

**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK**



**ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN MOTOR DC
MENGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE
TUNING ZIEGLER-NICHOLS**

SKRIPSI

Disusun Oleh :
RIKA YUNIARTI
NIM. 01.12.157



MARET 2006

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO 8-1
KONSTRUKSI TEKNIK ELEKTRO

ANALISA PERFORMANSI PERBEDAAN MOTOR DC
MENGGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE
TUNING ZIEGLER-NICHOLS

SKRIPSI



Dibuat oleh :
RIMA YUNANTI
NIM. 01.12.137

MARET 2008

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN MOTOR DC
MENGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE
TUNING ZIEGLER-NICHOLS**

SKRIPSI

*Disusun dan Diajukan Untuk Melengkapi dan Memenuhi Syarat-Syarat
Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik*

**Disusun Oleh :
RIKA YUNIARTI
NIM 01.12.157**



**Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro**

Ir. F. YUDI LIMPRAPTONO, MT
NIP.P. 103 950 0274

**Diperiksa dan disetujui,
Dosen Pembimbing**

Ir. WIDODO PUDJI M, MT
NIP.P. 102 870 0172

**KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2006**

LEMBAR PERSEMBAHAN



Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi dan silih bergantinya malam dan siang, terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal (intelektual) . Yaitu orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadaan berbaring, dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi, seraya berkata: “ Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia. Maha suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka”. (Q.S.3:190-

191)

Sembah sujud hamba hatirkan hanya pada-Mu ya Allah

Salawat dan salam semoga selalu terlimpah bagi-Mu wahai kekasih Allah

Tak hentinya mulut ini mengucap syukur kepada-Mu

Atas karunia yang Kau beri

Dan doa yang telah Kau kabulkan

Tak akan pernah berhenti ucapan syukur ini

Dan tak pernah lelah hamba-Mu untuk mengucapnya

Terimakasih Allah atas segala yang telah kau berikan

ALHAMDULILLAH

Lembar Persembahkan

Kedua orang tuaku tercinta,
yang selalu memberikan dukungan moral dan materi
serta atas kesabaran mereka yang sudah
mendidikku hingga aku seperti ini.
Mungkin inilah persembahan terbaik
yang pernah kuberikan pada kalian.
Terimakasih atas semua doanya
and everything that you have give to me
Sampai kapanpun anakmu ini tak akan bisa membalasnya,
ananda akan memberikan hasil terbaik yang membuat
kalian bahagia.

Ricky n rya, trims udah mau menghibur kakakmu ini.
Dukungan kalian sangat berarti buatku (yang rajin ya belajarnya).
Buat Iwan, dina, jaka, jaya, dan semuanya yang ada di Kalimantan,
trim's atas doanya and wait 4 me,
coz I'll be back and we'll be together again.

with love,

Rika



I want to thanks 4 u all, tanpa kalian aku gak bisa kayak gini. Terima kasih dah mau bantuin dah mau ikut repot de-el-el



♥ Pak Jayeng, Pak Sugeng, Bu Puji dan semua staff,terimakasih dah mau bantu kami sampai kami dalam pengerjaan skripsi ini sampai selesai. Tak lupa buat Bu Mimin, aku gak akan pernah lupa malam kelulusan itu bu, terima kasih atas semuanya. Mas Yudhi cs juga makasih yaaaaaa.



♥ Buat anak-anak lab, dini(trims buat semuanya), de2n, mada, bos kalis, zahid, udin (makasih ya dah mau nolongin), aris, amalia terimakasih dah mau bantuin (yang huruf merah harap rajin belajar, n cepet lulus). Buat Mr. Ram trims atas masukannya selama ini belajar ya emang enak jadi mahasiswa lagi? Pakde arief makacih buat editan + masukannya selama ini



♥ Teman-teman L4 irvan (Guterus) maju terus bang, sory ku tinggal duluan. Henry cepet urus skripsi jangan urusin otot terus. Oya trims atas sarapannya dulu, Vian akhirnya aku mendahului kamu makanya cepetan ,dika cepetan lulus ya. Awan, santoso, imron, fud, imam, aris, Pak ketua, komang, abu, andi, rohino dan semuanya yang rajin kuliah yaaaaa biar cepet lulus trusin perjuangan kalian!!



♥ Teman-teman ST 2001 Ebed, eric, rully, frenky, risky, o2n, kolik, hadi, de-el-el yang gak bias disebutkan (habis capek seeh lagian nanti habis satu lembar sendiri) ngebut kuliahnya yaaaaaaa. Buat andit makasih banyak buat editan gambarnya.



♥ Buat Adi yang semangat ngurus skripsinya yaaaaa, jangan putua asa dan pantang menyerah (kayak puisi perjuangan). Yang rajin berdoa oke. Trims ya udah dukung aku.



♥ Anak-anak di puskopad - bremy, yudha, jay, syafak, deny deelel trimakasih dah mau Bantu ngeprint dan dah mau disusahin ama cewek ini

ABSTRAKSI

“ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN MOTOR DC MENGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS”

(Rika Yuniarti; 01.12.157, TEKNIK ENERGI LISTRIK, 2006)
(Dosen Pembimbing : Ir. Widodo Pudji Muljanto M, MT)

Kata kunci : *Kontroler PID, Tuning, Performansi.*

Teknologi dipakai membantu manusia meningkatkan budaya hidupnya. Teknologi direncanakan dan diwujudkan oleh manusia untuk kepentingan manusia. Walaupun ada keterbatasan secara kecepatan, ketepatan serta ketahanan dalam melakukan tugas-tugasnya, manusia telah merancang begitu banyak peralatan dan mesin, yang semakin lama makin serba otomatis.

Kontroler *PID* merupakan kontroler yang bisa di pakai untuk mendapatkan tanggapan atau respon yang diinginkan dalam sebuah sistem, karena kontroler ini telah terbukti mampu memberikan respon sesuai yang diharapkan.

menganalisis performansi pengendalian dalam sebuah sistem, karena metode ini telah terbukti mampu memberikan performansi yang baik dengan akurasi hasil perkiraan yang bagus dan mempunyai tingkat error yang kecil.

Metode *Tuning Ziegler-Nichols* merupakan metode yang didasarkan pada kurva reaksi.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas rahmat dan karunia-Nya memungkinkan penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul, *“ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS”*

Skripsi ini bertujuan untuk memenuhi kurikulum akademik yang harus ditempuh oleh setiap mahasiswa ITN Malang guna mengakhiri pendidikan pada jenjang strata satu jurusan Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi Listrik di Institut Teknologi Nasional Malang.

Atas segala bimbingan, pengarahan dan bantuan yang diberikan, sehingga tersusunnya skripsi ini, maka penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Dr. Ir. Abraham Lomi, MSEE**, selaku Rektor ITN Malang.
2. **Ir. F Yudi Limpraptono, MT**, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro (S1) ITN Malang.
3. **Ir. Widodo Pudji M, MT**, Selaku Dosen Pembimbing
4. **Mas Wiwid Brawijaya** , yang sudah mau diganggu terus sama kita-kita.
5. Kedua orang tuaku yang telah membesarkan, mendidik dan selalu mendoakanku sampai terwujud cita-citaku.
6. Semua staff ITN yang telah membantu terwujudnya skripsi ini

7. Komunitas Lab. Kendali Industri yang selalu memberikan masukan dan dorongan pada skripsiku
8. Komunitas elektro ITN yang membantu dalam penulisan skripsi ini

Akhirnya tak ada gading yang tak retak, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih ada kekurangannya, dan penulis mengharapkan skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa khususnya pada jurusan Teknik Elektro konsentrasi Teknik Energi Listrik.

Malang, Maret 2006

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
ABSTRAKSI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GRAFIK	xiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Metodologi Penulisan.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	5

BAB II PERKIRAAN BEBAN LISTRIK

2.1. Motor DC Secara Umum.....	6
2.1.1. Prinsip Kerja Motor DC	7
2.1.2. Rangkaian Alih Motor DC Terpisah Dengan Pengaturan Jangkar.....	8
2.1.3. Pengaturan Kecepatan	12

BAB III TUNING KONTROLER PID

3.1.	Sistem Pengendalian Proses	14
3.2.	Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses	14
3.3.	Elemen-Elemen Sistem Pengendalian Proses	15
3.4.	Prinsip Kerja Pengendali	22
3.5.	Pengendali PID	23
3.5.1.	Pengendali Proporsional	23
3.5.2.	Pengendali Integral	27
3.5.4	Pengendali Diferensial	30
3.5.4	Pengendali Proporsioanal Plus Integral	33
3.5.5	Pngendali Proporsional Plus Diferensial	34
3.5.6	Pengendali Proporsional –Integral-Diferensial	35
3.6	Tuning Parameter Kontroler Sistem	38
3.6.1	Metode Ziegler-Nichols	39
3.6.1.1	Metode Kurva Reaksi	40

BAB IV ANALISA DAN PENGUJIAN

4.1.	Performansi Sistem	45
4.2.	Spesifikasi Motor DC	47
4.3.	Penyusunan Model Matematik	48
4.4.	Penyusunan Blok Diagram	51
4.5.	respon Open Loop	52

4.6. Hasil dan Analisa Pengujian Sistem.....	57
4.6.1. Analisa Pengujian Sistem	60

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	62
5.2. Saran	63

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4-1	Tampilan Arus Dari Blok Diagram <i>Simulink-MATLAB</i>	58
Grafik 4-2	Tampilan Torsi Dari Blok Diagram <i>Simulink-MATLAB</i>	59
Grafik 4-3	Tampilan Tegangan Dari Blok Diagram <i>Simulink-MATLAB</i>	59
Grafik 4-4	Tampilan Putaran Dari Blok Diagram <i>Simulink-MATLAB</i> 58	60

Gambar 3-12	Respon Tangga Satuan Sistem	41
Gambar 3-13	Kurva Respon Berbentuk S	41
Gambar 4-1	Bentuk Umum Respon	44
Gambar 4-2	Kurva Tanggapan Tangga Satuan	46
Gambar 4-3	Rangkaian Motor DC Pengutan Terpisah.....	48
Gambar 4-4	Diagram blok motor dc.....	52
Gambar 4-5	Diagram blok motor dc yang disederhanakan	52
Gambar 4-6	Kurva Respons berbentuk S	53
Gambar 4-7	Blok Diagram Sistem Open Loop Dalam Simulink- MATLAB 7.0	53
Gambar 4-8	Perhitungan Parameter K_p , T_i dan T_d Menggunakan matlab 7.0	56
Gambar 4-9	Hasil Perhitungan Nilai K_p , T_i dan T_d	57
Gambar 4-10	Blok Diagram simulink Untuk Analisa performansi.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1	Tabel Penalaan Metode Ziegler-Nichols	42
Tabel 4-1	Tabel Penalaan Metode Ziegler-Nichols	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Rangkaian Ekuivalen Pengaturan Motor DC Penguat Terpisah	9
Gambar 3-1	Kontroler Dan Diagram Kotaknya	16
Gambar 3-2	Diagram Blok Kontroler Proporsional	24
Gambar 3-3	Proporsional Band Dari Kontroler Proporsional Tergantung Penguatan	25
Gambar 3-4	Kurva Sinyal Kesalahan $e(t)$ terhadap t dan kurva $u(t)$ terhadap t pada pembangkit kesalahan nol	28
Gambar 3-5	Blok Diagram Hubungan Antara Besaran Kesalahan Dengan Kontroler Integral	29
Gambar 3-6	Perubahan Keluaran Sebagai Akibat Penguatan Dan Kesalahan	29
Gambar 3-7	Blok Diagram Kontroler Proporsional	31
Gambar 3-8	Kurva Waktu Hubungan Input-Output Kontroler Diferensial	32
Gambar 3-9	Blok Diagram Kontroler PID Analog	36
Gambar 3-10	Hubungan Dalam Fungsi Waktu Antara Sinyal Keluaran Dengan Masukan Untuk Kontroler PID	37
Gambar 3-11	Kurva Respon Tangga Satuan Yang Memperlihatkan 25% Lonjakan Maksimum	40

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era globalisasi, sektor industri memegang peranan yang sangat penting, khususnya di Indonesia. Banyak industri yang berkembang secara pesat. Di dalam industri sangat dibutuhkan sistem kontrol yang baik untuk dapat menunjang proses berjalannya industri tersebut dan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses produksi.

Kontrol *otomatis* telah memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dalam pabrik dan dunia industri modern. Karena kemajuan dalam teori dan praktek kontrol *otomatis* memberikan kemudahan dalam mendapatkan performansi dari sistem dinamik, mempertinggi laju produksi, meniadakan pekerjaan-pekerjaan rutin dan membosankan yang harus dilakukan oleh manusia, dan sebagainya.

Dalam sistem kontrol dikenal pula istilah kontrol PID. Kontroler PID merupakan kontroler berumpan balik yang paling populer di dalam dunia industri saat ini. Kontroler PID terbukti telah dapat memberikan performansi kontrol yang baik meskipun memiliki algoritma yang sederhana dan sangat mudah dipahami. Kontroler PID pun dikenal dengan kontroler klasik yang dapat menghasilkan performansi yang paling baik.

Salah satu yang sangat dikenal dalam desain kontrol PID adalah tuning atau yang lazim dikenal dengan pemberian parameter P, I dan D agar didapatkan respon sistem yang diinginkan.

Kontrol tuning adalah aspek yang sangat penting dalam desain kontroler PID ialah penentuan parameter kontroler PID sebagai sistem *closed loop* memenuhi kriteria performansi yang diinginkan.

Pada sistem kontrol *closed loop*, dimana informasi penting yang digunakan dalam komputasi sinyal kontrol adalah sinyal kesalahan, yaitu beda antara *set point* dengan output yang sebenarnya dari proses terkontrol. Beberapa strategi komputasi sinyal kontrol adalah sebagai berikut :

- a. Kontroler on-off
- b. Kontroler P
- c. Kontroler P + I
- d. Kontroler P +I + D

Kontroler *on-off* adalah strategi kontrol *closed loop* yang paling sederhana, ciri utamanya adalah memberikan output terkontrol yang berosilasi disekitar *set point*.

Dalam sistem pengendalian dikenal ada tiga jenis pengendalian kontinyu yang sering digunakan, yaitu pengendali proporsional (P), pengendali integral (I), dan pengendali diferensial (D). Karena kelebihan dan kekurangan ketiga pengendali tersebut, maka biasanya seringkali digunakan dalam bentuk kombinasi. Sebagai contoh kombinasi penggabungan P dan I (PI), kombinasi antara P dan D (PD) atau dapat pula gabungan antara P, I dan D Yang lebih dikenal dengan PID.

Istilah proporsional sendiri datang dari sifat unit itu sendiri, yaitu outputnya selalu sebanding (proporsional) dengan inputnya. Begitu pula,

disebut dengan integral karena output unit tersebut merupakan hasil integral dari inputnya. Dan disebut diferensial atau derivative karena output unit tersebut merupakan hasil diferensial atau derivatif dari inputnya.

Kontroler PID merupakan kontroler yang sampai sekarang masih banyak digunakan di dunia industri. Hal yang terpenting dalam desain kontrol PID ini adalah menentukan parameter kontroler atau yang disebut juga dengan tuning. Tuning dilakukan pada kontroler PID supaya sistem *closed loop* memenuhi kriteria performansi yang diinginkan. Adapun beberapa metode tuning yang biasanya dipakai adalah metode Ziegler-Nicols, Cohen-Coon dan Direct Syntesis.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang, maksud dari skripsi ini adalah bagaimana melakukan tuning pada kontroler PID dan analisa mengenai performansi pengendalian motor DC tersebut jika menggunakan metode tuning Ziegler_Nichols. Dengan mengimplementasikan kontroler PID pada pengendalian motor DC maka akan dianalisa performansi dari system tersebut. Sehubungan dengan permasalahan diatas, maka penyusun menentukan judul skripsi sebagai berikut:

ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN MOTOR DC MENGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS

1.3 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang telah dikemukakan diatas, maka penulisan skripsi bertujuan untuk menganalisis performansi sebuah pengendalian motor DC jika digunakan kontroler PID yang ditala menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols.

1.4 Batasan Masalah

Agar permasalahan mengarah sesuai dengan tujuan, maka pembahasan skripsi ini perlu dibatasi beberapa hal sebagai berikut ini:

1. Analisa performansi kontroler PID menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols.
2. Analisa dilakukan dengan mengimplementasikan motor dc penguatan terpisah.
3. Motor dc yang digunakan dianggap ideal
4. Software yang digunakan adalah *Simulink-MATLAB 7.0*

1.5 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Studi literatur

Yaitu kajian pustaka yang mempelajari teori-teori terkait melalui literature yang ada, yang berhubungan dengan pembahasan masalah.

- b. Studi penelitian yang berkaitan dengan permasalahan.
- c. Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak simulink-Matlab.
- c. Menarik kesimpulan dan hasil penelitian dan pembahasan masalah.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I = PENDAHULUAN

Membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, metodologi dan sistematika pembahasan yang akan dipaparkan dalam laporan skripsi ini.

BAB II = LANDASAN TEORI

Membahas tentang berbagai macam teori yang mendukung dalam mengendalikan motor dc sebagai objek yang dikendalikan

BAB III = TUNING KONTROLER PID

Membahas tentang system pengendalian dan metode tuning yang digunakan pada skripsi ini.

BAB IV = ANALISA DAN PENGUJIAN

Membahas tentang pengujian terhadap pengendalian motor dc setelah diimplementasikan metode tuning Ziegler-Nichols

BAB V = PENUTUP

Merupakan bagian akhir dari skripsi yang terdiri dari kesimpulan dan saran

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Motor DC Secara Umum

Motor DC adalah peralatan elektromekanis yang mengubah daya listrik menjadi daya mekanis dengan arus searah sebagai suplai energi listriknya.

Berdasarkan penguatannya, motor arus searah dapat dibagi menjadi :

1. Motor arus searah penguatan sendiri
2. Motor arus searah dengan penguatan bebas

Motor arus searah dengan penguatan sendiri adalah :

1. Motor arus searah penguatan shunt
2. Motor arus searah penguatan terpisah
3. Motor arus searah penguatan kompon

Berdasarkan pengaturannya Motor arus searah dapat dibagi menjadi :

1. Motor arus searah penguatan medan
2. Motor arus searah penguatan medan dan jangkar

Dalam skripsi ini motor DC yang digunakan adalah motor DC penguatan penguatan terpisah dengan pengaturan jangkar digunakan sebagai objek. Pada motor DC dapat terjadi perubahan beban , perubahan beban ini mengakibatkan berubahnya kecepatan motor DC. Untuk itu diperlukan suatu parameter pengaturnya, sehingga didapatkan kecepatan motor DC yang konstan dan waktu respon (*steady state*) yang lebih baik atau sesuai yang kita inginkan.

2.1.1 Prinsip Kerja Motor DC

Apabila ada gulungan kawat yang dialiri arus listrik dan ditempatkan dalam suatu medan magnet, maka gulungan kawat ini akan mengalami suatu gaya sebanding dengan arus dan kekuatan medan magnetnya. Gaya yang timbul dapat dirumuskan:

$$F=BI\ell \text{ (Newton)} \quad (2.1)$$

Dimana

B : rapat fluks dalam tesla (Wb/m^2)

I : arus yang mengalir dalam ampere

ℓ : panjang kawat dalam meter

Persamaan (2.1) rumus dasar sebuah motor, dimana terjadi proses perubahan energi listrik menjadi energi mekanik.

Jika motor mempunyai jari-jari rotor r, maka akan menimbulkan kopel sebesar:

$$T=Fr= BI\ell r \text{ (N-m)} \quad (2.2)$$

Pada saat gaya F ditimbulkan, konduktor akan bergerak didalam medan magnet dengan kerapatan fluks B, dan akan menimbulkan gaya gerak listrik yang merupakan reaksi lawan terhadap tegangan penyebabnya, maka perubahan fluks pada konduktor dengan panjang efektif ℓ adalah:

$$d\Phi=B\ell ds \quad (2.3)$$

Dari hukum Faraday diketahui bahwa gaya gerak listrik (ggl):

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

maka,

$$e = \frac{Bl ds}{dr} \quad (2.5)$$

dimana, $\frac{ds}{dr} = v$ kecepatan konduktor.

Tegangan induksi yang timbul pada kumparan jangkar yang berputar dengan kecepatan n rpm dalam medan magnet Φ dapat pula dinyatakan sebagai berikut:

$$E_a = C_n \Phi \text{ (Volt)} \quad (2.6)$$

Agar motor dapat berputar terus menerus, maka diperlukan tegangan suplai motor yang lebih besar dari ggl yang timbul. Hubungan antara tegangan sumber dan ggl lawan yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E_a = V - I_a R_a \text{ (Volt)} \quad (2.7)$$

Dimana:

I_a : arus jangkar

R_a : tahanan kumparan

Suatu motor berfungsi jika memiliki :

1. Kumparan medan
2. Kumparan jangkar

2.1.2 Rangkaian Alih Motor DC Penguat Terpisah Pengaturan Jangkar

Rangkaian pengganti motor arus searah penguatan terpisah diperlihatkan dalam gambar 2-1. Setiap komponen pada rangkaian jangkar ditimbulkan dengan indeks a , sedangkan untuk rangkaian medan disimbolkan dengan indeks f .

Simbol-simbol yang digunakan dalam motor DC adalah :

R_a = tahanan belitan jangkar, Ohm

L_a = induktansi belitan jangkar, Henry

E_b = gaya gerak listrik (ggl) lawan motor, Volt

E_a = tegangan yang dikenakan pada jangkar, Volt

I_a = arus jangkar, Ampere

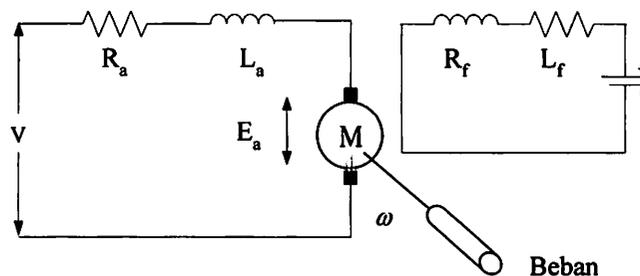
I_f = arus medan, Ampere

θ = perpindahan sudut dari poros motor, Radian

T = torsi yang diberikan oleh motor, Radian

J = moment inersia ekivalen dari motor dan beban pada poros, Kg-m^2

f = koefisien gesek, N-m rad/det



Gambar 2.1

Rangkaian Ekivalen Pengaturan Motor DC Penguat Terpisah

Pada umumnya konstruksi motor DC terdiri dari rotor dan stator. Diantara rotor, stator terdapat celah udara.

- Stator adalah bagian mesin yang diam
- Rotor adalah kumparan jangkar bagian mesin DC yang bergerak
- Celah udara adalah ruangan yang ada diantara stator dan rotor

Untuk menggunakan mesin DC sebagai motor, maka mesin ini perlu menggunakan torsi atau efek putaran. Jika sebatang kawat terdapat diantara kutub

U dan S dengan garis-garis gaya yang homogen, sedangkan didalam kawat ini mengalir arus listrik yang arahnya menjauhi kita (\otimes), maka disebelah kanan kawat garis gaya medan kutub magnet dan garis gaya medan arus listrik sama arahnya sedangkan disebelah kiri kawat arahnya berlawanan, sehingga bentuk medan magnet akan berubah lebih padat kanan. Pada kawat akan bekerja gaya kesebelah kiri. Dan jika sebuah belitan terletak dalam medan magnet yang homogen, maka karena kedua sisi belitan itu mempunyai arus yang arahnya berlawanan, sehingga belitan tersebut akan berputar.

Jadi prinsip kerja dari motor ini adalah :

- Adanya garis-garis gaya medan magnet (fluks), antara kutub yang berada di stator.
- Penghantar yang dialiri arus ditempatkan pada jangkar yang berada dalam medan magnet.
- Pada penghantar timbul gaya yang menghasilkan torsi.

Adanya arus medan menyebabkan timbulnya fluksi Φ pada celah udara antara rotor dan stator motor dc. Fluksi inilah yang membangkitkan torsi pada belitan jangkar Ia yang memberikan medan berlawanan dengan fluksi. Hubungan antara fluksi dengan arus medan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Phi = K_f I_f \tag{2.8}$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor dc berbanding lurus dengan hasil kali arus jangkar dan fluksi celah udara Φ , yaitu :

$$T = K_a I_a \Phi \text{ atau } T = K_f I_f K_a I_a \tag{2.9}$$

Atau apabila I_f konstan :

$$T = KI_a \quad (2.10)$$

Dengan,

$$K = K_f I_f K_a \quad (2.11)$$

Torsi ini untuk memutar rotor, beban yang terpasang pada satu poros yang sama. Jika momen inersia dan koefisien gesekan viskos gabungan dari motor adalah J dan B , sedangkan torsi lawan pada beban adalah T_b , maka hubungan antara torsi motor dan sudut putar adalah sebagai berikut :

$$T - T_b = J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} \quad (2.12)$$

Atau dinyatakan dalam kecepatan sudut ω , persamaan diatas dapat pula dituliskan sebagai berikut :

$$T - T_b = J \dot{\omega} + B \omega \quad (2.13)$$

Berputarnya rotor dalam medan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) yang besarnya berbanding lurus dengan kecepatan, serta mempunyai polaritas berlawanan dengan tegangan jangkar E_a , yaitu :

$$E_b = K_b \omega \text{ atau } E_b = K_b \dot{\theta} \quad (2.14)$$

Sedangkan hubungan antara arus jangkar dengan tegangan jangkar, dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + E_b \quad (2.15)$$

Dengan terlebih dahulu mentransformasikan persamaan (2.10) dan (2.13) ke bentuk Laplace, kemudian menggabungkannya, didapat :

$$I_a = 1/K (Js + Bs) \omega(s) + 1/K T_b \quad (2.16)$$

Dengan demikian persamaan (2.16) dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$\omega(s) = \frac{K}{JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)s + (BR_a - KK_b)} [E_a(s) - L_a(s) - R_a T_b(s)] \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\omega(s)}{[E_a(s) - (L_a(s) + R_a)T_b(s)]} = \frac{K}{JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)s + KK_b} \quad (2.18)$$

Dimisalkan :

$$E_a(s) - L_a(s) - R_a T_b(s) = U(s) \quad (2.19)$$

Dimana U(s) merupakan variable masukan $E_a(s) - R_a T_b(s)$, makarumus

2.18 dapat disederhanakan sebagai berikut :

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{JL_a s^2 + (JR_a + BL_a)s + KK_b} \quad (2.20)$$

Atau

$$\frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{S^2 + As + B} \quad (2.21)$$

$$K = K/JL_a \quad (2.22)$$

$$A = \frac{BL_a + JR_a}{JL_a} \quad (2.23)$$

$$B = \frac{BR_a - KK_b}{JL_a} \quad (2.24)$$

2.1.3 Pengaturan Kecepatan

Pengaturan kecepatan memegang peranan penting dalam motor arus searah, karena motor arus searah mempunyai karakteristik kopel-kecepatan yang menguntungkan dibanding dengan motor lainnya.

Telah diketahui bahwa untuk motor arus searah dapat diturunkan rumus

2.6 dan 2.7, maka:

$$n = \frac{Vt - IaRa}{C\phi}$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa kecepatan (n) dapat diatur dengan mengubah-ubah besarnya Φ , Ra atau Vt.

BAB III

TUNING KONTROLER PID

3.1. Sistem Pengendalian Proses

Hampir semua proses dalam industri membutuhkan peralatan-peralatan otomatis untuk mengendalikan parameter-parameter prosesnya. Otomatisasi tidak saja diperlukan demi kelancaran operasi, keamanan, ekonomi maupun mutu produk, tetapi lebih merupakan kebutuhan pokok. Oleh sebab itu tidak mungkin menjalankan suatu proses industri tanpa bantuan system pengendalian, contohnya pengendalian disuatu proses pengilangan minyak. Proses di suatu pengilangan minyak tidak mungkin dapat dijalankan tanpa bantuan fungsi sistem pengendalian.

Gabungan serta kerja alat-alat pengendalian otomatis dalam sebuah system pengendalian proses itulah yang dinamai system pengendalian proses (*process control system*). Sedangkan semua peralatan yang membentuk system pengendalian disebut instrumentasi pengendalian proses (*process control instrumentation*).

3.2. Prinsip-Prinsip Pengendalian Proses

Dalam pengendalian proses, operator mengerjakan empat langkah sebagai berikut: Mengukur, membandingkan, menghitung dan mengoreksi. Keempat langkah yang dikerjakan operator itu, seluruhnya dapat dikerjakan oleh instrumentasi. Manusia kemudian sama sekali tidak menentukan keempat langkah tadi. Operator hanya perlu menentukan besarnya set point, dan

semuanya akan dikerjakan secara otomatis oleh instrument. Sistem pengendalian semacam inilah yang disebut sistem pengendalian otomatis (*Automatic control system*). Keempat tahap pengendaliannya sepenuhnya dilakukan oleh instrumentasi. Mata rantai pengendalinnya kemudian disebut mata rantai tertutup, dan sistemnya juga disebut sistem pengendalian tertutup atau sistem *closed loop*.

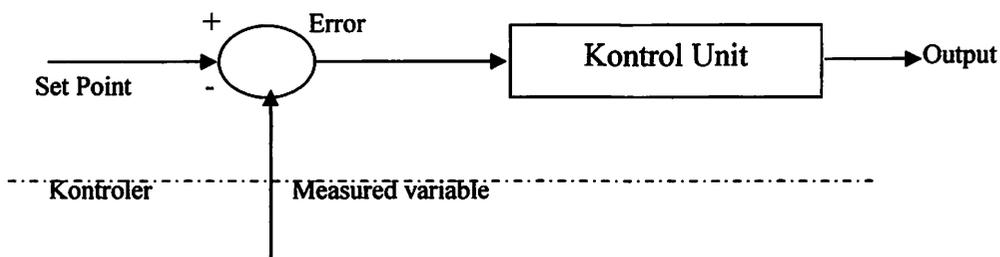
3.3 Elemen-Elemen Sistem Pengendalian Proses

Pada sistem pengendalian otomatis, selalu ada komponen-komponen pokok seperti elemen proses, elemen pengukuran (*sensing element dan transmitter*), elemen kontrol (*control unit*), dan final control element atau *control valve*. Dalam bentuk matematis, semua kotak elemen itu kelak akan diisi persamaan matematis yang merupakan transfer function elemen-elemen.

Bagian kontroler mempunyai *summing junction* dengan tanda positif-negatif (+/-). Dititik inilah langkah membandingkan dilakukan dengan mengurangi besaran set point dengan sinyal *measurement variable*. Hasilnya adalah sinyal yang disebut error. Tanda negative (-) di *summing junction* membawa arti yang sangat spesifik bagi seluruh system. Karena tanda inilah sistem pengendalian otomatis juga disebut *negative feedback*. Dengan demikian system pengendalian otomatis mempunyai dua nama lain yaitu sistem *closed loop* dan sistem *negative feedback*.

Pada feedback positif, tanda negative (-) di *summing junction* diganti dengan tanda positif (+). Jadi ada dua tanda positif (+) di *summing junction*.

Set point tidak lagi dikurangi sinyal *measurement variable*, tetapi ditambah dengan *measurement variable*. Jadi error bukanlah set point dikurangi *measurement variable*. Perubahan tanda ini membawa dampak yang sangat besar bagi kerja seluruh sistem.



Gambar 3.1 Kontroler Dan Diagram Kotaknya

Ada beberapa istilah dalam sistem pengendalian, yaitu :

➤ Variabel yang dikontrol

Variabel yang dikontrol adalah besaran atau keadaan yang diukur dan dikontrol. Variabel yang dimanipulasi adalah besaran atau keadaan yang diubah oleh kontroler untuk mempengaruhi nilai variable yang dikontrol. Dalam keadaan normal variabel yang dikontrol adalah keluaran dari sistem.

➤ *Manipulated Variable*

Adalah input dari suatu proses yang dapat dimanipulasi atau diubah-ubah besarnya agar process variable atau *controlled variable* besarnya sama dengan set point.

➤ Plant

Plant adalah seperangkat peralatan, yang terdiri dari beberapa bagian mesin yang bekerja bersama-sama, yang digunakan untuk melakukan suatu operasi tertentu.

➤ Proses

Proses adalah operasi atau perkembangan alamiah yang berlangsung secara kontinu yang ditandai oleh suatu deretan perubahan kecil yang berurutan dengan cara relatif tetap dan menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu: atau suatu operasi yang sengaja dibuat, berlangsung secara kontinu, yang terdiri dari beberapa aksi atau perubahan yang dikontrol, yang diarahkan secara sistematis menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu.

➤ Sistem

Sistem adalah kombinasi dari beberapa komponen yang bekerja bersama-sama dan melakukan sasaran tertentu.

➤ Gangguan

Gangguan adalah suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran system. Jika suatu gangguan dibangkitkan dalam sistem, disebut internal, sedangkan gangguan eksternal dibangkitkan di luar system dan merupakan suatu masukan.

➤ *Sensing Element*

Adalah bagian paling ujung suatu system pengukuran (*measuring system*)

➤ *Transmitter*

Adalah alat yang berfungsi untuk membaca sinyal yang dapat dimengerti oleh kontroler.

➤ **Transducer**

Adalah unit pengalih sinyal.

➤ ***Measurement Variable***

Adalah sinyal yang keluar dari transmitter. Besaran ini merupakan cerminan besarnya sinyal sistem pengukuran.

➤ **Kontrol Umpan Balik**

Kontrol umpan balik mengacu pada suatu operasi, yang dengan adanya gangguan, cenderung mengurangi perbedaan antara keluaran dari sistem dan suatu acuan masukan berdasarkan pada perbedaan.

➤ **Sistem Kontrol Umpan Balik**

Sistem yang mempertahankan hubungan yang ditentukan antara keluaran dan beberapa masukan acuan.

➤ **Sistem Kontrol Lup Tertutup**

Sistem kontrol umpan balik seringkali disebut sebagai sistem kontrol lup tertutup. Pada sistem kontrol lup tertutup, sinyal kesalahan yang bekerja, yaitu perbedaan antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik, disajikan ke kontroler sedemikian rupa untuk mengurangi kesalahan dan membawa keluaran sistem ke nilai yang dikehendaki.

➤ **Sistem Kontrol Lup Terbuka**

Suatu system yang keluarannya tidak mempunyai pengaruh terhadap aksi kontrol, atau dengan kata lain, tidak dapat digunakan sebagai perbandingan umpan balik dengan masukan.

- Perbandingan antara Sistem Kontrol Lup Tertutup dan Sistem Kontrol Lup Terbuka

Suatu kelebihan dari sistem kontrol lup tertutup adalah penggunaan umpan balik yang membuat respons sistem relatif kurang peka terhadap gangguan eksternal dan perubahan internal pada parameter sistem. Jadi mungkin dapat digunakan komponen-komponen yang relatif kurang teliti dan murah untuk mendapatkan pengontrolan *plant* dengan teliti, hal ini tidak mungkin diperoleh pada sistem lup terbuka.

Dari segi kestabilan, sistem kontrol lup terbuka lebih mudah dibuat karena kestabilan bukan merupakan persoalan utama. Sebaliknya kestabilan merupakan persoalan utama pada sistem kontrol lup tertutup karena cenderung terjadi kesalahan akibat koreksi berlebih yang dapat menimbulkan osilasi pada amplitudo konstan ataupun berubah.

Harus ditekankan bahwa untuk sistem dengan masukan yang telah diketahui sebelumnya dan tidak ada gangguan, maka disarankan untuk menggunakan kontrol lup terbuka. Sistem kontrol lup tertutup mempunyai kelebihan hanya jika terdapat gangguan yang yang tidak dapat diramal dan atau perubahan yang tidak dapat diramal pada komponen sistem. Jumlah komponen yang digunakan dalam sistem kontrol lup tertutup pada umumnya lebih banyak bila dibandingkan pada sistem kontrol lup terbuka. Oleh karena itu sistem kontrol lup tertutup pada umumnya lebih mahal dan besar. Kombinasi yang sesuai antara sistem kontrol lup terbuka dan sistem kontrol lup tertutup biasanya lebih murah dan akan memberikan kinerja sistem keseluruhan yang diinginkan.

Berikut ada tiga variabel yang berhubungan dengan kendali lup tertutup untuk mengevaluasi performansi system pengendalian proses, yaitu:

- Tanggapan Transien

adalah tanggapan system yang berlangsung dari awal sampai dengan keadaan akhir atau sampai sistem stabil, ini berkenaan dengan lonjakan (*overshoot*) sistem saat awal ataupun saat sistem terkena gangguan dari luar. Peredaman (*damping*) adalah metode yang digunakan untuk meredam lonjakan pada sistem kendali proses.

Berbagai bentuk variasi tingkat peredaman antara lain: sistem tak teredam, sistem teredam kritis dan sistem teredam lebih.

- Kesalahan Keadaan Tunak

Adalah perbedaan antara keluaran yang dicapai saat *steady state* dengan nilai yang dikehendaki, disebut juga sebagai *offset*. Kesalahan ini dapat jugadikurangi dengan peningkatan penguatan system, namun penambahan ini akan diimbangi oleh variabel keluaran yang berfluktuasi, yang mungkin menyebabkan sistem tidak stabil.

- Stabilitas

Variabel ini berkenaan dengan kemampuan sistem untuk memperkecil keluaran yang berosilasi sebagai akibat dari gangguan. Sistem tidak stabil akan menyebabkan keluaran berosilasi diatas dan dibawah nilai yang dikehendaki atau dengan kata lain keluaran sistem

➤ Set Point

Set Point adalah besar proses variabel yang dikehendaki. Sebuah kontroler akan selalu berusaha menyamakan variabel yang dikontrol dengan set point.

➤ Error

Error adalah selisih antara set point dikurangi *measured variabel*. Error bisa negative dan bisa juga positif. Bila Set point lebih besar dari *measured variable* Error akan menjadi positif. Sebaliknya, bila Set point lebih kecil dari *measured variable*, Error menjadi negatif.

➤ Kontroler

Kontroler adalah elemen yang mengerjakan tiga dari empat tahap langkah pengendalian, yaitu membandingkan *set point* dengan *measurement variable*, menghitung berapa banyak koreksi yang perlu dilakukan, dan mengeluarkan sinyal koreksi sesuai dengan hasil perhitungan tadi. Kontroler sepenuhnya menggantikan peran manusia dalam mengendalikan sebuah proses.

➤ Kontrol Unit

Kontrol unit adalah bagian dari kontroler yang menghitung besarnya koreksi yang diperlukan. Input kontrol unit adalah Error, dan output-nya adalah sinyal yang keluar dari kontroler. Unit kontrol mempunyai transfer function yang tergantung pada jenis kontroler. Output kontrol unit adalah hasil penyelesaian matematik transfer function dengan memasukkan nilai error sebagai input.

➤ *Final Kontrol Element*

Adalah bagian akhir dari instrumentasi sistem pengendalian. Bagian ini berfungsi untuk mengubah *measurement variable* dengan cara memanipulasi besarnya *manipulated variable*, berdasarkan perintah variabel.

3.4 Prinsip Kerja Pengendali ✓

Ada banyak macam pengendali akhir (*final control element*). Secara umum mereka terbagi menjadi dua bagian, yaitu *final control element* untuk pengendalian *on-off* dan *final control element* untuk pengendalian kontinu, misalnya control valve, damper, dan sebagainya. Kontrol valve adalah jenis *final control element* yang paling umum dipakai untuk system pengendalian proses. Kontrol valve pada system pengendalian *on-off* hanya akan bekerja di dua posisi, yaitu terbuka penuh atau tertutup penuh. Selain pengendali *on-off* yang bekerja hanya pada dua posisi *on* dan *off*, ada pengendali lain yang bekerja secara kontinu. Secara kontinu artinya kontrol valve bekerja dari titik 0% sampai ke titik 100%. Jenis pengendali ini lebih banyak dipakai dalam system pengendalian proses ada pengendalian kontinu, artinya pengendalian dengan kontroler PID, kontrol valve justru tidak diharapkan berada di posisi tertutup penuh atau terbuka penuh. Kontrol valve harus secara kontinu mengendalikan *manipulated variable* agar *process variable* selalu tetap sama dengan *set point*. Pada pembahasan selanjutnya hanya kontroler PID yang akan dibahas.

Pada dasarnya tugas pengendali kontinyu terbagi dalam dua tahap, yaitu membandingkan dan menghitung. Perbandingan itu sendiri dilakukan dengan mengurangi besaran *set point* dengan besaran *measurement variable*, yang hasilnya adalah besaran yang disebut error. Karena *set point* bisa lebih besar atau lebih kecil dari *measurement variable*, nilai error bisa negatif bisa juga positif. Berdasarkan besarnya error inilah unit kontrol menghitung besarnya koreksi. Jadi error adalah input unit kontrol dan *manipulated*

variable adalah output unit kontrol. Bearnnya *manipulated variable* dihitung berdasarkan besarnya error dan transfer function unit kontrol. Bentuk transfer function dari unit kontrol tergantung pada “mode” yang ada di kontroler (kontrol mode): P, PI, PD atau PID.

3.5 Pengendali PID ✓

Ada tiga jenis pengendali kontinu, yaitu pengendali proporsional disingkat P, pengendali Integral disingkat I, dan pengendali Diferensial disingkat D. Karena kelebihan dan kekurangan ketiga pengendali tersebut, mereka seringkali dipakai dalam bentuk kombinasi, yaitu P+I disingkat PI, P+D disingkat PD, dan P+I+D disingkat PID. Ketiga jenis pengendali ini memberikan respons yang berbeda-beda.

3.5.1 Pengendali Proporsional ✓

Salah satu dari ketiga mode unit kontrol yang paling populer dan paling banyak dipakai adalah unit kontrol P, dimana besar output unit kontrol P selalu sebanding dengan besarnya input. Besar transfer function unit kontrol proporsional oleh karenanya akan sederhana sekali. Unit kontrol P adalah unit kontrol yang paling banyak dipakai, baik tersendiri dalam bentuk pengendali P-*only* maupun dalam kombinasi dengan mode integral (I) dan diferensial (D).

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding/proposional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan, bahwa keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta

proporsional dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya.

Untuk kontroler dengan aksi kontrol proporsional, hubungan antara masukan kontroler $u(t)$ dan sinyal kesalahan $e(t)$ adalah :

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

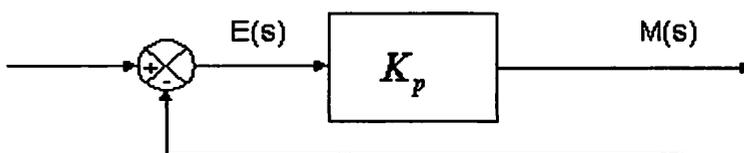
dimana :

K_p : penguatan proporsional

sedangkan persamaan dalam besaran transformasi Laplace :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

Gambar 3.2 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran setting, besaran aktual dengan besaran keluaran kontroler proporsional. Sinyal kesalahan (error) merupakan selisih antara besaran setting dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi kontroler, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga setting) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).



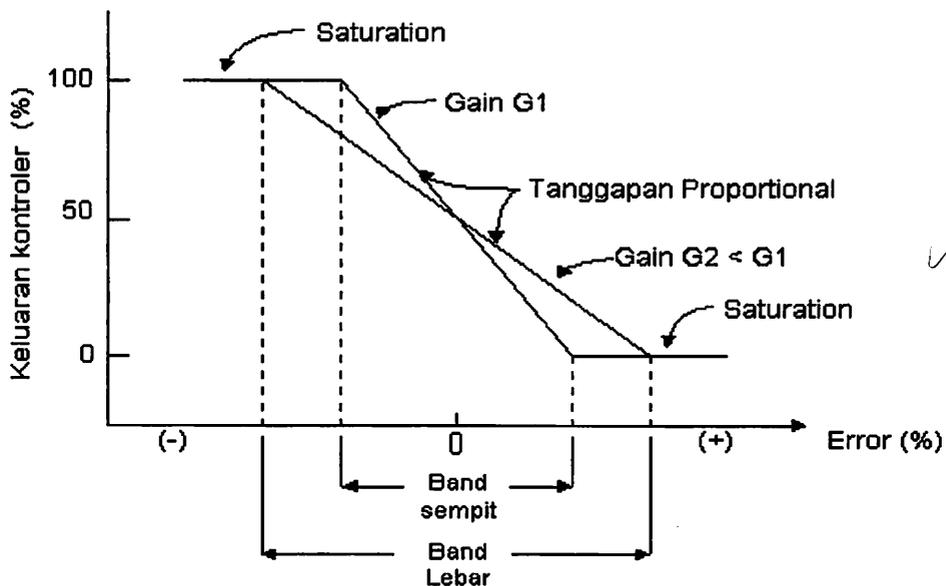
*Gambar 3.2
Diagram blok kontroler proporsional*

Kontroler proporsional memiliki 2 parameter, pita proporsional (*proportional band*) dan konstanta proporsional. Daerah kerja kontroler efektif

dicerminkan oleh Pita proporsional, sedangkan konstanta proporsional menunjukkan nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan, K_p . Hubungan antara pita proporsional (PB) dengan konstanta proporsional (K_p) ditunjukkan secara prosentasi oleh persamaan berikut:

$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100\% \quad \checkmark$$

Gambar 3.3 menunjukkan grafik hubungan antara PB, keluaran kontroler dan kesalahan yang merupakan masukan controller. Ketika konstanta proporsional bertambah semakin tinggi, pita proporsional menunjukkan penurunan yang semakin kecil, sehingga lingkup kerja yang dikuatkan akan semakin sempit.



Gambar 3.3

Proportional band dari kontroler proporsional tergantung pada penguatan.

Ciri-ciri kontroler proporsional harus diperhatikan ketika kontroler tersebut diterapkan pada suatu sistem. Secara eksperimen, pengguna kontroler proporsional harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut ini:

1. Kalau nilai K_p kecil, kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai K_p dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantabnya.
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi .

Pengendali proporsional ini memiliki kekurangan yaitu, dimana dalam proses pengendalian ini meninggalkan error yang lazim disebut offset. Offset yang ditinggalkan oleh pengendali proporsional ini tidak dapat diperkecil begitu saja dengan memperbesar gain, karena dengan bertambahnya gain, kemungkinan besar sistem menjadi tidak stabil. Apalagi kalau gain dibuat tak terhingga, maka sistem pengendalian menjadi sistem pengendalian *on-off* dan tentu saja hal itu tidak diharapkan. Untuk menghilangkan adanya error pada pengendali proporsional ini maka besaran bias diperlukan untuk mempertahankan output pada waktu error sama dengan nol. Salah satu cara untuk menghilangkan offset adalah dengan menyetel bias agar sedekat mungkin dengan load, namun cara ini tidak dapat direkomendasikan begitu saja, karena tidak semua kontroler memiliki fasilitas *adjustable bias*.

3.5.2 Pengendali Integral ✓

Untuk menghilangkan adanya *offset* pada pengendali proporsional, diperlukan pengendali lain yang dapat mengeluarkan output walaupun padanya tidak diperlukan input. Dengan kata lain diperlukan pengendali yang dapat menghasilkan output lebih besar atau lebih kecil dari bias pada saat input (error) sama dengan nol. Pengendali yang memenuhi kriteria ini adalah pengendali integral, disingkat I.

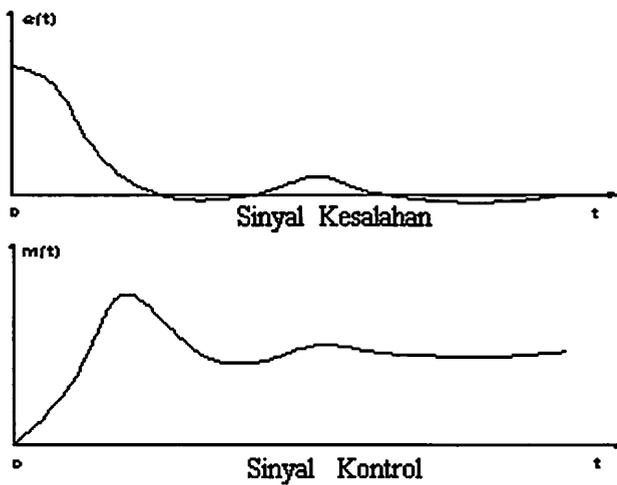
Sifat dasar pengendali integral yang dapat mengeluarkan output pada saat input sama dengan nol, adalah sifat sebuah unit integrator.

Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol. Kalau sebuah plant tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), kontroler proporsional tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol. Dengan kontroler integral, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan mantapnya nol.

Kontroler integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran kontroler sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Kalau sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.

Sinyal keluaran kontroler integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak- lihat konsep numerik. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal

kesalahan berharga nol. Gambar 3.4 menunjukkan contoh sinyal kesalahan yang disulutkan ke dalam kottroller integral dan keluaran kottroler integral terhadap perubahan sinyal kesalahan tersebut.



Gambar 3.4

Kurva sinyal kesalahan e(t) terhadap t dan kurva u(t) terhadap t pada pembangkit kesalahan nol.

Pada kendali integral, nilai masukan kottroler u(t) diubah pada laju proporsional dari sinyal pembangkit kesalahan e(t) . Sehingga

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \tag{3.2}$$

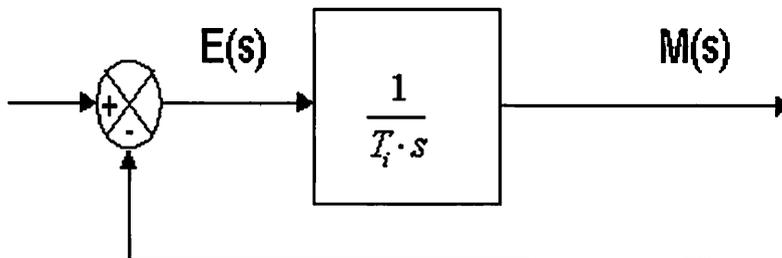
Atau

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \tag{3.3}$$

Fungsi alih dari kottroler integral, adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

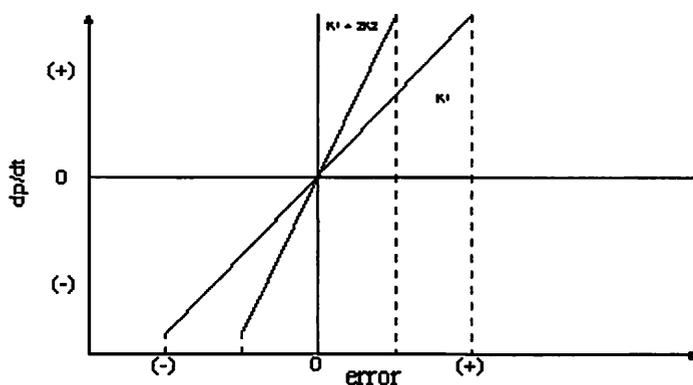
Gambar 3.5 menunjukkan blok diagram antara besaran kesalahan dengan keluaran suatu controller integral.



Gambar 3.5

Blok diagram hubungan antara besaran kesalahan dengan controller integral

Pengaruh perubahan konstanta integral terhadap keluaran integral ditunjukkan oleh Gambar 3.6. Ketika sinyal kesalahan berlipat ganda, maka nilai laju perubahan keluaran kontroler berubah menjadi dua kali dari semula. Jika nilai konstanta integrator berubah menjadi lebih besar, sinyal kesalahan yang relatif kecil dapat mengakibatkan laju keluaran menjadi besar.



Gambar 3.6

Perubahan keluaran sebagai akibat penguatan dan kesalahan

Ketika digunakan, kontroler integral mempunyai beberapa karakteristik berikut ini:

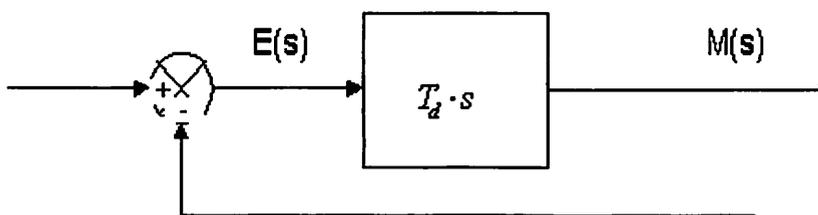
1. Keluaran kontroler membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga kontroler integral cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran kontroler akan bertahan pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran kontroler.

3.5.3 Pengendali Diferensial ✓

Aksi kendali diferensial atau kendali kecepatan dipakai untuk mempercepat tanggapan dinamik sistem kendali, yaitu mengantisipasi isnyal kesalahan yang akan terjadi dengan memperhatikan laju perubahan kesalahan. Dengan memberikan aksi kendali antisipator maka proses terkontrol cenderung stabil, sehingga sering digunakan untuk melawan pengaruh osilasi yang disebabkan oleh aksi integral.

Perubahan yang mendadak pada masukan kontroler, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Gambar 3.7 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan dengan keluaran kontroler.

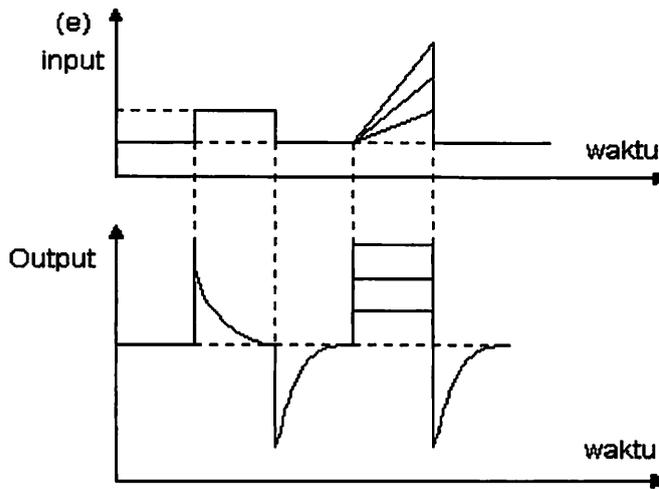
Keluaran kontroler diferensial memiliki sifat seperti halnya suatu operasi derivatif.



Gambar 3.7

BlokDiagram kontroler diferensial

Gambar 3.8 menyatakan hubungan antara sinyal masukan dengan sinyal keluaran kontroler diferensial. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran kontroler juga tidak mengalami perubahan, sedangkan apabila sinyal masukan berubah mendadak dan menaik (berbentuk fungsi *step*), keluaran menghasilkan sinyal berbentuk impuls. Jika sinyal masukan berubah naik secara perlahan (fungsi *ramp*), keluarannya justru merupakan fungsi *step* yang besar magnitudnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta diferensialnya T_d .



Gambar3. 8

Kurva waktu hubungan input-output kontroler diferensial

Karakteristik kontroler diferensial adalah sebagai berikut:

1. Kontroler ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan kontroler tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.
3. Kontroler diferensial mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga kontroler ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi kontroler diferensial dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif, dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem .

Berdasarkan karakteristik kontroler tersebut, kontroler diferensial umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Kerja kontroler diferensial hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh sebab itu kontroler diferensial tidak pernah digunakan tanpa ada kontroler lain sebuah sistem. Pengendali diferensial mengandung unsur derivative pada transfer function-nya. Itulah sebabnya pengendali diferensial juga disebut pengendali derivative, disingkat pengendali D. Karena sifat dari pengendali diferensial yang mampu mengeluarkan output ekstra di saat-saat awal, pengendali diferensial juga sering disebut *pre-act controller*.

3.5.4 Pengendali Proporsional Plus Integral ✓

Karena sifatnya yang tidak mengeluarkan output sebelum selang waktu tertentu, pengendali integral jadi memperlambat response, walaupun offset hilang karenanya. Untuk memperbaiki lambatnya response, umumnya pengendali integral dipasang parallel dengan pengendali proporsional. Gabungan kedua pengendali itu lazim disebut pengendali PI atau PI controller, dan pengendali dikatakan punya 2 mode yaitu P dan I. Persamaan matematis kontroler PI :

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (3.4)$$

Atau fungsi alih kontroler ini adalah :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (3.5)$$

Karena pengendali PI merupakan gabungan dari dua unit control, P dan I, semua kelebihan serta kekurangan yang ada pada pengendali P dan pengendali I juga ada padanya. Sifat pengendali P yang selalu meninggalkan offset dapat ditutupi oleh kelebihan pengendali I, Sedangkan sifat pengendali I yang lambat dapat ditutupi oleh pengendali P, sehingga pengendalian PI menghasilkan response yang lebih cepat dari pengendalian integral tapi mampu menghilangkan offset yang ditinggalkan oleh pengendalian P.

3.5.5 Pengendali Proporsional plus Diferensial

Pengendali diferensial dipasang parallel dengan pengendali proporsional, yang disebut pengendali PD. Karena pengendali PD adalah gabungan pengendali proporsional dan pengendali diferensial, pengendali ini memiliki sifat yang ada pada pengendali P dan pengendali D. Persamaan matematis dari kontroler PD ini adalah :

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Sehingga fungsi alihnya menjadi :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (3.7)$$

Dengan K_p menyatakan penguatan proporsional dan T_d menyatakan waktu turunan. Aksi derivative mempunyai keluaran hanya pada saat terjadi perubahan variable atau juga ada gangguan singkat yang timbul. Sinyal keluaran kontroler PD tidak naik secepat atau sedrastis pada tanggapan proporsional. Dengan kata lain pengendali PD memberikan efek peredaman terhadap tegangan proporsional dan derivatif. Jika sistem kendali teredam,

sistem mempunyai kemampuan bereaksi secara cepat dalam perubahan kasalahan tanpa bahaya osilasi.

3.5.6 Pengendali Proporsional-Integral-Difrensial

Sistem kendali PID memiliki umpan balik yang merupakan gabungan dari tiga mode pengendali yaitu pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali diferensial. Pengendali proporsional dalam hal ini berfungsi untuk mempercepat tanggapan awal sistem (*rise time*/waktu bangkit), pengendali derivatif untuk mempercepat tanggapan dinamik dan pengendali integral untuk menghilangkan *offset*. Pengendali integral pada sistem kendali PID digunakan jika sistem harus menjaga proses variabel pada nilai pengoperasian nominal, dimana perubahan variabel proses hanya akan terjadi sebagai akibat perubahan beban.

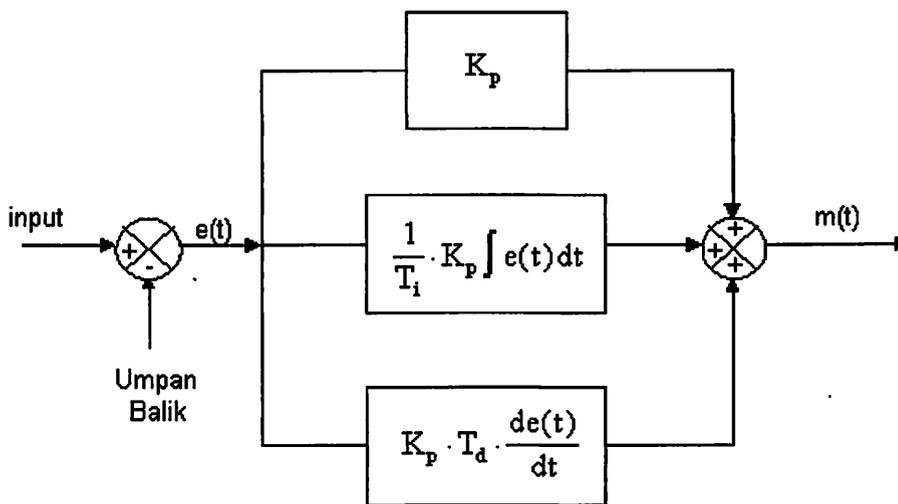
Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler P, I dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi kontroler proporsional plus integral plus diferensial (kontroler PID). Elemen-elemen kontroler P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Persamaan dengan tiga kombinasi ini diberikan oleh :

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Sehingga fungsi alihnya adalah :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (3.9)$$

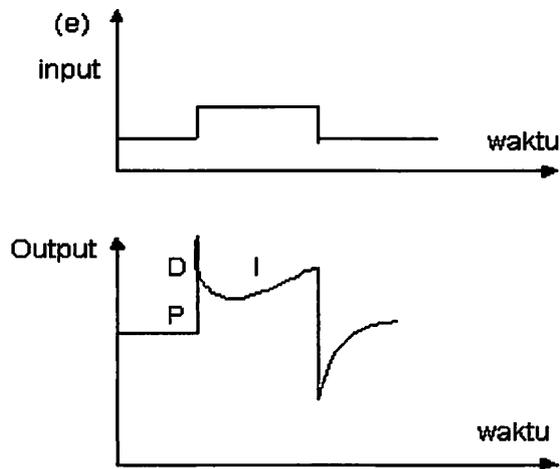
Gambar 3.9 menunjukkan blok diagram kontroler PID.



Gambar 3.9

Blok diagram kontroler PID analog

Keluaran kontroler PID merupakan jumlahan dari keluaran kontroler proporsional, keluaran kontroler integral. Gambar3.10 menunjukkan hubungan tersebut.



Gambar 3. 10

*Hubungan dalam fungsi waktu antara sinyal keluaran dengan masukan untuk
 controller PID*

Karakteristik kontroler PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , T_i , dan T_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan .

Mode proporsional dalam kontroler PID menghasilkan sinyal keluaran yang proporsional terhadap perbedaan antara nilai aktual dan nilai setpoint. Kendali integral berfungsi untuk menghasilkan keluaran yang proporsional dengan penjumlahan waktu dan lamanya waktu sinyal kesalahan timbul. Pengendali diferensial menghasilkan sinyal keluaran yang sebanding dengan

laju perubahan sinyal kesalahan . Pengendali PID tepat digunakan pada situasi dimana kontroler harus mampu merespon perubahan sinyal analog yang sangat cepat, dan pada kasus yang terjadi kelambanan waktu yang panjang antara pemakaian aksi koreksi, munculnya perubahan yang nyata sebagai akibat dari pemberian aksi kendali.

Pengaturan dan penalaan kontroler PID untuk mendapatkan performansi yang optimal dilakukan dengan mencari kombinasi dari ketiga metode tersebut, ini dilakukan saat proses benar-benar berjalan. Penetapan awal system kendali diperkirakan, dan tiga mode ditala dengan baik untuk akhirnya dicapai penetapan kendali yang optimal.

3.6 Tuning Parameter Kontroler PID

Hakikat utama system pengendalian adalah menjaga atau mengendalikan *process variable* agar selalu sama dengan set point. Walaupun keadaan ideal itu tidak pernah tercapai sepenuhnya, maka harus dicari cara agar process variabel dapat sedekat mungkin dengan set point pada keadaan load dan operasi bagaimanapun. Upaya utama yang dilakukan setelah merencanakan semua instrumentasi pengendalian adalah menyetel sistem agar *process variable* mengikuti set point dengan *response overdamped* atau *underdamped*. Sistem harus disetel agar tidak pernah berosilasi pada semua kondisi operasi. Keadaan sistem yang demikian disebut stabil.

Tuning parameter kontroler PID disebut juga sebagai penalaan parameter kontroler PID adalah untuk menentukan parameter kontroler PID

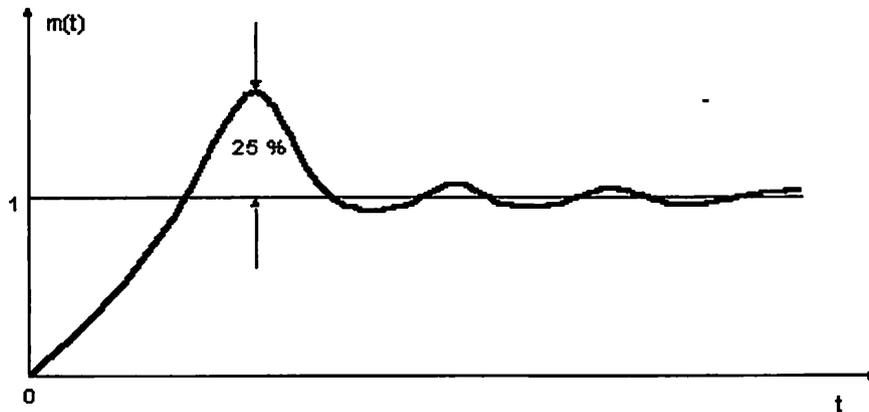
supaya sistem *closed loop* memenuhi kriteria performansi yang diinginkan. Penalaan parameter kontroler PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (Plant). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu plant, perilaku plant tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter PID itu dilakukan. Karena penyusunan model matematik *plant* tidak mudah, maka dikembangkan suatu metode eksperimental. Metode ini didasarkan pada reaksi plant yang dikenai suatu perubahan. Dengan menggunakan metode itu model matematik perilaku *plant* tidak diperlukan lagi, karena dengan menggunakan data yang berupa kurva keluaran, penalaan kontroler PID dapat dilakukan. Penalaan bertujuan untuk mendapatkan kinerja system sesuai dengan spesifikasi rancangan. Loop sistem pengendalian ditala dengan menyetel PB, TR dan TD tergantung pada mode pengendalian.

Ada beberapa cara penalaan kontroler PID diantaranya yaitu metode Ziegler-Nichols, metode Coohen-Coen, dan metode Direct Syntesis. Skripsi ini menggunakan salah satu metode tersebut untuk melakukan tuning, yaitu metode Ziegler-Nichols.

3.6.1 Metode Ziegler-Nichols

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

digunakan adalah cara kurva reaksi. Gambar 3.11 memperlihatkan kurva dengan lonjakan 25%.



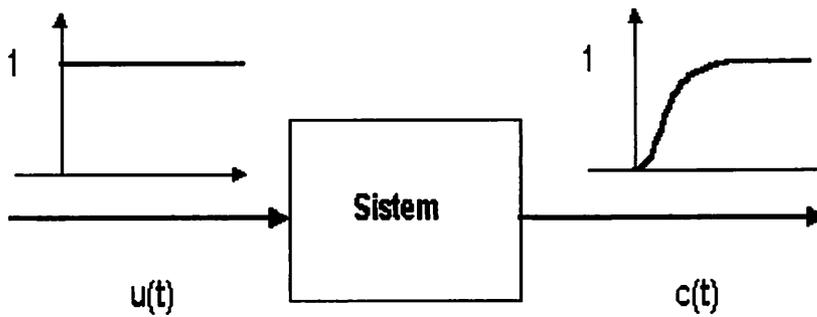
Gambar 3.11

Kurva respons tangga satuan yang memperlihatkan 25 % lonjakan maksimum

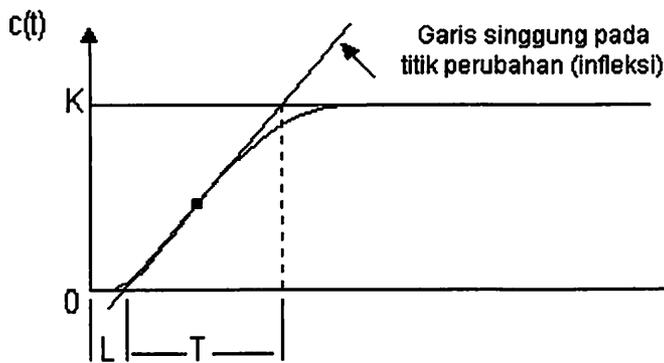
3.6.1.1 Metode Kurva Reaksi

Metode ini didasarkan terhadap reaksi sistem untaian terbuka. *Plant* sebagai untaian terbuka dikenai sinyal fungsi tangga satuan (gambar 3.12). Kalau *plant* minimal tidak mengandung unsur integrator ataupun pole-pole kompleks, reaksi sistem akan berbentuk S.

Gambar 3.13 menunjukkan kurva berbentuk S tersebut. Kelemahan metode ini terletak pada ketidakmampuannya untuk *plant* integrator maupun *plant* yang memiliki pole kompleks.



*Gambar 3.12
Respon tangga satuan system*



*Gambar 3.13
Kurva Respons berbentuk S.*

Kurva berbentuk-s mempunyai dua konstanta, waktu mati (dead time) L dan waktu tunda T . Dari gambar 3.13 terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik, setelah selang waktu L . 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.

Penalaan parameter PID didasarkan perolehan kedua konstanta itu. Zeigler dan Nichols melakukan eksperimen dan menyarankan parameter penyetelan nilai K_p , T_i , dan T_d dengan didasarkan pada kedua parameter tersebut. Tabel 1 merupakan rumusan penalaan parameter PID berdasarkan cara kurva reaksi.

Tabel 1
Penalaan paramater PID dengan metode kurva reaksi

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	T/L	~	0
PI	0,9 T/L	L/0.3	0
PID	1,2 T/L	2L	0,5L

BAB IV

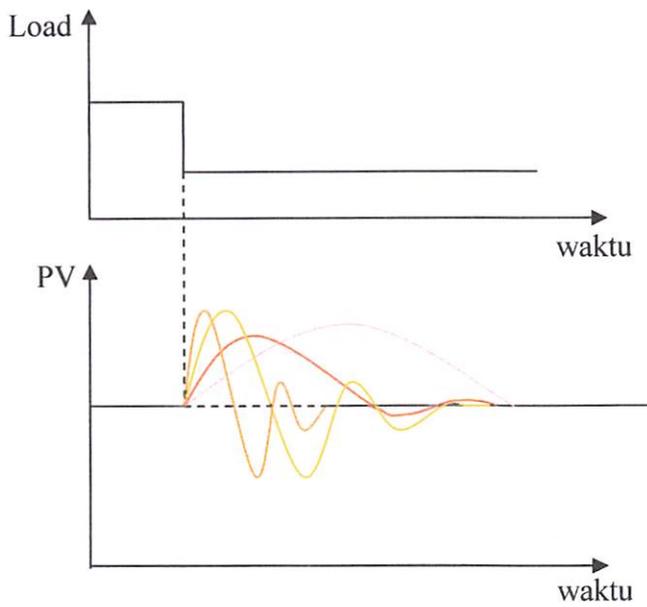
ANALISA DAN PENGUJIAN

Sistem kendali berfungsi untuk mengendalikan atau mengatur satu atau lebih variabel proses agar seimbang terhadap perubahan dalam sistem. Berdasarkan ada tidaknya sinyal umpan balik, sistem kendali dibagi menjadi dua bagian yaitu sistem kendali lup terbuka dan sistem kendali lup tertutup.

Pada kendali lup terbuka, proses beroperasi secara bebas tak tergantung pada variabel proses yang dikendalikan, sehingga masih membutuhkan seorang operator untuk memonitor sistem. Sedangkan pada kendali lup tertutup memungkinkan variabel proses dikendalikan untuk mendapatkan nilai yang diinginkan. Berikut ada beberapa variabel yang berhubungan dengan kendali lup tertutup untuk mengevaluasi performansi sistem kendali proses, yaitu,

- **Tanggapan Transien**

adalah tanggapan sistem yang berlangsung dari awal sampai dengan keadaan akhir atau sampai sistem stabil, ini berkenaan dengan lonjakan (*overshoot*) sistem saat awal ataupun saat sistem terkena gangguan dari luar. Peredaman (*damping*) adalah metode yang digunakan untuk meredam lonjakan pada sistem kendali proses. Berbagai bentuk variasi tingkat peredaman antara lain: sistem tak teredam, sistem teredam kritis dan sistem teredam lebih.



Gambar 4.1 Bentuk Umum Response

Sumber: Frans Guterus, Falsafah Dasar Sistem Pengendalian Proses, Hal. 9-5

Dimana:

- = *Overdamped*
- = *Underdamped*
- = *Quarter amplitude decay*
- = *Critically damped*

- Kesalahan Keadaan Tunak

Adalah perbedaan antara keluaran yang dicapai saat *steady state* dengan nilai yang dikehendaki. Kesalahan ini dapat juga dikurangi dengan peningkatan penguatan sistem, namun penambahan ini akan diimbangi

oleh variabel keluaran yang berfluktuasi, yang mungkin menyebabkan sistem tidak stabil.

- **Stabilitas**

Variabel ini berkenaan dengan kemampuan sistem untuk memperkecil keluaran yang berosilasi sebagai akibat dari gangguan. Sistem tidak stabil akan menyebabkan keluaran berosilasi diatas dan dibawah nilai yang dikehendaki atau dengan kata lain keluaran sistem tidak sesuai dengan yang diharapkan.

4.1 Performansi Sistem

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

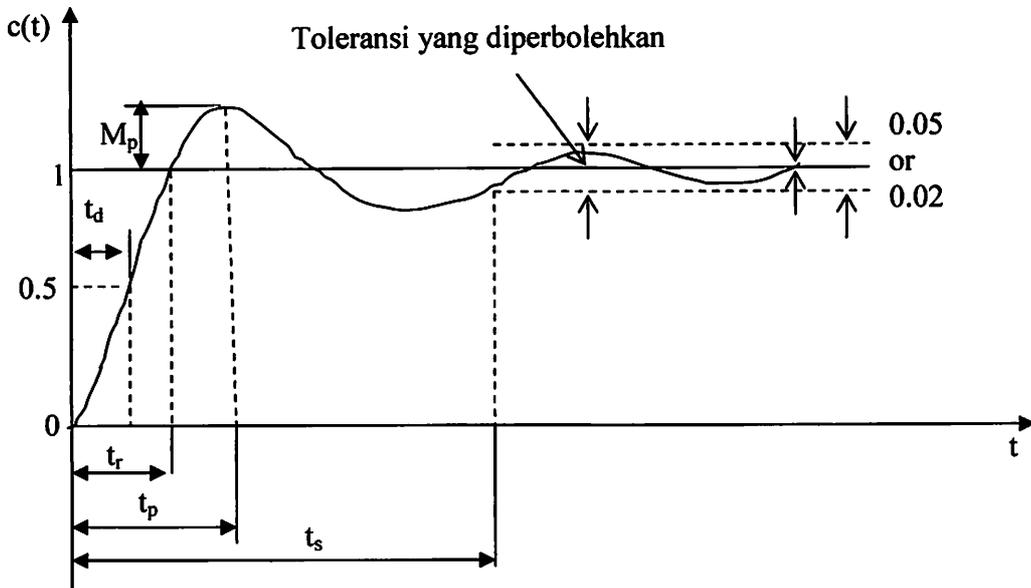
Berikut ada penjelasan dari beberapa komponen kriteria performansi:

- *Error steady state* ialah nilai selisih antara nilai *set point* dengan nilai actual plant pada kondisi *steady state*.

- *Rise time* (t_r), ialah waktu untuk respon naik dari 0% sampai 100% (untuk *system under-damped*).
- Waktu tunda (t_d), adalah waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir untuk waktu yang pertama.
- Waktu puncak (t_p), adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak pertama *overshoot*
- *Maximum overshoot* adalah puncak lewatan maksimum *respon transient*, biasanya dinyatakan dalam bentuk prosentasi selisih nilai *set point* dengan nilai actual puncak terhadap nilai *set point* dengan nilai actual puncak terhadap nilai *set point* itu sendiri. Besarnya prosentasi ini menunjukkan kestabilan relatif sistem.

$$\%M = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(t_p)} \times 100\%$$

- *Settling time* ialah waktu untuk respon mencapai suatu nilai dan menetap pada fraksi harga akhir sebesar 2% atau 5% (pita kestabilan)



Gambar 4.2 Kurva Tanggapan Tangga Satuan,

Sumber: Ogata, Teknik Kontrol Automatik, Hal 286

4.2 Spesifikasi Motor DC Penguatan Terpisah

Motor DC yang digunakan adalah motor DC penguatan terpisah dengan spesifikasi sebagai berikut:

- P = 0.3 kW
- V_a = 220 Volt
- I_a nominal = 2.2 Ampere
- R_a = 19.5 Ohm
- L_a = 193.38 Henry
- I_f nominal = 0.42 Ampere
- V_f = 220 Volt

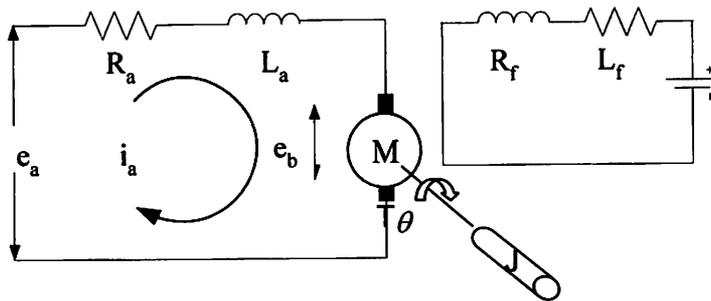
- Putaran nominal = 2000 rpm

Dari hasil pengujian motor DC didapatkan nilai-nilai sebagai berikut:

- V_a = 190 Volt
- T = 0.413 N-m
- N = 1939 rpm
- I_a = 0.46 Ampere

4.3 Penyusunan Model Matematik

Penyusunan model matematis sistem jika ditinjau dari motor arus searah dengan pengontrolan jangkar ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.3 Rangkaian Motor DC Pengutan Terpisah

Sumber, : Ogata, Teknik Kontrol Automatik, Hal 130

Pada sistem ini:

R_a = tahanan kumparan jangkar, ohm

L_a = induktansi kumparan jangkar, henry

i_a = arus kumparan jangkar, ampere

i_f = arus medan

e_a = tegangan yang dikenakan pada kumparan , volt

e_b = gaya gerak listrik balik, volt

θ = perpindahan sudut dari poros motor, N-m

T = torsi yang diberikan oleh motor, N-m

J = momen inersia ekivalen dari motor dan beban pada poros motor, Kg-m^2

b = koefisien gesekan viskos ekivalen dari motor dan beban pada poros

Motor, N-m/rad/sec

Torsi T yang dihasilkan motor adalah berbanding lurus dengan hasil kali arus kumparan i_a dan fluks celah udara ψ_t yang berbanding lurus dengan arus medan atau

$$\Psi = K_f i_f$$

Dengan K_f adalah konstanta. Sehingga torsi T dapat ditulis sebagai

$$T = K_f i_f K_1 i_a$$

Dengan K_1 konstanta.

Untuk medan arus konstan, fluks juga konstan dan torsi mempunyai arah sesuai arus kumparan magnet sehingga

$$T = K i_a$$

Dengan K adalah konstan torsi motor. Apabila tanda arus i_a dibalik maka tanda dari torsi T akan berbalik pula. Hal ini menyebabkan berbaliknya arah putaran motor.

Bila kumparan magnet berputar, maka tegangan akan sebanding dengan hasil kali fluks dan kecepatan sudut yang diinduksikan pada kumparan magnet. Untuk fluks yang konstan, tegangan induksi e_b berbanding lurus dengan kecepatan sudut $d\theta/dt$, atau

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (4.1)$$

dengan e_b adalah emf balik dan K_b konstanta emf balik.

Persamaan diferensial rangkaian kumparan magnet adalah

$$L_a \frac{di_a}{dt} + r_a i_a + e_b = e_a \quad (4.2)$$

Arus jangkar magnet menghasilkan torsi yang bekerja terhadap inersia dan gesekan sehingga

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = T = K i_a \quad (4.3)$$

Dengan menganggap bahwa semua syarat awal nol, dan ambil transformasi Laplace persamaan (4.1), (4.2), (4.3), diperoleh persamaan berikut:

$$K_b s \Theta(s) = E_b(s) \quad (4.4)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a s \quad (4.5)$$

$$(J s^2 + b s) \Theta(s) = T(s) = K I_a(s) \quad (4.6)$$

Jangkar magnet motor dc merupakan sistem umpan balik. Efek emf balik dapat dilihat sebagai sinyal umpan balik yang sebanding dengan kecepatan motor.

Fungsi untuk motor dc dapat ditulis sebagai

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s [L_a J s^2 + (L_a b + R_a J) s + R_a b + K K_b]} \quad (4.6)$$

Induktansi L_a dalam kumparan magnet biasanya kecil dan dapat diabaikan.

Bila L_a diabaikan maka fungsi alih yang diberikan oleh persamaan (4.6) menjadi

$$\frac{\Theta(s)}{E_a s} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (4.7)$$

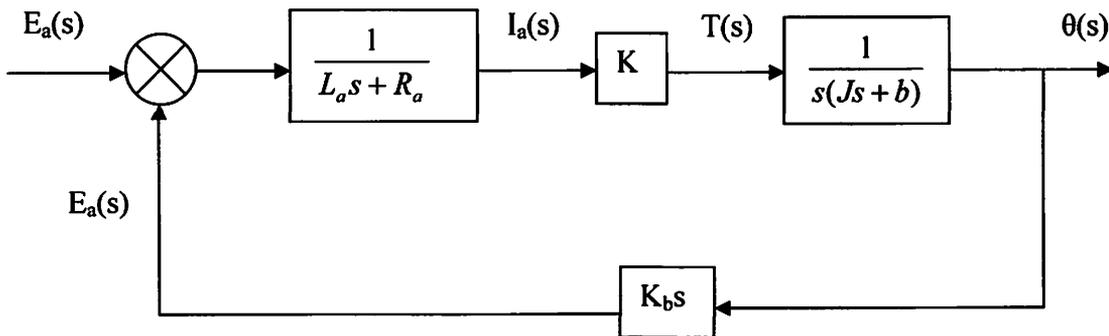
Dengan $K_m = K/(R_a b + K K_b) =$ konstanta penguatan motor

$$T_m = R_a J / (R_a b + K K_b) = \text{konstanta waktu motor}$$

Dari persamaan (4.7) dan (4.8) dapat dilihat bahwa fungsi alih melibatkan suku $1/s$. Jadi, sistem ini mempunyai sifat mengintegrasikan. Pada persamaan (4.8) perhatikan bahwa konstanta waktu motor bertambah kecil untuk R_a dan J yang kecil, jika tahanan R_a diperkecil maka konstanta waktu motor mendekati nol sehingga motor bekerja sebagai integrator ideal.

4.4 Penyusunan Blok Diagram

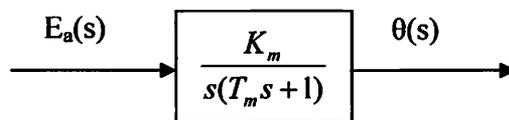
Setelah didapatkan persamaan matematik dari motor dc, maka akan didapat diagram blok motor dc dari persamaan (4.4)-(4.6) dengan inputan berupa tegangan jangkar (volt), dan outputan berupa putaran (rpm).



Gambar 4.4 Diagram blok motor dc

Sumber: Ogata, Teknik Kontrol Automatik, Hal 130

Diagram blok sederhana

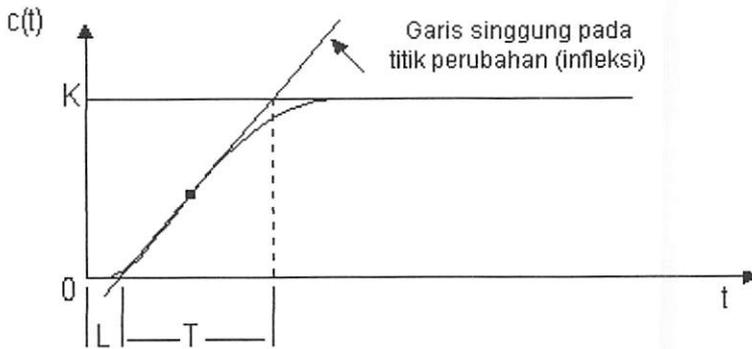


Gambar 4.5 Diagram blok motor dc yang disederhanakan

Sumber: Ogata, Teknik Kontrol Automatik, Hal 130

4.5 Respon Open Loop

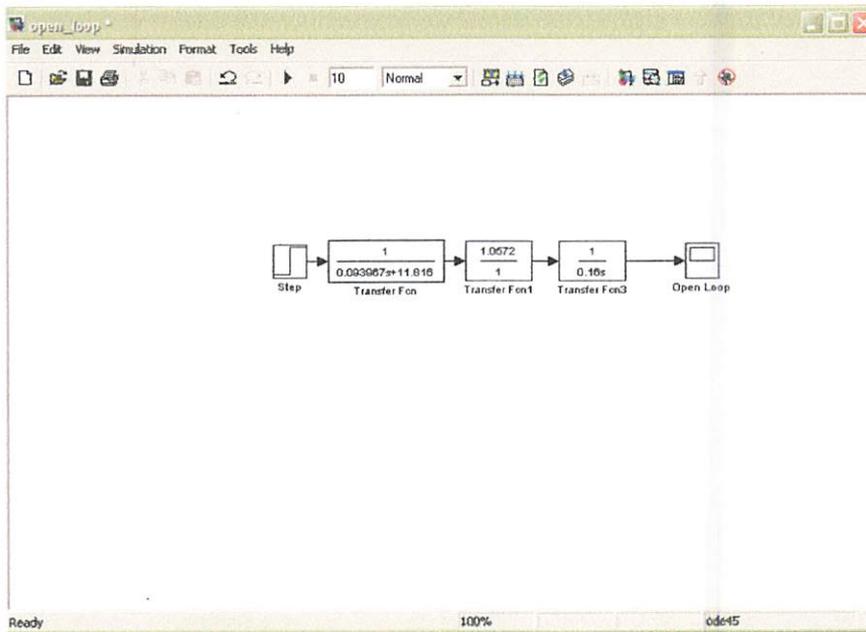
Setelah didapatkan model matematis dari system, selanjutnya adalah mencari respon open loop dari system. Respon open loop dari system didapat dengan menggunakan metode kurva reaksi yang didasarkan pada untai terbuka (gambar 4.6). tujuan mencari respon open loop adalah untuk memperoleh nilai L dan T yang nantinya diperlukan untuk mendapatkan nilai parameter k_p , T_i dan T_d .



Gambar 4.6 Kurva Respons berbentuk S

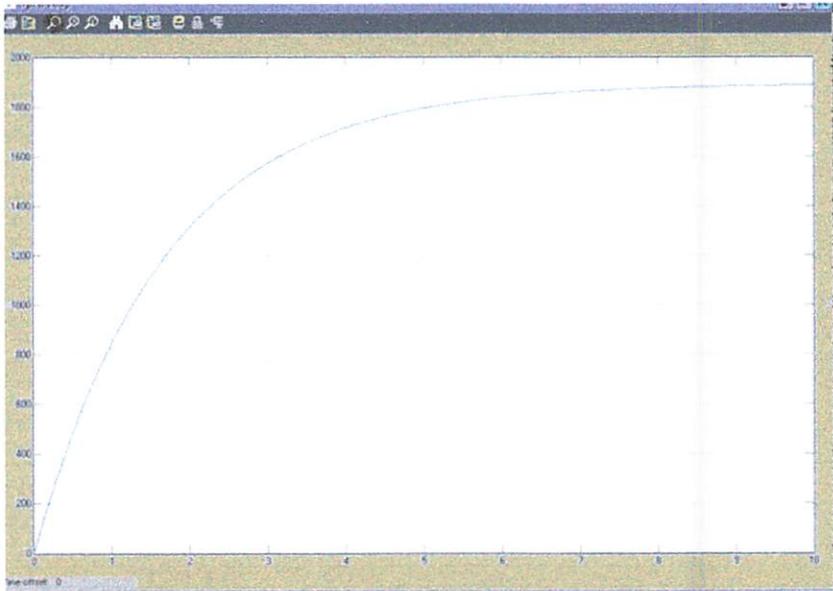
Sumber: Ir. Chairuzzaeni dkk, www.elektroindonesia.com, Hal. 11

Sedangkan dalam simulink MATLAB 7.0. Blok diagram respon open loop diperlihatkan sebagai berikut:



Gambar 4.7 Blok Diagram Sistem Open Loop Dalam Simulink-MATLAB 7.0

Grafik performansi dari open loop yang dihasilkan dalam *simulink-MATLAB 7.0* diperlihatkan sebagai berikut:



Grafik 4.1 Performansi Sistem Tanpa Kontroler

Sumber: Simulasi

Dari grafik diatas, maka akan didapatkan nilai L dan T, dimana

- L (dead time) = 0.00499 s
- T (waktu tunda) = 2.22 s

Setelah mendapatkan nilai L dan T, maka nilai L dan T tersebut dimasukkan dalam tabekl penalaan parameter PID dengan metode tuning Ziegler-Nichols

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	T/L	~	0
PI	0,9 T/L	L/0.3	0
PID	1,2 T/L	2L	0,5L

Tabel 4.1 Penalaan paramater PID dengan metode kurva reaksi

Sumber: Ir. Chairuzzaeni dkk, www.elektroindonesia.com, Hal. 11

Nilai T sebesar 2,22 s dan L sebesar 0,0499 s yang diperoleh pada respon open loop dimasukkan pada table penalaan metode tuning Ziegler-Nichols, maka akan didapat hasil perhitungan seperti di bawah ini:

$$\begin{aligned}
 K_p &= 1,2T/L \\
 &= 1,2 \times 2,22/0,0499
 \end{aligned}$$

$$= 53.3868$$

$$T_i = 2L$$

$$= 2 \times 0,0499$$

$$= 0.0998$$

$$T_d = 0.5L$$

$$= 0.5 \times 0,0499$$

$$= 0,02495$$

Dengan menggunakan matlab 7.0, perhitungan nilai K_p akan diperlihatkan sebagai berikut:

```

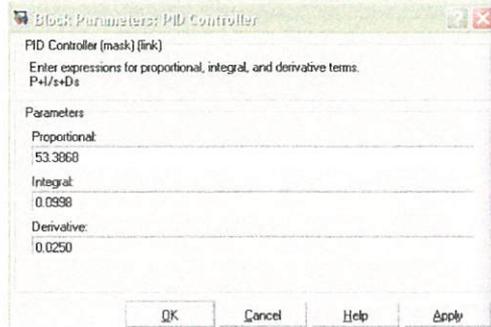
Editor - D:\MATLAB7\work\Z1.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - Kc = 1;
2 - T = 2.22;
3 - To = 0.0499;
4 - Kp = (T) / (To);
5 - Ki = (2 * To);
6 - Kd = (0.5 * To);
Z1.m x COOBA x Untitled2.m x

```

Gambar 4.8 Perhitungan Parameter K_p , T_i dan T_d Menggunakan matlab 7.0

Sumber: Matlab 7.0

Hasil perhitungan K_p , T_i dan T_d diperlihatkan pada gambar 4.9 sebagai berikut:

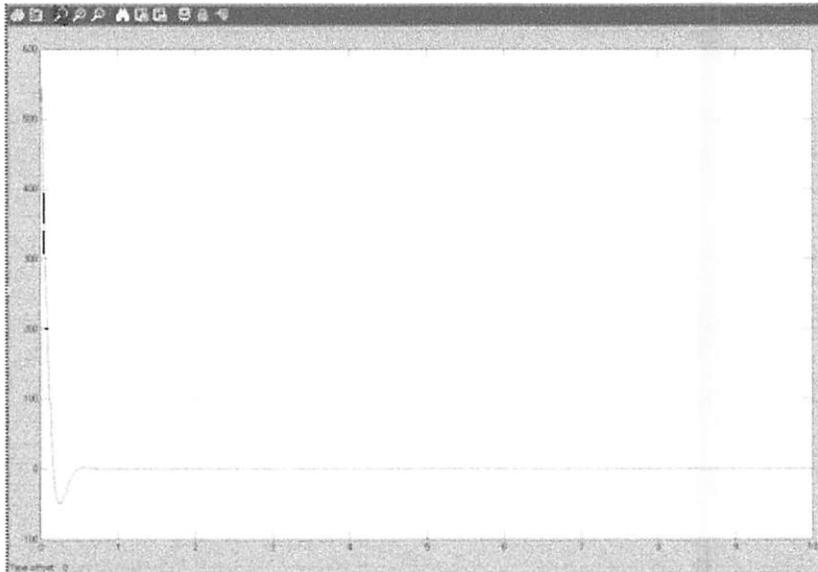


Gambar 4.9 Hasil Perhitungan Nilai K_p , T_i dan T_d

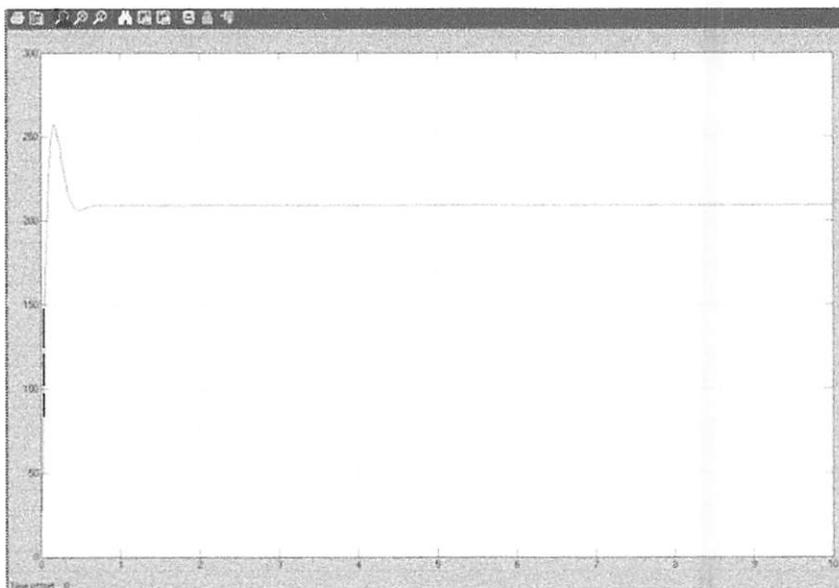
Sumber : Matlab 7.0

4.6 Hasil Dan Analisa Pengujian Sistem

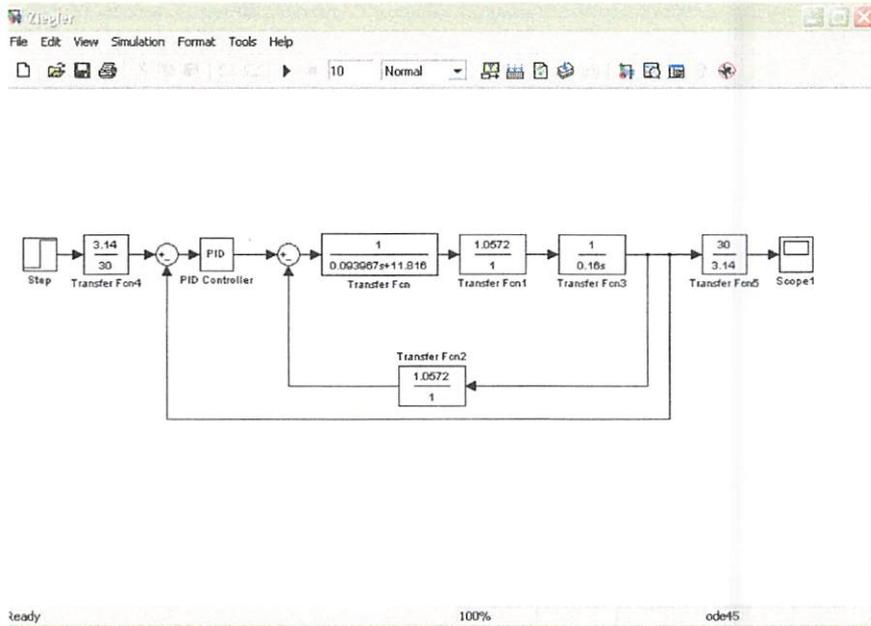
Performansi sistem dianalisa dengan melakukan simulink pada *Simulink-MATLAB*, dengan memasukkan transfer function motor dc yang ada pada blok diagram open loop motor dc. Sedang parameter PID yang muncul pada blok parameter dimasukkan pada blok kontroler PID disimulink. Berikut ini gambar diagram blok simulink:



Grafik 4.2 tampilan Torsi dari Blok diagram Simulink-MATLAB



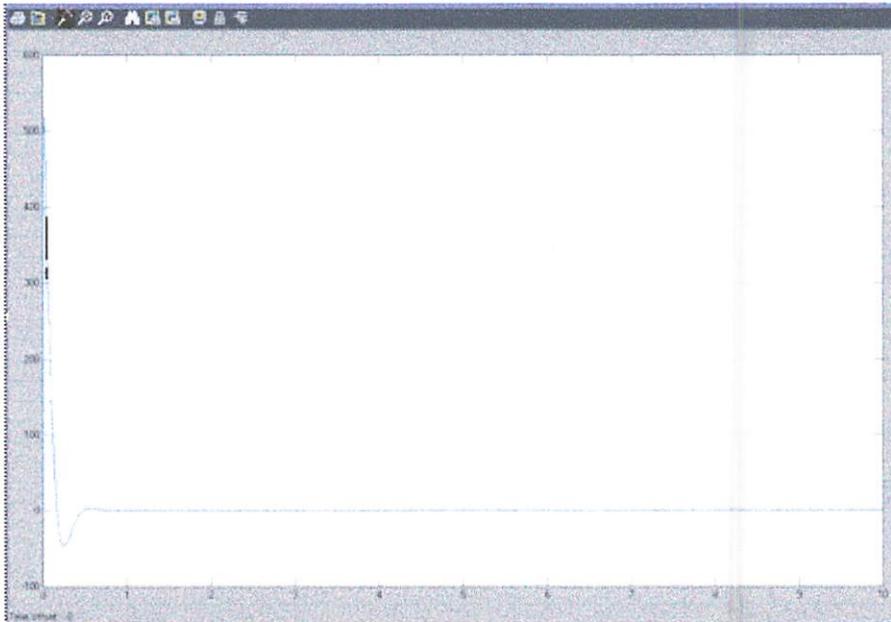
Grafik 4.3 tampilan Tegangan dari Blok diagram Simulink-MATLAB



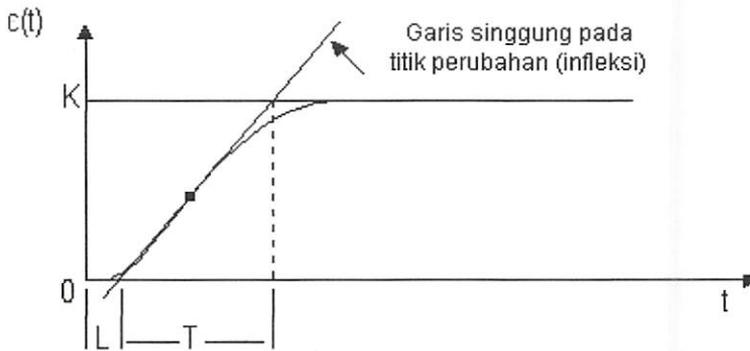
Gambar 4.10 Blok Diagram simulink Untuk Analisa performansi

Sumber: Simulink-MATLAB

Sedangkan grafik performansi sistem sebagai berikut:



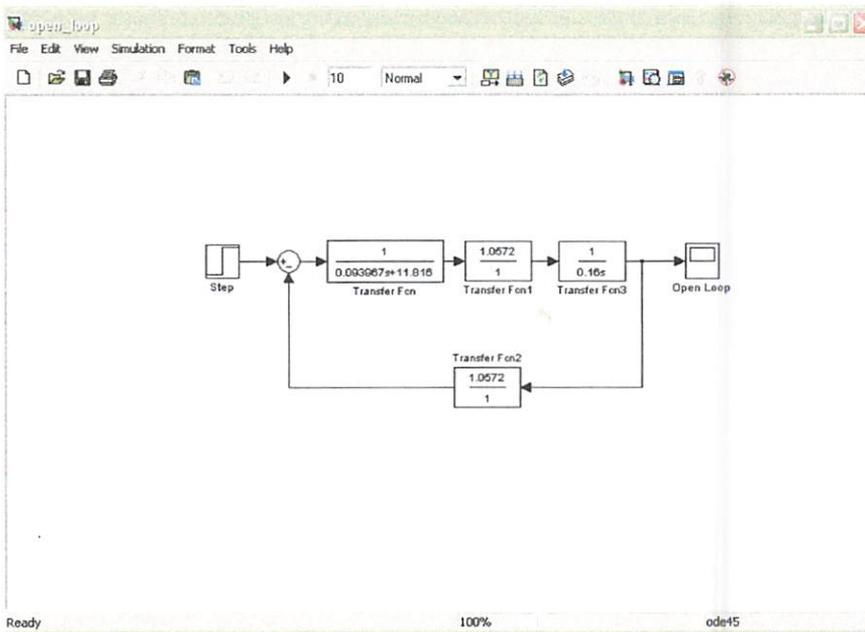
Grafik 4.1 Tampilan Arus Dari Blok Diagram *Simulink-MATLAB*



Gambar 4.6 Kurva Respons berbentuk S

Sumber: Ir. Chairuzzaeni dkk, www.elektroindonesia.com, Hal. 11

Sedangkan dalam simulink MATLAB 7.0. Blok diagram respon open loop diperlihatkan sebagai berikut:



Gambar 4.7 Blok Diagram Sistem Open Loop Dalam Simulink-MATLAB 7.0

Dari grafik respon *closed loop* dapat diketahui untuk *manipulated variable* berupa tegangan didapatkan performansi system sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \downarrow \text{Maksimum over shoot} &= \frac{c(tp) - c(\text{aktualplant})}{c(\text{aktualplant})} \times 100\% \\ &= \frac{257,557 - 209,34}{209,34} \times 100\% \\ &= 23,03\% \end{aligned}$$

$$\downarrow \text{Rise time} = 0.12 \text{ s}$$

$$\downarrow \text{Settling time} = 0.65\text{s}$$

$$\begin{aligned} \downarrow \text{Error} &= \text{nilai input-nilai aktual plant pada kondisi } \textit{steady state} \\ &= 220 - 209,34 \\ &= 10,66 \text{ volt} \end{aligned}$$

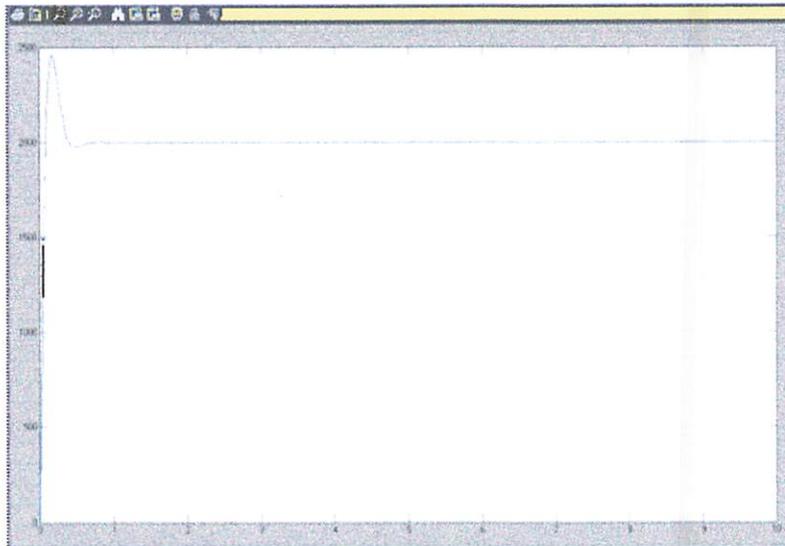
Dari grafik respon *closed loop* dapat diketahui untuk *controlled variable* berupa putaran didapatkan performansi sistem sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \downarrow \text{Maksimum over shoot} &= \frac{c(tp) - c(\text{aktualplant})}{c(\text{aktualplant})} \times 100\% \\ &= \frac{2460 - 2000}{2000} \times 100\% \\ &= 23\% \end{aligned}$$

$$\downarrow \text{Rise time} = 0.12 \text{ s}$$

$$\downarrow \text{Settling time} = 0.6\text{s}$$

$$\begin{aligned} \downarrow \text{Error} &= \text{nilai sp-nilai actual plant pada kondisi } \textit{steady state} \\ &= 2000 - 2000 \\ &= 0 \text{ rpm} \end{aligned}$$



Grafik 4.4 tampilan Putaran dari Blok diagram Simulink-MATLAB

4.6.1 Analisa Pengujian Sistem

Dari grafik respon open loop, system tanpa kontroler didapatkan performansi:

$$\text{Maksimum over shoot} = \frac{c(tp) - c(aktualplant)}{c(aktualplant)} \times 100\%$$

$$= \frac{0 - 1986,7874}{1986,7874} \times 100\%$$

$$= 0\%$$

$$\text{Rise time} = 8,7 \text{ s}$$

$$\text{Settling tisme} = \infty$$

$$\text{Error} = \text{nilai input-nilai actual plant pada kondisi steady state}$$

$$= 2000 - 1986,7874$$

$$= 13,2126 \text{ rpm}$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil perhitungan, nampak bahwa performansi dari suatu system tanpa menggunakan kontroler PID, didapatkan hasil *error steady state* sebesar 13,2126 rpm, maksimum *over shoot* 0 , rise time 8,7 s , serta *settling time* yang tak terhingga.

Dari hasil perhitungan, nampak bahwa performansi dari suatu system dengan kontroler PID yang menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols pada *manipulated variable* berupa tegangan didapatkan hasil *error steady state* sebesar 10,66 volt, maksimum *overshoot* sebesar 23,03% dan *rise time* 0,12 s serta *settling time* 0,65 s .

Sedangkan untuk *controlled variable* berupa putaran didapatkan hasil *error steady state* sebesar 0 rpm, maksimum *overshoot* sebesar 23% dan *rise time* 0,12 s serta *settling time* 0.6 s.

Jadi metode tuning Ziegler-Nichols mempunyai performansi yang baik pada outputan berupa putaran yaitu rise time 0.12 s dan settling time 0.6 s serta error steady state 0 rpm, namun masih terdapat maksimum *overshoot* sebesar 23%.

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis adalah, agar metode tuning Ziegler-Nichols dapat diimplementasikan pada sistem yang sebenarnya agar dapat diaplikasikan dalam dunia industri.

DAFTAR PUSTAKA

1. **Wicaksono, Handy.**, “ *Analisa Performansi Dan Robustness Beberapa Metode Tuning Kontroler PID Pada Motor DC* ”, Jurnal Teknik Elektro Vol. 4, no. 2, September 2004 : 70-78.
2. **Gunterus, Frans.**, “ *Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Proses* ”, Salatiga, 1977.
3. **Ogata, Katsuhiko.**, “ *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1* ”, University Of Minnesota, Edisi kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997.
4. **Ogata, Katsuhiko.**, “ *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2* ”, University Of Minnesota, Edisi kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997.
5. **Chairuzzaini dkk.**, “ *Pengenalan Metode Ziegler-Nichols Pada Perancangan Kontroler PID* ”, 1998. URL : <http://www.elektroindonesia.com/elektro/tutor12.html>.
6. **Prajeto S, Judi.**, “ *Matlab Dasar-Dasar Pemakaian* ”, Laboratorium Komputer Growth Centre, Surabaya, 1998.
7. **Zuhal.**, “ *Dasar Tenaga Listrik* ”, Penerbit ITB, Bandung, 1991.
8. **Fitzgerald A. E., Kingsley Jr, Charles., D. Umans, Stephen.**, “ *Mesin-Mesin Listrik* ”, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1997.
9. **Pakpahan S,** “ *Kontrol Otomatik Teori Dan Penerapan* ”, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1987.

LEMBAR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : RIKA YUNIARTI
NIM : 01 12 157
Jurusan : TEKNIK ELEKTRO
Konsentrasi : ENERGI LISTRIK S-1
Judul Skripsi : **ANALISAPERFORMANSI PENGENDALIAN
MOTOR DC MENGGUNAKAN KONROLER
PID DENGAN METODE TUNING
ZIEGLER-NICHOLS**

Tgl. Mengajukan Skripsi : 21 DESEMBER 2005
Tgl. Menyelesaikan skripsi : 21 MEI 2006
Dosen Pembimbing : Ir. WIDODO PUDJI M, MT
Telah dievaluasi dengan nilai : 80 

Mengetahui

Kepala Jurusan Teknik Elektro



Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Nip P. 103 950 0274

Diperiksa dan disetujui

Dosen Pembimbing



Ir. Widodo Pudji M, MT
Nip. P. 102 870 0171

**KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
MARET 2006**



FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Rika Yuniarti
Nim : 01.12.157
Masa Bimbingan : 21 DESEMBER 2005 – 21 MEI 2006
Judul Skripsi : ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN
MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER PID
DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS

No.	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	26 Januari 2006	Konsultasi Bab I & II	
2.	28 Januari 2006	ACC Bab I & II	
3.	8 Februari 2006	Konsultasi Bab III	
4.	18 Februari 2006	Revisi Bab III	
5.	22 Februari 2006	ACC Bab III	
6.	24 Februari 2006	Konsultasi Bab IV dan V	
7.	27 Februari 2006	Revisi Bab IV & V	
8.	28 Februari 2006	Revisi Bab V	
9.	1 Maret 2006	ACC Bab IV & V	

Malang, 01 Maret 2006
Dosen Pembimbing

(Ir. WIDODO PUDJI M.MT)
NIP.P 1028700171



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

**BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

Nama Mahasiswa : RIKA YUNIARTI
N.I.M. : 01.12.157
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
**Judul Skripsi : ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN
MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER
PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-
NICHOLS**

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1)

Hari : Rabu
Tanggal : 22 Maret 2006
Dengan Nilai : 78,65 (B+) *hm*



Ketua Majelis Penguji

Ir. Mochtar Asroni, MSME
Nip.P.101 810 0036

Panitia Ujian

Sekretaris Majelis Penguji

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Nip.P.103 950 0274

Anggota Penguji

Penguji Pertama

Ir. Choirul Saleh, MT
Nip.P.101 880 0190

Penguji Kedua

Ir. Eko Nurcahyo
Nip.P.102 870 0172



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang Starta (S1) yang diselenggarakan pada :

Hari : Rabu

Tanggal : 22 Maret 2006

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : Rika Yuniarti
2. Nim : 0112157
3. Jurusan : Teknik Elektro
4. Program Studi : Teknik Energi Listrik S-1
5. Judul skripsi : ANALISA PERFORMANSI PENGENDALIAN MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS

Perbaikan Meliputi :

NO	Materi Perbaikan	Keterangan
1.	Perbaiki Untuk Gambar Open Loop Sistem	

Malang , Maret 2006

Anggota Penguji

Penguji Pertama

Ir. Choirul Saleh, MT
Nip.P.101 880 0190

Penguji Kedua

Ir. Eko Nurcahyo
Nip.P.102 870 0172

Dosen Pembimbing

Ir. Widodo Pudji M, MT
Nip.P.102 870 0171



PERMOHONAN PERSETUJUAN SKRIPSI

Yang betanda tangan dibawah ini :

Nama : RIKA YUNIARII
 NIM : 01.12.157
 Semester : IX
 Fakultas : Teknologi Industri
 Jurusan : Teknik Elektro S-1
 Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
 Alamat : Jl. PLOMOWJEN 11 / 310 Malang

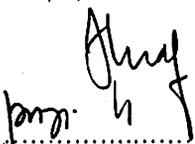
Dengan ini kanti mengajukan permohonan untuk mendapatkan persetujuan untuk membuat **SKRIPSI Tingkat Sarjana**. Untuk melengkapi permohonan tersebut, bersama kami lampirkan persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi.

Adapun persyaratan-persyaratan pengambilan **SKRIPSI** adalah sebagai berikut :

1. Telah melaksanakan semua praktikum sesuai dengan konsentrasinya (.....)
2. Telah lulus dan menyerahkan Laporan Praktek Kerja (.....)
3. Telah lulus seluruh mata kuliah keahlian (MKB) sesuai konsentrasinya (.....)
4. Telah menempuh mata kuliah ≥ 134 sks dengan IPK ≥ 2 dan tidak arla nilai E (.....)
5. Telah mengikuti secara aktif kegiatan seminar skripsi yang diadakan Jurusan (.....)
6. Memenuhi persyaratan administrasi (.....)

Demikian permohonan ini untuk mendapatkan penyelesaian lebih lanjut dan atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

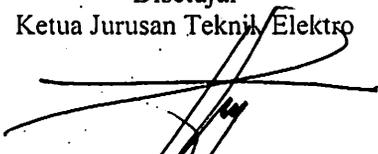
Telah diteliti kebenaran data tersebut diatas
 Recording Teknik Elektro


 (.....)

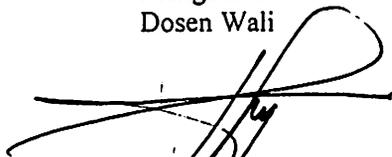
Malang, 10 Agustus.....2005
 Pemohon


 (RIKA YUNIARII.....)

Disetujui
 Ketua Jurusan Teknik Elektro


 Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
 NIP. P. 1039500274

Mengetahui
 Dosen Wali


 (.....)

Catatan :

Bagi mahasiswa yang telah memenuhi persyaratan mengambil SKRIPSI agar membuat proposal dan mendapat persetujuan dari Ketua Jurusan/Sekretaris Jurusan T. Elektro S-1

1. IPE 408/138 = 2.96
2.
3. -7. perah 29 bars