

Analisis Penalaan Kontroler PID pada Simulasi Kendali Kecepatan Putaran Motor DC

ADITYA FITRIANSYAH, WALUYO, SYAHRIAL

Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung
Email :adityajailani@yahoo.co.id

ABSTRAK

Motor listrik merupakan salah satu peralatan listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri, salah satunya adalah motor DC. Kelebihan motor DC adalah relatif mudah diperoleh dan diatur kecepatannya. Cara pengaturan kecepatan yang digunakan adalah dengan menggunakan teknik PID, dimana salah satu teknik untuk mengatur kecepatan motor DC yang umum digunakan. Dalam perancangan sistem kontrol PID, yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan. Hasil simulasi menunjukkan kontroler PID untuk kendali kecepatan motor DC ini menghasilkan kondisi robust (kokoh) saat nilai $K_p = 0,2$, $K_i = 1,6$ dan $K_d = 0,1$. Hasil dari parameter kendali yang dirancang memiliki error steady state 0,999 % dan dengan settling time 0,84 detik pada rise time 0,49 detik dan nilai peak terletak pada 0,99. Kecepatan awal yang dihasilkan mendekati set point yang diinginkan pada detik kedua dan kecepatannya tidak ada penurunan atau tetap konstan sampai dengan detik ke 100.

Kata Kunci : Motor DC, PID, Rise time, Error Steady state, Settling time

ABSTRACT

The electric motor is one of the most power equipment used in world industries , one of which is DC motor. The advantages of DC motors are relatively easy to obtain and set the speed of rotation. A technique to control the speed is used PID, which is commonly used. In PID control system design needs to be done were to set the parameters P, I or D so that the output signal response system to particular input as desired. The simulation results showed that the PID controller for DC motor speed control produced robust conditions when the value of $K_p = 0.2$, $K_i = 1.6$ and $K_d = 0.1$. The results of the control parameters were designed to have a steady state error of 0.999 % and the settling time of 0.84 seconds, 0.49 seconds rise time and peak value was at 0.99. The resulting initial velocity approaching the desired set point was 2nd second and remain constant until 100th second.

Keywords : Motor DC, PID, Rise time, Error Steady state, Settling time

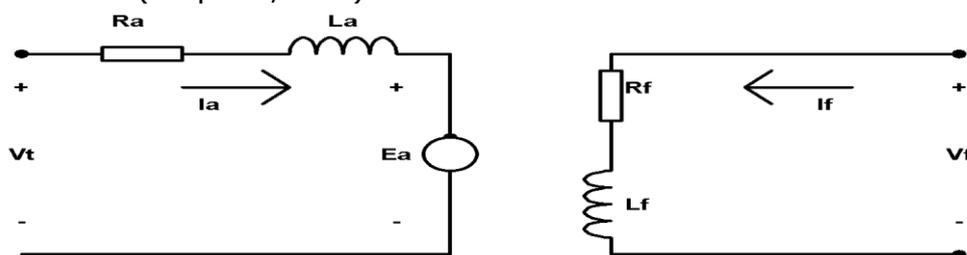
1. PENDAHULUAN

Motor DC merupakan jenis motor yang menggunakan tegangan searah sebagai sumber tenaganya. Dengan memberikan beda tegangan pada kedua terminal tersebut, motor akan berputar pada satu arah, dan bila polaritas dari tegangan tersebut dibalik maka arah putaran motor akan terbalik pula. Polaritas dari tegangan yang diberikan pada dua terminal menentukan arah putaran motor sedangkan besar dari beda tegangan pada kedua terminal menentukan kecepatan motor (Chapman, 1991).

Motor DC memiliki 2 bagian dasar :

1. Bagian yang tetap/*stasioner* yang disebut stator. Stator ini menghasilkan medan magnet, baik yang dibangkitkan dari sebuah koil (elektro magnet) ataupun magnet permanen.
2. Bagian yang berputar disebut rotor. Rotor ini berupa sebuah koil dimana arus listrik mengalir.

Selama ini kenyataannya kecepatan motor DC mengalami penurunan akibat dari pembebanan pada motor DC sehingga menyebabkan putaran dari motor DC menjadi lambat dan tidak cepat untuk mencapai kecepatan yang konstan. Untuk mengatasi hal ini maka diperlukan suatu perancangan sistem kendali kecepatan motor DC agar motor DC tersebut berputar sesuai dengan kecepatan yang diharapkan. Agar sistem kendali kecepatan motor DC lebih baik maka diperlukan kontroler yang dapat mengendalikan sistem tersebut. Kontroler yang digunakan untuk mengatasi hal ini yaitu dengan kontroler *Proportional Integral Derivatif* (PID). Spesifikasi umum dalam desain adalah *rise-time*, *settling-time*, *maximum overshoot* dan *error steady state* terhadap masukan yang diberikan, kendali kecepatan motor DC dikontrol dengan kontroler PID yang di simulasikan dengan suatu perangkat lunak yang ditampilkan melalui GUI (*graphic user interface*) berfungsi sebagai *Human Interface* untuk mendapatkan respon kecepatan yang konstan pada *setpoint* 1750 RPM dan pada waktu yang cepat. Pengendalian motor DC ini menggunakan rangkaian DC berpenguat terpisah, yang diterapkan pada ujung jangkar dengan tegangan terpasang e_a sesuai Gambar 1 (Chapman, 1991).



Gambar 1. Rangkaian motor DC berpenguat terpisah

Karena motor DC sering digunakan pada sistem kendali untuk tujuan analisis maka perlu dibuat model matematis motor DC untuk aplikasi kendali maka menggunakan gambar rangkaian ekuivalen di atas untuk merepresentasikan motor DC dengan magnet permanen. Untuk analisis linier diasumsikan bahwa torka yang dihasilkan motor sebanding dengan fluks pemisah udara dan arus jangkar. Medan konstan, fluks konstan dan torka mempunyai arah sesuai kumparan magnet, sehingga (Subrahmanyam, 1994):

$$T_m(t) = K_T \cdot \Phi \cdot I_a \quad (1)$$

Karena Φ konstan, maka persamaan 1 dapat ditulis

$$T_m(t) = K_T \cdot i_a \quad (2)$$

Tegangan keluaran *loop* terbuka dari persamaan 2 maka :

$$e_t = K_T \omega \quad (3)$$

Tegangan pada terminal jangkar motor diberikan oleh persamaan :

$$e_a = K_b e \quad (4)$$

Sehingga dengan menggunakan *Hukum Kirchoff* tegangan:

$$e_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (5)$$

Ketika konduktor bergerak pada medan magnet, suatu tegangan dibangkitkan melintasi ujung-ujungnya. Tegangan ini, *emf* balik yang sebanding dengan kecepatan motor, berlawanan dengan aliran arus. Hubungan emf balik (e_b) Volt dengan kecepatan motor (ω_m) rad/detik adalah

$$e_b = K_b \omega_m (t) \quad (6)$$

Persamaan Motor mempunyai keseimbangan torsi sebagai berikut :

$$J \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_T i_a \quad (7)$$

Dengan menggunakan rumus penguatan *Masson* (*Masson Gain Formula*) :

$$T(s) = \frac{\frac{K_T}{JL_a}}{s^2 + s(L_a + JR_a) + (R_a + K_b K_T)} \quad (8)$$

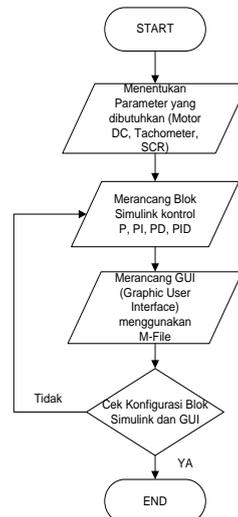
Dimana e_a = tegangan masukan (Volt), K_T = konstanta torsi (Nm/A), J = momen inersia ekivalen (Kgm^2), L_a = induktansi kumparan jangkar (H), T_L = torka beban (Nm), ω_m = kecepatan motor (RPM), R_a = tahanan jangkar (Ω), K_b = konstanta EMF balik (V/s.rad), L_a = induktansi kumparan jangkar (H), I_a = arus kumparan jangkar (A)

2. METODE SIMULASI

Pada penelitian ini, kendali kecepatan motor DC yang akan dirancang menggunakan kontroler PID. Kontroler yang dirancang menggunakan perangkat lunak, di mana terdapat *diagram blok* yang berfungsi untuk menciptakan subsitem pada PID untuk mengendalikan kecepatan motor DC berdasarkan *set point* yang diberikan. Selanjutnya, setelah dirancang sistem kontrol PID pada *diagram blok* ditampilkan menggunakan GUI yang berfungsi sebagai *Human interface*. GUI mengandung tugas, perintah, atau komponen program yang mempermudah *user* (pengguna) dalam menjalankan sebuah kontrol PID.

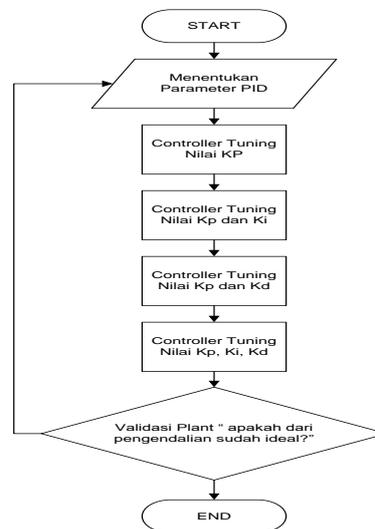
Gambar 2 merupakan *flowchart* konsep perancangan kendali motor DC, dimana langkah pertama menentukan motor DC yang digunakan, mencari parameter yang dibutuhkan seperti konstanta torka, momen inersia, tahanan jangkar, konstanta EMF, arus kumparan

jangkar, induktansi serta mencari parameter untuk SCR sebagai *actuator* dan *tachometer* sebagai sensor kecepatan. Langkah kedua adalah merancang blok kontroler PID menggunakan *diagram blok* yaitu dengan melakukan beberapa percobaan seperti menggunakan kontroler *proportional* saja, *proportional integral*, *proportional derivatif* dan *proportional integral derivatif*. Langkah ketiga adalah merancang GUI, selanjutnya mensinkronkan antara diagram blok dan GUI agar blok dan program yang dirancang berjalan dengan sempurna.



Gambar 2. *Flowchart* Konsep Perancangan Kendali kecepatan Motor DC

2.1 *Flowchart* Sistem Kendali Motor dengan Penalaan PID



Gambar 3. *Flowchart* Penalaan Pada kontrol PID untuk mendapatkan nilai parameter

Gambar 3 adalah *flowchart* penentuan parameter PID dengan mencari besarnya nilai dari parameter K_p , K_i dan K_d yaitu dengan cara *men-tuning* atau melakukan penalaan. Proses ketika memasukan nilai parameter kontrol PID yang dilakukan memiliki beberapa urutan sebagai berikut.

1. Penalaan parameter *kontroler* dimulai dengan hanya menggunakan *kontroler Proportional*, kemudian baru ditambahkan *kontroler Integral*.
2. Penalaan selanjutnya *kontroler Proportional* hanya ditambahkan *kontroler Derivatif*.

3. Penalaan terakhir semua parameter *kontroler Proportional, Integral dan Derivatif* dimasukan nilainya.
4. Melakukan Simulasi penalaan parameter kendali PID untuk aplikasi sistem pengendalian kecepatan motor DC dengan memasukkan nilai model matematika keseluruhan yang telah dihitung sebelumnya (Ogata K, 1994).

2.2 Data Spesifikasi yang Dibutuhkan

2.2.1 Spesifikasi Motor DC

Pada rancangan penelitian ini motor DC yang digunakan adalah *type* PITMAN Series GM 9000 type GM9X33, spesifikasi motor yang digunakan (Pittman, 2013).

No-Load Speed	= 5993 rpm
No-Load Current	= 0,20 A
Konstanta Aplifier (K_A)	= 10 N-m/A
Konstanta torsi Motor (K_T)	= 4,20 Nm/A
Back-EMF Kosntan (K_b)	= 3,10 (V/krpm)
Momen Inersia (J)	= $4,46 \times 10^{-6}$ kg/m ²
Induktansi jangkar (L_a)	= 2,08 mH
Resistansi (R_a)	= 2,53 ohm

Dari data tersebut, nilai *Transformasi Laplace* dapat dicari dengan menggunakan persamaan (8) seperti dibawah ini.

$$\begin{aligned}
 T(s) &= \frac{\frac{K_T}{JL_a}}{s^2 + s(L_a + JR_a) + (R_a + K_b K_T)} \\
 &= \frac{\frac{4.20}{2,08 \times 4,46 \times 10^{-6}}}{s^2 + s(2,08) + (4,46 \times 10^{-5} \times 2,53) + (2,53 + 3,10 \times 4,20)} \\
 &= \frac{45274}{s^2 + 2,080 s + 15,55}
 \end{aligned}$$

2.2.2 Spesifikasi Tachometer

Sensor yang digunakan adalah tachometer yang prinsip kerjanya terjadi proses konversi langsung antara kecepatan dan tegangan. Masukan sensor kecepatan berupa kecepatan putar dari motor DC (ω_m). Setelah dikonversi, keluaran dari sensor adalah tegangan dalam volt. Sensor ini memiliki tegangan 6,5 Volt dengan kecepatan putar mencapai 5993 rpm, sehingga *gain* dari sensor kecepatan adalah sebagai berikut (Shearer, 1990).

$$K = \frac{E}{\omega_m} = \frac{6,5 V}{4230 rpm} = 1,53 \times 10^{-3} V/rpm$$

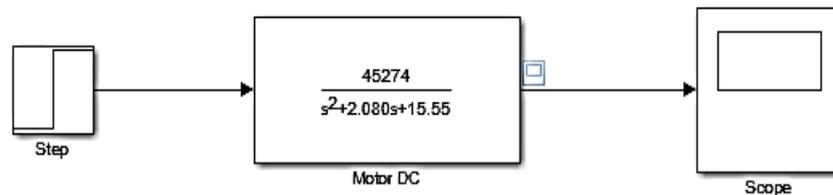
2.2.3 SCR (*Silicon Controlled Rectifier*)

Aktuator yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor DC adalah SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) yang memiliki tegangan DC 180 volt dengan tegangan keluaran sebesar 220 volt. Motor DC yang dikendalikan memiliki tegangan input 30,3 Volt, dengan kecepatan putar 0 - 5993 RPM, sehingga diperoleh *gain* untuk SCR sebesar (Shearer, 1990).

$$K_{SCR} = \frac{Output_V_{dc}}{Input_V_m} = \frac{220 Volt}{180 Volt} = 1,22 Volt$$

2.3 Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Tanpa Menggunakan Kontroler PID

Percobaan pertama dengan perancangan kendali kecepatan motor DC tanpa menggunakan kontroler PID yaitu dengan system *open loop*. Model simulasi kendali kecepatan motor DC dengan sistem *open loop* ditunjukkan oleh Gambar 4.



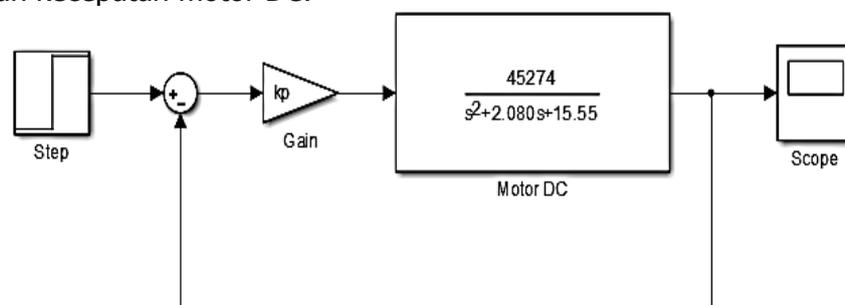
Gambar 4. Model Simulink *open loop* motor DC

2.4. Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor DC dengan Menggunakan Kontroler PID

Pada rancangan kontrol PID (*Proportional Integral Derivatif*) ini menggunakan jenis Motor DC PITMAN Series GM 9000 type GM9X33. Perancangan dilakukan dengan beberapa kontroler.

2.4.1 Rancangan Kontrol Proportional

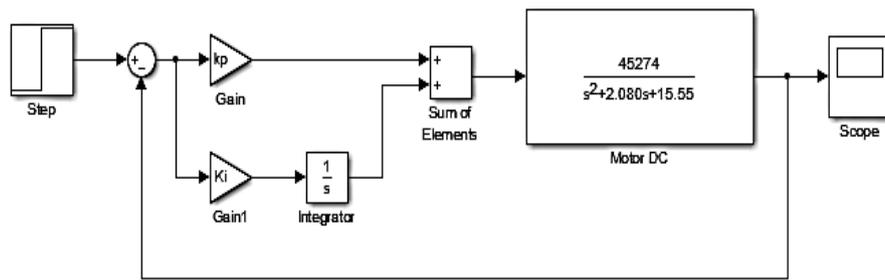
Gain unit control proportional dapat berupa bilangan bulat, atau bilangan pecahan. Semakin besar nilai *gain* akan menyebabkan pengendali semakin reaktif terhadap *error*. Hal ini ditandai dengan adanya *overshoot* pada kondisi *transient* dan sebaliknya. Gambar 5 menunjukkan rancangan diagram blok menggunakan kontrol proportional saja untuk mengendalikan kecepatan motor DC.



Gambar 5. Kontrol *Proportional*

2.4.2 Rancangan Kontrol *Proportional Integral*

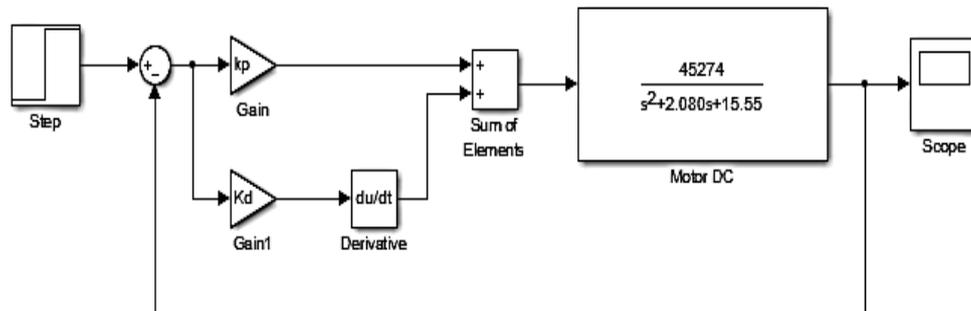
Kekurangan pengendali proporsional dapat dihilangkan dengan memasukkan elemen pengendali *integral*. Elemen pengendali *integral* mempunyai kelemahan dalam respon dinamik, dimana pengaturan lingkaran tertutup beresilasi dengan amplitudo yang mengecil secara perlahan atau bahkan amplitudo yang membesar, biasanya kedua hal ini tidak diinginkan. Gambar 6 adalah rancangan diagram blok menggunakan kontrol *Proportional* dan *Integral* untuk mengatur kecepatan motor DC.



Gambar 6. Kontrol *Proportional Integral* pada Simulink

2.4.3 Rancangan Kontrol *Proportional Derivatif*

Kendali *derivatif* selalu digunakan bersama-sama dengan aksi proporsional. Aksi kendali *derivatif* mendahului kesalahan penggerak, mengawali aksi koreksi dini dan cenderung memperbesar kestabilan sistem. Gambar 7 adalah rancangan diagram blok menggunakan kontrol *Proportional* dan *Derivatif* tanpa menggunakan kontrol *Integral* untuk mengatur kecepatan motor DC.

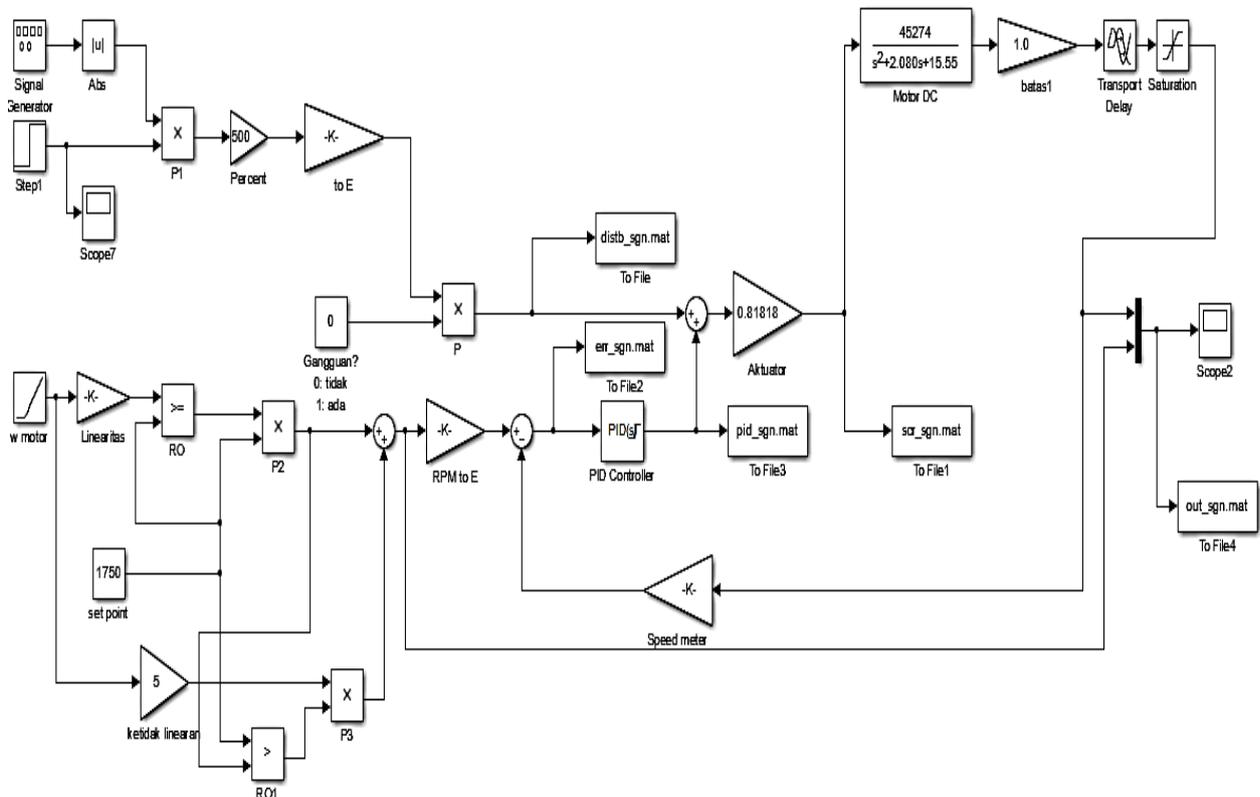


Gambar 7. Kontrol *Proportional* dan *Derivatif* pada Simulink

2.4.4 Rancangan Kontrol *Proportional Integral Derivatif*

Pada perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran system terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan sehingga mendapatkan nilai ideal dengan melakukan penalaan nilai K_p , K_i , K_d . Gambar 8 adalah rancangan diagram blok system untuk kontroler *Proportional*, *Integral* dan *Derivatif* untuk tampilan di *GUI*. Sinyal *step* diberikan untuk *set point* sebesar 1750 RPM, karena keluaran adalah data linear sebanding dengan waktu simulasinya, misalnya 100 putaran, keluaran hanya sampai 100 putaran sehingga diperlukan pengubah ke data *actual* (RPM) dengan memasukkan blok *Gain*. Blok ketidaklinearan diberikan dengan asumsi sewaktu mengubah *setpoint*, terjadi gangguan gesekan di *potensiometer*. Blok *Relational Operator* berfungsi jika masukan *Port 1* lebih besar atau sama dengan *set point*, maka nilainya 1, dan jika data pengaturan masih lebih kecil dari *set point* maka keluaran blok *relational operator* bernilai 0. *Set point* adalah E (gaya gerak listrik), keluaran tachometer juga E (gaya gerak listrik) dengan keluaran blok ω_m (nilai RPM), maka keluaran blok *set point* harus menjadi besaran E (ggl) dengan blok RPM ke E . Nilai E diperoleh dari nilai pengubah *tachometer*, karena *tachometer* juga berfungsi sebagai pengubah RPM ke E . Nilai *set point* yang sudah di-*set* sebesar 1750 RPM merupakan batas sinyal masukan (kecepatan) pada *scope*, serta pada blok kontroler PID, yang berfungsi untuk mencari kecepatan motor DC yang ideal dengan cara mencari nilai penalaan parameter K_p , K_i , K_d . Blok *transfer function* berfungsi untuk memasukkan nilai parameter pada motor DC, selanjutnya memasukkan nilai parameter K_p , K_i , K_d yang dimasukkan pada blok kontroler PID, untuk mengatur kecepatan motor DC. Blok *saturation* berfungsi untuk membatasi keluaran agar tidak melampaui

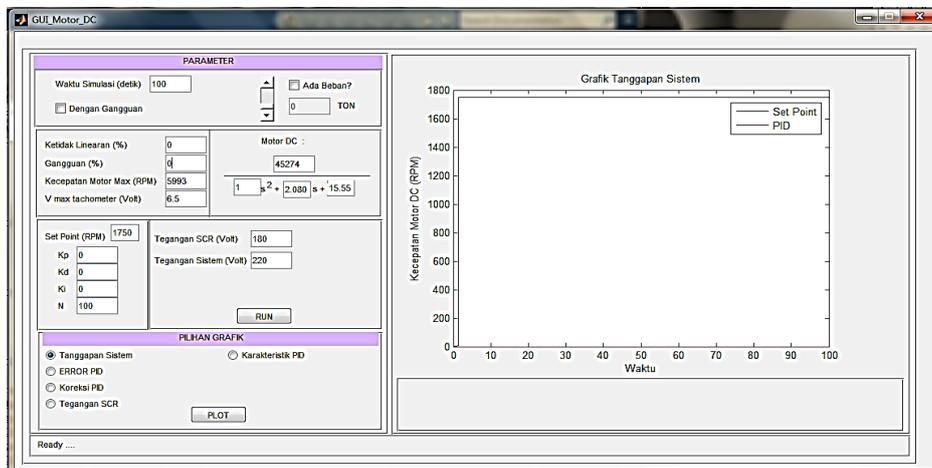
kecepatan maksimum motor, sebesar 4230 RPM, serta dengan nilai tersebut tachometer akan mengeluarkan tegangan 6.5 volt dan menghasilkan sinyal *output* pada *scope* (Ogata, 1970).



Gambar 8. Kontrol Porportional, Integral dan Derivatif pada Simulink

2.4.5 Rancangan GUI (*Graphical User Interface*)

GUI adalah suatu sistem *interface* pada komputer yang memberikan atau memfasilitasi tampilan pilihan pada layar, yang biasanya berbentuk *icon* (simbol gambar) atau menu (daftar karakter *alfanumerik*) sebagai sarana yang dapat digunakan pengguna untuk memberikan perintah melalui divais input. GUI dirancang dengan menggunakan *source-source* serta *icon* yang diperlukan untuk menampilkan pada layar. Gambar 9 adalah *Human interface* yang dirancang menggunakan GUI.



Gambar 9. Tampilan Rancangan GUI

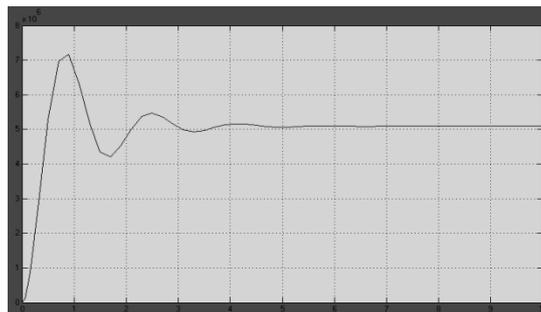
3. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Sistem

Dari hasil perancangan pada simulasi kendali kecepatan motor DC yang telah dilakukan, yaitu dengan adanya pengendalian tanpa kontroler PID dan dengan adanya pengendalian dari kontroler PID, maka diperoleh hasil rancangan yang dapat dianalisis sebagai berikut.

3.1.1 Analisis Pengujian Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Tanpa Menggunakan *Kontroler* PID

Pengujian rancangan kendali motor DC ini dilakukan tanpa menggunakan kontroler PID. Berikut merupakan grafik yang dihasilkan dari sistem *open loop* motor DC tanpa kontrol PID.



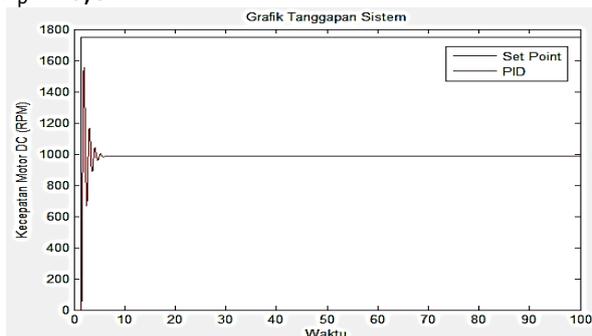
Gambar 10. Respon Motor DC

Gambar 10 memperlihatkan hasil dari kinerja respon dari motor DC tanpa pengendalian yang diberikan *input* sinyal *step* bahwa respon bisa mengikuti *set point* sebesar 1750 rpm sampai dengan 10 detik tetapi *steady state*-nya masih besar.

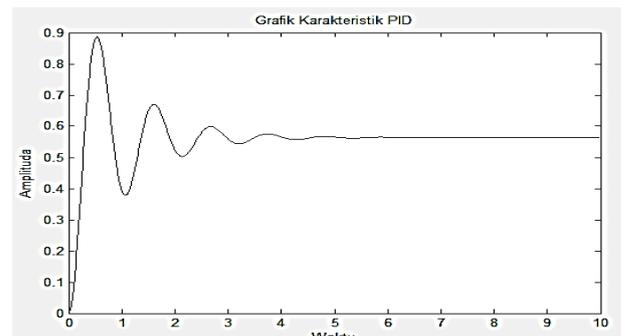
3.1.2 Analisis Pengujian Sistem Kendali Kecepatan Motor DC dengan Menggunakan *Kontroler* PID

3.1.2.1 Uji penalaan parameter kontrol dengan memasukkan nilai *Proportional*

Respon penalaan parameter kontrol PID sistem pengendalian kecepatan motor DC dengan $K_p = 0,5$



(a)



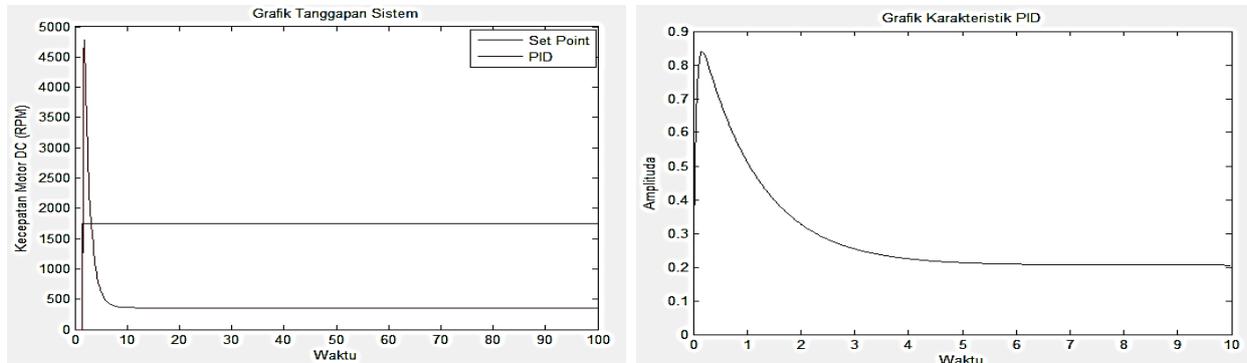
(b)

Gambar 11 (a) Grafik tanggapan sistem $K_p = 0,5$
(b) Grafik karakteristik PID $K_p = 0,5$

Gambar 11 (a) adalah grafik tanggapan sistem motor DC pada $K_p = 0,5$ dengan *set point* 1750 RPM menghasilkan kecepatan awal sebesar 1500 RPM sampai detik kelima tetapi kecepatan yang dihasilkan tidak konstan mengalami kenaikan dan penurunan. Gambar 11 (b) adalah grafik karakteristik PID menghasilkan nilai *rise Time* = 0,155, *settling Time* = 3,77, *peak* = 0,88, dan *steady state* = 0,578.

3.1.2.2 Uji Penalaan Parameter kontrol dengan memasukkan nilai *proportional integral*

Respon penalaan parameter kontrol PID sistem pengendalian kecepatan motor DC dengan $K_p = 0,2$, $K_i = 0,6$.

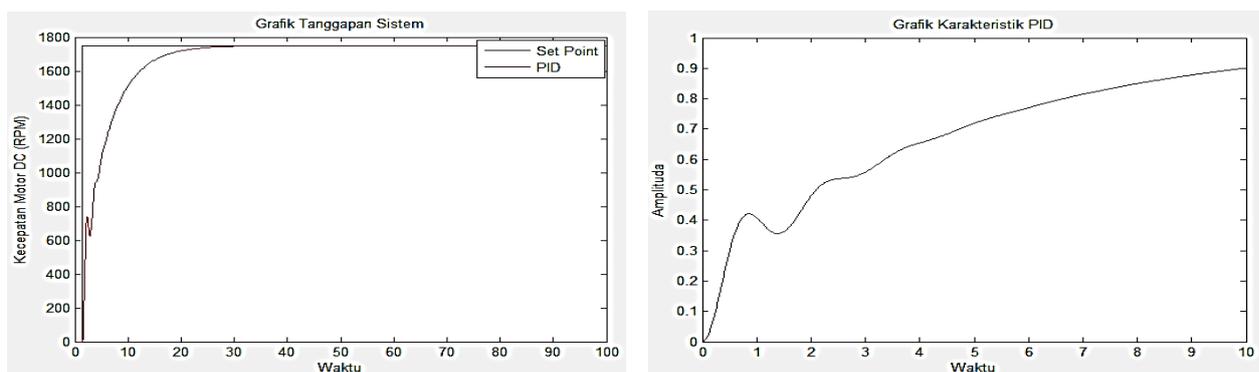


(a) Grafik tanggapan sistem $K_p = 0,1$, $K_i = 0,5$
 (b) Grafik karakteristik PID $K_p = 0,1$, $K_i = 0,5$

Gambar 12 (a) adalah grafik tanggapan sistem motor DC pada $K_p = 0,1$, $K_d = 0,5$ dengan *set point* 1750 RPM menghasilkan kecepatan sekitar 4600 RPM tetapi kecepatan mengalami penurunan sekitar 500 RPM pada detik kesembilan. Gambar 12 (b) adalah grafik karakteristik PID menghasilkan nilai *rise time* = 0,007, *settling time* = 4,462, *peak* = 0,44, dan *steady state* = 0,217.

3.1.2.3 Uji Penalaan Parameter Kontrol dengan memasukkan nilai *Proportional, Derivatif*

Respon penalaan parameter kontrol PID sistem pengendalian kecepatan motor DC dengan $K_p = 0,1$, $K_d = 0,1$



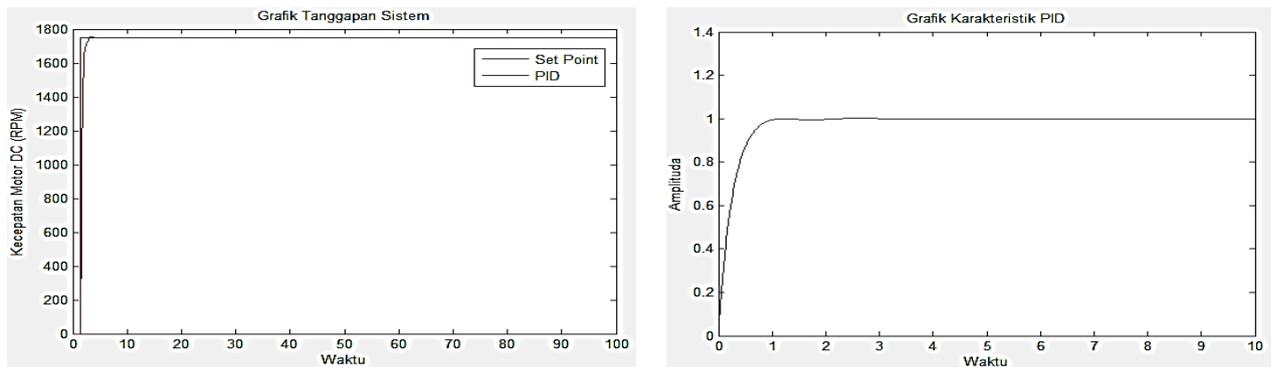
(a) Grafik tanggapan sistem $K_p = 0,1$, $K_d = 0,1$
 (b) Grafik karakteristik PID $K_p = 0,1$, $K_d = 0,1$

Gambar 13(a) adalah grafik tanggapan sistem motor DC pada $K_p = 0,1$, $K_d = 0,1$ dengan *set point* 1750 RPM, yang menghasilkan kecepatan awal sebesar 900 RPM tetapi kecepatan yang dihasilkan tidak konstan sampai detik ketiga mengalami penurunan pada kecepatan 600 RPM dan mengalami kenaikan ke *set point* 1750 RPM pada detik ke 30. Gambar 13 (b) adalah grafik karakteristik PID yang dihasilkan dengan nilai *rise time* = 9,46, *settling time* = 17,640, *peak* = 0,99, dan *steady state* = 0,9.

3.1.2.3 Uji Penalaan Parameter kontrol dengan memasukkan nilai *Proportional*, *Integral* dan *Derivatif*.

Respon penalaan parameter kontrol PID sistem pengendalian kecepatan motor DC dengan $K_p = 0,2$, $K_i = 1,6$, $K_d = 0,1$

Gambar 14 (a) adalah grafik tanggapan sistem motor DC pada $K_p = 0,2$, $K_i = 1,6$, $K_d = 0,1$ dengan *set point* 1750 RPM yang menghasilkan kecepatan awal yang ideal mendekati *set point* sebesar 1750 RPM pada detik kedua. Kecepatan yang dihasilkan pada kontroler ini adalah kecepatan yang konstan sampai 100 detik dan kecepatan awal yang dihasilkan berlangsung cepat. Gambar 14 (b) adalah grafik karakteristik PID menghasilkan nilai *rise time* = 0,49, *settling time* = 0,84, *peak* = 0,99, dan *steady state* = 0,999.



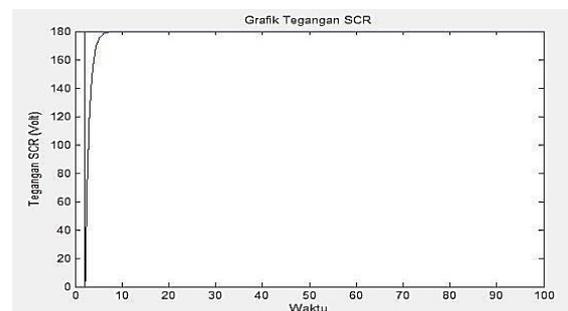
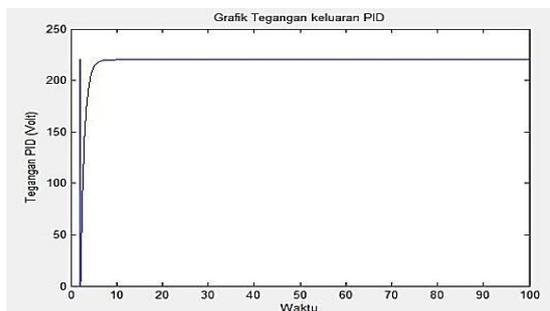
(a) (b)
Gambar 14(a) Grafik tanggapan sistem $K_p = 0,2$, $K_i = 1,6$, $K_d = 0,1$
(b) Grafik karakteristik PID $K_p = 0,2$, $K_i = 1,6$, $K_d = 0,1$

Tabel 1. Hasil Respon Penalaan Parameter Kontrol PID dengan Metode Heuristik untuk Pengendalian kecepatan motor DC

Kecepatan Motor DC (<i>Set Point</i>)	Uji Metode Heuristik			<i>Settling Time</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Error Steady State</i>	<i>Peak</i>
	K_p	K_i	K_d	Detik	Detik	%	
1750 RPM	0.1	0	0	0.29	0.30	0.07	0.06
	0.5	0	0	3,77	0,15	0.51	0.88
	1.4	0	0	0.46	0.14	0.41	0.50
	3	0	0	0.44	0.17	0.43	0.52
	3.8	0	0	0.43	0.11	0.56	0.61
	0.2	0.5	0	4.46	0.07	0.44	0.21
	0.1	1.1	0	1.98	0.00	0.04	0.59
	1.9	1.4	0	1.45	0.01	0.38	0.68
	0.9	2.2	0	2.66	0.00	0.23	0.76
	3.5	2.2	0	1.35	0.01	0.53	0.77
	0.1	0	0.1	9.46	17,6	0.49	0.90
	0.9	0	0.6	24.5	13.5	0.82	0.99
	2	0	0.9	19.4	10.1	0.89	0.99
	3.2	0	1.8	11.1	5.4	0.97	0.99
	3.7	0	2.9	7.19	3.4	0.99	0.99
	0.1	0.1	0.1	127.1	0.49	0.99	0.99
	0.2	1,6	0.1	0.89	7.26	0.95	0.99
1	0.3	1.3	10.1	6.3	0.97	0.99	

1.8	0.3	1.4	10.5	6.4	0.96	0.99
1.7	0.5	1.3	13.5	6.8	0.98	0.99
2	0.7	1.9	7.6	4.8	0.98	0.99
1.5	0.9	2.5	4.8	3.4	0.99	0.99
1.3	1.2	3	3.3	2.8	0.99	0.99
1.2	1.9	3.5	2.9	2.6	0.99	1.01
1.1	2.5	3.6	4.3	2.7	1.01	1,03
0.9	1.1	0.1	127	66.7	0.28	0.99

Tabel 1 merupakan hasil uji dengan metode Heuristik untuk mendapatkan parameter yang ideal untuk mengendalikan kecepatan motor DC, dengan K_p , K_i dan K_d berturut-turut sebesar 1,1, 0,1 dan 3,7 serta mempunyai grafik tegangan keluaran PID dan grafik tegangan SCR, dimana ditunjukkan oleh Gambar 15.



Gambar 15(a). Grafik Tegangan keluaran PID **Gambar 15(b). Grafik Tegangan SCR**

Gambar 15(a) dengan nilai $K_p = 0,2$, $T_i = 1,6$, $T_d = 0,1$ menghasilkan nilai tegangan pada PID sebesar 220 volt pada waktu 100 detik sesuai *set point* yang diinginkan.

Gambar 15(b) dengan nilai $K_p = 0,2$, $T_i = 1,6$, $T_d = 0,1$ menghasilkan nilai tegangan pada SCR sebesar 180 volt pada waktu 100 detik sesuai *set point* yang diinginkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari percobaan simulasi, sistem pengendalian kecepatan motor DC menggunakan kontrol PID dan analisis data yang telah dipaparkan, dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Dari simulasi yang dilakukan dengan Metode Heuristik atau penalaan terbukti mampu memberikan kriteria performansi sistem kendali yang robust dilihat dari perbandingan nilai *error steady state* yang dihasilkan. *Error steady state* pada pengendali tanpa menggunakan kontroler PID jauh lebih besar dibanding dengan menggunakan kontroler PID, yang hanya 0,999%.
2. Penalaan parameter kendali PID untuk mengendalikan kecepatan motor DC yang dipakai pada perancangan ini mampu memberikan respon pengendalian yang paling baik dengan nilai $K_p = 0,2$, $K_i = 1,6$ dan $K_d = 0,1$ terlihat dari hasil grafik *Rise time* yang sangat cepat, yaitu 0,49 detik dengan *settling time* bernilai 0,84 detik, sedangkan *error steady state*-nya 0,999%. Kecepatan yang dikendalikan juga tidak mengalami penurunan dan respon yang dihasilkan untuk mencapai *set point* terjadi pada detik ketiga.

DAFTAR RUJUKAN

- Chapman, Stephen.(1991).Electric Machinery Fundamentals.edisi 2, United State : McGraw-Hill Companies.
- Ogata, Katsuhiko.(1970).Teknik Kontrol Automatik.Edisi 2 Jilid 1, ErlanggaJakarta :Prentice Hall.
- Ogata K.(1994).Solving Control Engineering Problems with MATLAB. Prentice Hall International, Inc :Prentice Hall.
- Pittman. (2013). Buletin motor DC catalog GM 14900 type 1.
- Shearer, J. Lowen.(1990). Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems, Macmillan Publishing Company. New York :Printice Hall Int.
- Subrahmanyam, Vedam.(1994). Electrical Drives "Concepts and Applications", Tata McGraw-Hill Company Limited. New Delhi :McGraw-Hill Companies.