

# Analisa Performansi dan *Robustness* Beberapa Metode *Tuning* Kontroler PID pada Motor DC

Handy Wicaksono

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra  
e-mail: handy@peter.petra.ac.id

## Abstrak

Kontroler PID adalah kontroler yang sampai sekarang masih banyak digunakan di dunia industri. Hal yang penting pada desain kontroler PID ini ialah menentukan parameter kontroler atau *tuning*. Beberapa metode *tuning* yang akan dibahas di sini ialah Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, dan Direct Synthesis. Dengan mengimplementasikan kontroler PID pada motor DC, akan dianalisa performansi dan *Robustness* dari sistem tersebut. Secara umum metode Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon memberikan performansi yang lebih baik (*rise time* sekitar 0.1s dan *settling time* di bawah 1s), juga *Robustness* yang lebih baik (*phase margin* sekitar  $40^\circ$ ). Namun jika diberikan pendekatan nonlinier akibat keterbatasan motor DC, metode Direct Synthesis memberikan performansi yang jauh lebih baik.

**Kata kunci:** kontroler PID, *tuning*, *robustness*.

## Abstract

*PID controller is a wellknown controller that still used in industry nowadays. The important thing in designing is tuning the controller's parameter. Several tuning methods that described here are Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, and Direct Synthesis. By implementing PID controller on DC motor, we will analyze performance and Robustness of the system. Generally, Ziegler-Nichols and Cohen-Coon methods give better performance (amount of rise time is about 0.1 s and settling time is under 1 s), and better Robustness too (amount of phase margin is about  $40^\circ$ ). But if the nonlinearity approximation is applied because of DC motor's limitation, Direct Synthesis method give much better performance.*

**Keywords:** PID controller, *tuning*, *robustness*.

## 1. Pendahuluan

Kontroler PID adalah kontroler berumpan balik yang paling populer di dunia industri. Selama lebih dari 50 tahun, kontroler PID terbukti dapat memberikan performansi kontrol yang baik meski mempunyai algoritma sederhana yang mudah dipahami [1]. Hal krusial dalam desain kontroler PID ialah *tuning* atau pemberian parameter P, I, dan D agar didapatkan respon sistem yang kita inginkan.

Pada tahun 1942, Ziegler-Nichols mengembangkan metode kurva reaksi (*open loop tuning*) di mana kita bisa mendapatkan parameter P, I, D dari respon *open loop* sistem (tidak perlu mengetahui model *plant*). Sementara Cohen-Coon juga mengembangkan metode eksperimental dimana hasilnya akan memberikan *overshoot* yang meluruh seperempat bagian.

Kemudian muncul metode *tuning* yang berdasar model *plant*, karena identifikasi *plant* bukan lagi hal yang sulit untuk dilakukan. Metode pertama ialah *Direct Synthesis* yang memerlukan model *plant* sebenarnya dan model *plant* yang diinginkan untuk mendapatkan parameter P, I, D dari kontroler [2].

Untuk mengamati performansi suatu sistem, parameter-parameter berikut sering digunakan : *maximum overshoot*, *error steady state*, *rise time* dan *settling time*. Selain itu, pengamatan *Robustness* sistem juga perlu diperhatikan, seiring dengan berkembangnya studi tentang *robust control system* pada tahun 1980an. *Gain margin* dan *phase margin* sering kali digunakan sebagai ukuran *Robustness* suatu sistem [3]. Sehingga dengan mengamati nilai *gain margin* dan *phase margin*, kita bisa menentukan *Robustness* suatu sistem.

---

**Catatan:** Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Desember 2004. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 5, nomor 1, Maret 2005.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Kontroler PID [4]

Kontroler adalah komponen yang berfungsi meminimasi sinyal kesalahan. Tipe kontroler yang paling populer ialah kontroler PID. Elemen-elemen kontroler P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar.

Persamaan kontroler PID dalam bentuk Laplace:

$$U(s) = K_p(E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) + T_d s E(s)) \quad (1)$$

Dimana :

$K_p$  = penguatan proporsional

$T_i$  = waktu integral

$T_d$  = waktu turunan

$U(s)$  = Sinyal kontrol

$E(s)$  = Sinyal error

### 2.2 Tuning Kontroler

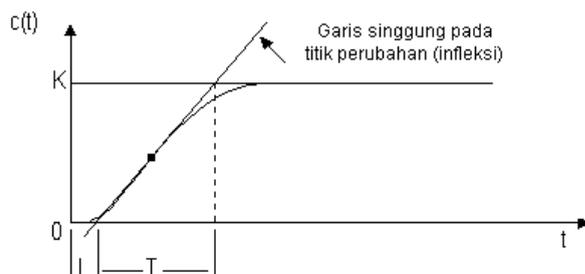
Aspek yang sangat penting dalam desain kontroler PID ialah penentuan parameter kontroler PID supaya sistem *close loop* memenuhi kriteria performansi yang diinginkan. Hal ini disebut juga dengan *tuning* kontroler.

#### 2.2.1 Metode Ziegler-Nichols [4]

Ziegler-Nichols pertama kali memperkenalkan metodenya pada tahun 1942. Metode ini memiliki dua cara yaitu metode osilasi dan kurva reaksi. Kedua metode ditujukan untuk menghasilkan respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25%.

Metode kurva reaksi didasarkan terhadap reaksi sistem *loop* terbuka. *Plant* sebagai *loop* terbuka dikenai sinyal *step function*. Kalau *plant* minimal tidak mengandung unsur integrator ataupun *pole - pole* kompleks, reaksi sistem akan berbentuk S. Gambar 1 menunjukkan kurva berbentuk S tersebut. Kelemahan metode ini terletak pada ketidakmampuannya untuk menangani *plant* integrator maupun *plant* yang memiliki *pole* kompleks.

Kurva berbentuk S mempunyai dua konstanta, waktu mati (*dead time*)  $L$  dan waktu tunda  $T$ . Dari Gambar 1 terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik, setelah selang waktu  $L$ .



Gambar 1. Kurva Respons Berbentuk S.

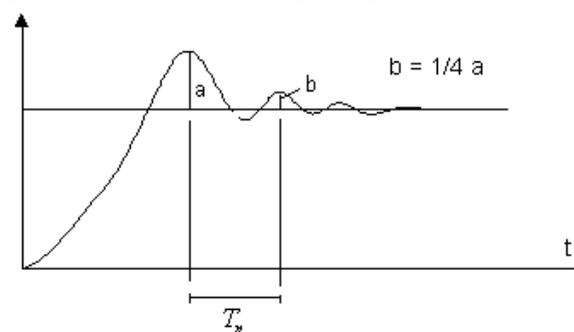
Sedangkan waktu tunda menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan mantapnya. Pada kurva dibuat suatu garis yang bersinggungan dengan garis kurva. Garis singgung itu akan memotong dengan sumbu absis dan garis maksimum. Perpotongan garis singgung dengan sumbu absis merupakan ukuran waktu mati, dan perpotongan dengan garis maksimum merupakan waktu tunda yang diukur dari titik waktu  $L$ . Tabel 1 merupakan rumusan penalaan parameter PID berdasarkan cara kurva reaksi.

Tabel 1. Penalaan Parameter PID dengan Metode Kurva Reaksi

Tipe Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\sim$	0
PI	$0,9 T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 T/L$	$2L$	$0,5L$

#### 2.2.2 Metode Cohen-Coon

Karena tidak semua proses dapat mentolerir keadaan osilasi dengan amplitudo tetap, Cohen – Coon berupaya memperbaiki metode osilasi dengan menggunakan metode *quarter amplitude decay*. Respon *loop* tertutup sistem, pada metode ini, dibuat sehingga respon berbentuk *quarter amplitude decay*. *Quarter amplitude decay* didefinisikan sebagai respon transien yang amplitudonya dalam periode pertama memiliki perbandingan sebesar seperempat ( $1/4$ ).



Gambar 2. Kurva Respon *Quarter Amplitude Decay*

Kontroler proportional  $K_p$  ditala hingga diperoleh tanggapan *quarter amplitude decay*, periode pada saat tanggapan ini disebut  $T_p$  dan parameter  $T_i$  dan  $T_d$  dihitung dari hubungan  $K_p$  dengan  $T_p$ . Sedangkan penalaan parameter kontroler PID adalah sama dengan yang digunakan pada metode Ziegler-Nichols. Selain cara tersebut, metode Cohen – Coon ini bisa dihitung dengan aturan praktis yang parameter – parameter *plant*-nya diambil dari kurva reaksi sebagai berikut [2].

Tabel 2. Penalaan Paramater PID dengan Metode Cohen-Coon

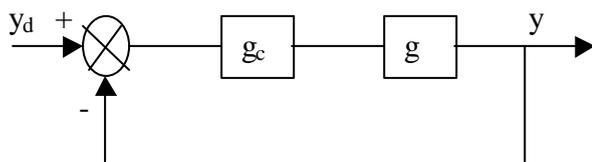
Tipe Kontroller	Kc	Ti	Td
P	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{L}{T} \right) \right]$	-	-
PI	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ 0,9 + \frac{1}{12} \left( \frac{T}{L} \right) \right]$	$L \left[ \frac{30 + 3 \left( \frac{L}{T} \right)}{9 + 20 \left( \frac{L}{T} \right)} \right]$	-
PD	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ \frac{5}{4} + \frac{1}{6} \left( \frac{L}{T} \right) \right]$	-	$L \left[ \frac{6 - 2 \left( \frac{L}{T} \right)}{22 + 3 \left( \frac{L}{T} \right)} \right]$
PID	$\frac{1}{K} \left( \frac{T}{L} \right) \left[ \frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left( \frac{L}{T} \right) \right]$	$L \left[ \frac{32 + 6 \left( \frac{L}{T} \right)}{13 + 8 \left( \frac{L}{T} \right)} \right]$	$L \left[ \frac{4}{11 + 2 \left( \frac{L}{T} \right)} \right]$

2.2.3 Metode Direct Synthesis [2]

Seiring dengan berkembangnya penelitian tentang identifikasi suatu sistem “black box”, maka memperoleh *transfer function* atau karakteristik dari sistem tersebut bukanlah hal yang teramat sulit. Hal ini menyebabkan metode *tuning* kontroler yang membutuhkan model *plant* sebenarnya juga dapat dilakukan dengan relatif mudah, misalnya dengan metode Direct Synthesis.

Metode ini terlebih dulu menentukan perilaku output yang diinginkan (*reference*) dengan membuat bentuk trayektorinya, dan model prosesnya (*plant*) digunakan untuk secara langsung mendapatkan persamaan kontroler yang sesuai. Berikut ini penurunan rumusnya.

Jika diketahui diagram blok dari suatu sistem ialah sebagai berikut.



Gambar 3. Blok Diagram dari Sistem Kontrol Berumpanbalik

Maka *closed-loop transfer function* ialah sebagai berikut :

$$y(s) = \frac{gg_c}{1 + gg_c h} y_d(s) \tag{2}$$

Dan pendekatan yang diinginkan untuk mendapatkan *setpoint* yang baru dimodelkan dengan trayektori yang diinginkan berikut :

$$\frac{y(s)}{y_d(s)} = q(s) = \frac{gg_c}{1 + gg_c h} \tag{3}$$

sehingga persamaan kontrolernya :

$$g_c = \frac{1}{g} \left( \frac{q}{1 - q} \right) \tag{4}$$

Sesuai dengan *transfer function plant* motor DC yang telah didapatkan dan berbentuk *First Order Plus Dead Time (FOPDT)*, yaitu :

$$g(s) = \frac{K e^{-as}}{ts + 1} \tag{5}$$

Dan dipilih *reference trajectory* :

$$q(s) = \frac{e^{-a_r s}}{t_r s + 1} \tag{6}$$

Dengan memasukkan hasil Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5 pada Persamaan 2.3 maka didapat persamaan kontroler :

$$g_c = \frac{(ts + 1)}{K} \left( \frac{1}{t_r s + 1 - e^{-as}} \right) \tag{7}$$

Akhirnya didapatkan kontroler dalam bentuk persamaan, namun untuk merealisasikannya sangat sulit karena besaran  $e^{-as}$  tidak bisa diimplementasikan dalam komponen analog. Namun dengan adanya implementasi kontroler PID pada mikroprosesor dan komputer digital membuat besaran tersebut bisa diimplementasikan. Melalui model dasar kontroler ini didapatkan beberapa macam nilai *tuning* PID yang berbeda – beda.

Dengan menggunakan pendekatan Pade orde 1 :

$$e^{-as} \approx \frac{1 - \frac{a}{2}s}{1 + \frac{a}{2}s} \tag{8}$$

Pada Persamaan 8, kontroler yang didapatkan menjadi

$$g_c = \frac{t}{K(t_r + a)} \left( 1 + \frac{1}{ts} \left( \frac{1 + \frac{a}{2}s}{1 + t^*s} \right) \right) \quad (9)$$

dengan  $\tau^*$  adalah *filter* yang mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$t^* = \frac{at_r}{2(a + t_r)} \quad (10)$$

Persamaan 2.8 mempunyai struktur sesuai dengan struktur kontroler PID komersial. Maka parameter kontroler PID komersial dapat dicari sebagai berikut :

$$K_c = \frac{t}{K(t_r + a)} ; t_i = t ; t_d = \frac{a}{2} ;$$

$$t^* = \frac{a}{2} \left( \frac{t_r}{a + t_r} \right) \quad (11)$$

Dengan kontroler yang sama, persamaan di atas dapat disusun kembali menjadi:

$$g_c = \frac{t + \frac{a}{2}}{K(t_r + a)} \left[ 1 + \frac{1}{(t + \frac{a}{2})s} + \left( \frac{a \frac{t}{2}}{t + \frac{a}{2}} \right) \left( \frac{1}{t^*s + 1} \right) \right] \quad (12)$$

Maka parameter *tuning* dari kontroler PID ideal ialah :

$$K_c = \frac{t + \frac{a}{2}}{K(t_r + a)} \quad t_i = t + \frac{a}{2} \quad t_d = \frac{\frac{a}{2}t}{t + \frac{a}{2}}$$

$$t^* = \frac{a}{2} \left( \frac{t_r}{a + t} \right) \quad (13)$$

Parameter inilah yang digunakan dalam eksperimen.

### 2.3 Performansi Sistem [5]

Dalam mendesain suatu sistem kontrol, yang terpenting adalah spesifikasi atau kriteria performansi yang ditampilkan. Karena sistem kontrol adalah sistem dinamik, maka spesifikasi kinerja sistem mungkin diberikan dalam suku-suku kelakuan tanggap transien untuk masukan

tertentu, seperti masukan langkah, masukan landai, dan sebagainya, atau spesifikasi mungkin diberikan dalam suku indeks kinerja.

Berikut ini penjelasan dari beberapa komponen kriteria performansi yang nantinya digunakan

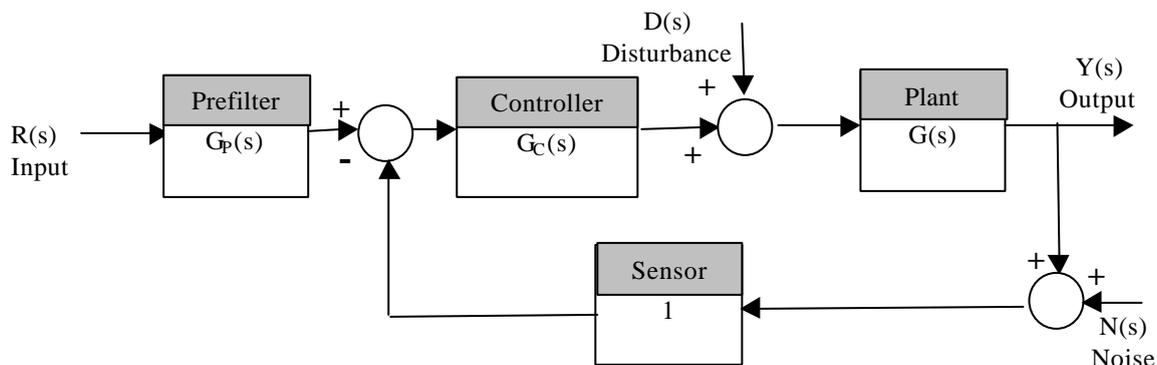
- *Error steady state* ialah nilai selisih antara nilai *set point* dengan nilai aktual *plant* pada kondisi *steady state*.
- *Rise time* ialah waktu untuk respon naik dari 0% sampai 100% (untuk sistem *under-damped*).
- *Maximum overshoot* adalah puncak lewatan maksimum respon *transient*, biasanya dinyatakan dalam bentuk prosentase selisih nilai *set point* dengan nilai aktual puncak terhadap nilai *set point* itu sendiri. Besarnya prosentase ini menunjukkan kestabilan relatif sistem.
- *Settling time* ialah waktu untuk respon mencapai suatu nilai dan menetap pada fraksi harga akhir sebesar 2% atau 5% (pita kestabilan).

### 2.4 Robustness Sistem [3]

#### 2.4.1 Pendahuluan Sistem Robust

Selain performansi, *Robustness* dari suatu sistem juga mulai diperhitungkan orang. *Robustness* suatu sistem menunjukkan kemampuan sistem untuk tetap memberikan performansi yang diinginkan meskipun ada perubahan (ketidaktentuan) paramer *plant* yang signifikan. Ketidaktentuan (*uncertainty*) dalam sistem muncul karena :

- Perubahan parameter plant
- Dinamika plant yang tidak dimodelkan
- Time delay yang tidak dimodelkan
- Perubahan daerah operasi
- *Noise* dari sensor
- *Disturbance* yang tidak diprediksikan



Gambar 4. Diagram Sistem Loop Tertutup dengan Ketidaktentuan Sistem

Berikut ini struktur sistem yang mengakomodasi ketidakpastian sistem yang potensial. Termasuk *noise* dari sensor (N(s)), input *disturbance* yang tidak terprediksi (D(s)), dan plant (G(s)) yang mempunyai dinamika yang belum dimodelkan atau parameternya bisa berubah.

**2.4.2 Sistem Robust dan Sensitivitas Sistem**

Untuk mendesain sistem yang bisa menangani adanya ketidakpastian, perlu diperhatikan masalah sensitivitas sistem. Sensitivitas menunjukkan seberapa peka sistem menanggapi adanya perubahan parameter plant dengan memperbaiki output sistemnya. Dalam perumusan, sensitivitas sistem adalah rasio dari perubahan fungsi alih sistem dengan perubahan fungsi alih *plant* untuk perubahan kecil yang bertambah dengan kontinyu. Berikut ini persamaannya.

$$S = \frac{\partial T / T}{\partial G / G} = \frac{\partial \ln T}{\partial \ln G} \tag{14}$$

Jika fungsi alih sistem loop tertutup :

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \tag{15}$$

Sehingga sensitivitas dari sistem berumpanbalik :

$$S_G^T = \frac{\partial T}{\partial G} \cdot \frac{G}{T} = \frac{1}{(1+GH)^2} \cdot \frac{G}{G/(1+GH)}$$

$$S_G^T = \frac{1}{1+G(s)H(s)} \tag{16}$$

Suatu sistem kontrol dikatakan *robust* jika : (1) mempunyai sensitivitas rendah, (2) stabil meskipun ada perubahan variasi parameter, (3) performansi sistem tetap memenuhi kriteria yang ditetapkan meski ada perubahan parameter sistem.

**2.4.3 Sistem Robust pada Domain Frekuensi**

Jika kita mendesain suatu sistem *robust* dalam domain frekuensi, maka kita perlu menemukan kompensator (G<sub>c</sub>(s)) yang tepat, sehingga sensitivitas sistem loop tertutup lebih kecil dari batasan sensitivitas yang telah ditentukan. Hal ini mirip dengan permasalahan *gain margin* dan *phase margin*, dimana perlu ditemukan kompensator yang tepat untuk mencapai nilai *gain margin* dan *phase margin* yang telah ditentukan.

*Gain margin* didefinisikan sebagai batas perubahan dalam penguatan yang dikehendaki loop terbuka yang membuat sistem loop tertutup

tidak stabil. Sistem dengan *gain margin* yang lebih besar dapat menahan perubahan besar dalam parameter sistem sebelum ketidakstabilan terjadi dalam loop tertutup. Secara matematis *gain margin* adalah besaran yang berbanding terbalik dengan gain |GH(j $\omega$ )| pada frekuensi dimana sudut fase mencapai -180°. Berikut ini persamaannya:

$$20 \log \left( \frac{1}{|GH(j\omega)|} \right) = -20 \log |GH(j\omega)|_{dB} \tag{17}$$

Sedang *phase margin* merupakan besarnya perubahan dalam pergeseran fase loop terbuka yang ditetapkan untuk membuat sistem loop tertutup tidak stabil. Secara matematis besarnya *phase margin* adalah 180° ditambah sudut fase *f* dari fungsi alih pada frekuensi *crossover gain*. Berikut ini persamaannya :

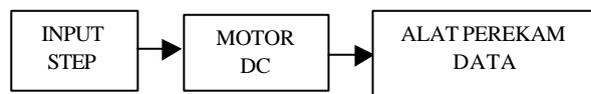
$$g = 180^\circ + f \tag{18}$$

Melalui diagram bode, kita dapat mencari nilai *gain margin* dan *phase margin* dengan mudah [3],[6].

**3. Hasil Pengukuran dan Analisa**

**3.1 Identifikasi Sistem [7]**

Identifikasi proses atau sistem dilakukan berdasarkan data percobaan/eksperimen dengan mengukur sinyal masukan dan keluaran. Identifikasi yang dilakukan berikut adalah metode identifikasi Strejc yang merupakan salah satu contoh dari metode eksperimental. Berikut ini setup peralatan untuk identifikasi.



Gambar 5. Setup Peralatan untuk Identifikasi Motor DC

Dari perhitungan yang telah dilakukan pada penelitian penulis sebelumnya [8], berikut model matematika yang didapatkan :

$$G(s) = \frac{0,847}{(1,604s + 1)(0,056s + 1)} \tag{19}$$

Dari perhitungan dengan Matlab untuk membandingkan hasil simulasi dan respon sebenarnya, didapatkan *norm error* yang cukup kecil antara keduanya yaitu sebesar : 4,8608.

### 3.2 Hasil *setting* Kp, Ti, dan Td

Berikut ini nilai Kp, Ti, dan Td yang didapatkan dengan perhitungan menggunakan rumus-rumus pada bagian 2.2. Konfigurasi kontroler PID yang digunakan ialah seri.

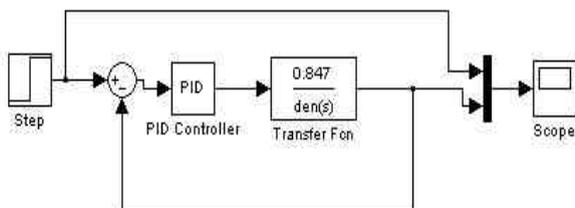
Tabel 3. Hasil Perhitungan Parameter Kontroler PID

Sistem loop-tertutup	Kp	Ti	Td
Ziegler-Nichols	34.371	0.112	0.028
Cohen-Coon	45.382	0.131	0.020
Direct Synthesis	1.826	1.119	0.051

### 3.3 Hasil dan Analisa Pengujian Sistem

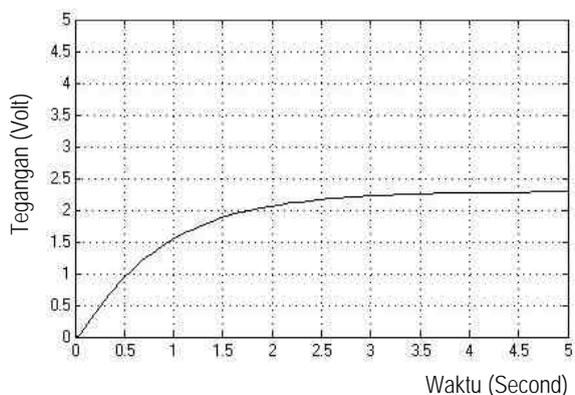
#### 3.3.1 Analisa Performansi

Performansi sistem dianalisa dengan melakukan simulasi pada Simulink-MATLAB, dengan memasukkan transfer function motor DC yang telah didapatkan pada bagian 3.1. Sedang parameter PID yang muncul pada bagian 3.2 dimasukkan pada blok kontroler PID di Simulink. Berikut ini gambar diagram blok Simulink secara umum untuk percobaan-percobaan berikut.

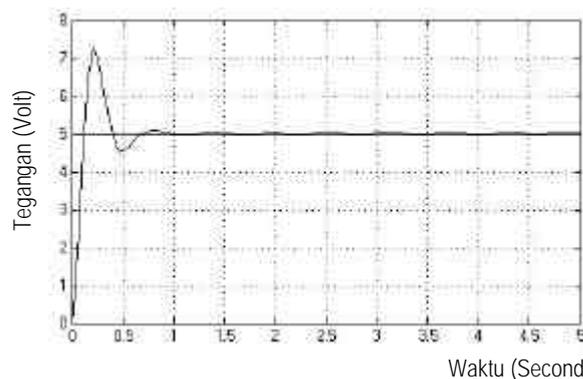


Gambar 6. Blok Diagram Simulink untuk Analisa Performansi

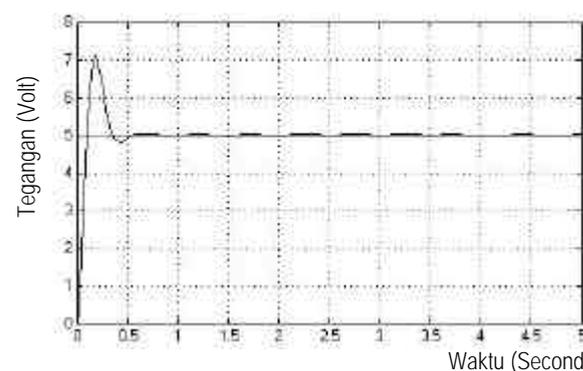
Berikut ini grafik yang dihasilkan.



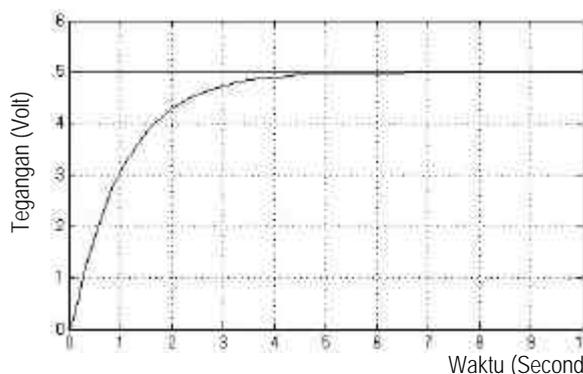
Gambar 7. Performansi Sistem Tanpa Kontroler



Gambar 8. Performansi Sistem dengan Kontroler PID – Ziegler Nichols



Gambar 9. Performansi Sistem dengan Kontroler PID – Cohen Coon



Gambar 10. Performansi Sistem dengan Kontroler PID – *Direct Synthesis*

Berikut ini tabel performansi masing – masing sistem.

Tabel 4. Performansi Sistem Loop Tertutup

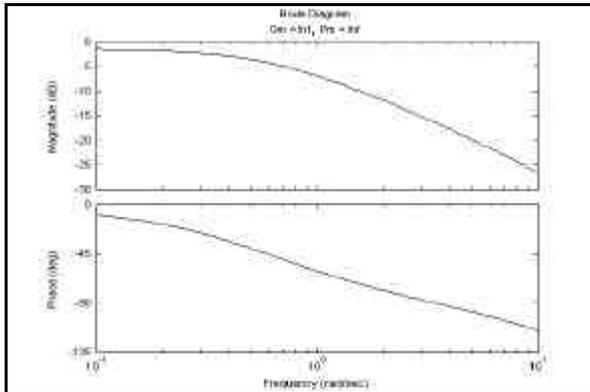
Sistem loop-tertutup	Error Steady state	Maximum Overshoot	Rise Time	Settling Time
Tanpa kontroler	2.2	0	4 s	~
Ziegler-Nichols	0	46 %	0.12 s	1 s
Cohen-Coon	0	42 %	0.10 s	0.6 s
Direct Synthesis	0	0	5 s	5 s

Dari tabel tersebut, nampak bahwa sistem tanpa kontroler mempunyai performansi yang buruk, dengan adanya *error steady state* yang besar, dan akibatnya tidak akan pernah mencapai nilai *set point* (*settling time* besarnya tak hingga). Juga terlihat bahwa metode Ziegler-Nichols (ZN) dan Cohen-Coon (CC) mempunyai *rise time* dan *settling time* yang lebih baik dari *Direct Synthesis* (DS). Namun keduanya mempunyai *maximum overshoot* yang cukup tinggi, sedang DS tidak memberikan *overshoot* sama sekali. Secara umum, performansi ZN dan CC lebih baik daripada DS.

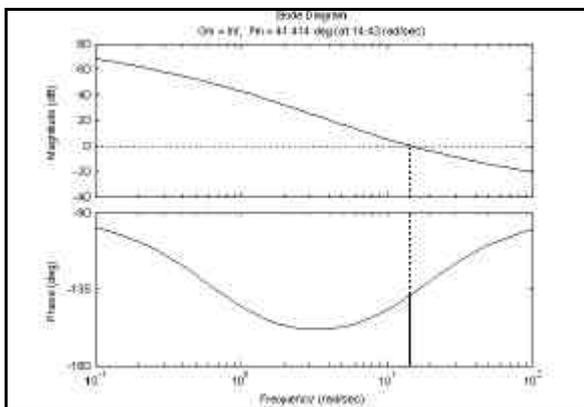
### 3.3.2 Analisa Robustness

*Robustness* suatu sistem diamati dengan mencari *gain margin* (GM) dan *phase margin* (PM) dari sistem tersebut. Dengan nilai GM dan PM yang mengikuti batas yang ditetapkan, maka sistem dikatakan mempunyai stabilitas relatif dan *Robustness* yang baik. Pencarian nilai GM dan PM dilakukan dengan instruksi *margin* pada MATLAB. Berikut ini grafik yang dihasilkan.

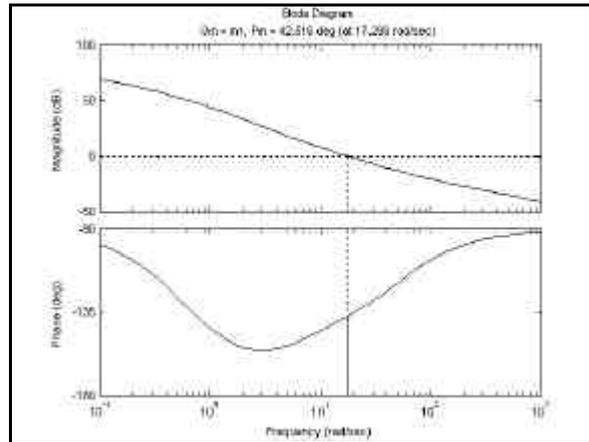
#### ▪ Sistem Tanpa Kontroler



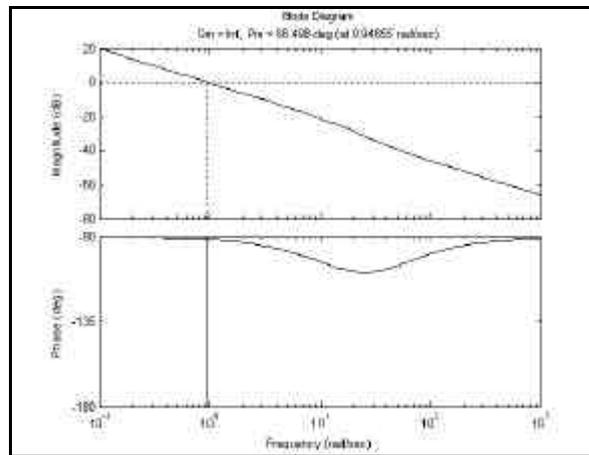
Gambar 11. Respons Frekuensi Sistem Tanpa Kontroler



Gambar 12. Respons Frekuensi Sistem dengan Kontroler PID – Ziegler Nichols



Gambar 13. Respons Frekuensi Sistem dengan Kontroler PID – Cohen Coon



Gambar 14. Respons Frekuensi Sistem dengan Kontroler PID – Direct Synthesis

Berikut ini tabel dari nilai *gain margin* dan *phase margin* dari sistem di atas.

Tabel 5. *Gain Margin* dan *Phase Margin* Sistem Loop Tertutup

Sistem loop-tertutup	Gain Margin	Phase Margin
Tanpa kontroler	~	~
Ziegler-Nichols	~	41.414
Cohen-Coon	~	42.516
Direct Synthesis	~	88.498

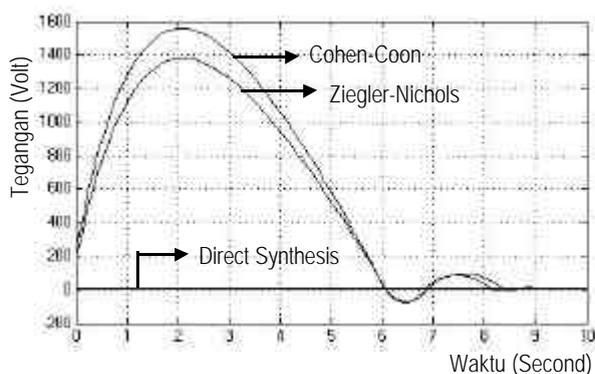
Jika besarnya GM dan PM negatif, maka sistem tidak stabil. Untuk performansi sistem yang memuaskan, disarankan besarnya GM lebih dari 6 dB dan besarnya PM antara 30° sampai 60° [5]. Dari tabel di atas, nampak bahwa sistem tanpa kontroler mempunyai GM tak hingga, yang berarti sistem stabil berapapun nilai penguatan pada loop terbuka yang diberikan. Juga besarnya nilai PM ialah tak hingga, yang berarti keluar

dari batasan nilai PM yang telah ditetapkan di atas.

Dengan kontroler PID metode *Ziegler-Nichols* dan *Cohen-Coon*, PM yang didapatkan berada dalam kisaran nilai PM yang diinginkan. Sedangkan metode *Direct Synthesis* memberi nilai PM yang berada di luar kisaran tersebut, tapi masih memberikan hasil yang lebih baik dibanding sistem tanpa kontroler. Secara umum, sistem dengan metode *Ziegler-Nichols* dan *Cohen-Coon* mempunyai *Robustness* yang lebih baik dari metode *Direct Synthesis*.

### 3.3.3 Analisa Praktis dari Motor DC

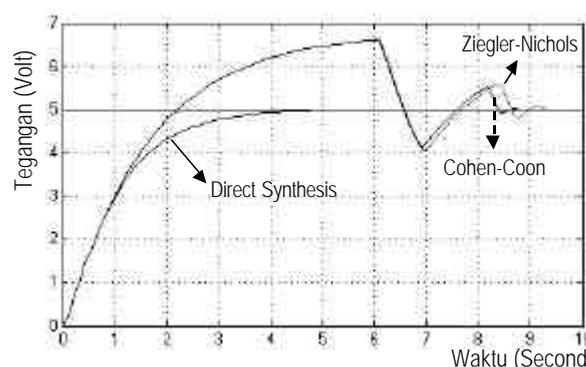
Hasil eksperimen laboratorium dari penelitian yang dilakukan penulis sebelumnya [8] menunjukkan bahwa performansi sistem dengan metode *Direct Synthesis* jauh lebih baik daripada metode *Ziegler-Nichols* dan *Cohen-Coon*. Hal ini disebabkan karena plant motor DC mempunyai keterbatasan, yaitu nilai tegangan yang boleh diberikan pada motor tersebut maksimal 8 V. Jadi sinyal kontrol dari kontroler PID yang bisa digunakan untuk menggerakkan maksimal juga sebesar 8 V. Nilai sinyal kontrol yang telah diberikan oleh masing-masing kontroler dengan metode *tuning* tertentu pada simulasi di atas digambarkan dalam grafik berikut, dan dimasukkan dalam tabel di bawah.



Gambar 15. Perbandingan Sinyal Kontrol dari Ketiga Metode *Tuning*

Tampak bahwa besar sinyal kontrol maksimal untuk metode *Ziegler Nichols*: 1376 V, dan *Cohen-Coon* : 1555 V. Sedangkan *Direct Synthesis* hanya membutuhkan : 9 V.

Dengan menambahkan nolinieritas sistem ini (berupa pembatasan sinyal kontrol) menggunakan blok *Saturate* pada *Simulink*, maka didapatkan hasil grafik berikut.



Gambar 16. Perbandingan Respon Sistem dengan Pembatasan Sinyal Kontrol

Berikut ini tabel performansi sistem dengan keterbatasan plant.

Tabel 6. Performansi Sistem dengan Pembatasan Sinyal Kontrol

Sistem loop-tertutup	Error Steady state	Maximum Overshoot	Rise Time	Settling Time	Control Signal Maximum
Tanpa kontroler	2.2	0	4 s	~	Tidak ada
Ziegler-Nichols	0	32 %	2.2 s	9.3 s	1376
Cohen-Coon	0	32 %	2.2 s	8.6 s	1555
Direct Synthesis	0	0	5 s	5 s	9

Dari gambar dan tabel, nampak bahwa performansi sistem dengan metode *Direct Synthesis* jauh lebih baik dari 2 metode yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa pembatasan sinyal kontrol berpengaruh besar pada kinerja kontroler PID dengan metode-metode tersebut.

## 4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi, kontroler PID dengan metode *tuning Ziegler Nichols* dan *Cohen-Coon* mempunyai performansi yang lebih baik (*rise time* sekitar 0.1 s dan *settling time* di bawah 1 s) dari metode *Direct Synthesis* (*rise time* dan *settling time* sebesar 5 s). Juga kedua metode tersebut memberikan *Robustness* sistem yang lebih baik, dengan *phase margin* 41.4° dan 42.6°, dibanding metode terakhir yang memberikan *phase margin* 88.5°.

Namun akibat keterbatasan plant motor DC yang hanya mampu menerima sinyal kontrol maksimal 8 V, maka metode *Direct Synthesis* memberikan performansi yang lebih baik (tanpa *overshoot*, *rise time* dan *settling time* sebesar 5 s), dibanding

kedua metode lainnya (*maximum overshoot*: 32%, *rise time* : 2.2 s, dan *settling time* di atas 8 s). Jadi, untuk aplikasi nyata metode *Direct Synthesis* memberikan hasil yang jauh lebih baik dari kedua metode lainnya.

### Daftar Pustaka

- [1] Willis, M.J., Proportional – Integral – Derivative Control, 1999. <[URL:http://lorien.ncl.ac.uk/ming/pid/pid.pdf](http://lorien.ncl.ac.uk/ming/pid/pid.pdf)>.
- [2] Ogunnaike, B.A., dan Ray, W.H., *Process Dynamics, Modelling and Control*. Oxford University Press . New York, USA. 1994.
- [3] Dorf, R.C., dan Bishop, R.H., *Modern Control Systems*. Prentice Hall International. New Jersey. 2001.
- [4] Chairuzzaini dkk., Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Kontroler PID, 1998. URL: <http://www.elektroindonesia.com/elektro/tutor12.html>,
- [5] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*. Prentice Hall International. London, 1997.
- [6] Hartanto, T.W.D, dan Prasetyo, Y.W.A. *Analisis dan Desain Sistem Kontrol dengan MATLAB*. Penerbit Andi. Yogyakarta, 2003.
- [7] Annexe, *Methode D'identification De Strejc*, 1998. <[URL:http://www.univlille1.fr/eudil/belk/pral.htm](http://www.univlille1.fr/eudil/belk/pral.htm)>.
- [8] Wicaksono, H., dan Pramudijanto, J., *Implementasi Kontroler PID pada Modul ASCII untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan PLC C200H*. Tugas Akhir ITS, 2003.
- [9] Ho, W.K., et. al. Performance Gain and Phase Margin of Well-Known PID Tuning Formulas. *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 4, No. 4. July 1996.