Numerous control approaches are available for both linear and nonlinear DC motor systems. However, many linear control techniques fail to adequately address parameter variations, nonlinear characteristics, and system disturbances. The PID controller, a nonlinear control technique, is widely adopted in DC motor applications. Nevertheless, when applied in offline modeling scenarios, PID often falls short in delivering optimal output responses. In contrast, when implemented in real-time (online) systems, PID control can offer improved performance and system behavior. This study aims to enhance the output response of DC motors under online control conditions, focusing on maintaining real-time stability and accuracy.

Keywords: PID, Motor DC, Speed Control, Linear, Nonlinear

1. Pendahuluan

Untuk memahami dan mempelajari karakteristik dari sistem kendali, maka diperlukan proses identifikasi sistem. Proses ini dapat dilakukan melalui pemodelan matematis yang didasarkan pada sifat-sifat komponen penyusunnya [9]. Dari hasil identifikasi tersebut, diperoleh fungsi alih. Model fungsi alih ini memungkinkan kita mengetahui bagaimana sistem memberikan respons terhadap berbagai jenis masukan [1].

^{1*} Penulis Korespondensi

Dengan memahami karakteristik sistem, Anda dapat menentukan langkah atau perlakuan yang sesuai agar sistem dapat berperilaku sesuai dengan yang diinginkan [10]. Identifikasi sistem merupakan pendekatan eksperimental yang digunakan untuk mendefinisikan model dinamis dari suatu sistem.

Secara umum, model dibuat berdasarkan data hasil pengamatan, dan identifikasi sistem menjadi tugas penting dalam kegiatan penelitian ilmiah sebagai langkah awal dalam analisis sistem [11]. Namun, proses untuk mendapatkan model tersebut memerlukan prosedur yang kompleks. Terdapat dua pendekatan dalam memperoleh model matematis dari suatu sistem fisik, yaitu pendekatan analitis dan pendekatan eksperimental. Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk memperoleh model motor DC secara eksperimental [12]. Salah satu caranya adalah dengan mengamati input dan output dari motor DC. Namun demikian, ada juga peneliti yang memanfaatkan algoritma kecerdasan buatan seperti *recurrent neural networks* (RNN), yaitu metode yang menggunakan jaringan saraf tiruan, di mana model dinamika motor DC diperoleh dari nilai kesalahan minimum hasil pembelajaran dari model motor DC dengan parameter yang sudah diketahui. Selain itu, terdapat penelitian yang memanfaatkan tegangan balik pada motor DC sebagai input kendali dan kecepatan putar motor DC sebagai output kendali. Hubungan antara input dan output ini dievaluasi menggunakan alat bantu identifikasi kontrol yang tersedia pada perangkat lunak Matlab.

Motor DC memiliki karakteristik kerja yang bersifat nonlinier, terutama saat terjadi variasi beban. Pengendali konvensional seperti pengendali PID sangat umum digunakan karena memiliki kinerja yang baik dalam mengendalikan sistem linier. Dalam penelitian ini, motor DC magnet permanen digunakan sebagai objek yang akan diidentifikasi dan dikendalikan menggunakan metode kontrol PID optimal.

2. Metode Penelitian

A. Material

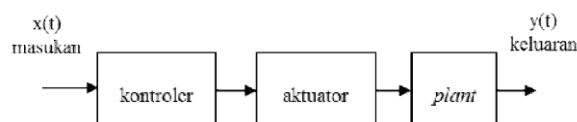
Dalam sistem kendali, proses identifikasi sistem secara umum dapat digambarkan seperti pada Gambar 1. Tahapan dalam proses identifikasi sistem terdiri dari empat langkah, yaitu:

1. Ketersediaan data input-output dari plant yang akan diidentifikasi.
2. Pemilihan struktur model.
3. Estimasi parameter model.
4. Validasi terhadap model yang telah diidentifikasi (baik struktur maupun nilai parameternya).



Gambar 1. Diagram blok proses identifikasi suatu sistem [1]

Dalam penelitian ini, proses identifikasi motor DC dilakukan secara *open loop* menggunakan Arduino dan komputer pribadi (PC) yang terhubung dengan Simulink-Matlab. Metode yang digunakan untuk identifikasi adalah metode identifikasi statis [12]. Salah satu metode identifikasi statis yang paling umum digunakan adalah metode *open loop* dengan input tangga seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok proses identifikasi plant menggunakan metode open loop [1]

1. Karakteristik Sistem

Karakteristik sistem merupakan ciri khas dari perilaku dinamis suatu sistem atau biasa disebut sebagai spesifikasi kinerja sistem. Respon keluaran sistem muncul akibat adanya pemberian sinyal masukan atau setelah diberikan sinyal uji [13]. Berdasarkan karakteristik respon, sistem dapat diklasifikasikan menjadi karakteristik respon waktu dan karakteristik respon frekuensi. Dalam penelitian ini, yang diamati adalah karakteristik respon waktu dari motor DC [14]. Tujuan dari pengamatan karakteristik respon waktu adalah untuk melihat bentuk respon keluaran sistem terhadap perubahan waktu. Umumnya, karakterisasi waktu dibagi menjadi dua tahapan pengamatan, yaitu spesifikasi respon transien dan respon keadaan tunak. Selain itu, pengamatan terhadap sifat-sifat sistem juga dapat diakses melalui sistem primer dan sekunder [15].

2. Model Motor DC

Motor DC merupakan motor listrik yang mengubah daya arus searah ke kumparan medan menjadi energi kinetik mekanik. Kumparan medan pada motor DC disebut stator (bagian yang tidak berputar), sedangkan kumparan angker disebut rotor (bagian yang berputar) [16]. Seperti namanya, motor DC menggunakan arus searah dalam satu arah. Motor DC adalah perangkat elektronik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk gerakan rotasi [17]. Motor DC memiliki armature dengan satu atau lebih kumparan terpisah. Setiap kumparan dihubungkan dengan cincin komutator yang dapat dilepas. Jika terdapat isolator antar saklar, cincin isolasi dapat berfungsi sebagai saklar 2 kutub (saklar hidup/mati). Motor DC bekerja berdasarkan prinsip gaya Lorentz, yaitu gaya yang terjadi saat konduktor berarus ditempatkan dalam medan magnet. Kecepatan (N) motor DC dapat dihitung dengan rumus berikut [2]:

$$N = \frac{V_{TM} - I_A R_A}{K \Phi} \quad (1)$$

Keterangan:

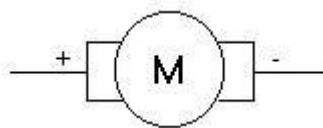
V_{TM} = Tegangan Terminal

I_A = Arus Jangkar

R_A = Resistansi Jangkar

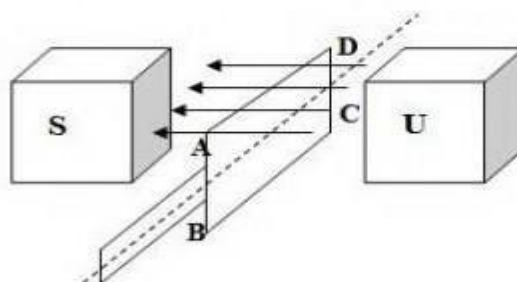
K = Konstanta Motor

Φ = Fluks Magnetik



Gambar 3. Simbol Motor DC [2]

a. Prinsip Kerja Motor DC



Gambar 4. Prinsip Kerja Motor DC [2]

Kumparan ABCD berada dalam medan magnet yang seragam dan posisi sisi aktif AD dan CB berada sejajar dengan arah fluks magnetik [18]. Dengan menjaga sisi AB dan DC tetap di tengah, saat sisi AD dan CB berputar akibat gaya Lorentz, kumparan ABCD pun berputar. Gaya dikalikan jarak pada titik tertentu disebut momen [19]. Karena pengaruh momen putar (T), sisi aktif AD dan CB akan berputar terhadap porosnya. Setiap sisi kumparan aktif AD dan CB mengalami momen puntir seperti berikut [2]:

$T = F \cdot r$	(2)
-----------------	-----

Keterangan:

T = Momen Puntir (Nm)

F = Gaya (Newton)

r = Jarak Sisi Kumparan Terhadap Sumbu Putar (Meter)

Di bawah kutub magnet, besar gaya Lorentz akan menjaga besar momen putar [20]. Artinya, posisi garis netral pada sisi kumparan akan menghentikan rotasi. Agar motor dapat terus berputar dengan baik, diperlukan penambahan jumlah kumparan. Kumparan harus dirangkai agar momen puntir yang dihasilkan dari kedua sisi saling memperkuat dan menghasilkan putaran yang baik [21]. Secara teknis, lilitan kumparan ini juga disebut sebagai lilitan armatur karena kumparan berputar di sekitar perangkat yang disebut angker.

b. Bagian Utama Motor DC

- **Kutub Medan**

Motor DC sederhana memiliki dua kutub medan: kutub utara dan selatan. Garis medan magnet membentang di ruang terbuka antara kutub dari utara ke selatan. Pada motor yang lebih besar atau kompleks terdapat satu atau lebih elektromagnet [22].

- **Kumparan**

Motor

DC

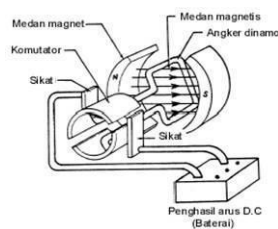
Ketika arus masuk ke dalam kumparan motor DC, maka arus tersebut akan menjadi elektromagnet. Kumparan motor DC berbentuk silinder, dihubungkan ke poros penggerak untuk memindahkan beban. Pada motor DC kecil, kumparan akan berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub sampai kutub utara dan selatan magnet saling bertukar tempat. Ketika hal ini terjadi, arus akan berbalik untuk mengubah kutub utara dan selatan kumparan [23].

- **Komutator**

Motor

DC

Komponen ini umum ditemukan pada motor DC. Fungsinya adalah untuk membalik arah arus listrik dalam kumparan serta membantu mengalirkan arus antara kumparan dan sumber daya [24].



Gambar 5. Bagian-Bagian Motor DC [2]

c. Keunggulan Motor DC

Keunggulan utama motor DC adalah dalam hal pengaturan kecepatannya yang tidak dipengaruhi oleh kualitas pasokan daya [25]. Motor ini dapat dikendalikan dengan cara:

- Mengatur tegangan kumparan motor DC. Peningkatan tegangan akan meningkatkan kecepatan.
- Mengatur arus medan. Penurunan arus medan akan meningkatkan kecepatan.

Motor DC tersedia dalam berbagai ukuran. Namun, pada ukuran besar, masalah pembalikan arus secara mekanis membatasi penggunaannya pada aplikasi daya rendah dan kecepatan menengah seperti mesin perkakas dan mesin penggiling. Selain itu, motor ini tidak cocok digunakan di tempat bersih dan aman karena adanya risiko percikan dari sikat.

3. Pengendali PID

a. Pengendali Proporsional (P)

Keluaran pengendali ini sebanding dengan besar kesalahan (selisih antara perintah dan kondisi aktual). Secara sederhana, output dari pengendali proporsional adalah hasil kali antara konstanta proporsional dan masukan. Saat frekuensi masukan berubah, sistem secara langsung mengubah keluaran hanya dengan mengalikan konstanta tersebut. Pengendali ini memiliki dua parameter: pita proporsional dan konstanta proporsional. Hubungan antara pita proporsional (PB) dan konstanta proporsional (K_p) ditunjukkan pada rumus berikut [3]:

$PB = \frac{1}{K_p} \times 100\%$	(3)
-----------------------------------	-----

Diagram interaksi antara PB, keluaran pengendali, dan kesalahan masukan menunjukkan bahwa peningkatan nilai K_p menyebabkan penurunan pita proporsional. Dalam penerapannya, nilai K_p yang terlalu kecil hanya mampu memperbaiki kesalahan kecil dan membuat respon sistem lambat. Sementara itu, peningkatan nilai K_p yang berlebihan akan menyebabkan sistem berperilaku tidak stabil atau berosilasi [4].

b. Pengendali Integral (I)

Pengendali integral dirancang untuk menghasilkan Pengendali integral berfungsi menghasilkan respon sistem dengan kesalahan keadaan tunak nol. Jika sistem tidak memiliki elemen integrator (1/s), maka pengendali proporsional saja tidak cukup menjamin kesalahan nol. Oleh karena itu, pengendali integral digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem. Output dari pengendali ini adalah akumulasi dari perubahan input. Bila sinyal kesalahan tetap, output akan tetap seperti sebelumnya. Nilai konstanta integrator yang besar memungkinkan kesalahan kecil menghasilkan output yang besar. Karakteristik penggunaan pengendali integral meliputi:

1. Memerlukan waktu tertentu untuk memberikan output, sehingga respon sistem cenderung lebih lambat.
2. Jika sinyal kesalahan nol, output tetap seperti sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak nol, maka output akan naik atau turun tergantung nilai kesalahan dan konstanta K_i .
4. Nilai K_i yang besar mempercepat penghilangan offset, tetapi juga meningkatkan osilasi sinyal output [5].

c. Pengendali Derivatif (D)

Keluaran dari pengendali derivatif menyerupai operasi turunan. Perubahan mendadak pada input akan menghasilkan perubahan besar dan cepat pada output. Jika input tidak berubah, output tidak berubah.

Namun, ketika terjadi perubahan mendadak (fungsi tangga), maka output berupa sinyal pulsa. Pada perubahan lambat (fungsi ramp), output berupa fungsi tangga yang nilainya tergantung pada laju perubahan ramp dan konstanta T_d . Ciri-ciri pengendali derivatif antara lain:

1. Tidak menghasilkan output jika input (sinyal kesalahan) tidak berubah.
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, output tergantung pada T_d dan laju perubahan kesalahan.
3. Dapat memberikan koreksi sebelum kesalahan menjadi besar, sehingga meningkatkan stabilitas sistem.

Karena karakteristiknya, pengendali derivatif biasanya digunakan untuk mempercepat respon awal sistem, tetapi tidak mengurangi kesalahan keadaan tunak. Pengendali ini tidak digunakan sendiri, melainkan dikombinasikan dengan pengendali lain [6].

d. Pengendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID)

Kelebihan dan kekurangan masing-masing pengendali P, I, dan D dapat saling menutupi jika dikombinasikan secara paralel dalam bentuk pengendali PID. Unsur P, I, dan D bertujuan untuk mempercepat respon sistem,

menghilangkan offset, serta menghasilkan perubahan awal yang besar. Diagram blok PID menunjukkan bahwa output merupakan penjumlahan dari output masing-masing pengendali. Karakteristik PID sangat dipengaruhi oleh nilai kontribusi dari ketiga parameter. Penyesuaian nilai Kp, Ti, dan Td akan menonjolkan karakteristik tertentu. Dalam praktik, PID diidentifikasi dengan: P = gain, I = reset, D = rate [5].

B. Metode

Dalam penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan proses untuk mencapai tujuan penelitian. Tahap pertama adalah melakukan studi literatur dari hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan pengendali PID dan simulasi, baik dari jurnal ilmiah, skripsi, maupun buku teks.

Tahap kedua adalah melakukan pemodelan dinamika motor DC. Model ini diperoleh melalui pendekatan matematis berdasarkan interaksi sifat fisik sistem.

Tahap ketiga adalah perancangan pengendali untuk mencapai tujuan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan analisis mendalam terhadap kendala dalam mengendalikan posisi motor DC.

Tahap keempat adalah implementasi melalui simulasi. Dari hasil simulasi, respon sistem dapat diketahui sesuai dengan pengendali yang diterapkan pada plant, seperti data mobilitas motor DC, nilai kesalahan keadaan tunak, kemampuan sistem menghadapi gangguan, dan tingkat kestabilan motor DC.

Tahap kelima adalah melakukan pengujian dan analisis sesuai dengan skema pengendali yang telah dirancang untuk mengetahui apakah sistem sudah sesuai dengan desain matematis. Jika hasil belum memuaskan, dapat dilakukan modifikasi pada sistem atau skema kendalinya.

Tahap terakhir adalah menarik kesimpulan dari hasil temuan yang menunjukkan bahwa tujuan penelitian tercapai, masalah terselesaikan, dan proses penelitian berhasil. Berdasarkan hasil temuan, apakah tujuan penelitian tercapai, proses investigasi berhasil, permasalahan dapat diselesaikan, dan sistem bekerja sebagaimana mestinya.

C. Analisis Perhitungan

a. Motor DC

Hubungan antara kecepatan, fluks medan, dan tegangan ditunjukkan oleh persamaan berikut:

Gaya Elektromagnetik (E) [2]

$E = K\Phi N$	(4)
---------------	-----

Torsi (T) [2]

$T = K\Phi I_a$	(5)
-----------------	-----

Kecepatan Motor Tanpa Beban (N no-load (rpm)) [2]

$N \text{ no-load (rpm)} = T \times (N_{\text{Max/km}})$	(6)
--	-----

Kecepatan Motor dengan Beban (N loaded (rpm)) [2]

$N_{\text{Max}} - N \text{ no-load} = N \text{ loaded (rpm)}$	(7)
---	-----

Arus: [2]

$I \text{ (A)} = T \times K_m/A$	(8)
----------------------------------	-----

Daya Masukan: [2]

$T \times N \text{ loaded} \times \text{Conversion Factor between T and N} = \text{Input Power (Win)}$	(9)
--	-----

Daya Keluaran: [2]

$V \times A = \text{Output Power (Wout)}$	(10)
---	------

Efisiensi: [2]

Efisiensi (%) = W_{out} / W_{in}	(11)
------------------------------------	------

Keterangan:

E = gaya elektromagnetik yang terbentuk pada terminal angker (volts)

Φ = fluks medan yang sebanding dengan arus medan

N = kecepatan dalam RPM (putaran per menit)

T = torsi elektromagnetik (g/cm)

I_a = arus dinamo (A)

K = konstanta dalam persamaan

V = Tegangan (Volts)

W_{out} = Daya Keluaran (Watt)

W_{in} = Daya Masukan (Watt)

Untuk fluks yang konstan, tegangan induksi sebanding dengan kecepatan sudut $= d\theta/dt$ [7]

$e_b = K_b d\theta = K_b \omega$	(12)
----------------------------------	------

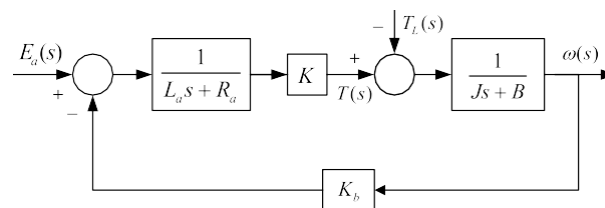
Kecepatan motor servo DC yang dikendalikan oleh armatur dikendalikan melalui tegangan armatur Persamaan diferensial dari rangkaian armatur adalah sebagai berikut: [7]

$e_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b$	(13)
---	------

Arus armatur menghasilkan torsi yang sebanding dengan jumlah torsi inersia dan gesekan, sehingga: [7]

$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = K i_a$	(14)
--	------

Perlu dicatat bahwa torsi beban tidak dimasukkan karena dianggap sebagai gangguan dalam sistem kontrol kecepatan motor DC linier. Respons terhadap gangguan beban akan dibahas di bagian akhir hasil simulasi. Dengan mengasumsikan bahwa semua kondisi awal sistem adalah nol,



Gambar 6. Sistem Motor DC [8]

Transformasi Laplace dari sistem akan menghasilkan persamaan berikut [8]:

$E_b(s) = K_b \omega(s)$	(15)
--------------------------	------

$E(s) = (L_a s + R)(s) + E_b(s)$	(16)
----------------------------------	------

$T(s) = (J s + B) \omega(s) = K I(s)$	(17)
---------------------------------------	------

Gambar 6 menunjukkan diagram blok dari sistem motor DC. Fungsi alih *open-loop* dari motor DC dari tegangan input ke kecepatan output motor dapat dituliskan sebagai berikut [8]:

$$E(s)(L_a s + R_a)(J s + B) + K_b K \quad (18)$$

Untuk keperluan simulasi, parameter dan nilai-nilainya yang digunakan dalam pengendalian kecepatan motor DC tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter yang Digunakan dalam Simulasi

Parameter	Nilai
R_a	0.4 Ω
L_a	2.7 H
J	0.0004 kg.m ²
B	0.022 N.m.s/rad
K	0.015 N.m/A
K_b	0.05 V.s

Parameter sistem ini meliputi:

R_a : tahanan armatur,
 L_a : induktansi armatur, H
 I_a : arus armatur, A
 I_f : arus medan, A
 E_a : tegangan armatur, V
 E_b : gaya gerak balik elektromotif, V
 T : torsi motor, N
 m : kecepatan sudut poros motor, rad/s
 A : torsi inersia motor, kg.m²
 K_b : konstanta gaya gerak elektromotif, V.s/rad
 K : konstanta torsi motor, N.m/A
 B : konstanta gesekan motor, N.m.s/rad

3. Hasil dan Diskusi

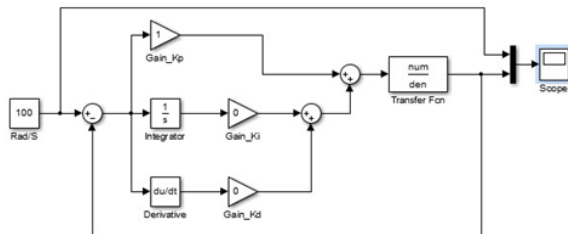
3.1. Uji Coba Pertama

Kode yang Digunakan

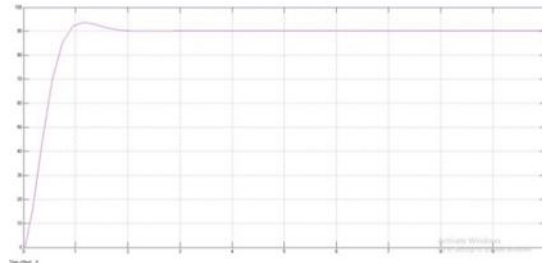
```

Clear
clc
Ra = 0.4;
La = 2.7;
J = 0.0004;
B = 0.0022;
K = 0.015;
Kb = 0.05;
num = K;
den = [La*J (La*B + Ra*J) (Ra*B+Kb*K)];
Gs = tf(num,den);
    
```

- Simulasi

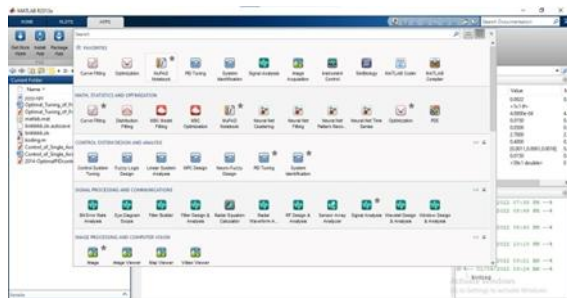


Gambar 6. Model Simulink

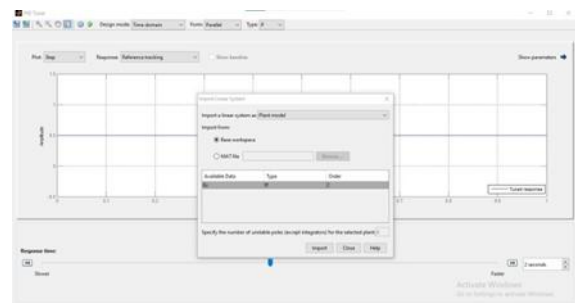


Gambar 7. Grafik yang Dihasilkan

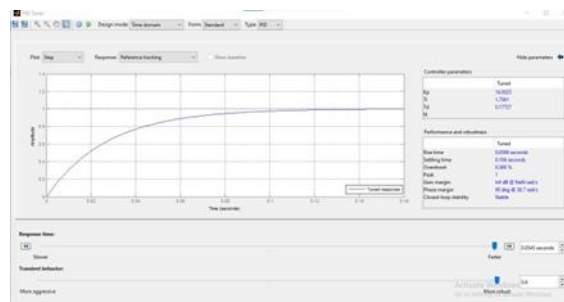
3.2. Tuning dengan PID



Gambar 8. Alat Tuning PID



Gambar 9. Import GS



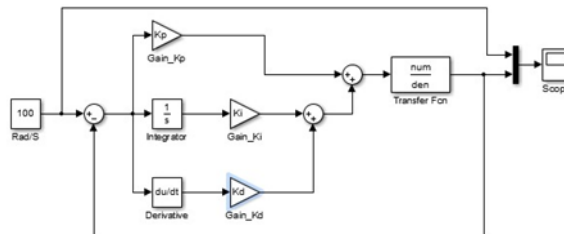
Gambar 10. Mencari Grafik Optimal

Dari eksperimen PID tuning, grafik yang paling optimal telah diperoleh. Nilai K_p , K_i , dan K_d dari grafik tersebut adalah:

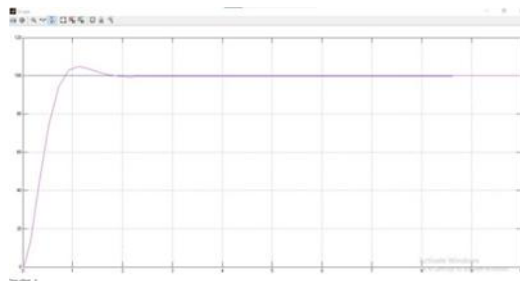
$K_p = 14.9325$, $K_i = 8.532$, dan $K_d = 2.67471$. Nilai-nilai ini kemudian diterapkan ke dalam sistem dengan kode berikut:

```
clear
clc
Ra = 0.4;
La = 2.7;
J = 0.0004;
B = 0.0022;
K = 0.015;
Kb = 0.05;
num = K;
den = [La*J (La*B + Ra*J) (Ra*B+Kb*K)];
Gs = tf(num,den);
```

$K_p = 14.9325$;
 $K_i = 8.532$;
 $K_d = 2.6471$;



Gambar 11. Model Simulink



Gambar 12. Grafik yang Dihasilkan

3.3 Diskusi

Pada Gambar 12 terlihat adanya *overshoot* dan respon PV menjadi lebih lambat. Penilaian terhadap karakteristik kontrol dilakukan berdasarkan nilai *Maximum Overshoot* (M_p) dan *Time Settling* (T_s). Kedua parameter ini sangat berpengaruh terhadap grafik osilasi PID. Dengan mengetahui nilai M_p dan T_s , kita dapat menentukan bentuk respon kontrol terbaik untuk setiap percobaan. Secara teori, M_p dan T_s memiliki hubungan berbanding terbalik. Artinya, semakin tinggi kenaikan maksimum (*maximum rise*), maka waktu tunda mencapai kondisi tunak cenderung lebih cepat, dan sebaliknya. Bagian ini menjelaskan pengaruh masing-masing parameter PID (K_p , T_i , dan T_d) terhadap keseluruhan respon kontrol.

Parameter **K_p** identik dengan kontrol proporsional. Nilai K_p mempengaruhi sensitivitas pengendali. Semakin besar nilai K_p , maka pengendali menjadi semakin sensitif, dan begitu pula sebaliknya. Parameter **T_i** identik dengan kontrol integral, yang memiliki sifat menghasilkan keluaran meskipun masukan bernilai nol. Nilai T_i yang besar membuat pengendali lebih responsif atau sensitif. Sementara parameter **T_d** identik dengan kontrol derivatif yang hanya menghasilkan keluaran jika terdapat perubahan pada input. Nilai keluaran berbanding lurus dengan besarnya T_d ; semakin besar T_d , maka keluaran juga semakin besar. Karena itu, penggunaan PID memungkinkan untuk mengatasi kekurangan masing-masing kontrol P, I, dan D serta menyesuaikan tambahan energi ketika terjadi perubahan beban atau nilai setpoint. Namun, tidak semua keunggulan pengendali PID dapat diaplikasikan untuk semua parameter proses. Elemen D hanya cocok digunakan pada variabel proses yang tidak memiliki riak (*ripple*). Oleh karena itu, PID umumnya hanya digunakan pada kontrol suhu. Penyesuaian salah satu dari parameter K_p , T_i , atau T_d dapat membuatnya menonjol dan berpengaruh dominan terhadap keseluruhan respon sistem.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa serta menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan makalah ini. Penulis juga memohon maaf apabila masih terdapat kekurangan dalam penulisan, dan berharap karya ini dapat menjadi pembelajaran untuk penyusunan karya ilmiah selanjutnya.

4. Kesimpulan

1. Parameter **K_p** berfungsi sebagai kontrol proporsional dan mempengaruhi sensitivitas sistem. Semakin besar nilai **K_p**, semakin responsif pengendali.
2. Parameter **T_i** berperan sebagai kontrol integral. Kontrol ini dapat menghasilkan keluaran walau input bernilai nol. Nilai **T_i** yang besar meningkatkan kepekaan sistem.
3. Parameter **T_d** merupakan kontrol derivatif. Ia hanya akan memberikan respon jika terdapat perubahan pada input. Nilai **T_d** yang lebih besar akan menghasilkan nilai keluaran yang lebih tinggi.
4. Parameter **K_p, T_i, dan T_d** dalam kontrol PID dapat saling melengkapi untuk mengatasi keterbatasan masing-masing jenis kontrol serta memberikan respon yang lebih optimal ketika terjadi perubahan beban atau nilai target. Namun, tidak semua kelebihan PID dapat digunakan untuk mengendalikan semua variabel proses. Elemen D hanya cocok digunakan untuk variabel proses yang bebas dari riak.

Daftar Pustaka

- [1] B. Hekimoğlu, S. Ekinici, and S. Kaya, "Optimal PID controller design of DC-DC buck converter using whale optimization algorithm," in Proc. IEEE IDAP, Malatya, Turkey, Sep. 2018, pp. 1–6.
- [2] S. Khubalkar, A. Junghare, M. Aware, and S. Das, "Modeling and control of a permanent-magnet brushless dc motor drive using a fractional order proportional-integral-derivative controller," Turkish J. Elect. Eng. Comput. Sci., vol. 25, no. 5, pp. 4223–4241, 2017.
- [3] Podlubny, "Fractional order systems and PID-controllers," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 44, no. 1, pp. 208–214, Jan. 1999.
- [4] A. Monje, Y. Chen, B. M. Vinagre, D. Xue, and V. Feliu-Batlle, Fractional-order Systems and Controls: Fundamentals and Applications. London, U.K.: Springer-Verlag, 2010.
- [5] P. Shah and S. Agashe, "Review of fractional PID controller," Mechatron- ics, vol. 38, pp. 29–41, Sep. 2016.
- [6] S. Khubalkar, A. Chopade, A. Junghare, M. Aware, and S. Das, "Design and Realization of Stand-Alone Digital Fractional Order PID Controller for Buck Converter Fed DC Motor. Circuits Syst. Signal Process" vol. 35, issue 6, pp. 2189–2211.
- [7] S. Das, Functional Fractional Calculus, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2011.
- [8] Haj, Muhammad Izzul, et al. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 2.1 (2025): 41-49.
- [9] Pradana, Muhammad Handy Wahyu. "Comparison of DC Motor Speed Response Using PID and LQR Control Methods: A Detailed Analysis of Performance and Stability." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.1 (2024): 1-7.
- [10] Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1 (2025): 10-19.
- [11] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 14-25.
- [12] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 1-13.
- [13] Rohman, Yulian Fatkur, and Anggara Trisna Nugraha. "DC Motor Analysis 42D29Y401 for System Optimization through LQR and LQT Approaches." Conference of Electrical, Marine and Its Application. Vol. 3. No. 1. 2024.
- [14] Ainudin, Fortunaviaza Habib, and Anggara Trisna Nugraha. "Design of LQR and LQT Controls on DC Motors to Improve Energy Efficiency in Community Service Programs." Maritime in Community Service and Empowerment 2.2 (2024): 1-7.
- [15] Framuja, M. Alief, Fortunaviaza Habib Ainudin, and Anggara Trisna Nugraha. "Design and

- Implementation of Roll, Pitch, and Yaw Simulation System for Quadrotor Control Using LQR and PID Algorithms." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2 (2024): 1-12.
- [16] Nugraha, Anggara Trisna, Rizki Abdi Pradana, and Muhammad Jafar Shiddiq. "Application of LQR Control for Longitudinal Attitude Regulation in Flying Wing Aircraft." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2 (2024): 1-6.
- [17] Muttaqin, Imam Mursyid, Salsabila Ika Yuniza, and Anggara Trisna Nugraha. "Performance Analysis of a Single-Phase Controlled Half-Wave Rectifier Applied to AC Motor." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2 (2024): 1-10.
- [18] Nugraha, Anggara Trisna, and Chusnia Febrianti. "Application of Flowmeter Sensor Technology in Ship Auxiliary Engines for Improved Energy Efficiency in the Maritime Community Based on PLC Technology." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2 (2024): 1-7.
- [19] Sobhita, Rama Arya, Anggara Trisna Nugraha, and Mukhammad Jamaludin. "Analysis of Capacitor Implementation and Rectifier Circuit Impact on the Reciprocating Load of A Single-Phase AC Generator." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1 (2025): 1-9.
- [20] Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Springer, Singapore, 2025. 211-228.