



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA SISTEM WARD LEONARD PADA RANGKAIAN
MOTOR DAN GENERATOR DC DENGAN PENGENDALI PID**

SKRIPSI

**DENNA MAULANA ACHMAD
0906602540**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA SISTEM WARD LEONARD PADA RANGKAIAN
MOTOR DAN GENERATOR DC DENGAN PENGENDALI PID**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**DENNA MAULANA ACHMAD
0906602540**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JANUARI 2012**

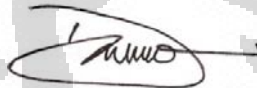
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Denna Maulana Achmad

NPM : 0906602540

Tanda Tangan :



Tanggal : 25 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Denna Maulana Achmad
NPM : 0906602540
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisa Sistem Ward Leonard Pada Rangkaian Motor dan Generator DC dengan Pengendali PID

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T.

Penguji : Ir. I Made Ardita Y M.T.

Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng

Ditetapkan di : Departemen Teknik Elektro

Tanggal : 26 Januari 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Mesin di Fakultas Teknik Universitas Indonesia, dan sebagai wadah untuk mengaplikasikan ilmu yang telah didapat pada masa perkuliahan.

Dalam penyusunan skripsi ini banyak kesulitan yang dihadapi, baik yang disebabkan oleh keterbatasan waktu dan data maupun kemampuan penulis. Tetapi berkat bantuan dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu melalui kesempatan ini penulis mengungkapkan rasa terima kasih yang setulus-tulusnya kepada:

1. Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi arahan, bimbingan dan persetujuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik;
2. Keluarga penulis, M Achmad Hanafiah G (ayah) ,Ucu Sulasmi (ibu) , Melly Camelia (Kakak), Allex Aromatica, (Kakak), atas dukungan do'a dan moril serta motivasinya hingga terselesaikannya skripsi ini;
3. Seluruh dosen pengajar dan staff laboratorium Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia yang telah mengajarkan ilmunya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan bermacam ilmu yang telah didapat;
4. Teman-teman satu bimbingan Raden Irwan, Hendry S dan Yoga D H atas kebersamaannya dalam menghadapi semua kendala penyelesaian skripsi ini;
5. Teman-teman seperjuangan PPSE Teknik Elektro UI angkatan 2009 atas kebersamaan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Semoga skripsi ini dapat memberikan banyak manfaat dan wawasan khususnya bagi penulis dan pembaca pada umumnya.

Depok, Januari 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Denna Maulana Achmad

NPM : 0906602540

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**ANALISA SISTEM WARD LEONARD PADA RANGKAIAN
MOTOR DAN GENERATOR DC DENGAN PENGENDALI PID**

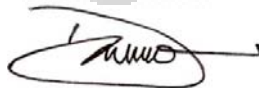
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti *Nonexclusive* ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 18 Januari 2012

Yang menyatakan,



Denna Maulana Achmad

ABSTRAK

Nama : Denna Maulana Achmad
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisa Sistem Ward Leonard Pada Rangkaian Motor dan Generator DC Dengan Pengendali PID

Dewasa ini perkembangan teknologi dan sistem kendali sangat pesat, dan peralatan elektronik telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari. Termasuk di dalamnya pemanfaatan putaran motor dan energi yang dihasilkan oleh generator. Pengembangan sistem kendali diharapkan dapat meningkatkan optimasi kinerja dari motor maupun generator. Ide awal dari sistem kendali motor Ward Leonard merupakan permulaan dari pemanfaatan putaran motor sebagai suatu bentuk pemanfaatan dan optimasi energi, dimana sebuah generator memanfaatkan putaran motor penggerak utama untuk menggerakkan motor yang lain. Diperlukan suatu sistem kendali yang mampu menjaga kestabilan sistem ini agar tujuan dari sistem dapat tercapai.

Kata kunci:
Pengendali, motor, generator, Ward Leonard.

ABSTRACT

*Name : Denna Maulana Achmad
Study Program : Electrical Engineering
Thesis title : Analysis Of The Ward Leonard Control Drive System On DC Motor and Generator Using PID*

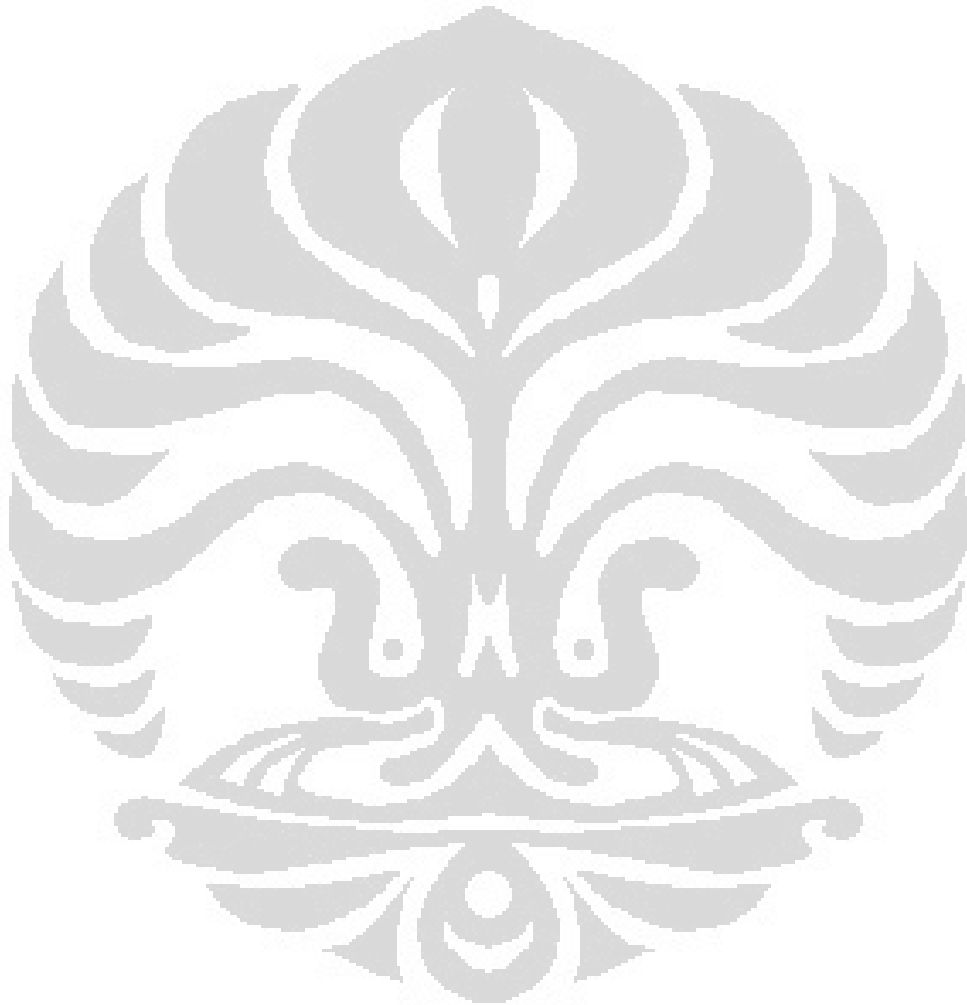
Nowadays technologies and control systems development is very fast, electronic devices already being part of daily life. For the examples, the usage of rotation from motor and energy which is generate by generator. Improvement control systems are ways to get optimization motor and generator. The idea of Ward Leonard control system previously are to get optimization of rotation motor to run generator which voltage generated, is used to run another motor. It is necessary to get stability of system so the target can be achieved.

Key words:
controller, motor, generator, Ward Leonard

DAFTAR ISI

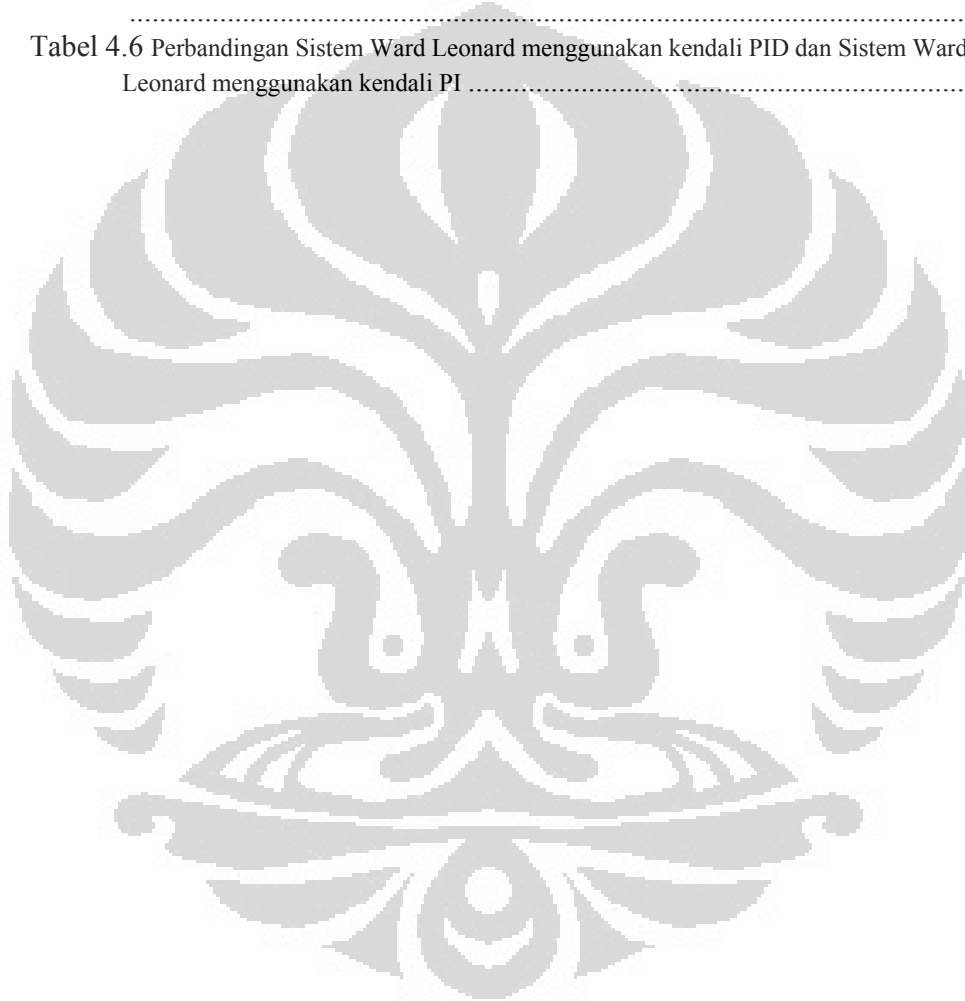
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
BAB 2	3
DASAR TEORI	3
2.1 Sistem Pengendali Motor Ward Leonard.....	3
2.2 Motor Dan Generator DC	4
2.2.1 Prinsip Kerja Motor dan Generator Arus Searah	4
2.2.2 Persamaan Ekuivalen Rangkaian dan Torsi Elektromagnetik	8
2.3 Pengendali PID[5]	10
2.3.1 Kendali Proporsional.....	11
2.3.2 Kendali Integral.....	11
2.3.3 Kendali Derivative.....	11
2.4 Spesifikasi Respon Transien.....	12
2.5 Pemodelan Sistem.....	14
BAB 3	15
PEMODELAN DAN PERANCANGAN KENDALI SISTEM WARD LEONARD.....	15
3.1 Diagram Alir Sistem Ward Leonard.....	15
3.2 Pemodelan Sistem Ward Leonard	16
3.2.1 Pemodelan Motor DC Permanen Magnet.....	17
3.2.2 Pemodelan Generator DC Penguatan Terpisah	19
3.2.3 Pemodelan Motor DC Penguatan Terpisah	22
3.2.4 Pemodelan Sistem Ward Leonard	24
3.3 Perancangan Pengendalian Sistem Ward Leonard	28
BAB 4	30
SIMULASI DAN ANALISA PADA PEMODELAN SISTEM WARD LEONARD.....	30
4.1 Simulasi Komponen Penyusun Sistem Ward Leonard.....	30
4.2 Simulasi Sistem Ward Leonard	36
4.2.1 Sistem Ward Leonard Tanpa Pengendali	37
4.2.2 Sistem Ward Leonard Dengan Pengendali	42
BAB 5	53

KESIMPULAN	53
DAFTAR REFERENSI	54



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter motor DC permanen magnet.....	30
Tabel 4.2 Parameter generator DC penguatan terpisah	32
Tabel 4.3 Parameter motor DC penguatan terpisah	34
Tabel 4.4 Perbandingan Sistem Ward Leonard tanpa dan menggunakan kendali PID	45
Tabel 4.5 Perbandingan Sistem Ward Leonard menggunakan kendali PID dengan beban variabel	49
Tabel 4.6 Perbandingan Sistem Ward Leonard menggunakan kendali PID dan Sistem Ward Leonard menggunakan kendali PI	50



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Kendali Kecepatan Ward Leonard Loop Tertutup pada rangkaian motor dan generator DC [1]	4
Gambar 2.2 Konduktor yang dilalui arus listrik [2]	5
Gambar 2.3 Kaidah tangan kiri Fleming [2]	5
Gambar 2.4 Prinsip kerja motor DC [3]	7
Gambar 2.5 Rangkaian ekivalen motor arus searah [4]	8
Gambar 2.6 kurva unit step yang menunjukkan $t_d, t_r, t_p, M_p,$ dan t_s [4]	13
Gambar 3.1 Ilustrasi diagram alir sistem Ward Leonard.	16
Gambar 3.2 blok diagram motor DC permanen magnet.[6]	19
Gambar 3.3 diagram generator DC penguatan terpisah.[6]	19
Gambar 3.4 Diagram Blok motor DC magnet permanen	20
Gambar 3.5 Blok Diagram Generator DC Penguatan Terpisah	22
Gambar 3.6 Diagram motor DC Penguatan Terpisah.[6]	22
Gambar 3.7 Blok diagram motor DC penguatan terpisah	23
Gambar 3.8 Rangkaian Ward Leonard [7]	24
Gambar 3.9 Diagram Blok arus pada <i>armature</i> motor penggerak utama	24
Gambar 3.10 Diagram blok kecepatan putar motor penggerak utama yang di-kopling dengan generator	25
Gambar 3.11 Diagram Blok Arus <i>armature</i> generator	25
Gambar 3.12 Diagram blok kecepatan putar motor DC penguatan terpisah	26
Gambar 3.13 Diagram blok sistem Ward Leonard	27
Gambar 3.14 Diagram sistem Ward Leonard tanpa pengendali	28
Gambar 3.15 Diagram blok Sistem Ward Leonard dengan kendali pada sub sistem motor penggerak utama, dengan perbaikan respon putaran generator	28
Gambar 3.16 Diagram Blok Sistem Ward Leonard Dengan kendali untuk sistem secara keseluruhan	29
Gambar 4.1 Letak Pole motor DC permanen magnet	31
Gambar 4.2 Kurva kecepatan motor DC permanen magnet (a) tanpa beban, (b) dengan pembebanan pada detik ke lima.	32
Gambar 4.3 Kurva tegangan keluaran generator pada kecepatan putar yang berbeda	33
Gambar 4.4 Letak Pole motor DC penguatan terpisah	35
Gambar 4.5 Kurva kecepatan motor DC penguatan terpisah (a) tanpa beban, (b) dengan pembebanan pada detik ke lima.	36
Gambar 4.6 Blok diagram sistem Ward Leonard tanpa pengendali	38
Gambar 4.7 Kurva karakteristik sistem Ward Leonard tanpa pengendali (a) arus pada motor penggerak utama, (b) kecepatan putar generator, (c) arus pada <i>armature</i> generator, (d) putaran pada motor beban.	40
Gambar 4.8 (a) arus pada motor penggerak utama, (b) kecepatan putar generator, (c) arus pada <i>armature</i> generator, (d) putaran pada motor dengan beban.	41
Gambar 4.9 (a) arus pada motor penggerak utama, (b) kecepatan putar generator, (c) arus pada <i>armature</i> generator, (d) putaran pada motor beban dengan pengendali PID pada motor penggerak utama.	43

Gambar 4.10 Blok diagram sistem Ward Leonard dengan kendali PID pada motor Penggerak Utama.....	44
Gambar 4.11 Sistem Ward Leonard dengan kendali PID untuk seluruh sistem, dengan parameter error didapat dari motor, (a) karakteristik kecepatan, (b) kurva karakteristik arus pada motor penggerak utama (c) karakteristik kecepatan motor beban, (d) karakteristik arus pada motor beban	47
Gambar 4.12 Blok diagram sistem ward Leonard pengendali PID dengan umpan balik kesalahan dari kecepatan putar motor beban	48
Gambar 4.13 Karakteristik (a) karakteristik kecepatan, (b) kurva karakteristik arus pada motor penggerak utama (c) karakteristik kecepatan motor beban, (d) karakteristik arus pada motor beban	52
Gambar 4.14 Perbandingan karakteristik kecepatan motor dengan (a) pengendali PI dan (b) PID pada motor beban	52



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini perkembangan teknologi dan sistem kendali sangat pesat, dan peralatan elektronik telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan sehari-hari. Termasuk di dalamnya pemanfaatan putaran motor dan energi yang dihasilkan oleh generator. Pengembangan sistem kendali diharapkan dapat meningkatkan optimasi kinerja dari motor maupun generator. Ide awal dari sistem kendali motor Ward Leonard merupakan permulaan dari pemanfaatan putaran motor sebagai suatu bentuk pemanfaatan dan optimasi energi, dimana sebuah generator memanfaatkan putaran motor penggerak utama untuk menggerakkan motor yang lain. Diperlukan suatu sistem kendali yang mampu menjaga kestabilan sistem ini agar tujuan dari sistem dapat tercapai.

Pada skripsi ini akan disampaikan gagasan perbaikan sistem kendali motor Ward Leonard, yang memanfaatkan putaran motor dengan cara meng-kopling sebuah generator dimana hasil tegangan yang dihasilkan dimanfaatkan untuk menggerakkan motor. Namun konsep awal dari sistem kendali motor Ward Leonard masih memiliki kekurangan. Melalui pengendalian sistem, diharapkan dapat dicapai optimasi untuk tegangan yang dibangkitkan oleh generator, maupun putaran motor (dengan sumber tegangan dari generator).

Dengan menggunakan program MATLAB, sistem fisik yang terdiri dari motor pengendali utama, generator dan motor yang dihubungkan dengan beban dibuat ke dalam bentuk model matematis untuk kemudian disimulasikan sehingga dapat diketahui respon tiap bagian pengendali dan diketahui pula perbaikan respon yang perlu dilakukan sebelum gagasan ini diterapkan secara nyata.

1.2 Permasalahan

Masalah yang diangkat pada skripsi ini adalah bagaimana cara membuat sistem kendali pada sistem Ward Leonard yang dapat mengatur generator sehingga memiliki tegangan keluaran yang diinginkan dan sistem kendali untuk mengatur kecepatan putar motor.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan skripsi ini adalah mengembangkan sistem kendali motor Ward Leonard. dengan analisa perhitungan menggunakan MATLAB, diharapkan diperoleh suatu kendali yang dapat memperbaiki respon dari sistem, sehingga dicapai suatu optimasi sistem, yakni sistem yang memiliki *overshoot* kecil, *settling time* yang cepat, dan nilai *steady state error* yang mendekati nol.

1.4 Batasan Masalah

Skripsi ini, dibatasi pada:

1. Sistem kendali Ward Leonard
2. Motor pengendali utama (*prime mover*) menggunakan motor DC Permanen Magnet
3. Generator Penguatan Terpisah
4. Motor DC Penguatan Terpisah
5. Simulasi dari pemodelan sistem menggunakan Simulink MATLAB.
6. Pembuatan benda secara nyata tidak dilakukan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini dibagi atas lima bab. Dengan pembagian bab sebagai berikut, bab satu berisi pendahuluan yang membahas tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab dua menjelaskan dasar teori sistem pengendali Ward Leonard, motor dan generator DC, pengendalian PID, dan pemodelan. Bab tiga berisi perancangan sistem kendali motor Ward Leonard. Bab empat merupakan simulasi pemodelan sistem Ward Leonard dimulai dengan simulasi motor DC permanen magnet, generator DC penguat terpisah dan motor DC penguatan terpisah secara terpisah dan analisa sistem Ward Leonard menggunakan rangkaian motor DC permanen magnet sebagai motor penggerak utama, generator DC penguatan terpisah dan motor DC penguatan terpisah untuk motor yang dihubungkan dengan beban. baik pada kondisi beban nol pada kondisi beban berubah. Bab lima merupakan kesimpulan dari keseluruhan skripsi ini.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Sistem Pengendali Motor Ward Leonard

Ward Leonard diambil dari nama penemu sistem ini, dimana sistem terdiri dari motor yang kecepatannya dikendalikan (dikenal sebagai motor kerja atau *work motor* atau motor yang dihubungkan dengan beban) dan satu set generator yang di-kopling dengan motor dalam satu kesatuan. Motor kerja biasanya memiliki eksitasi yang konstan dan tegangan *armature* diberikan oleh generator yang diputar oleh motor penggerak utama. [1]

Secara umum, susunan tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1, dengan keterangan gambar, DC motor 1 merupakan motor penggerak utama (Motor DC permanen magnet), generator, menggunakan generator DC penguatan terpisah, dan DC motor 2, merupakan motor yang dihubungkan ke beban, motor DC penguatan terpisah.

Motor DC magnet permanen menggerakkan generator DC penguatan terpisah, tegangan yang dibangkitkan digunakan untuk memutar motor DC pada kecepatan konstan, dan tegangan *armature* generator (V) kira-kira proporsional dengan fluks medan dari generator. Fluks, dalam putaran, bergantung pada kesalahan tegangan (ε) pada terminal penguat (*amplifier*),

$$V \sim \varepsilon \quad (2.1)$$

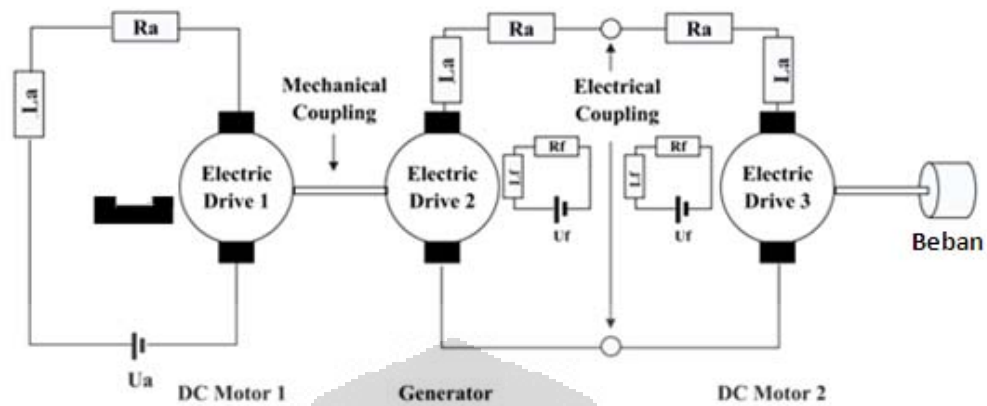
penguat dari motor kerja mempunyai nilai yang konstan, maka fluks motor kerja memiliki nilai yang konstan, dengan demikian

$$\omega \sim V \quad (2.2)$$

dengan mengkombinasikan 2.1 dan 2.2 maka

$$\omega \sim \varepsilon \quad (2.3)$$

dalam hal ini, *error-actuated* dan kecepatan poros motor kerja, proporsional terhadap kesalahan tegangan. [1]



Gambar 2.1 Sistem Kendali Kecepatan Ward Leonard Loop Tertutup pada rangkaian motor dan generator DC [1]

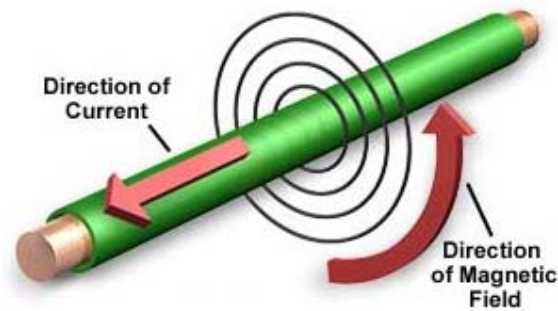
2.2 Motor Dan Generator DC

Motor DC atau motor arus searah banyak digunakan untuk aplikasi elektronik seperti: pemutar kaset, pemutar piringan magnetik di harddisk komputer, kipas pendingin komputer. Untuk keperluan-keperluan dengan daya besar, motor arus searah masih dipakai pada aplikasi tertentu seperti kereta listrik, motor penggerak pada elevator dan motor pada mesin yang digunakan pada tambang (batu bara).

2.2.1 Prinsip Kerja Motor dan Generator Arus Searah

Pada dasarnya, motor arus searah merupakan suatu transducer yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Proses konversi ini terjadi melalui medan magnet.

Ketika arus (I) melalui sebuah konduktor, akan dihasilkan garis-garis gaya magnet (fluks) B . Arah dari fluks bergantung pada arah arus yang mengalir atau dimana terjadi perbedaan potensial tegangan. Hubungan arah arus dan arah medan magnet ditunjukkan oleh Gambar 2.2, menggunakan kaidah tangan kanan dari gaya Lorentz.[2]



Gambar 2.2 Konduktor yang dilalui arus listrik [2]

Berdasarkan aturan tangan kiri Fleming, ditunjukkan oleh Gambar 2.3, ibu jari menunjukkan arah gerak, jari telunjuk menunjukkan arah medan, dan jari tengah menunjukkan arah arus. Jika sebuah kumparan yang dialiri arus listrik diletakkan di sekitar medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen, maka pada penghantar tersebut akan mengalami gaya. Prinsip inilah kemudian yang digunakan pada motor.



Gambar 2.3 Kaidah tangan kiri Fleming [2]

Secara matematis, gaya Lorentz dapat dituliskan dengan persamaan 2.4

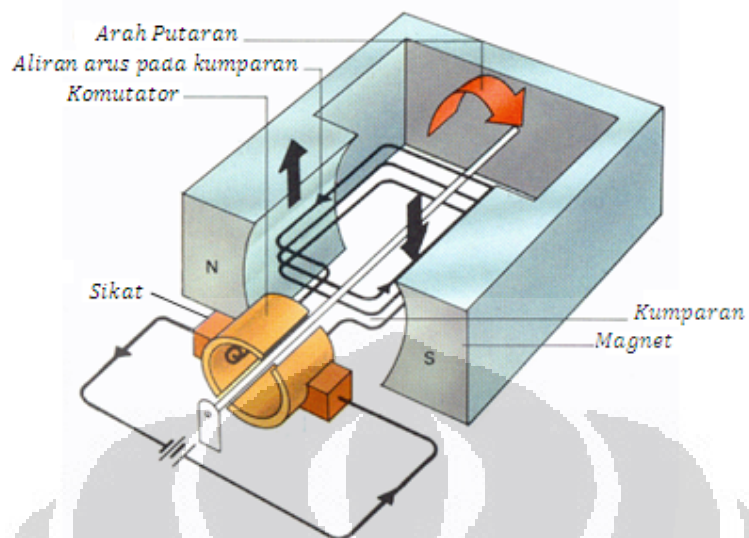
$$F = i \times B L \quad 2.4$$

dengan:

F = Gaya Lorentz	(Newton)
B = Kerapatan fluks	(Tesla)
i = Arus	(ampere)
L = Panjang konduktor kawat	(meter)

Pada motor arus searah, fenomena ini digunakan sebagai dasar penggerak motor. Ketika kawat konduktor dialiri arus, konduktor akan bergerak didalam kumparan medan magnet dan menimbulkan gaya gerak listrik yang merupakan reaksi lawan terhadap tegangan sumber. Agar proses perubahan energi mekanik tersebut dapat berlangsung secara sempurna, maka tegangan sumber harus lebih besar dari pada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Dengan memberi arus pada kumparan jangkar yang dilindungi oleh medan maka menimbulkan perputaran pada motor. Sehingga terjadilah gaya yang akan memutar jangkar/*armature* motor.

Gerak atau putaran yang dihasilkan oleh motor arus searah diperoleh dari interaksi dua buah medan yang dihasilkan oleh bagian **jangkar** (*armature*) dan bagian **medan** (*field*) dari motor arus searah. Pada Gambar 2.4, bagian medan berbentuk suatu kumparan yang terhubung ke sumber arus searah. Sedangkan bagian jangkar ditunjukkan sebagai magnet permanen (U-S), bagian jangkar ini tidak harus berbentuk magnet permanen, bisa juga berbentuk belitan yang akan menjadi elektro-magnet apabila mendapatkan sumber arus searah. Sehingga apabila motor arus searah berjenis jangkar belitan, maka kita harus menyediakan dua sumber arus searah, satu untuk bagian jangkar, satu lagi untuk bagian medan. Bagian lain yang tidak kalah penting pada motor arus searah adalah adanya **komutator** (*comutator*) yang berpasangan dengan cincin belah (*slip rings*). Pasangan ini menjadikannya suatu konverter mekanik yang membuat arus dari sumber mengalir pada arah yang tetap walaupun belitan medan berputar.



Gambar 2.4 Prinsip kerja motor DC [3]

Perputaran kawat konduktor tadi akan menimbulkan sebuah gaya gerak listrik (GGL) yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran dan sebanding terhadap kecepatan putaran (ω_m) pada motor dan flux per kutub (Φ_d). GGL atau biasa disebut tegangan induksi e bernilai negatif, karena polaritasnya selalu berlawanan dengan tegangan sumber (v). [4]

Persamaan tegangan induksi:

$$e_a = \frac{PZ}{2\pi} \Phi_d \omega_m \quad (2.5)$$

dengan :

e_a = Tegangan induksi (GGL)

P = Jumlah kutub

Z = Jumlah konduktor

ω_m = Kecepatan putar perdetik (rad/s)

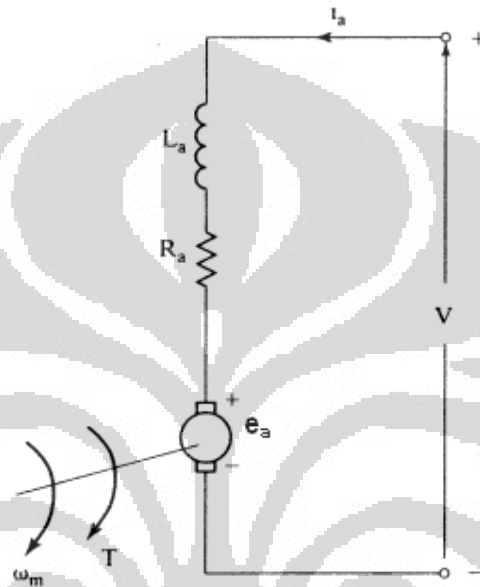
Φ_d = Medan fluks (Weber)

Jumlah konduktor (Z), jumlah kutub (P), dan 2π bernilai konstan, maka bisa diasumsikan sebagai konstanta armatur (K_a), sehingga persamaan tegangan induksinya (e_a) menjadi:

$$e_a = K_a \Phi_d \omega_m \quad (2.6)$$

2.2.2 Persamaan Ekuivalen Rangkaian dan Torsi Elektromagnetik

Pada dasarnya rangkaian ekuivalen motor arus searah berdasarkan resistansi armature (R_a), induktansi dalam (L_a), tegangan induksi (e_a). Pada motor, input yang berupa energi listrik akan terkonversi menjadi energi mekanik dalam bentuk torsi (T) dan kecepatan putar (ω_m).



Gambar 2.5 Rangkaian ekuivalen motor arus searah [4]

$$v = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.7)$$

dengan :

- v = Tegangan sumber (Volt)
- e_a = Tegangan induksi (Volt)
- R_a = Resistansi armatur (Ohm)
- i_a = Arus armatur (Ampere)
- L_a = Induktansi dalam armature (Henry)

Dalam keadaan *steady state*, arus armature bersifat konstan dan rasio perubahan arus armatur adalah nol, sehingga persamaan tegangan armatur (v) menjadi:

$$v = e_a + R_a i_a \quad (2.8)$$

Untuk mengetahui daya yang diambil motor, persamaan tegangan armatur (v) 2.5 dikalikan dengan arus armatur (i_a) :

$$v i_a = e_a i_a + R_a i_a^2 \quad (2.9)$$

dengan :

$$v i_a = \text{Daya sumber atau } P_a \quad (\text{Watt})$$

$$e_a i_a = \text{Daya efektif atau } P_e \quad (\text{Watt})$$

$$R_a i_a^2 = \text{copper losses} \quad (\text{Watt})$$

Daya efektif (P_e) adalah daya yang dikonversikan menjadi daya mekanik (P_m) pada motor. Dengan mengasumsikan rugi-rugi gesekan dan angin tidak ada atau nol. Daya mekanik (P_m) terjadi dalam bentuk torsi elektromagnetik dan kecepatan.

$$P_m = T \omega_m \quad (2.10)$$

Daya efektif (P_e) yang sebanding dengan daya mekanik (P_m). bisa didapatkan hubungan torsi (T) terhadap tegangan armatur (v).

$$e_a i_a = T \omega_m \quad (2.11)$$

persamaan 2.6 disubstitusikan dengan persamaan 2.11, maka didapat;

$$K_a \Phi_d i_a = T \quad (2.12)$$

Jika fluks (Φ_d) bernilai konstan, maka konstanta armatur (K_a) dan fluks (Φ_d), menjadi konstanta baru atau konstanta magnetik (K_m). dan persamaan torsi (T) 2.12 dan persamaan tegangan induksi (e_a) 2.6 menjadi :

$$T = K_m i_a \quad (2.13)$$

$$e_a = K_m \omega_m \quad (2.14)$$

Sewaktu periode konduksi arus armatur, energi listrik mengalir pada rangkaian armature, interaksi dari arus dan medan fluks menghasilkan torsi elektromagnetik (T) bersifat positif, sedangkan jika ada pembebanan, disebut torsi beban (T_L). Motor yang mendapat suplai beban energi sewaktu periode perputaran memiliki energi kinetik.

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.15)$$

Induksi armatur yang bertindak sebagai reservoir dari energi listrik sewaktu periode konduksi. Armatur dan beban inersia (J) bertindak sebagai reservoir dari energi mekanis sewaktu periode perputaran motor.

Ketika perputaran celah udara (*air-gap*) torsi bernilai nol, persamaan diferensial yang menggambarkan kecepatan motor, sebagai berikut;

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m = 0 \quad (2.16)$$

dimana diasumsikan beban torsi sebanding dengan kecepatan. Kecepatan motor dalam hal kecepatan awal (ω_{m0}) menjadi:

$$\omega_m = \omega_{m0} e^{-t/\tau_L} \quad (2.17)$$

Dan konstanta waktu mekanis (τ_L) motor:

$$\tau_L = \frac{J}{B} \quad (2.18)$$

2.3 Pengendali PID[5]

Sebuah pengendali membandingkan nilai yang terbaca atau PV (*process variable*) dari keluaran *plant* dengan nilai referensi atau SP (*setpoint*), deviasi nilai ini disebut *error*. Sinyal yang dihasilkan pengendali berguna untuk mengurangi deviasi ke nol (*zero*) atau menghasilkan nilai deviasi (*error*) yang kecil.

$$e(t) = SP - PV \quad (2.19)$$

nilai error $e(t)$ ini, disubstitusikan pada persamaan pengendali $u(t)$,

$$u(t) = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (2.20)$$

$$u(t) = \left(K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e dt + K_p T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (2.21)$$

$$u(t) = \left(K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \right) \quad (2.22)$$

dengan:

$e(t)$:	Error
SP	:	Set point
PV	:	Process Variable
$u(t)$:	Keluaran pengendali
K_p	:	Penguat atau gain
K_d	:	Konstanta derivative ($K_p \cdot T_d$)
K_i	:	Konstanta integrator ($K_p \cdot T_i$)
T_i	:	waktu integral atau <i>reset time</i>
T_d	:	waktu derivative atau <i>rate time</i>

2.3.1 Kendali Proporsional

Untuk pengendali dengan aksi kendali proporsional, hubungan antara keluaran dari pengendali $u(t)$ dan aktuasi sinyal error $e(t)$ adalah:

$$u_P(t) = K_p e(t) \quad (2.23)$$

Atau dalam bentuk transformasi Laplace,

$$\frac{U_P(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.24)$$

Dengan K_p adalah proporsional gain. Apapun mekanisme aktual yang mungkin terjadi dan apapun bentuk pengoperasian daya, pengendali proporsional secara esensial adalah amplifier dengan penguat yang disesuaikan.

2.3.2 Kendali Integral

Didalam sebuah pengendali dengan aksi kendali integral, nilai dari keluaran pengendali $u(t)$ berubah dalam rasio proporsional terhadap aktuasi sinyal error $e(t)$, oleh karena itu,

$$\frac{du_I(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2.25a)$$

atau,

$$u_I(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.26b)$$

Dengan K_i adalah konstanta yang disesuaikan. Fungsi alih dari pengendali integral adalah

$$\frac{U_I(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.27)$$

Jika sinyal error $e(t)$ adalah nol, maka nilai keluaran pengendali $u(t)$ tidak berubah (*stationary*)

2.3.3 Kendali Derivative

Ketika kendali derivative ditambahkan pada kendali proporsional, akan dihasilkan sebuah pengendali yang sangat sensitive. Keuntungan dari penggunaan kendali derivative adalah merespon terhadap perubahan aktuasi error dan dapat menghasilkan pengoreksian yang signifikan sebelum magnitude dari aktuasi error menjadi terlalu besar.

$$u_D(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (2.28)$$

Dalam transformasi Laplace,

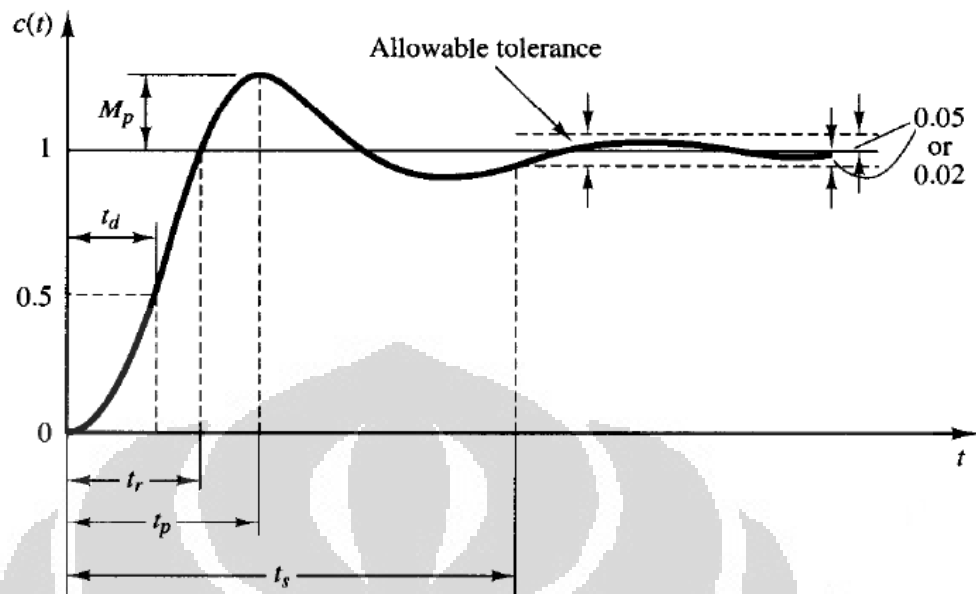
$$\frac{U_D(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.29)$$

Kendali derivative mengantisipasi aktuasi error, aksi koreksi inisiasi awal, dan menjaga kestabilan sistem.

2.4 Spesifikasi Respon Transien

Dalam banyak kasus, tampilan dari karakteristik sistem kendali dispesifikasikan pada domain waktu. Sistem dengan penyimpanan energi (*energy storage*) tidak bisa merespon secara instan dan akan menampilkan respon transien kapanpun disubyeksikan terhadap input atau *disturbance*. Sering kali, karakteristik tampilan dari sistem kendali yang dispesifikasikan dalam transien respon terhadap input unit step, karena mudah untuk ditampilkan dan cukup drastis, jika respon terhadap input step diketahui, maka secara matematis dimungkinkan untuk menghitung respon terhadap berbagai input.

Pada sistem kendali respon transien, seringkali sistem mengalami osilasi teredam (*damped*) sebelum keadaan *steady-state* tercapai. Dalam karakteristik respon transien sistem kendali terhadap input unit step, terdapat beberapa spesifikasi, berikut adalah Gambar kurva respon dan penjelasannya:



Gambar 2.6 kurva unit step yang menunjukkan t_d , t_r , t_p , M_p , dan t_s [4]

- Delay time, t_d
Delay time adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai setengah dari nilai akhir (*final value*) pada saat pertama kali
- Rise time, t_r
Rise time adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk naik dari 10% ke 90%, 5% ke 95%, atau 0% ke 100% dari nilai akhir.
- Peak time, t_p
Peak time adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak pertama overshoot
- Maximum overshoot, M_p
Maximum overshoot adalah nilai puncak overshoot maksimum kurva respon dalam bentuk persen
- Settling time, t_s Settling time adalah waktu yang dibutuhkan kurva respon untuk mencapai nilai akhir dan memiliki range tetap terhadap nilai akhir, biasanya 2% atau 5%.

2.5 Pemodelan Sistem

Dalam penelaahan suatu sistem kendali, dapat dilakukan dengan cara membuat model sistem dinamika dan menganalisa karakteristik dinamika. Model matematika dari sistem didefinisikan sebagai sejumlah persamaan yang menggambarkan dinamika dari sistem secara tepat, atau paling tidak, cukup baik.[5]

Dinamika sistem mungkin dijelaskan dalam bentuk persamaan diferensial. Persamaan diferensial dapat diperoleh menggunakan hukum fisika yang mengendalikan hukum tertentu. Menurunkan model matematika yang layak adalah bagian yang paling penting dalam analisa. Sangat mungkin untuk memperbaiki ketepatan model analisa dilakukan dengan meningkatkan kerumitannya. Tapi dalam hal mendapatkan model matematika, perlu kompromi antara kesederhanaan model dengan ketepatan analisa. Jika ketepatan ekstrim tidak diperlukan, maka cukup digunakan model yang sederhana. Namun perlu diperhatikan bahwa hasil yang diperoleh dari analisa hanya berlaku untuk model yang mendekati sistem dinamika yang diberikan.

Pada penyidikan percobaan sistem dinamika, jika sebab dan akibat adalah sebanding, maka sistem dapat dianggap sebagai linear. Sedangkan sistem dinyatakan tidak linear jika tanggapan terhadap dua masukan tidak dapat dihitung dengan mengukur satu masukan pada suatu waktu tertentu dan menambahkan hasilnya.

Prosedur untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan sistem nonlinear umumnya sangat rumit. Karena kesulitan matematika yang ada pada sistem non linear, perlu dibuat sistem linear yang ekivalen yang berlaku untuk jangka waktu yang terbatas.[5]

BAB 3

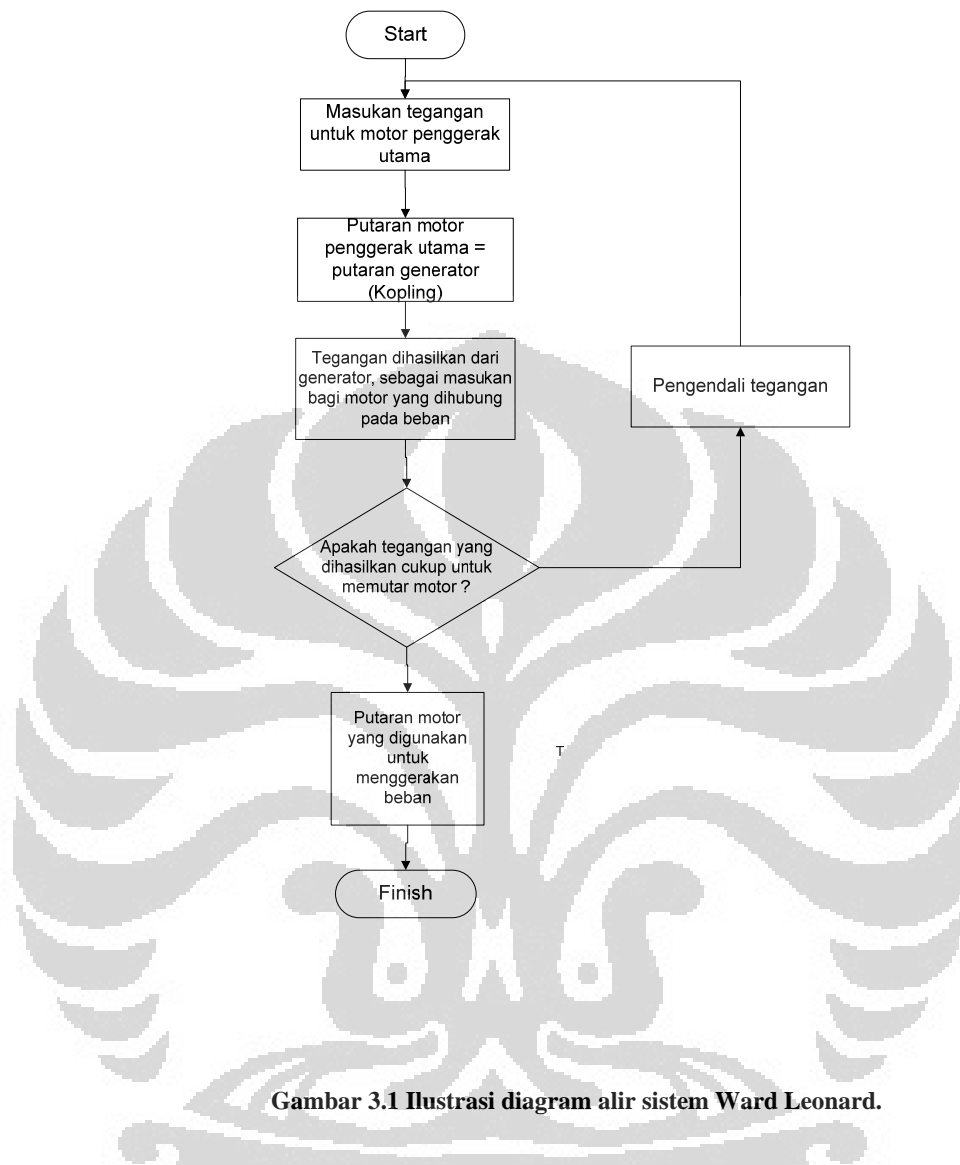
PEMODELAN DAN PERANCANGAN KENDALI SISTEM WARD LEONARD

3.1 Diagram Alir Sistem Ward Leonard

Sebagaimana telah disampaikan pada sub bab 2.1 sistem Ward Leonard terdiri dari motor yang kecepatannya dikendalikan (motor yang dihubungkan dengan beban) dan satu set generator yang di-kopling dengan motor dalam satu kesatuan. Motor kerja biasanya memiliki eksitasi yang konstan dan tegangan *armature* diberikan oleh generator yang diputar oleh motor penggerak utama

Sistem Ward Leonard dengan motor penggerak utama berupa motor DC permanen magnet diberikan tegangan, tegangan ini memutar motor, motor penggerak utama ini di-kopling dengan generator DC penguatan terpisah. Putaran pada generator membangkitkan tegangan pada generator. Tegangan yang dibangkitkan oleh generator digunakan untuk memutar motor yang dihubungkan ke beban.

Umpan balik dari sistem Ward Leonard adalah, putaran pada motor yang dihubungkan pada beban, jika putaran pada motor yang menggerakkan beban belum sesuai dengan putaran yang diharapkan, maka masukan motor penggerak utama perlu ditambah, hingga didapat putaran yang diharapkan, selama karakteristik motor memungkinkan hal ini terjadi, atau dengan kata lain, sistem ini terbatas pada kemampuan fisik dari pendukung sistem yang digunakan. Hasil keluaran dari sistem ini adalah putaran motor yang digunakan untuk menggerakkan beban, diagram alir dari sistem Ward Leonard ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Ilustrasi diagram alir sistem Ward Leonard.

3.2 Pemodelan Sistem Ward Leonard

Pada rangkaian Ward Leonard yang diamati, digunakan motor penggerak utama berupa motor DC dengan magnet permanen, Generator DC dengan penguatan terpisah dan Motor DC dengan penguatan terpisah. Motor DC dengan magnet permanen menggerakkan generator. Tegangan induksi yang dihasilkan oleh generator DC penguatan terpisah digunakan sebagai masukan bagi lilitan jangkar untuk motor DC.

3.2.1 Pemodelan Motor DC Permanen Magnet

Dari ilustrasi Rangkaian Ward Leonard, penggerak utama yang digunakan adalah motor DC permanen magnet. Jika lilitan armature dari motor DC dihubungkan dengan sumber tegangan (U_{apm}), maka melalui analisa elektrik, dapat dikatakan bahwa lilitan *armature* memiliki hambatan (R_{apm}) dan Induktansi (L_{apm}) akan dialiri arus (i_{apm}) juga akan dihasilkan tegangan induksi (E_{apm}). Dalam loop tertutup, berdasarkan hukum Kirchhoff tegangan, dapat dituliskan persamaan sebagai berikut;

$$U_{apm} - UR_{apm} - UL_{apm} - E_{apm} = 0 \quad (3.1)$$

dengan UR_{apm} , merupakan tegangan pada hambatan armature dan UL_{apm} tegangan pada induktor *armature*, yang dipengaruhi oleh arus i_{apm} . Persamaan (3.1) dapat dituliskan kembali menjadi;

$$U_{apm} - R_{apm}i_{apm} - L_{apm} \frac{di_{apm}}{dt} - E_{apm} = 0 \quad (3.2)$$

$$U_{apm} = R_{apm}i_{apm} + L_{apm} \frac{di_{apm}}{dt} + E_{apm} \quad (3.3)$$

E_{apm} adalah tegangan induksi hasil reaksi pada armature besarnya dapat dirumuskan sebagai;

$$E_{apm} = k_{apm}\omega_{rpm} \quad (3.4)$$

dengan k_{apm} merupakan konstanta yang dihasilkan dari fluks magnet permanent dan dipengaruhi juga oleh reluktansi penghantar pada armature, jumlah lilitan armature. Dan ω_{rpm} adalah kecepatan putar armature. Dengan mensubstitusikan persamaan 3.4 ke persamaan 3.3, maka didapat;

$$U_{apm} = R_{apm}i_{apm} + L_{apm} \frac{di_{apm}}{dt} + k_{apm}\omega_{rpm} \quad (3.5)$$

$$R_{apm}i_{apm} + L_{apm} \frac{di_{apm}}{dt} = U_{apm} - k_{apm}\omega_{rpm} \quad (3.6)$$

$$i_{apm} = \frac{U_{apm} - k_{apm}\omega_{rpm}}{(R_{apm} + L_{apm} \frac{d}{dt})} \quad (3.7)$$

Dengan menggunakan transformasi laplace, persamaan 3.7 dapat dituliskan kembali menjadi;

$$I_{apm}(s) = \frac{U_{apm} - k_{apm}\omega_{rpm}(s)}{(R_{apm} + L_{apm}s)} \quad (3.8)$$

Persamaan 3.1 sampai persamaan 3.8 merupakan analisa motor DC permanen magnet dari karakteristik elektrik. [6] Untuk mengamati karakteristik mekanik

dari motor DC permanen magnet, dengan menggunakan prinsip hukum D'alembert, jumlah total torsi pada motor harus sama dengan nol;

$$T_e - T_{\dot{\omega}} - T_{\omega} - T_{Load} = 0 \quad (3.9)$$

dengan T_e , adalah Torsi elektromagnetik, besar dari torsi elektromagnetik sebanding dengan perubahan arus yang mengalir pada gulungan *armature*, sehingga dapat dituliskan sebagai;

$$T_e = K_E i_{apm} \quad (3.10)$$

dengan K_E adalah konstanta torsi elektromagnetik, sama halnya dengan k_{apm} , yang dipengaruhi oleh fluks magnet permanent dan dipengaruhi juga oleh reluktansi penghantar pada armature, dan jumlah lilitan armature. $T_{\dot{\omega}}$ adalah torsi yang ditimbulkan akibat adanya percepatan pada putaran rotor;

$$T_{\dot{\omega}} = J \frac{d\omega_{rpm}}{dt} \quad (3.11)$$

J adalah inersia rotor. T_{ω} torsi yang dihasilkan akibat adanya putaran rotor,

$$T_{\omega} = B\omega_{rpm} \quad (3.12)$$

dan T_{Load} adalah torsi yang ditimbulkan akibat adanya beban mekanik.

Dengan diketahuinya persamaan 3.11 dan 3.12, maka persamaan 8, dapat dituliskan kembali sebagai;

$$K_E i_a - T_{Load} = J \frac{d\omega_{rpm}}{dt} + B\omega_{rpm} \quad (3.13)$$

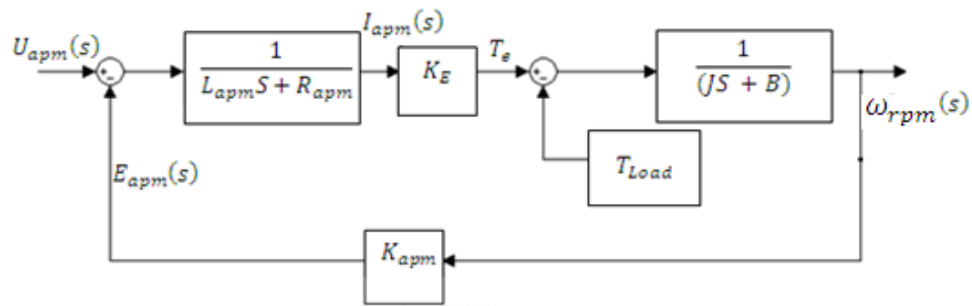
yang ekuivalen dengan,

$$\omega_{rpm} = \frac{K_E i_a - T_{Load}}{(J \frac{d}{dt} + B)} \quad (3.14)$$

persamaan 3.14 dengan transformasi Laplace, dapat dituliskan kembali dengan;

$$\omega_{rpm}(s) = \frac{K_E i_a - T_{Load}(s)}{(Js + B)} \quad (3.15)$$

dari persamaan 3.8 dan 3.15, diagram blok



Gambar 3.2 blok diagram motor DC permanen magnet.[6]

Dari Gambar 3.2 dapat dituliskan kembali;

$$\left((U_{apm} - E_{apm}) \frac{K_E}{L_{apm}S + R_{apm}} - T_{Load} \right) \frac{1}{(JS+B)} = \omega_{rpm} \quad (3.16)$$

Jika T_{Load} diabaikan, maka persamaan 3.16 menjadi;

$$(U_{apm} - \omega_{rpm} K_E) \frac{K_E}{L_{apm}S + R_{apm}} \frac{1}{(JS+B)} = \omega_{rpm} \quad (3.17)$$

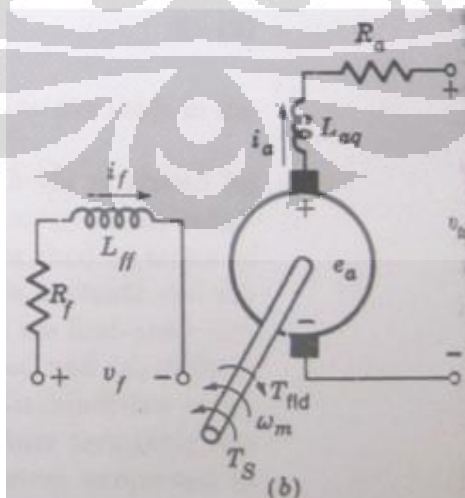
$$\left(U_{apm} \frac{K_E}{L_{apm}S + R_{apm}} - \omega_{rpm} \frac{K_E^2}{L_{apm}S + R_{apm}} \right) = (JS+B)\omega_{rpm} \quad (3.18)$$

$$\left(U_{apm} \frac{K_E}{L_{apm}S + R_{apm}} \right) = \omega_{rpm} \left(\frac{(L_{apm}S + R_{apm})(JS+B) + K_E^2}{L_{apm}S + R_{apm}} \right) \quad (3.19)$$

Atau dalam bentuk yang lebih sederhana, fungsi alih dari Gambar 3.2 dapat dituliskan sebagai;

$$\frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} = \frac{K_E}{(JS+B)(L_{apm}S + R_{apm}) + K_E^2} \quad (3.20)$$

3.2.2 Pemodelan Generator DC Penguatan Terpisah



Gambar 3.3 diagram generator DC penguatan terpisah.[6]

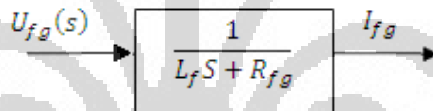
Generator yang dipilih selanjutnya adalah Generator penguat terpisah, mengacu pada Gambar ilustrasi rangkaian Ward Leonard, generator DC penguatan terpisah diberikan masukan berupa putaran dari motor DC permanen magnet (ω_{rpm}). Putaran yang dihasilkan oleh motor DC permanen ini mengakibatkan timbulnya reaksi di armature Generator, medan elektromagnetik generator (E_{ag}) dibangkitkan. Besarnya E_{ag} dipengaruhi oleh putaran motor DC permanen magnet (ω_{rpm}), induktansi gandeng medan (*field*) dan armature generator (L_{afg}) dan arus medan generator (i_{fg}). Atau secara matematis dapat dituliskan sebagai;

$$E_{ag} = L_{afg} i_{fg} \omega_{rpm} \quad (3.21)$$

$$i_{fg} = \frac{E_{ag}}{L_{afg} \omega_{rpm}} \quad (3.22)$$

$$U_{fg} = R_{fg} i_{fg} + L_{fg} \frac{di_{fg}}{dt} \quad (3.23)$$

Diagram blok untuk U_{fg} adalah;



Gambar 3.4 Diagram Blok motor DC magnet permanen

jika $L_{afg} i_{fg}$ dibuat konstan, maka persamaan (3.21) dapat ditulis menjadi;

$$E_{ag} = K_{EG} \omega_{rpm} \quad (3.24)$$

Tegangan keluaran generator (U_{ag}) merupakan hasil dari tegangan E_{ag} yang dipengaruhi oleh rugi-rugi dari belitan armature generator;

$$U_{ag} = E_{ag} - R_{ag} i_{ag} - L_{ag} \frac{di_{ag}}{dt} \quad (3.25)$$

$$U_{ag} = K_{EG} \omega_{rpm} - R_{ag} i_{ag} - L_{ag} \frac{di_{ag}}{dt} \quad (3.26)$$

$$(L_{ag} \frac{d}{dt} + R_{ag}) i_{ag} = K_{EG} \omega_{rpm} - U_{ag} \quad (3.27)$$

dengan menggunakan transformasi Laplace, persamaan (3.27) menjadi;

$$I_{ag} = \frac{K_{EG} \omega_{rpm} - U_{ag}(s)}{(L_{ag} s + R_{ag})} \quad (3.28)$$

untuk analisa sistem generator dari sisi mekanik,

$$T_S = T_{\dot{\omega}_g} + T_{\omega_g} + T_{eg} \quad (3.29)$$

dengan T_{eg} , merupakan Torsi elektromagnetik generator, besar dari torsi elektromagnetik sebanding dengan perubahan arus yang mengalir pada gulungan armature dan perubahan arus pada medan generator, sehingga dapat dituliskan sebagai;

$$T_{eg} = K_{Eg} i_{fg} i_{ag} \quad (3.30)$$

dengan K_{Eg} adalah konstanta torsi elektromagnetik, sedikit berbeda dengan K_E pada motor DC permanen magnet, pada generator DC penguatan terpisah, besar K_{Eg} dipengaruhi oleh fluks yang dihasilkan oleh lilitan armature dan medan generator dan dipengaruhi juga oleh reluktansi penghantar pada armature, dan jumlah lilitan armature. $T_{\dot{\omega}_g}$ adalah torsi yang ditimbulkan akibat adanya percepatan pada putaran rotor generator, namun, jika i_{fg} yang diberikan pada rangkaian adalah konstan, maka persamaan 3.30 dapat dituliskan kembali sebagai;

$$T_{eg} = K_{Eg} i_{ag} \quad (3.31)$$

$$T_{\dot{\omega}_g} = J_g \frac{d\omega_{rpm}}{dt} \quad (3.32)$$

J_g adalah inersia rotor. T_{ω_g} torsi yang dihasilkan akibat adanya putaran rotor,

$$T_{\omega_g} = B_g \omega_{rpm} \quad (3.33)$$

B_g adalah redaman *viscous* generator. Dari persamaan 3.31, 3.32 dan 3.33, persamaan 3.29 dapat dituliskan kembali menjadi;

$$T_S = J_g \frac{d\omega_{rpm}}{dt} + B_g \omega_{rpm} + K_{Eg} i_{ag} \quad (3.34)$$

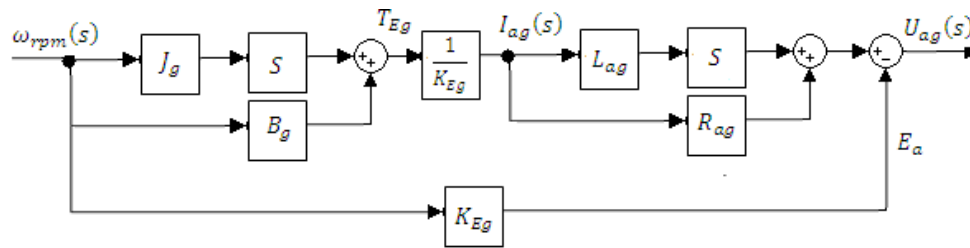
$$(J_g \frac{d}{dt} + B_g) \omega_{rpm} = T_S - K_{Eg} i_{ag} \quad (3.35)$$

dengan menggunakan transformasi Laplace, persamaan 3.35 menjadi;

$$(J_g S + B_g) \omega_{rpm} = T_S(s) - K_{Eg} I_{ag} \quad (3.36)$$

$$\omega_{rpm}(s) = \frac{T_S - K_{Eg} I_{ag}(s)}{(J_g S + B_g)} \quad (3.37)$$

maka diagram blok dari generator DC dengan penguatan terpisah adalah;



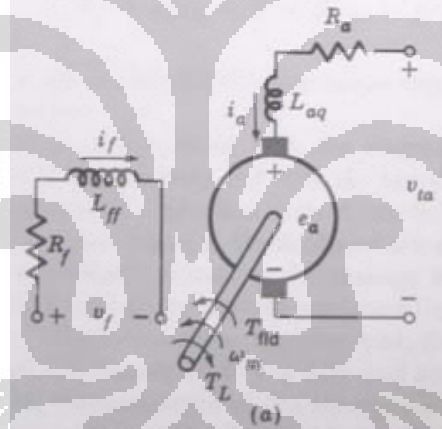
Gambar 3.5 Blok Diagram Generator DC Penguatan Terpisah

Dari Gambar 3.5 dapat dituliskan kembali fungsi alih dari model motor DC permanen magnet adalah;

$$\frac{U_{ag}}{\omega_{rpm}} = E_{ag} - \frac{(J_g s + B_g)(L_{ag} s + R_{ag})}{K_{Eg}} \quad (3.38)$$

3.2.3 Pemodelan Motor DC Penguatan Terpisah

Untuk Motor DC penguatan terpisah,



Gambar 3.6 Diagram motor DC Penguatan Terpisah.[6]

Hampir sama dengan motor DC permanen magnet,

$$T_m = K_{fm} i_{fm} i_{am} \quad (3.39)$$

$$E_{am} = k_{fm} i_{fm} \omega_m \quad (3.40)$$

Jika i_{fm} dibuat konstan, maka persamaan (3.39) dan (3.40) dapat dirubah menjadi;

$$T_m = K_m i_{am} \quad (3.41)$$

$$E_{am} = K_m \omega_m \quad (3.42)$$

Dengan K_m merupakan konstanta pengganti $K_{fm} i_{fm}$. Tegangan masukan motor,

$$U_{am} = R_{am} i_{am} + L_{am} \frac{di_{am}}{dt} + E_{am} \quad (3.43)$$

substitusi persamaan 3.42 ke persamaan 3.42;

$$U_{am} = R_{am}i_{am} + L_{am} \frac{di_{am}}{dt} + K_m \omega_m \quad (3.44)$$

Transformasi Laplace untuk persamaan 3.44 adalah;

$$U_{am}(s) = R_{am}I_{am} + L_{am}SI_{am} + K_m\omega_m \quad (3.45)$$

$$R_{am}I_{am} + L_{am}SI_{am} = U_{am}(s) - K_m\omega_m \quad (3.46)$$

$$I_{am} = \frac{U_{am}(s) - K_m\omega_m}{(R_{am} + L_{am}S)} \quad (3.47)$$

Persamaan dinamik dari sistem mekanik motor DC dengan penguatan terpisah dari persamaan (3.41) adalah;

$$T_m = K_m i_{am} = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_{Lm} \quad (3.48)$$

T_{Lm} adalah Torsi beban untuk motor DC, B_m adalah *viscous damping* dari rotor, dan J_m adalah inersia rotor.

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m = K_m i_{am} - T_{Lm} \quad (3.49)$$

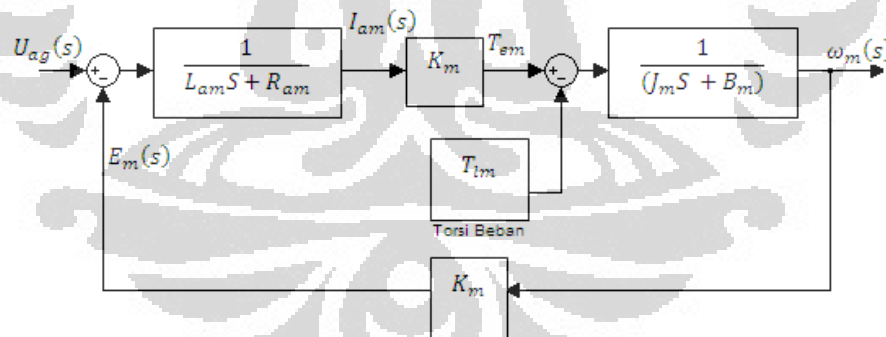
$$(J_m \frac{d}{dt} + B_m) \omega_m = K_m i_{am} - T_{Lm} \quad (3.50)$$

Transformasi Laplace untuk persamaan 3.50 adalah;

$$(J_m s + B_m) \omega_m(s) = K_m i_{am}(s) - T_{Lm}(s) \quad (3.51)$$

$$\omega_m(s) = \frac{K_m i_{am}(s) - T_{Lm}(s)}{(J_m s + B_m)} \quad (3.52)$$

Dari persamaan 3.52 dan 3.47 dapat digambarkan blok diagram;



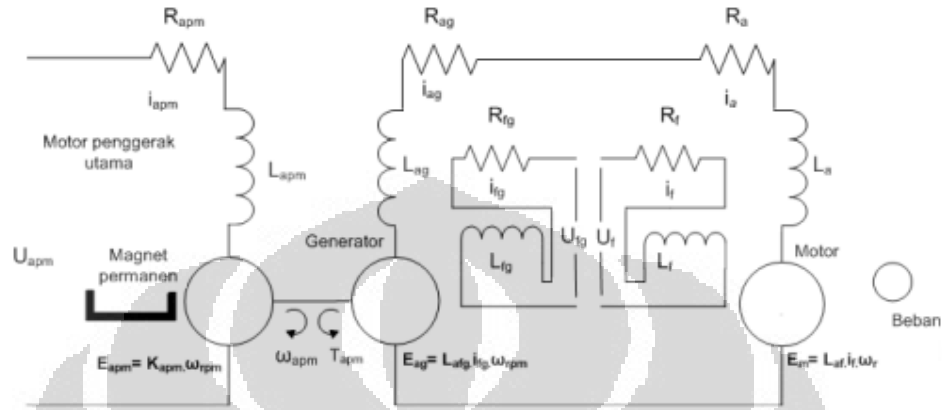
Gambar 3.7 Blok diagram motor DC penguatan terpisah

Dari Gambar 3.7, fungsi alih untuk motor DC Penguatan terpisah, dapat dituliskan kembali sebagai;

$$\frac{\omega_m}{U_{am}} = \frac{K_m}{(J_m S + B_m)(L_{am} S + R_{am}) + K_m^2} \quad (3.53)$$

3.2.4 Pemodelan Sistem Ward Leonard

Dari Gambar 3.2, jika rangkaian Ward Leonard dengan rangkaian motor DC dan generator DC, jika digambarkan ulang;

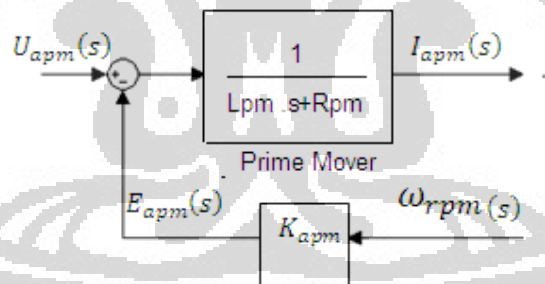


Gambar 3.8 Rangkaian Ward Leonard [7]

Arus *armature* dari motor penggerak utama sama dengan persamaan 3.8 yakni;

$$I_{apm}(s) = \frac{U_{apm} - k_{apm} \omega_{rpm}(s)}{(R_{apm} + L_{apm}s)} \quad (3.8)$$

Diagram blok untuk persamaan 21;



Gambar 3.9 Diagram Blok arus pada *armature* motor penggerak utama

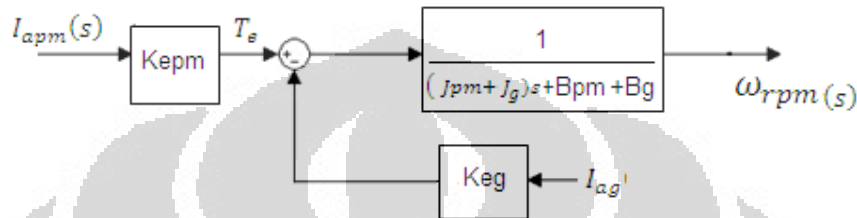
Berikutnya kecepatan motor penggerak utama, dari persamaan 3.15, karena dilakukan kopel antara motor permanen magnet sebagai motor penggerak utama dan generator penguat terpisah, maka Inersia dan *viscous damping* dari generator akan berpengaruh terhadap kecepatan putar motor atau dapat dituliskan kembali sebagai;

$$\omega_{rpm}(s) = \frac{K_{epm} i_a - T_{Load}(s)}{(J_{pm} + J_g)s + (B + B_g)} \quad (3.54)$$

dan torsi beban, T_{Load} , karena arus pada field generator, (I_{fg}) dibuat konstan, maka akan proporsional dengan nilai arus armature generator, I_{ag} , dan konstanta generator (K_{eg}), sehingga jika dituliskan kembali, persamaan 3.54 menjadi;

$$\omega_{rpm}(s) = \frac{K_{epm}I_a - K_{eg}I_g(s)}{(J_{pm} + J_g)s + (B_{pm} + B_g)} \quad (3.55)$$

dari persamaan 3.54, dapat dibuat diagram blok;



Gambar 3.10 Diagram blok kecepatan putar motor penggerak utama yang di-kopling dengan generator.

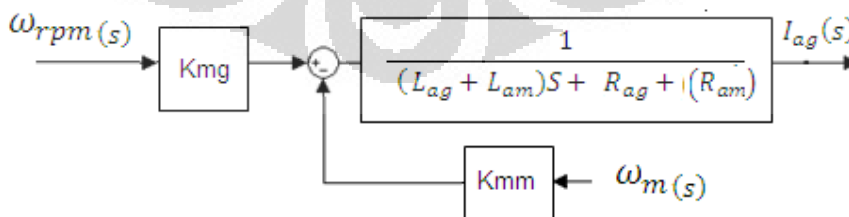
Arus pada armature generator dapat dimodelkan dengan persamaan 3.28, karena secara elektrik generator di-kopel dengan motor DC penguatan terpisah, maka persamaan 3.28 dapat dituliskan kembali sebagai;

$$I_{ag} = \frac{K_{mg}\omega_{rpm} - U_{ag}(s)}{((L_{ag} + L_{am})s + (R_{ag} + R_{am}))} \quad (3.56)$$

Karena U_{ag} sangat dipengaruhi besarnya oleh beban, dan beban dalam hal ini merupakan motor beban, maka, besarnya $U_{ag} = E_{am} = k_{fm}i_{fm}\omega_m = k_{mm}\omega_m$, dari persamaan 3.40, dengan demikian, persamaan 3.55 menjadi;

$$I_{ag} = \frac{K_{mg}\omega_{rpm} - k_{mm}\omega_m(s)}{((L_{ag} + L_{am})s + (R_{ag} + R_{am}))} \quad (3.57)$$

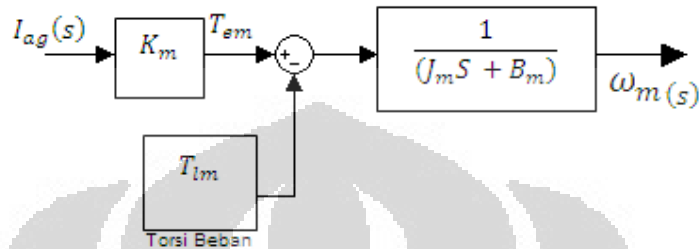
Diagram blok untuk persamaan 3.57 adalah;



Gambar 3.11 Diagram Blok Arus armature generator

Kecepatan putar motor ω_m berdasarkan persamaan 3.52, disebabkan oleh arus yang mengalir pada armature motor adalah arus dari generator penguat terpisah, maka $i_{am} = i_{ag}$ maka;

$$\omega_m(s) = \frac{K_m i_{ag}(s) - T_{Lm}(s)}{(J_m s + B_m)} \quad (3.58)$$



Gambar 3.12 Diagram blok kecepatan putar motor DC penguatan terpisah

Dari diagram blok yang diperoleh untuk rangkaian Ward Leonard, diagram blok untuk sistem Ward Leonard secara keseluruhan ditunjukkan oleh Gambar 3.14.

Dalam bentuk persamaan yang lebih sederhana, dari gambar 3.14 sistem Ward Leonard Dapat dituliskan dengan;

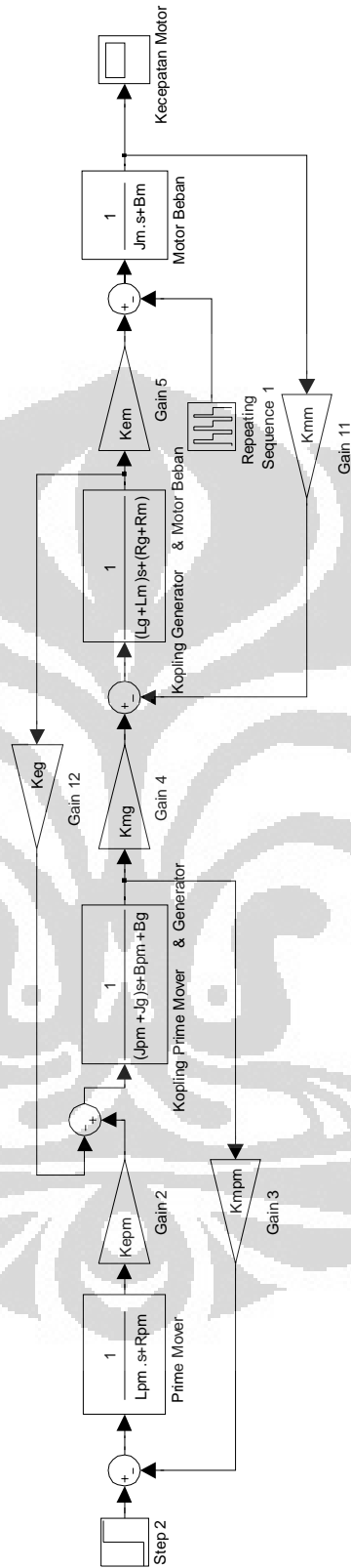
$$\frac{U_{apm}}{\omega_m} = \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 H} \quad (3.59)$$

Dengan;

$$G_1 = \frac{K_{epm} K_{mg}}{(L_{apm} s + R_{apm})((J_{pm} + J_g) s + (B_{pm} + B_g)) + K_{epm} K_{mpm}}$$

$$G_2 = \frac{K_{em}}{((L_g + L_m) s + (R_g + R_m))(J_m s + B_m) + K_{em} K_{mm}}$$

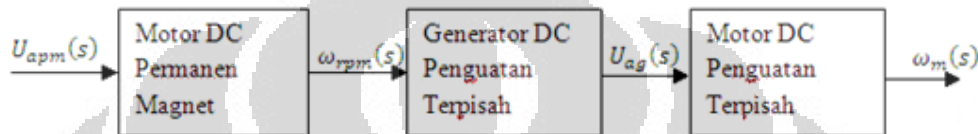
$$H = \left(\frac{K_{eg} (L_{apm} s + R_{apm}) (J_m s + B_m)}{K_e K_m} \right)$$



Gambar 3.1.1 Diagram Blok Sistem Ward Leonard

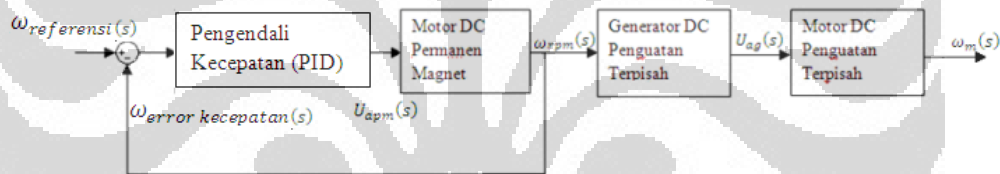
3.3 Perancangan Pengendalian Sistem Ward Leonard

Sistem Ward Leonard tanpa kendali maksudnya adalah sistem dengan rangkaian motor dan generator bekerja tanpa ada perbaikan respon dari keluaran yang dihasilkan. Pada sistem ini, keluaran dari motor beban, menjadi masukan bagi generator. Tegangan yang dibangkitkan oleh generator menjadi masukan bagi motor beban ditunjukkan oleh Gambar 3.15



Gambar 3.14 Diagram sistem Ward Leonard tanpa pengendali

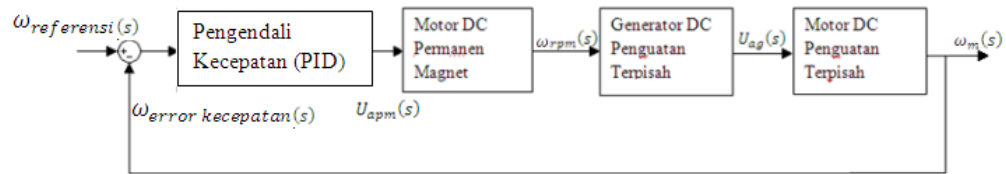
Pada sistem Ward Leonard ini, DC permanen magnet (penggerak utama) diberikan pengendali untuk memperoleh perbaikan respon keluaran dari sistem



Gambar 3.15 Diagram blok Sistem Ward Leonard dengan kendali pada sub sistem motor penggerak utama, dengan perbaikan respon putaran generator

Umpan balik berupa kecepatan dari putaran generator dibandingkan dengan kecepatan referensi, dengan pengendali kecepatan PID diharapkan perbaikan respon dapat tercapai.

Selanjutnya adalah pengendalian dengan umpan balik dari motor beban, untuk memperbaiki respon sistem secara keseluruhan diagram blok ditunjukkan pada Gambar 3.17 putaran dari motor beban digunakan sebagai umpan balik sistem, kecepatan referensi juga digunakan agar sistem dapat mencapai kecepatan yang diinginkan;



Gambar 3.16 Diagram Blok Sistem Ward Leonard Dengan kendali untuk sistem secara keseluruhan

Untuk dapat melakukan analisa simulasi pada sistem ward Leonard dengan pemodelan dan fungsi alih sebagaimana telah diuraikan pada bab 3, maka diperlukan informasi mengenai parameter dari motor DC permanen magnet, generator DC penguatan terpisah dan motor DC penguatan terpisah. Sehingga dapat dicari komponen-komponen pengendalian motor, dalam hal ini untuk pengendali proporsional, Integral dan Diferensial (PID).

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISA PADA PEMODELAN SISTEM WARD LEONARD

4.1 Simulasi Komponen Penyusun Sistem Ward Leonard

Untuk melakukan simulasi pada sistem Ward Leonard sebagaimana telah disampaikan pada BAB 3, maka perlu diketahui karakteristik motor dan generator penyusun sistem Ward Leonard. Sehingga dari hasil simulasi terhadap karakteristik motor yang telah diketahui dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan terhadap pengendalian yang akan dilakukan terhadap sistem.

4.1.1 Motor DC Permanen Magnet

Motor DC permanen magnet yang digunakan dalam simulasi pemodelan ini memiliki parameter ditunjukkan pada Tabel 4.1 [8];

Tabel 4.1 Parameter motor DC permanen magnet

$U = 230 \text{ V}$	$R = 0.0125 \Omega$
$J = 3 \text{ Nm}$	$L = 6,5 \text{ mH}$
$K_E = K_T = 1.91$	$B = 0.6 \text{ Nms}$

Dari persamaan 3.20, maka fungsi alih motor DC permanen magnet dengan parameter pada Tabel 4.1 bisa dituliskan kembali sebagai;

$$\frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} = \frac{1.91}{(3s+0.6)(0.0065s+0.0125) + (1.91)^2}$$

$$\frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} = \frac{1.91}{(0.0195s^2 + 0.0414s + 0.0075) + 3.6481}$$

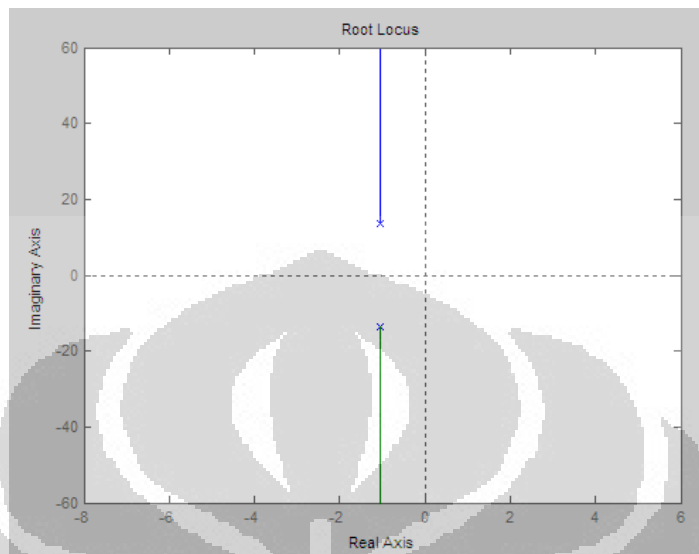
$$\frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} = \frac{1.91}{(0.0195s^2 + 0.0414s + 3.6556)}$$

Agar nilai pada nilai s dengan pangkat tertinggi bernilai 1, dengan tujuan memudahkan perhitungan, baik nomenator maupun denumenator dikalikan dengan 1.91;

$$\frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} = \frac{97.949}{(s^2 + 2.123s + 187.467)}$$

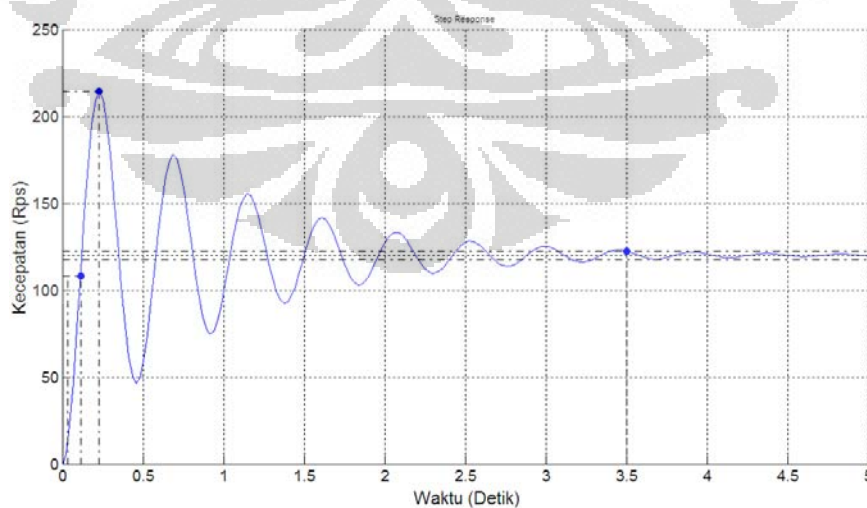
Dari hasil fungsi alih yang telah disederhanakan, selanjutnya dicari akar-akar persamaan karakteristik, guna melihat posisi dari pole yang dibentuk dari fungsi

alih model. Dengan menggunakan metode root locus, diperoleh gambar letak akar-akar persamaan karakteristik ditunjukkan pada Gambar 4.1;

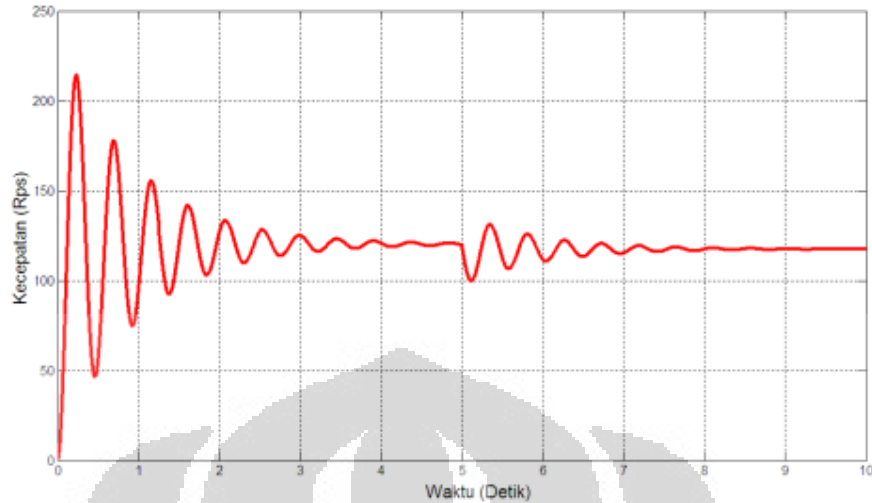


Gambar 4.1 Letak Pole motor DC permanen magnet

Kedua nilai persamaan karakteristik yang juga merupakan pole, berada di sebelah kiri sumbu imajiner, hal ini menunjukkan bahwa sistem stabil. Jika masukan tegangan U_{apm} diberikan pada motor sebesar 230 V, respon kecepatan motor terhadap masukan ditunjukkan pada Gambar 4.2 (a) Untuk mencapai keadaan stabil motor memerlukan waktu 5 detik, jika motor DC permanen magnet diberi beban pada detik ke-6 maka kurva kecepatan motor ditunjukkan pada Gambar 4.2 (b)



(a) Kurva respon kecepatan motor DC permanen magnet tanpa beban



(a) Kurva kecepatan motor DC permanen magnet dengan pembebanan pada detik ke lima

Gambar 4.2 Kurva kecepatan motor DC permanen magnet (a) tanpa beban, (b) dengan pembebanan pada detik ke lima.

Hasil dari simulasi pada motor permanen magnet menunjukkan bahwa diperlukan waktu bagi motor untuk mencapai kondisi *steady state*. Dengan *settling time* pada detik ke 3.5, Maksimum Overshoot pada detik ke 0.229, dengan persen *overshoot* mencapai 78.3%. *Raise time* pada detik ke 0.089. Pembebanan pada motor menyebabkan sistem motor memberikan respon yang juga menyebabkan motor memerlukan waktu untuk kembali pada kondisi *steady state*.

4.1.2 Generator DC Penguatan Terpisah

Tabel 4.2 Parameter generator DC penguatan terpisah

Daya Mekanik	100 HP
Putaran Nominal	1750 RPM
Tegangan Jangkar	240 V
Arus Jangkar	340 Amp
R (armature)	0.018 Ω
L (armature)	0.0007 H
J	22 Lb.Ft ²

Dari tabel 4.2, maka secara matematis dapat dicari nilai-nilai yang diperlukan dalam perhitungan;

$$\begin{aligned}
 P \text{ (daya listrik)} &= \text{Daya mekanik} \times 746 \\
 &= 100 \times 746 \\
 &= 74600 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega &= 1750 \text{ RPM} \\
 &= (1750 \times 2\pi)/60 \\
 &= 183 \text{ Rps}
 \end{aligned}$$

$$J = 22 \times 0.0421401$$

$$= 0.9207$$

$$K_E = T/I_a = 407/340$$

$$= 1.197$$

$$K_M = (E_a - I_a R_a) / \omega$$

$$= (240 - 340(0.018)) / 183$$

$$= 1.278$$

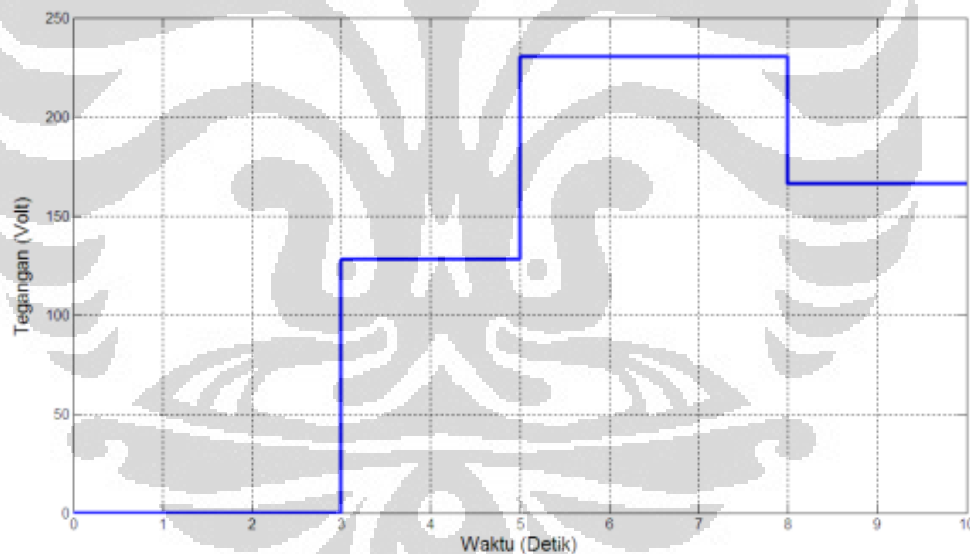
$$T = P/\omega$$

$$= 74600/183 = 407 \text{ Nm}$$

$$B = T/\omega$$

$$= 407/183 = 2.22$$

Generator DC penguatan terpisah merupakan komponen dari sistem Ward Leonard yang ke-2, yang digunakan dalam simulasi pemodelan ini memiliki parameter motor seperti ditunjukkan pada tabel 4.2 [13], berdasarkan hasil pemodelan pada Gambar 3.5 dan persamaan 3.38, hasil keluaran generator proporsional terhadap masukan yang diberikan, hal ini ditunjukkan pada gambar 4.3;



Gambar 4.3 Kurva tegangan keluaran generator pada kecepatan putar yang berbeda

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa ketika generator di putar pada detik ke tiga dengan putaran 100 Rps generator menghasilkan tegangan sebesar 128V, pada detik ke lima generator diputar pada putaran 180 Rps menghasilkan tegangan sebesar 230V, dan saat detik ke delapan, kecepatan generator dikurangi hingga mencapai 130 Rps, tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator adalah 166V.

4.1.3 Motor DC Penguatan Terpisah

Komponen yang ke-3 adalah Motor DC dengan penguatan terpisah. Dengan parameter motor yang digunakan dalam simulasi pemodelan sebagai berikut [14];

Tabel 4.3 Parameter motor DC penguatan terpisah

Daya Mekanik	75 HP
Putaran Nominal	1150 RPM
Tegangan Jangkar	240 V
Arus Jangkar	260 Amp
R (armature)	0.036 Ω
L (armature)	0.0016 H
J	22 Lb.Ft²

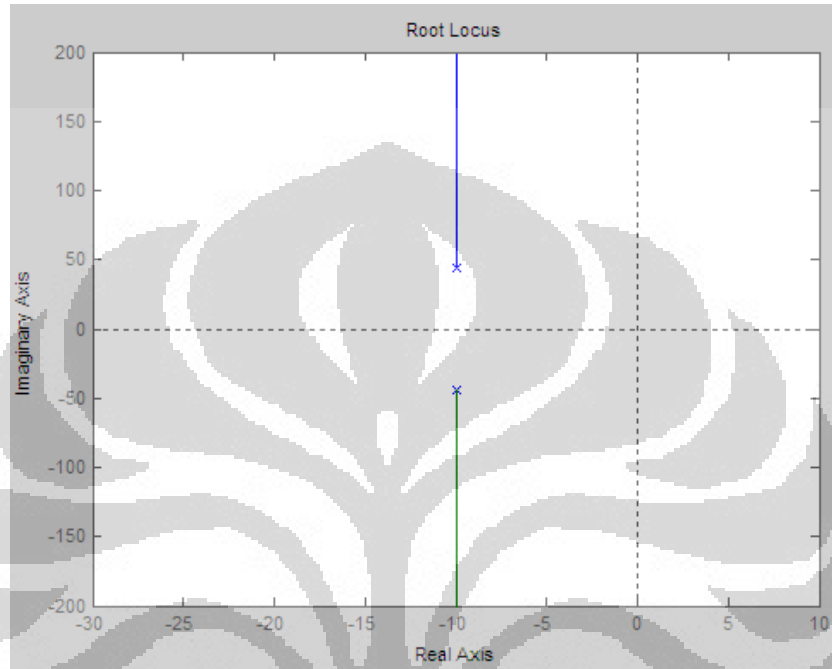
Dari tabel 4.3, maka secara matematis dapat dicari nilai-nilai yang diperlukan dalam perhitungan;

$$\begin{aligned}
 P \text{ (daya listrik)} &= \text{Daya mekanik} \times 746 & \omega &= 1750 \text{ RPM} \\
 &= 75 \times 746 & &= (1150 \times 2\pi)/60 \\
 &= 55950 \text{ Watt} & &= 120 \text{ Rps} \\
 J &= 22 \times 0.0421401 & T &= P/\omega \\
 &= 0.9207 & &= 55950/120 = 466.25 \text{ Nm} \\
 K_E = T/I_a &= 466.25/260 & B &= T/\omega \\
 &= 1.793 & &= 466.25/120 = 3.8854 \\
 K_M &= (E_a - I_a R_a) / \omega \\
 &= (240 - 260(0.036))/120 \\
 &= 1.92
 \end{aligned}$$

Dari persamaan (3.53), maka fungsi alih motor DC permanen magnet dengan parameter di atas bisa dituliskan kembali sebagai;

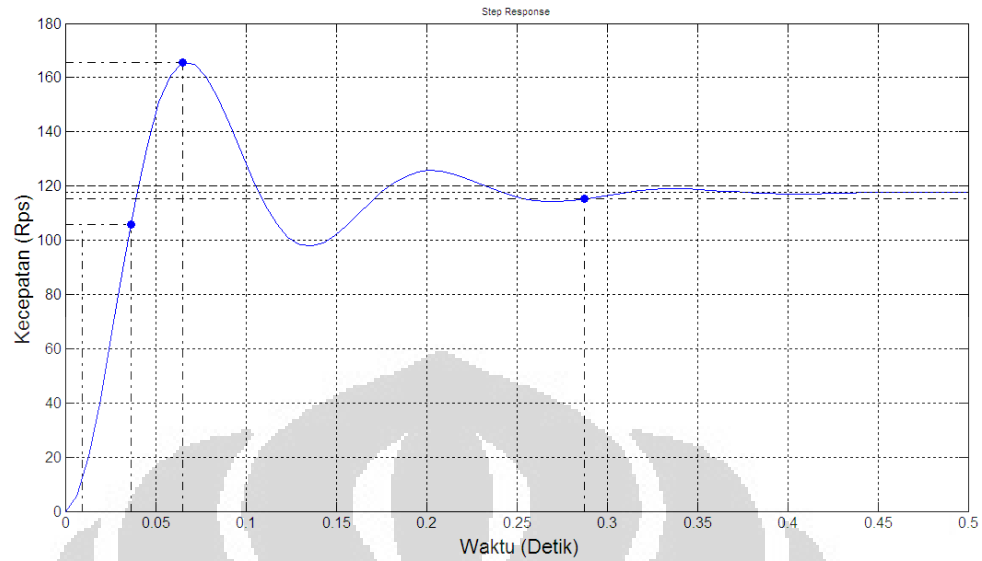
$$\begin{aligned}
 \frac{\omega_m}{U_{am}} &= \frac{1.793}{(0.927S + 3.8854)(0.0016S + 0.036) + 1.793 \times 1.92} \\
 \frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} &= \frac{1.793}{(0.0015S^2 + 0.0396S + 0.1399) + 3.44256} \\
 \frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} &= \frac{1.793}{(0.0015S^2 + 0.0396S + 3.58246)} \\
 \frac{\omega_{rpm}}{U_{apm}} &= \frac{1195.3}{(S^2 + 26.4S + 2388)}
 \end{aligned}$$

Dari hasil fungsi alih yang telah disederhanakan, selanjutnya dicari akar-akar persamaan karakteristik, guna melihat posisi dari pole yang dibentuk dari fungsi alih model. Dengan menggunakan metode root locus, diperoleh gambar letak akar-akar persamaan karakteristik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4;



Gambar 4.4 Letak Pole motor DC penguatan terpisah

Kedua nilai persamaan karakteristik yang juga merupakan pole, berada di sebelah kiri sumbu imajiner yakni pada $-13.2 + 49.1i$ dan $-13.2 - 49.1i$, hal ini menunjukkan bahwa sistem stabil. Jika masukan tegangan U_{am} diberikan pada motor sebesar 230 V, respon kecepatan motor terhadap masukan ditunjukkan pada Gambar 4.5 (a) dengan nilai maksimum *overshoot* 40.7% pada waktu 0.065 detik, *settling time* 0.288 detik, dan *raise time* 0.0272 detik. Jika motor DC permanen magnet diberi beban pada detik ke-6 maka kurva kecepatan motor ditunjukkan pada Gambar 4.5 (b)



(a) Kurva kecepatan motor DC penguatan terpisah tanpa beban



(b) Kurva kecepatan motor DC penguatan terpisah dengan pembebanan pada detik ke lima

Gambar 4.5 Kurva kecepatan motor DC penguatan terpisah (a) tanpa beban, (b) dengan pembebanan pada detik ke lima.

4.2 Simulasi Sistem Ward Leonard

Dengan menggunakan parameter motor yang telah diuraikan dari 4.1.1-4.1.3, simulasi sistem Ward Leonard dibagi ke dalam dua tahap yakni sistem Ward Leonard tanpa pengendali dan sistem Ward Leonard dengan pengendali, berikut analisa pada kedua sistem tersebut.

4.2.1 Sistem Ward Leonard Tanpa Pengendali

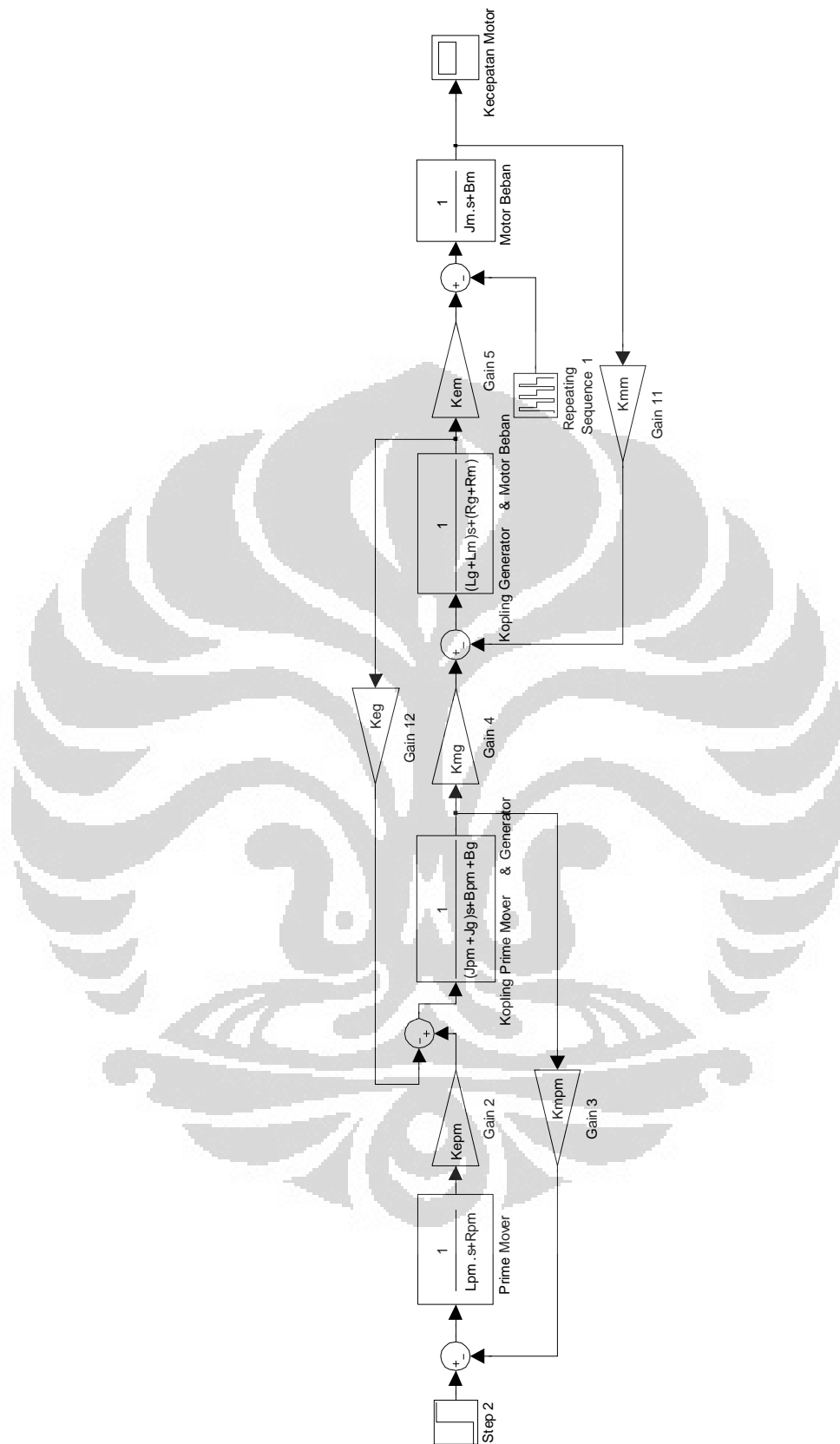
Sistem Ward Leonard tanpa pengendali dapat diamati dengan memasukan nilai-nilai parameter motor penggerak utama, generator penguat terpisah dan motor penguat terpisah pada sistem yang digambarkan pada gambar 3.14, maka hasil yang didapat dari sistem Ward Leonard tanpa pengendali adalah sebagai berikut;

Arus Pada Motor DC Permanen Magnet, merupakan arus yang terjadi akibat adanya tegangan masukan U_{apm} dan dipengaruhi oleh putaran motor.

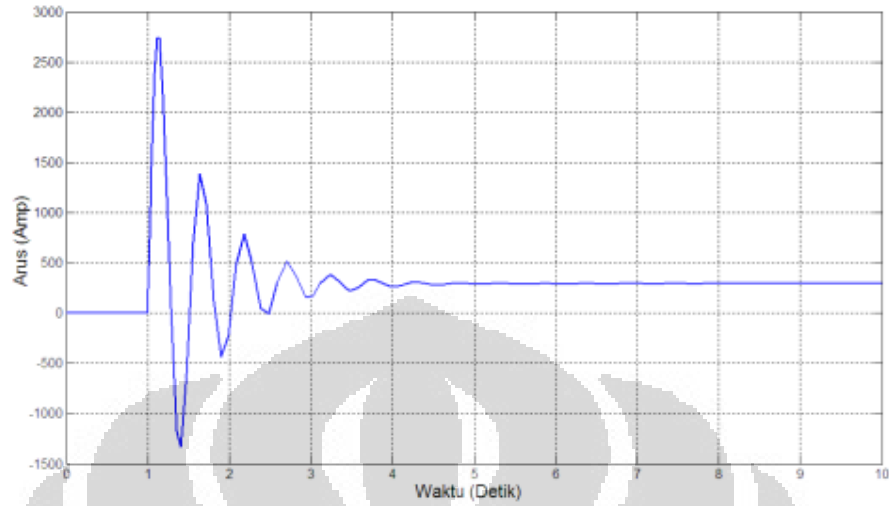
Arus pada armature jangkar kemudian diubah menjadi torsi dengan adanya K_E Motor, dipengaruhi oleh induksi penguat terpisah dari arus medan generator, karena nilai pada simulasi ini dibuat konstan, maka besarnya adalah sama dengan K_B generator yakni 1.92. karena motor penggerak utama dan generator di-*couple*, maka Inersia dari motor dan generator saling mempengaruhi sistem. Begitu juga *viscous damping* dari motor dan generator. Sehingga didapat putaran motor yang sama besarnya dengan putaran generator.

Arus armature generator sama dengan arus armature pada motor. Pada bab 3 telah dimodelkan dimana resistansi generator dan motor saling mempengaruhi besarnya arus yang mengalir pada armature kedua elemen ini. Untuk putaran motor pada bagian akhir dari sistem Ward Leonard selain dipengaruhi oleh arus armature, juga dipengaruhi oleh torsi beban yang diberikan. Untuk kondisi beban nol, maka besarnya arus armature motor penggerak utama, putaran generator, arus armature motor dan putaran motor ditunjukkan pada gambar 4.7;

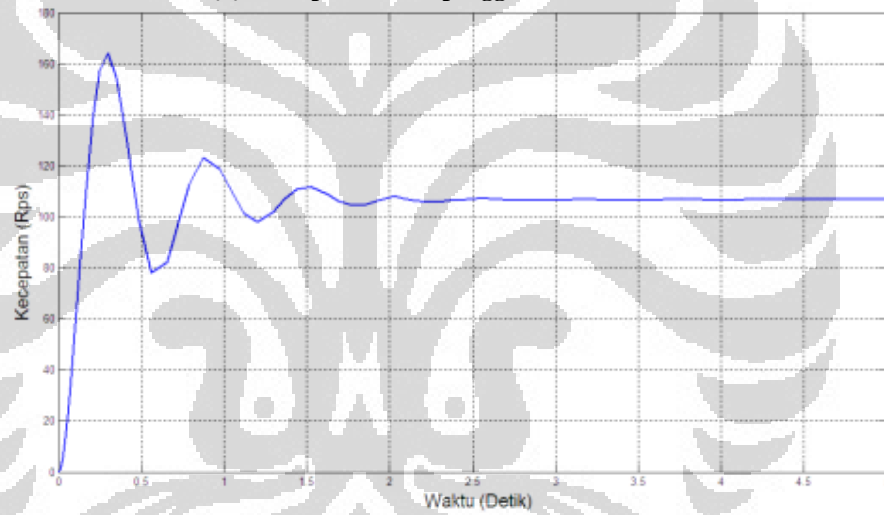
Dari gambar 4.7.a sampai 4.7.d baik arus pada armature motor penggerak utama dan motor tanpa beban memerlukan waktu untuk mencapai kondisi *steady state* begitupun untuk kecepatan kopling generator dan motor penggerak utama dengan generator. *Overshoot* maksimum pada sistem Ward Leonard tanpa pengendali mencapai 47%, *rise time* 0.118 detik dan *settling time* 1.8 detik.



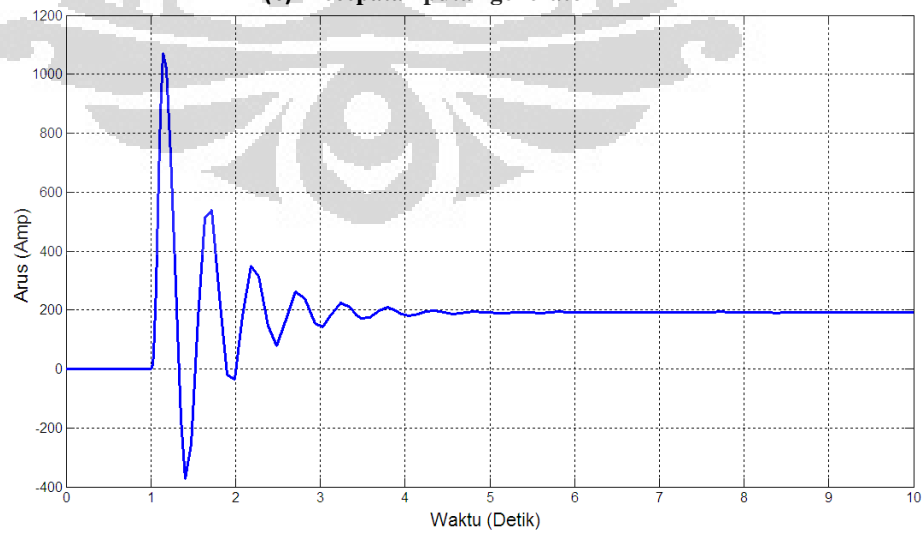
Gambar 4.6 Blok diagram sistem Ward Leonard tanpa pengendali



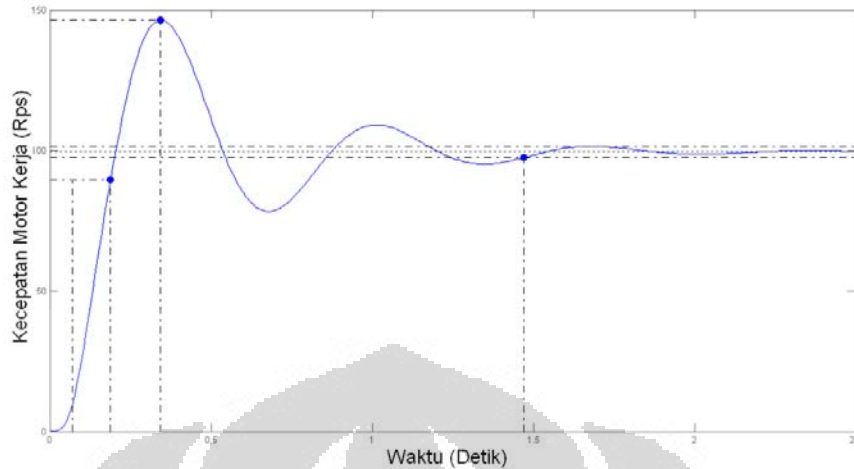
(a) arus pada motor penggerak utama



(b) kecepatan putar generator



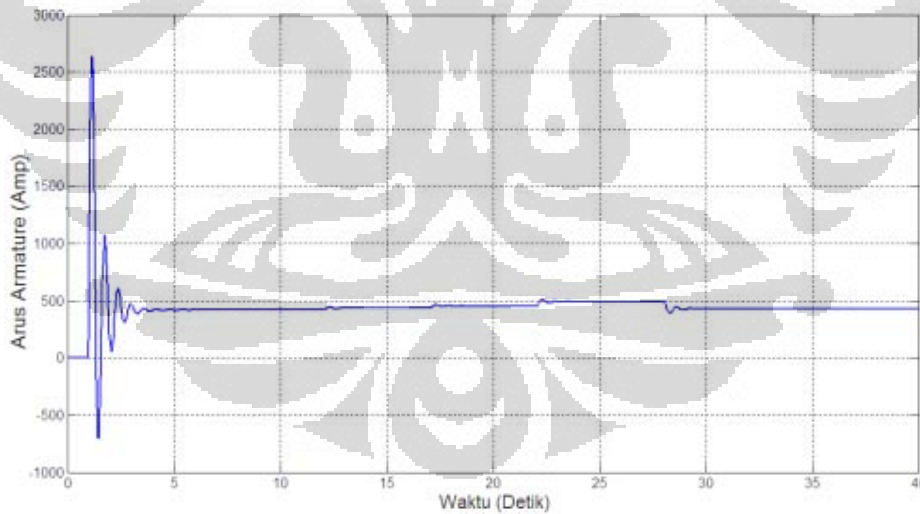
(c) arus pada armature generator



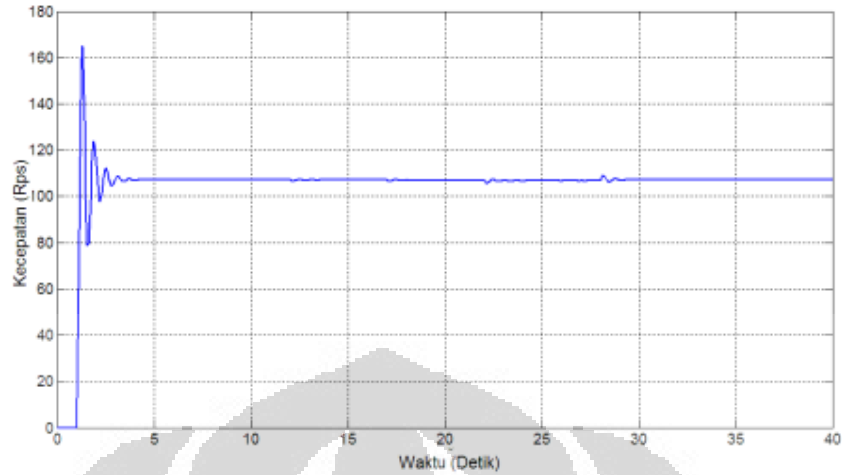
(d) putaran pada motor beban

Gambar 4.7 Kurva karakteristik sistem Ward Leonard tanpa pengendali (a) arus pada motor penggerak utama, (b) kecepatan putar generator, (c) arus pada armature generator, (d) putaran pada motor beban.

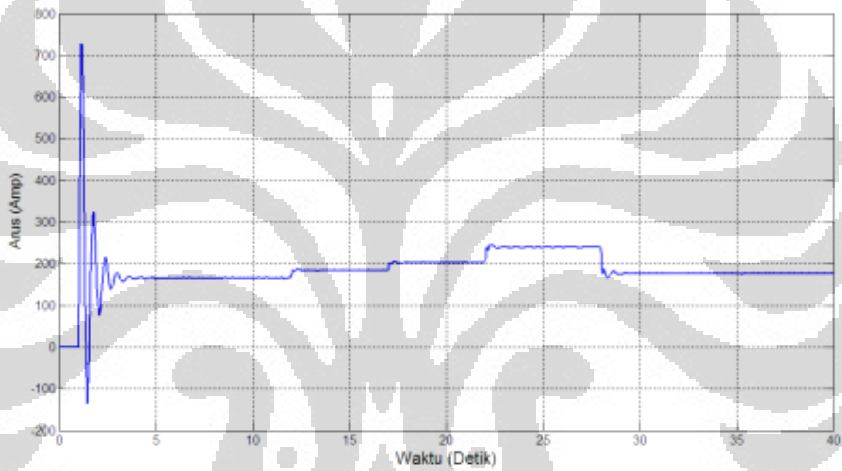
Kondisi selanjutnya adalah kondisi dimana motor diberi beban, dengan kata lain, pembebanan diberikan pada sistem Ward Leonard. Kurva karakteristik dari sistem yang diberi beban ditunjukkan pada Gambar 4.8



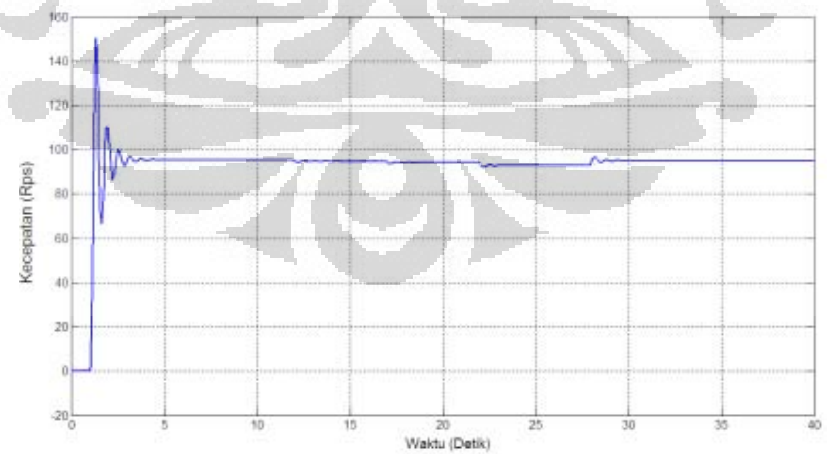
(a) arus pada motor penggerak utama



(b) kecepatan putar generator



(c) arus pada armature generator



(d) putaran pada motor

Gambar 4.8 (a) arus pada motor penggerak utama, (b) kecepatan putar generator, (c) arus pada armature generator, (d) putaran pada motor dengan beban.

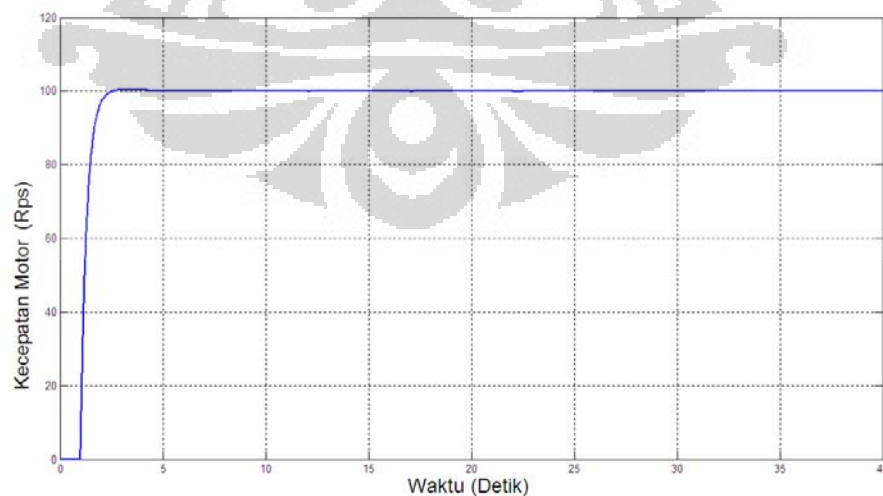
4.2.2 Sistem Ward Leonard Dengan Pengendali

Tujuan Dari pengendalian sistem Ward Leonard ini adalah untuk mendapatkan putaran motor sesuai dengan putaran yang diinginkan (putaran referensi), dan memiliki respon terhadap masukan yang cepat (Sistem dapat dengan cepat mencapai kondisi *steady state*).

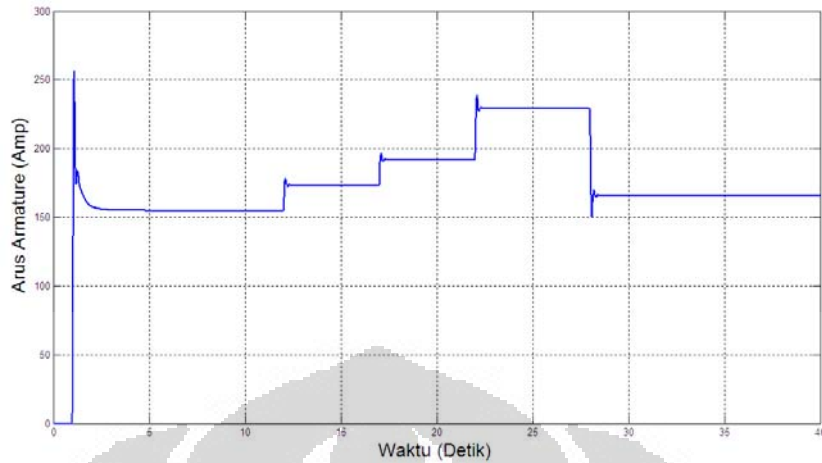
Untuk mencapai tujuan tersebut, langkah pertama yang dilakukan adalah dengan memberikan pengendalian PID pada motor penggerak utama. Besarnya konstanta dari $K_i = 6.8$, $K_p = 10$, $K_d = 2.8$, menghasilkan respon arus *armature* motor penggerak utama, kecepatan putaran generator, arus *armature* generator dan kecepatan putar motor seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.9 dan Blok diagram untuk sistem ini, ditunjukkan pada Gambar 4.10



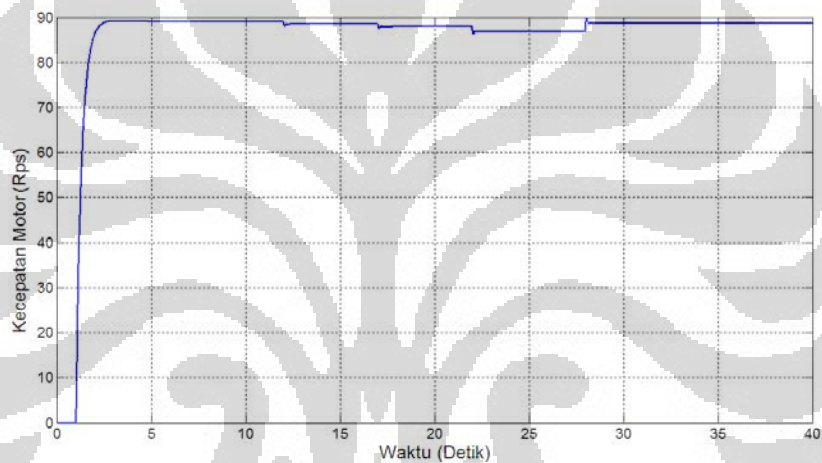
(a) arus pada motor penggerak utama



(b) kecepatan putar generator



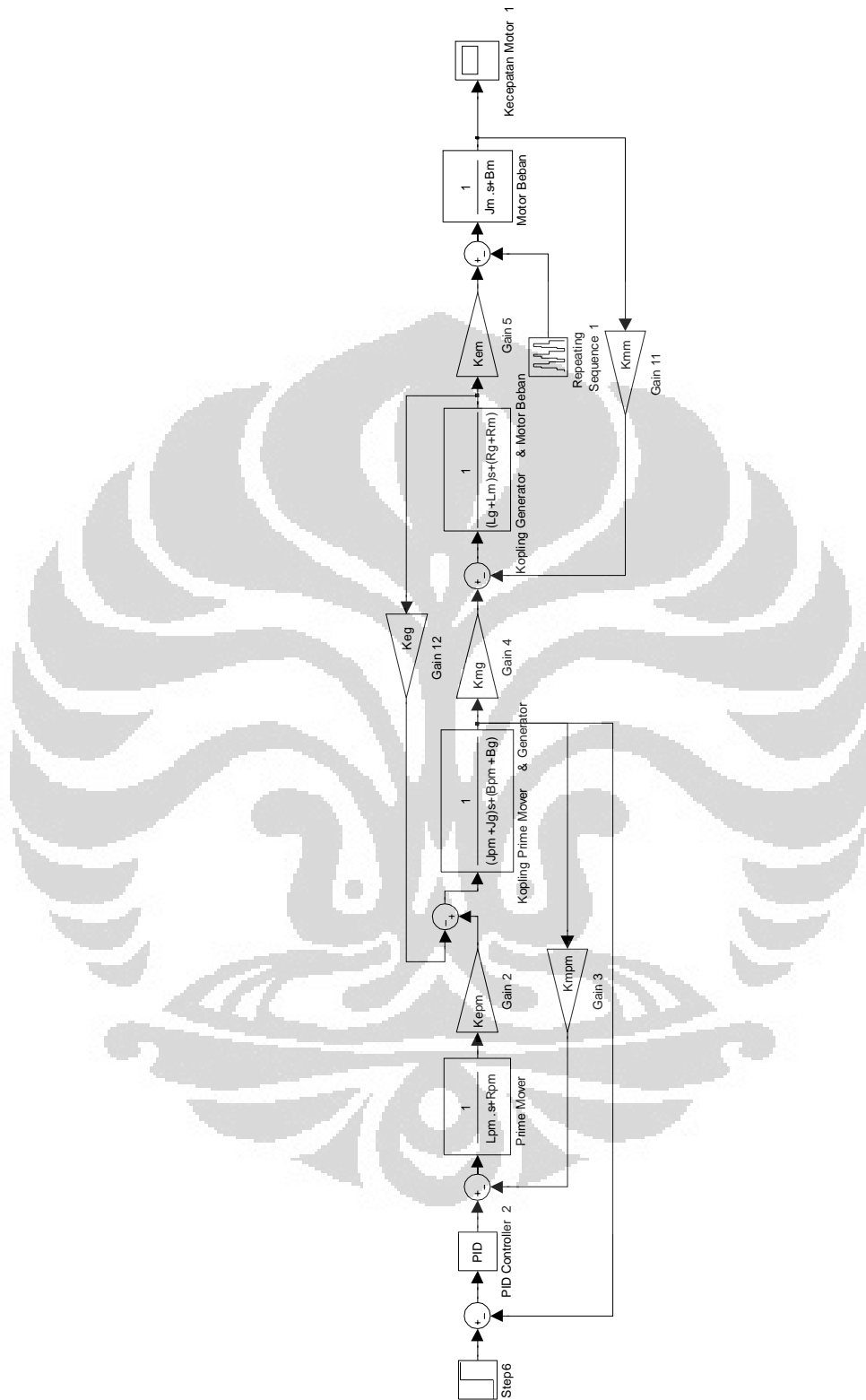
(c) arus pada armature generator



(d) putaran pada motor beban

Gambar 4.9 (a) arus pada motor penggerak utama, (b) kecepatan putar generator, (c) arus pada armature generator, (d) putaran pada motor beban dengan pengendali PID pada motor penggerak utama.

Setelah diberikan pengendali PID, respon dari sistem menjadi tidak memiliki *overshoot*, pada putaran motor penggerak utama. Pada motor beban perubahan masih ada, yakni pada nilai *steady state*. hal ini disebabkan oleh, pengendali yang tidak mengkompensasi kesalahan pada keluaran dari motor beban. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada tabel 4.4. Gambar 4.10 menunjukkan diagram blok sistem dengan pengendali PID untuk motor penggerak utama.



Gambar 4.10 Blok diagram sistem Ward Leonard dengan kendali PID pada motor Penggerak Utama

Tabel 4.4. Perbandingan Sistem Ward Leonard tanpa dan menggunakan kendali PID

Kondisi	Tanpa Kendali		Dengan PID		
	Motor Utama	Penggerak Motor Beban	Motor Utama	Penggerak Motor Beban	Motor Beban
Waktu Steady State (Detik)	2.8	4.5	2.4		3
Kecepatan Steady State (Rps)	111	105	110		106
Maximum Overshoot	47.1%	47.1%	0%		0%

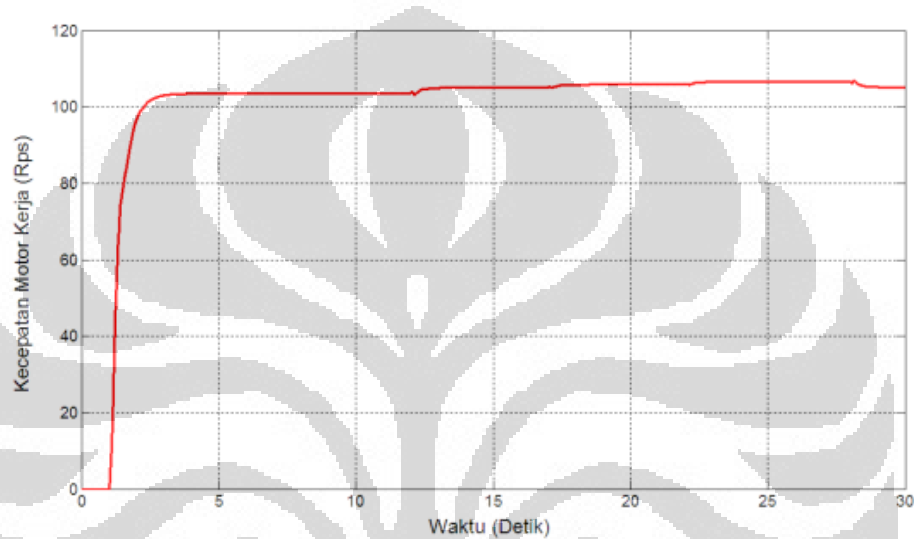
Karena masukan bagi motor adalah hasil dari putaran generator, maka PID pada motor saja dinilai tidak efektif bila dilakukan, mengingat referensi putaran yang digunakan adalah masukan bagi motor. Jika pada motor penggerak utama tidak dilakukan pengendalian, maka putaran generator akan menjadi kurang tepat pada sistem dengan PID seperti itu. Dengan demikian maka selanjutnya adalah pada kondisi pengendali PID diletakkan pada kedua motor. Dengan putaran dari motor penggerak utama dijadikan sebagai error yang dibandingkan dengan masukan referensi. Dan untuk motor kedua, referensi diperoleh dari motor, dan putaran dari motor adalah masukan untuk error dari sistem.

Bila konsep dua pengendali disimulasikan, maka baik kecepatan motor maupun arus armatur pada motor tidak akan mencapai nilai seperti yang diinginkan, atau dengan kata lain sistem seperti ini tidak bisa dilakukan, hal ini dikarenakan oleh, referensi error yang didapat untuk masukan motor beban didapat dari putaran generator. Yang mana belum tentu bisa digunakan sebagai referensi. Selain itu umpan balik error dan hasil kali dengan komponen PID akan mempengaruhi sistem secara keseluruhan (menjadi disturbance pada sistem secara keseluruhan).

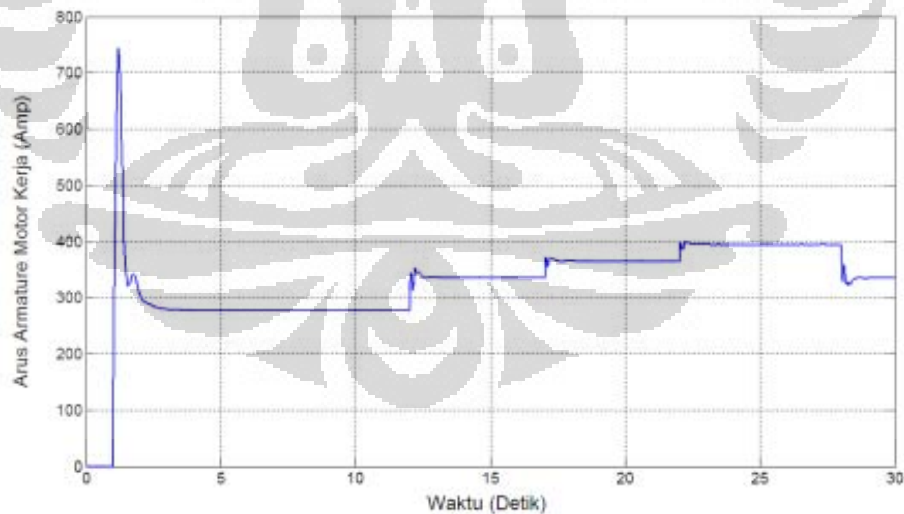
Pengendali PID yang ke dua adalah dengan cara meletakkan pengendali di awal sistem, dengan masukan *error* dari motor, sehingga perbaikan kesalahan pada sistem secara keseluruhan dikendalikan oleh satu pengendali., blok diagram yang menggambarkan sistem ini ditunjukkan pada gambar 4.12.

Pada pengendali PID untuk keseluruhan sistem, kecepatan acuan yang diberikan merupakan kecepatan yang diinginkan pada putaran motor. dengan demikian, motor penggerak utama dibuat menyesuaikan dengan kondisi yang diinginkan tersebut.

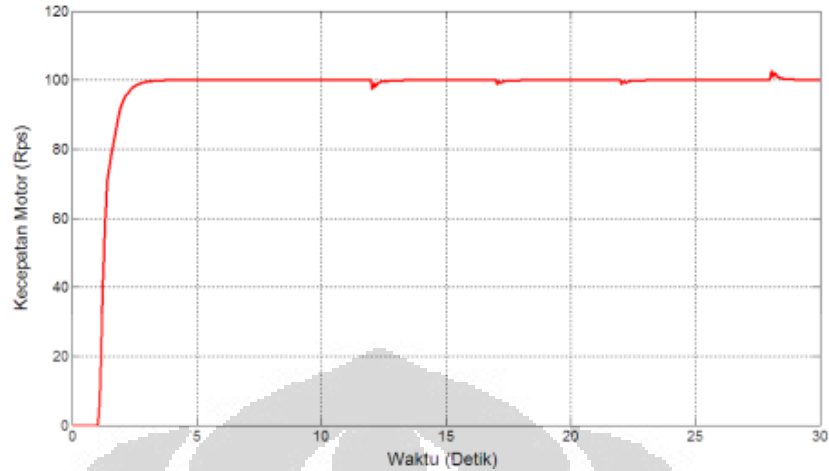
Untuk mencapai tujuan tersebut, langkah pertama yang dilakukan adalah dengan memberikan pengendalian PID pada motor penggerak utama. Besarnya konstanta dari $K_p = 0.3$, $K_i = 5$, $K_d = 0.12$, menghasilkan respon arus *armature* motor penggerak utama, kecepatan putaran generator, arus *armature* generator dan kecepatan putar motor seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.11 dan Blok diagram untuk sistem ini, ditunjukkan pada Gambar 4.12.



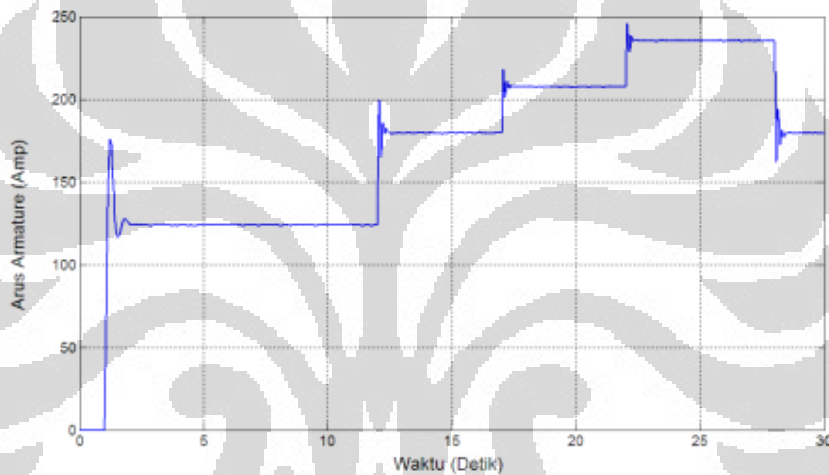
(a) Karakteristik kecepatan pada sistem Ward Leonard dengan pengendali PID



(b) Karakteristik arus armature pada motor penggerak utama

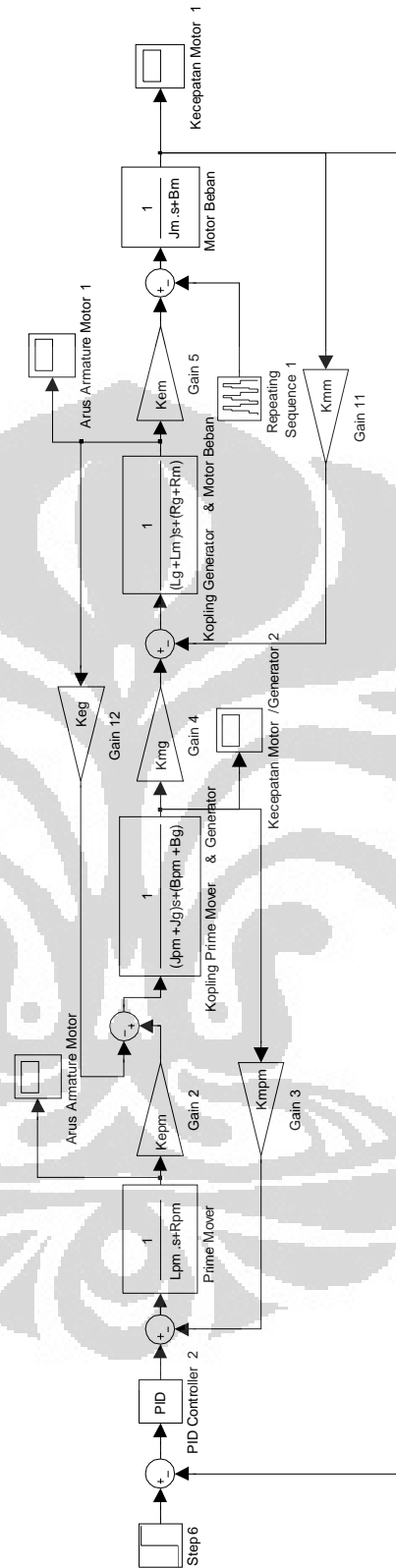


(c) Karakteristik kecepatan motor beban



(d) Karakteristik arus pada motor beban

Gambar 4.11 Sistem Ward Leonard dengan kendali PID untuk seluruh sistem, dengan parameter error didapat dari motor, (a) karakteristik kecepatan, (b) kurva karakteristik arus pada motor penggerak utama (c) karakteristik kecepatan motor beban, (d) karakteristik arus pada motor beban



Gambar 4.12 Blok diagram sistem ward Leonard pengendali PID dengan umpan balik kesalahan dari kecepatan putar motor beban

Pada pengendalian PID yang dapat dilakukan pada sistem Ward Leonard, baik pada pengendalian PID dengan umpan balik kesalahan dari putaran generator (tipe 1) dan pengendalian PID dengan umpan balik kesalahan dari putaran motor beban (tipe 3), dilakukan pemberian beban dengan besar pembebanan bervariasi; detik ke 12 diberikan beban 100 N, pada detik ke 17 dan 22 beban ditambah lagi 50 N, pada detik ke 28 beban dihilangkan sebesar 100N. didapat hasil pada tabel 4.4 sebagai;

Tabel 4.5. Perbandingan Sistem Ward Leonard menggunakan kendali PID dengan beban variabel

Tipe	Objek Pengamatan	Penambahan Beban			
		100 N (detik ke 12)	50 N (detik ke 17)	50 N (detik ke 22)	-100 N (detik ke 28)
PID 1	Waktu Steady State	0.4	0.4	0.4	0.4
	Kecepatan Steady State	104.8	104	103.3	104.8
	Maximum Overshoot	6%	3%	6%	5%
PID 3	Waktu Steady State	1	0.5	0.5	0.7
	Kecepatan Steady State	100	100	100	100
	Maximum Overshoot	3%	1.2%	1.2%	2.5%

Dari tabel 4.5 dapat diamati bahwa pemberian beban dapat mempengaruhi kinerja sistem, pada tipe satu pemberian beban juga berpengaruh pada kecepatan steady state, hal ini terjadi karena tidak ada umpan balik dari keluaran sistem ke PID. Sedangkan pada pengendalian PID tipe 3 kecepatan *steady state* tetap pada kecepatan acuan, karena error yang diperbaiki didapat dari keseluruhan sistem.

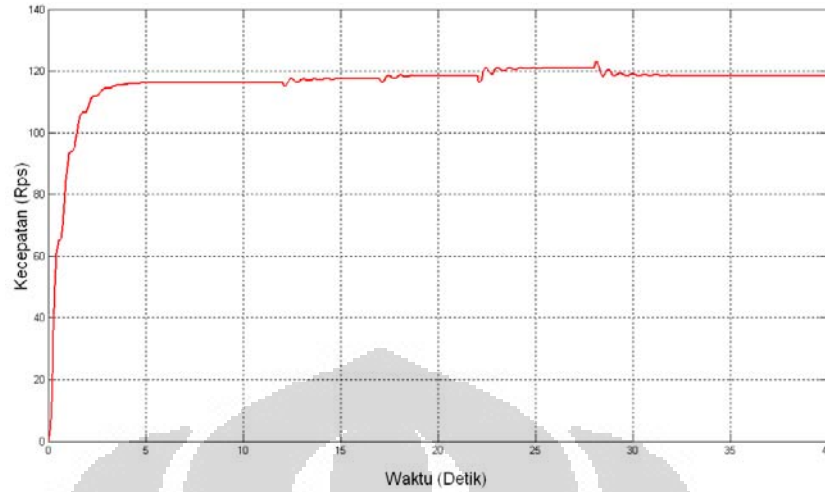
Selain PID, telah dilakukan pula pengujian untuk pengendalian PI, dengan skema sama dengan pengendalian PID untuk tipe 3; adapun hasil yang diamati dapat dilihat pada tabel 4.6

Tabel 4.6. Perbandingan Sistem Ward Leonard menggunakan kendali PID dan Sistem Ward Leonard menggunakan kendali PI

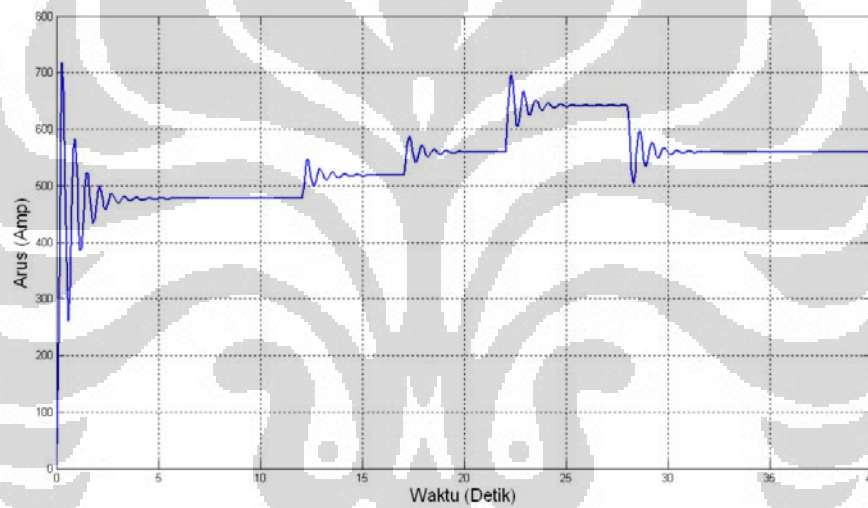
Tipe	Objek Pengamatan	Penambahan Beban				
		0 N	100 N (detik ke 12)	50 N (detik ke 17)	50 N (detik ke 22)	-100 N (detik ke 28)
PID 3	Waktu Steady State (Detik)	3	1	0.5	0.5	0.7
	Kecepatan Steady State (Rps)	100	100	100	100	100
	Maximum Overshoot (%)	0	3	1.2	1.2	2.5
PI	Waktu Steady State (Detik)	6	5	4	4	3
	Kecepatan Steady State (Rps)	100	100	100	100	100
	Maximum Overshoot (%)	0	3	1.2	1.2	2.5

Simulasi dilakukan dengan parameter $K_p = 0.3$, $K_i = 5$, $K_d = 0.12$, dan untuk parameter pengendalian KI menggunakan $K_p = 0.05$, $K_i = 3$. Meskipun dapat mencapai nilai kecepatan yang sama, namun pada pengendali PI terdapat osilasi. karakteristik keluaran dari model ini ditunjukkan pada gambar 4.15.

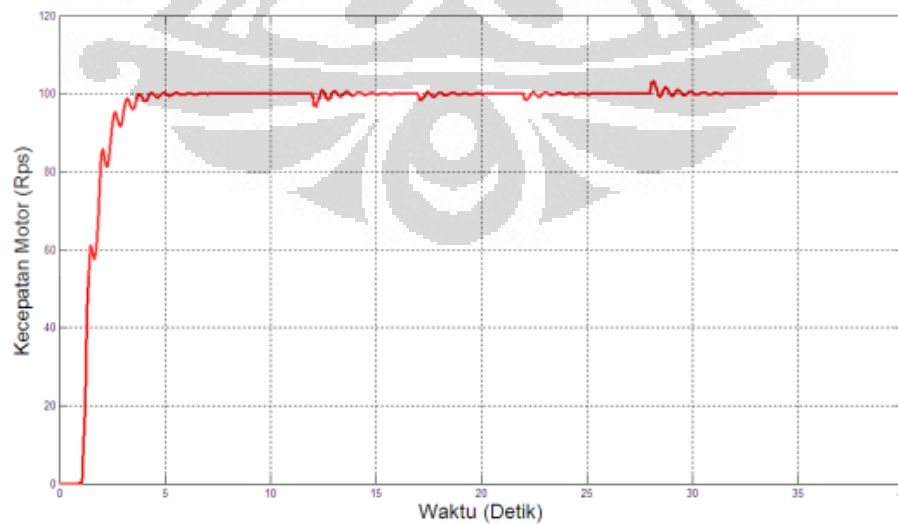
Simulasi dilakukan dengan parameter $K_p = 0.3$, $K_i = 5$, $K_d = 0.12$, dan untuk parameter pengendalian KI menggunakan $K_p = 0.05$, $K_i = 3$. Meskipun dapat mencapai nilai kecepatan yang sama, namun pada pengendali PI terdapat osilasi. Karakteristik keluaran dari model ini ditunjukkan pada gambar 4.13.



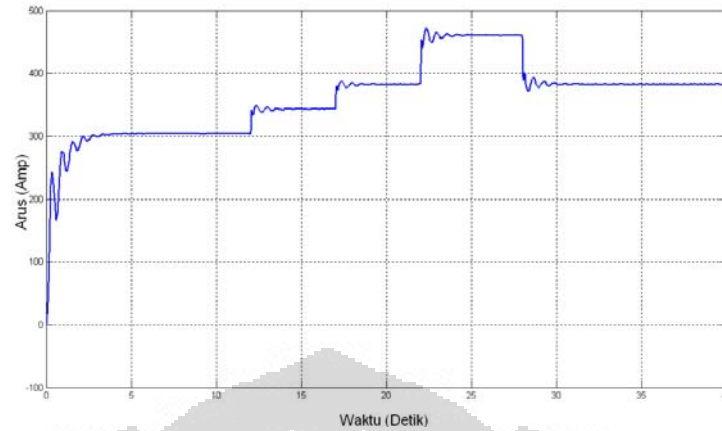
(a) karakteristik kecepatan motor penggerak utama,



(b) kurva karakteristik arus pada motor penggerak utama

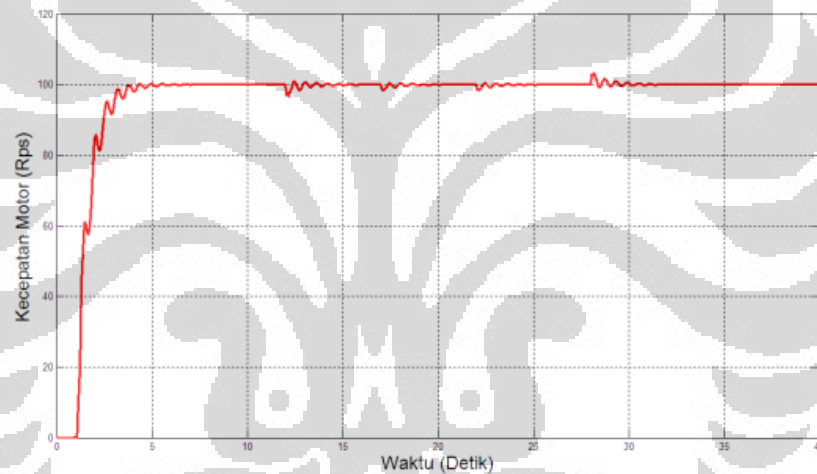


(c) karakteristik kecepatan motor beban

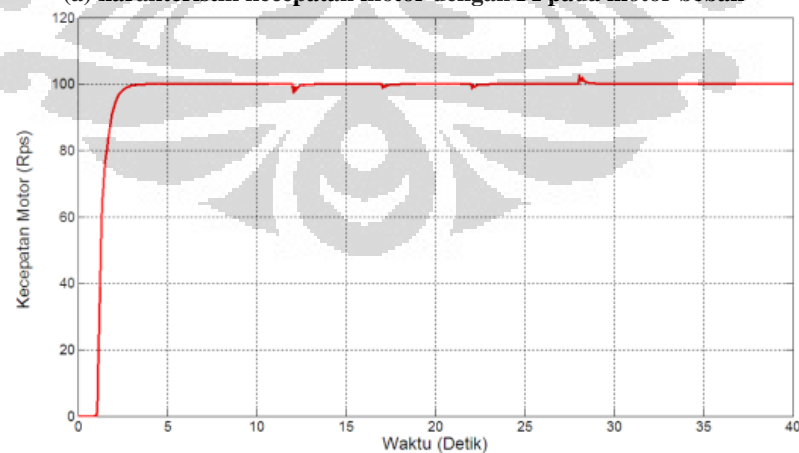


(d) karakteristik arus armature generator

Gambar 4.13 Karakteristik (a) karakteristik kecepatan, (b) kurva karakteristik arus pada motor penggerak utama (c) karakteristik kecepatan motor beban, (d) karakteristik arus pada motor beban



(a) karakteristik kecepatan motor dengan PI pada motor beban



(b) karakteristik kecepatan motor dengan PID pada motor beban

Gambar 4.14 Perbandingan karakteristik kecepatan motor dengan (a) pengendali PI dan (b) PID pada motor beban

BAB 5

KESIMPULAN

Dari penulisan tersebut, dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu :

1. Dengan menggunakan pengendali PID, dengan nilai $K_p = 10$ $K_i = 6.8$ $K_d = 2.8$ pada motor kerja, dapat memperbaiki maksimum overshoot yang semula 47.1% menjadi nol. dan waktu mencapai keadaan tunak, yang semula 4.5 detik menjadi 3 detik.
2. Tipe pengendalian PID yang dilakukan memiliki keunggulan dan kekurangan, pada pengendali PID pada motor penggerak utama dengan umpan balik error dari putaran generator, respon terhadap error cepat namun tidak dapat mengkompensasi error dari keluaran sistem. Sedangkan pada pengendali PID untuk keseluruhan, error dari sistem dapat dihilangkan.
3. Dengan adanya faktor pengendali derivative pada pengendalian PID, dapat mengurangi osilasi yang terjadi, apabila dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan faktor ini (tipe pengendali PI).
4. Model Ward Leonard yang dibuat masih memiliki kekurangan diantaranya arus armature yang buat konstan. Pada kenyataannya dapat dikendalikan dan mempengaruhi kinerja motor penguat terpisah.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Morris, Noel M. (1983). *Control Engineering Third Edition. Meidenhead, Berkshire, Inggris: McGRAW-HILL Book Company (UK) Limited.*
- [2] <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electricity/generators/index.html>
- [3] <http://duniaelektronika.blogspot.com/2008/04/mesin-arus-searah.html>
- [4] Chapman, S.J., "Electric Machinery Fundamentals
- [5] Ogata, Katsuhiko. (1996). *Teknik Kontrol Automatik*. Jakarta: Erlangga; alih bahasa Edi Laksono.
- [6] Fitzgerald, A.E & Kinsley & Umans, "Electric Machinery", 2003, sixth edition, Mc-Graw Hill, London
- [7] Zaki, Ahmad (2004). *ANALYSIS OF SIMULATED WARD LEONARD SYSTEMS'S RESPONSE USING AUTOCORRELATION*. School of Electrical and Information Engineering, University of South Australia.
- [8] Fischer E. Michel, Arindam Gosh, Sharaf M. Adel INTELLIGENT CONTROL STRATEGIES FOR PERMANENT MAGNET DC DRIVES. International Journal electric.