



**SISTEM KONTROL GENERATOR INDUKSI DENGAN BEBAN
KOMPLEMEN BERBASIS PID
PADA PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO**

SKRIPSI

Oleh

M. Husni Farabi

NIM 101910201022

**PROGRAM STUDI STRATA 1
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2015



**SISTEM KONTROL GENERATOR INDUKSI DENGAN BEBAN
KOMPLEMEN BERBASIS PID
PADA PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

M. Husni Farabi

NIM 101910201022

**PROGRAM STUDI STRATA 1
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

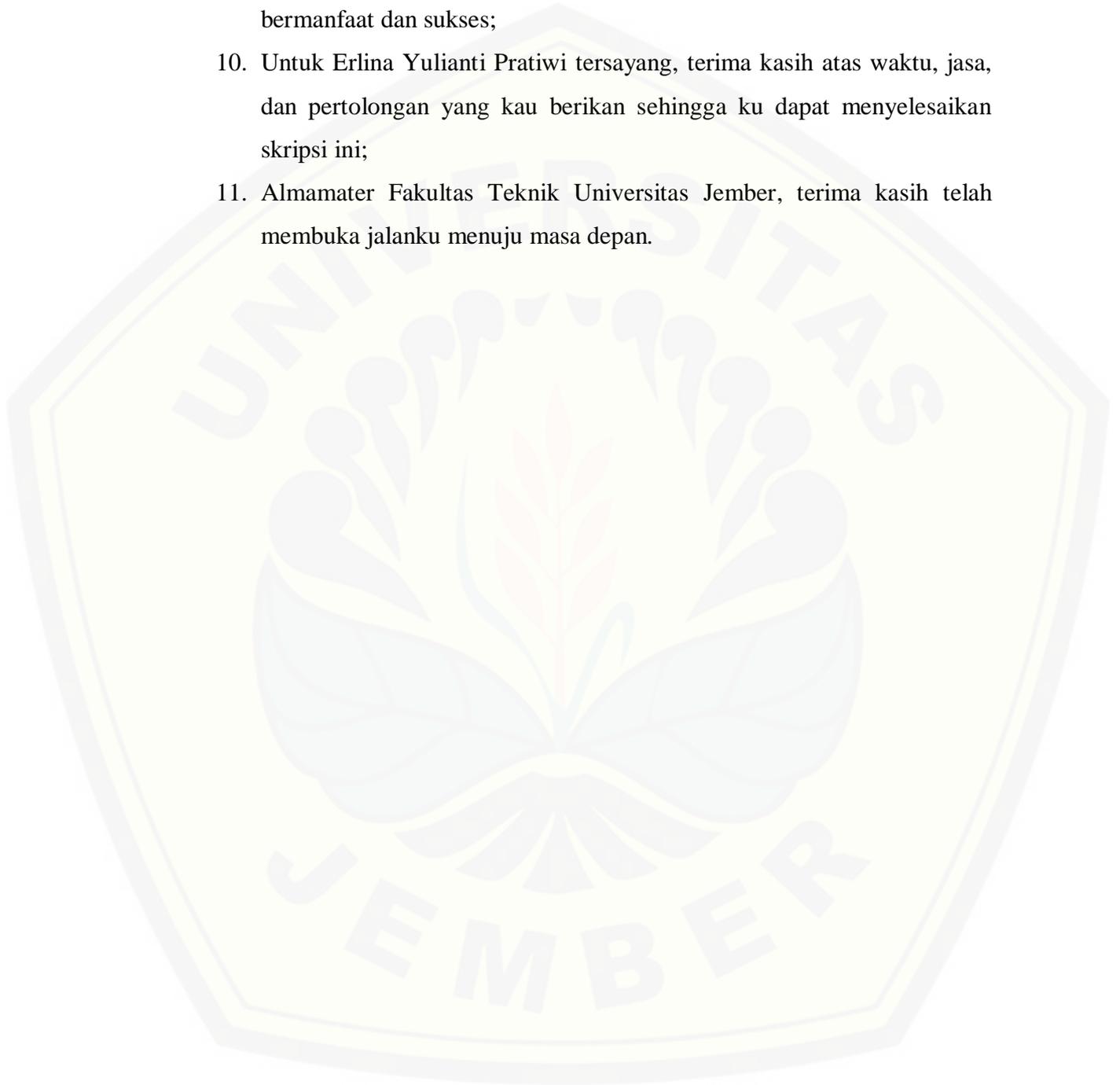
2015

PERSEMBAHAN

Skripsi ini merupakan sedikit permulaan dari kesuksesanku dan kuharap membawaku menuju kesuksesan yang selanjutnya dalam pencapaian hidupku. Tenaga, waktu dan pikiran yang telah kucurahkan, demikian saya ingin mempersembahkan skripsi ini kepada :

1. Allah SWT yang telah memberiku kehidupan yang istimewa dan berarti, serta atas rahmat dan hidayah-Nya dalam merampungkan skripsi ini. Dengan petunjuk-Mu aku menjadi orang yang bermakna;
2. Ibunda Munik Narjis dan Ayahanda Boni Syahrizal yang tercinta, terima kasih atas didikan, doa dan kasih sayangmu yang tiada henti hingga saat ini. Keinginan terbesarku adalah melihat senyum kalian dan memenuhi keinginan kalian yang terpendam;
3. Saudara kandungku Tiara dan Farhan, terima kasih atas dukungan dan semangat yang kalian berikan selama ini;
4. Dosen Pembimbing Skripsi, Bapak Bambang Sudjanarko dan Bapak Ghozali, terima kasih atas bimbingannya yang dipenuhi ketekunan dan kesabaran sehingga ku dapat menyelesaikan skripsi ini;
5. Untuk Bapak Triwahju dan Bapak Azmi Saleh, terima kasih atas waktu dan pengorbanan yang telah diberikan;
6. Keluarga Besar Teknik Elektro 2010, yang tidak dapat kusebutkan satu per satu, aku bangga menjadi bagian dari kalian, terima kasih atas kesempatan bertemu dengan kalian, orang-orang yang luar biasa;
7. SOKIT, teman-temanku sekelas seperjuangan dari SMA, terima kasih telah memberi warna dalam hidupku dengan kebahagiaan dan kebaikan hati kalian;
8. Guru-guru TK kartini 2, SD Al-Furqan, SMPN 2 Jember, dan SMAN 1 Jember, Seluruh Dosen Fakultas Teknik, terima kasih atas ilmu dan kasih sayang yang diberikan. Aku bukanlah aku tanpa kalian, pahlawan tanpa tanda jasa;

9. Rekan- Rekan-ku, Mbak Mona, Febrian, Mas Deni, Fendy, Pak Iwan, Pak Hendra, Pak Pras, Pak Rudy, terima kasih telah memberi pengalaman dan mengajarkanku untuk menjadi manusia yang bermanfaat dan sukses;
10. Untuk Erlina Yulianti Pratiwi tersayang, terima kasih atas waktu, jasa, dan pertolongan yang kau berikan sehingga ku dapat menyelesaikan skripsi ini;
11. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember, terima kasih telah membuka jalanku menuju masa depan.



MOTTO

Bila kau tak mau menanggung lelahnya belajar, maka kau akan menanggung perihnya kebodohan

(Imam Syafi'i)

Kejujuran adalah hadiah yang mahal. Jangan harapkan itu dari orang-orang yang murahan

(Warren Buffet)

Sebaik-baik manusia adalah yang bermanfaat bagi orang lain.

(Nabi Muhammad SAW)

Kesuksesan adalah mendapatkan apa yang kau inginkan, Kebahagiaan adalah menginginkan apa yang telah kamu dapat.

(Dale Carnegie)

Jangan ceritakan mimpimu kepada orang lain, Buktikanlah!

(Anonim)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : M. Husni Farabi

NIM : 101910201022

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa proyek skripsi yang berjudul **Sistem Kontrol Generator Induksi Dengan Beban Komplemen Berbasis PID Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro** adalah hasil karya saya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan keberanan isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian saya buat pernyataan ini dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan tanpa paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, April 2015

Yang menyatakan,

M. Husni Farabi

NIM 101910201022

SKRIPSI

**SISTEM KONTROL GENERATOR INDUKSI DENGAN BEBAN
KOMPLEMEN BERBASIS PID
PADA PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO**

Oleh:

M. Husni Farabi

NIM 101910201022

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Ir. Bambang Sujanarko M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : H.R.B. Moch. Gozali, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Sistem Kontrol Generator Induksi Dengan Beban Komplemen Berbasis PID Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Kamis, 16 April 2015

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji.

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Ir. Bambang Sujanarko, MM.

H.R.B. Moch. Gozali, S.T., M.T.

NIP 19631201 199402 1 002

NIP 19690608 199903 1 002

Penguji I,

Penguji II,

Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T.

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

NIP 19700404 199601 1 001

NIP. 19710402 200312 1 001

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik,

Ir. Widyono Hadi, M.T.

NIP 19610414 198902 1 001

SISTEM KONTROL GENERATOR INDUKSI DENGAN BEBAN
KOMPLEMEN BERBASIS PID
PADA PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO

M. Husni Farabi

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

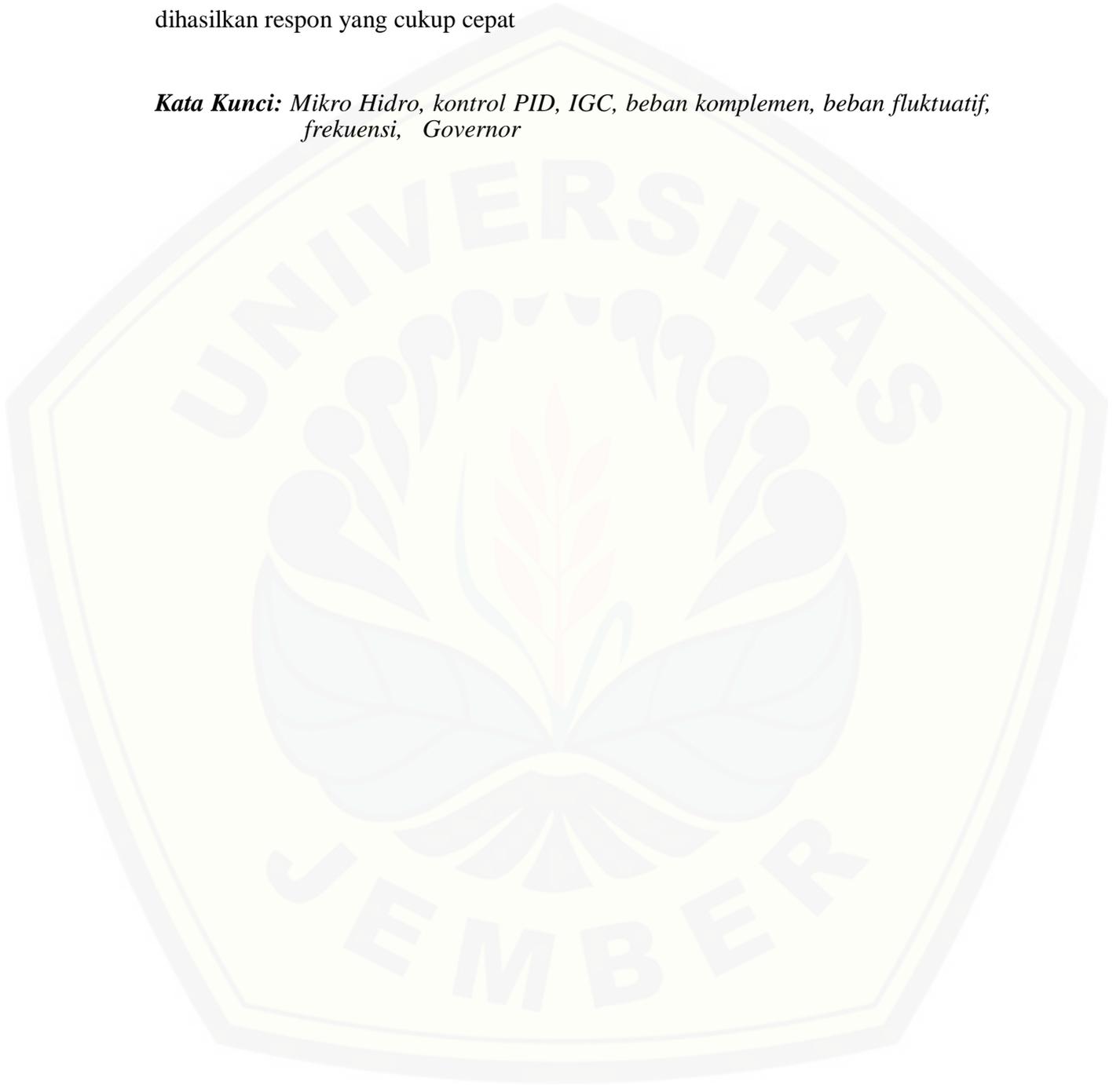
Seiring dengan pertambahan jumlah penduduk, maka permintaan terhadap kebutuhan energi juga meningkat, sementara cadangan energi yang dimiliki semakin terbatas dan menipis baik dalam hal kuantitas maupun kualitasnya. Hal ini yang mendorong perlu adanya konservasi dan diversifikasi energi. Pembangkit Listrik Mikrohidro merupakan salah bentuk pembangkit energi alternatif dengan tenaga air.

Secara umum, suatu pembangkit listrik tenaga mikrohidro menggunakan dua sistem, yaitu pengaturan frekuensi melalui *governor* dengan mengatur input air yang masuk dan pengaturan frekuensi dengan beban secara elektronik. Penggunaan dari *governor* ternyata kurang menguntungkan karena kurang ekonomis dimana harganya hampir sama bahkan melebihi harga turbin generator.

Kekurangan yang lain adalah mengontrol aliran air secara langsung akan menghasilkan reaksi yang lambat bila beban berubah dengan cepat. Untuk itu diperlukan desain pengontrolan beban secara elektronik yang dilengkapi dengan algoritma dengan harapan dapat menghemat biaya dan tingkat respons yang baik, oleh karena itu perlu dilengkapi dengan teknologi yang diharapkan dapat beradaptasi dengan perubahan beban dengan lebih cerdas terutama pada aplikasi dengan beban yang berubah-ubah. Sistem pengaturan beban secara elektronik atau lebih dikenal dengan sebutan IGC (Induction Generator Control) yang dilengkapi PID bekerja dengan mengatur daya yang disalurkan ke beban komplemen setiap terjadi perubahan frekuensi akibat perubahan beban pada beban utama konsumen sehingga terjadi keseimbangan antara daya turbin (daya input) dan daya beban

(daya output). Mode aksi kontroler PID merupakan kombinasi dari aksi pengontrol proportional, integral dan derivatif, menggabungkan ketiga sifat dan karakteristik yang dimiliki oleh ketiga aksi pengontrol tersebut sehingga dihasilkan respon yang cukup cepat

Kata Kunci: Mikro Hidro, kontrol PID, IGC, beban komplemen, beban fluktuatif, frekuensi, Governor



*INDUCTION GENERATOR CONTROL SYSTEM WITH BASED PID
LOAD COMPLEMENT
IN MICRO HYDRO POWER GENERATION*

M. Husni Farabi

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Universitas Jember*

ABSTRACT

Along with population growth, the demand for energy needs increase, while energy reserves is limited and depleting both in terms of quantity and quality. This led the need for conservation and energy diversification. Micro Hydro is one form of alternative energy generation by hydropower. In general, a micro hydro power plant uses two systems, namely the frequency setting by the governor to regulate the incoming water input and frequency settings with the electronic load. The use of the Governor was less favorable due to less economical in which the price is almost the same even exceed the price of the turbine generator. Other deficiencies that are controlling the water flow directly will produce a slow reaction when the load is changing rapidly. It is necessary for the design of electronic load control that comes with the algorithm can save costs and a good response rate, therefore it needs to be equipped with technology that is expected to adapt to changes in the load with more precisely, especially in applications with unlinear loads. Electronic load control system, or better known as the IGC (Induction Generator Control) equipped PID-base works by regulating the power supplied to the load complement each frequency changes due to changes in load on the main burden of the consumer so that there is a balance between the power turbine (power input) and load power (power output). The Model of PID controller is a combination of proportional control action, integral and derivative, combining these three properties and characteristics

possessed by all three of the controller action that produced fast enough response system.

Keywords: *Micro-hydro, PID control, IGC, complement load, load fluctuations, frequency, Governor*



RINGKASAN

Sistem Kontrol Generator Induksi Dengan Beban Komplemen Berbasis PID Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro; M. Husni Farabi; 101910201022; 100 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan sumber daya alam yang kaya, namun belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu sumber daya yaitu sumber daya energi. Indonesia merupakan negara dengan sumber daya energi yang sangat besar baik itu sektor fosil maupun non-fosil. Seiring dengan pertambahan jumlah penduduk, maka permintaan terhadap kebutuhan energi juga meningkat, sementara cadangan energi yang dimiliki semakin terbatas dan menipis baik dalam hal kuantitas maupun kualitasnya.

Hal ini yang mendorong perlu adanya konservasi dan diversifikasi energi. Berdasarkan informasi-informasi tersebut, maka dibutuhkan pengembangan sumber energi alternatif yang dapat mencukupi kebutuhan manusia, terutama seperti Pembangkit Listrik Mikrohidro. Pembangkit Listrik Mikrohidro merupakan salah bentuk pembangkit energi alternatif dengan tenaga air sebagai penggerak dengan kapasitas 5 kW hingga 1 MW. Secara umum, suatu pembangkit listrik tenaga mikrohidro menggunakan dua sistem, yaitu pengaturan frekuensi melalui *governor* dengan mengatur input air yang masuk dan pengaturan frekuensi dengan beban secara elektronik. Penggunaan dari *governor* ternyata kurang menguntungkan karena kurang ekonomis dimana harganya hampir sama bahkan melebihi harga turbin generator. Kekurangan yang lain adalah mengontrol aliran air secara langsung akan menghasilkan reaksi yang lambat bila beban berubah dengan cepat.

Untuk itu diperlukan desain pengontrolan beban secara elektronik yang dilengkapi dengan algoritma dengan harapan dapat menghemat biaya dan tingkat respons yang lebih baik, oleh karena itu perlu dilengkapi dengan teknologi yang

diharapkan dapat beradaptasi dengan perubahan beban dengan lebih cerdas terutama pada aplikasi dengan beban yang berubah-ubah. Sistem pengaturan beban secara elektronik atau lebih dikenal dengan sebutan IGC (Induction Generator Control) yang dilengkapi PID bekerja dengan mengatur daya yang disalurkan ke beban komplemen setiap terjadi perubahan frekuensi akibat perubahan beban pada beban utama konsumen sehingga terjadi keseimbangan antara daya turbin (daya input) dan daya beban (daya output). Mode aksi kontroler PID merupakan kombinasi dari aksi pengontrol proportional, integral dan derivatif, menggabungkan ketiga sifat dan karakteristik yang dimiliki oleh ketiga aksi pengontrol tersebut sehingga dihasilkan respon yang cukup cepat dan terjangkau.

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim

Puji Syukur kehadiran ALLAH SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sistem Kontrol Generator Induksi Dengan Beban Komplemen Berbasis PID Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Program Studi Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu tersusunnya skripsi ini, khususnya kepada

1. Bapak Ir. Widyono Hadi, MT. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Dr. Triwahju Hardianto S.T., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
3. Bapak Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak H.R.B. Moch. Gozali, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatiannya guna memberikan pengarahan dan bimbingan demi terselesaikannya penulisan skripsi ini.
4. Bapak Suprihadi Prasetyono, ST., M.T. dan Bapak Dr, Bambang Sri Kaloko, S.T, M.T, selaku Tim Penguji Skripsi yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan pengarahan dan koreksi demi terselesaikannya penulisan skripsi ini.
5. Ibunda Munik Narjis dan Ayahanda Boni Syahrizal yang tercinta, terima kasih atas didikan, doa dan kasih sayangmu yang tiada henti hingga saat ini. Keinginan terbesarku adalah melihat senyum kalian dan memenuhi keinginan kalian yang terpendam

6. Saudara kandungku Tiara dan Farhan, terima kasih atas dukungan dan semangat yang kalian berikan selama ini
7. Untuk Erlina Yulianti Pratiwi tersayang, terima kasih atas waktu, jasa, dan pertolongan yang kau berikan sehingga kudapat menyelesaikan skripsi ini;
8. Keluarga Besar Teknik Elektro 2010 yang tidak dapat kusebutkan satu per satu, aku bangga menjadi bagian dari kalian, terima kasih atas kesempatan bertemu dengan kalian, orang-orang yang luar biasa

Semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya untuk disiplin ilmu teknik elektro, kritik dan saran diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan proyek skripsi ini dan diharapkan dapat dikembangkan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Jember, April 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
RINGKASAN	xii
PRAKATA	xiv
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR GAMBAR	xx
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Batasan Masalah	3
1.3 Perumusan Masalah	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	3
1.4.1 Tujuan	3
1.4.2 Manfaat	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pembangkit Listrik Mikrohidro	5
2.1.1 Prinsip Kerja PLTMH	7
2.1.2 Komponen Utama Pembangkit Mikrohidro	10
2.2 PID (<i>Proportional Integral Derivatives</i>)	30
2.2.1 Proportional	31
2.2.2 Pengontrol Integral	33

2.2.3	Pengontrol Derivative	35
2.3	Tuning atau Penalaan Parameter Pengontrol PID	36
2.4	Metode Zieeger – Nichols	37
2.4.1	Metode Isolasi.....	38
2.4.2	Metode Kurva Reaksi.....	38
BAB 3.	METODE PENELITIAN	40
3.1	Jenis Penelitian	40
3.1.1	Tahap Penelitian	40
3.2	Alat dan Bahan	42
3.3	Diagram Alur Tugas Akhir	43
3.4	Pemodelan Sistem Pembangkit Mikrohidro.....	44
3.5	Pemodelan Turbin Air	45
3.6	Pemodelan Generator	46
3.7	Pemodelan Kapasitor	49
3.8	Pemodelan Sistem Pengaturan Generator.....	50
3.8.1	Sistem Regulator.....	49
3.8.2	Pemodelan Switching PWM	50
3.9	Pemodelan Beban.....	52
3.10	Pemodelan PID	53
3.10.1	Perancangan Kontrol PID.....	53
3.10.2	Penentuan Konfigurasi Nilai K_p , K_i dan K_d	54
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1	Pemodelan Mesin Induksi Sebagai Generator.....	56
4.2	Pengujian Generator Induksi Tanpa Beban Komplemen	60
4.3	Pengujian Generator Induksi dengan Beban Berubah Tanpa Beban Komplemen	67
4.4	Pengujian Generator Induksi dengan Beban Komplemen Menggunakan Kendali PWM.....	80
4.5	Identifikasi Sistem dan Penentuan Konstanta Kontrol PID	82
4.6	Pengujian Generator Induksi dengan Beban Komplemen dan	

Kontrol PID 88

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Klasifikasi Jenis turbin untuk PLTMH	11
3.1 Tabel Perencanaan Penelitian	40
3.2 Tabel Spesifikasi Generator Induksi	47
4.1 Tabel Spesifikasi Mesin Induksi sebagai Generator	59
4.2 Penentuan Nilai Kapasitor pada Generator Induksi Beban Penuh 4 kW	60
4.3 Hasil Data Simulasi Generator Induksi Sebagai Generator dengan Torsi Masukan 15 Nm	62
4.4 Hasil Data Generator Induksi dengan Beban Berubah Tanpa Beban Komplemen.....	68
4.5 Hasil Data Generator Induksi dengan Beban Komplemen menggunakan PWM.....	81
4.6 Tuning PID dengan Metode Kurva Reaksi.....	84
4.7 Hasil Simulasi Generator Induksi dengan Kontrol PID dan Tanpa Kontrol PID (C=3500 Var).....	97

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
2.1	Skema Pembangkit Tenaga Listrik Mikrohidro.....	7
2.2	Karateristik Input – Output Pembakit Listrik Mikrohidro	8
2.3	Penampakan Turbin <i>Crossflow</i>	13
2.4	Sketsa Rotor Sangkar	16
2.5	Stator pada Mesin Induksi yang Menunjukkan Kumparan Stator.....	17
2.6	Konstruksi Motor Induksi Sebagai Generator Rotor Sangkar	17
2.7	Komponen Stator Mesin Induksi Tiga Fase	18
2.8	Mesin Induksi Satu Kumparan Stator dan Satu Kumparan Roto	19
2.9	Karakteristik Torsi-Kecepatan pada Mesin Induksi Memperlihatkan Wilayah Operasi Generator dan Motor (Lihat torsi <i>pushover</i>)	21
2.10	Sebuah Generator Induksi Bereksitasi Sendiri dengan Bank Kapasitor untuk Mensuplai Daya Reaktif.....	22
2.11	Plot Tegangan Vs Arus Seperti pada Frekuensi Tertentu	24
2.12	Karakteristik Tegangan-Arus Terminal Generator Induksi Untuk Beban dengan Faktor Daya <i>Lagging</i> yang Konstan	25
2.13	Skema Pengaturan Beban dengan Beban Komplemen	26
2.14	Blok Diagram <i>Induction Generator Controller</i> secara Umum.....	28
2.15	Contoh Susunan Thyristor Pengontrol Beban Komplemen	29
2.16	Diagram Blok Kontroler <i>proportional</i>	31
2.17	<i>Proportional Band</i> dari Pengontrol <i>proportional</i> Tergantung pada Penguatan.....	32
2.18	Kurva Sinyal Kesalahan $e(t)$ Terhadap t Pada Pembangkit Kesalahan Nol.....	33
2.19	Blok Diagram Hubungan Antara Besaran Kesalahan dengan Pengontrol <i>integral</i>	34
2.20	Perubahan Keluaran sebagai Akibat Penguatan dan Kesalahan	35

2.21	Kurva Waktu Hubungan <i>input-output</i> Pengontrol <i>Derivative</i>	36
2.22	Sistem Untaian Tertutup dengan Alat pengontrol <i>proporsional</i>	37
2.23	Kurva Respon <i>sustain oscillation</i>	39
2.24	Respons Tangga Satuan Sistem	39
2.25	Kurva Respons Berbentuk S.....	39
3.1	Blok Diagram Pemodelan Sistem	45
3.2	Penampang <i>runner</i> Turbin <i>crossflow</i>	46
3.3	Blok Diagram Generator Induksi	46
3.4	Blok Diagram Kapasitor	50
3.5	Blok Diagram Discrete Frequency Regulator	50
3.6	Pemodelan Switching PWM pada Simulasi Generator Induksi	51
3.7	Hasil Modulasi Gelombang Switching PWM	52
3.8	Blok Beban Diagram Tiga Fase	52
3.9	Blok Diagram Subsistem <i>3-Phase Locked Loop</i> pada IGC.....	53
3.10	Blok Parameter pada PID <i>controller</i>	54
4.1	Sistem Elektris Mesin Induksi Rotor Sangkar pada Simulasi	56
4.2	Skema Model Generator Induksi Berpenguat Sendiri.....	57
4.3	Parameter Generator Induksi pada simulasi	58
4.4	Blok Diagram Simulasi Generator Induksi Tanpa Beban Komplemen.....	61
4.5	Profil Grafik Vrms dan Frekuensi pada Beban Resistif 1 kW (C=2000 Var)	64
4.6	Profil Grafik Vrms dan Frekuensi pada Beban Resistif 2 kW (C=2500 Var)	65
4.7	Profil Grafik Vrms dan Frekuensi pada Beban Resistif 4 kW (C=3500 Var)	66
4.8	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 4 kW ke 1 kW (C=2000 Var).....	69
4.9	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 4 kW ke 1 kW (C=3500 Var).....	70

4.10	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 4 kW ke 1 kW (C=5000 Var).....	71
4.11	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 2 kW ke 4 kW (C=2000 Var).....	72
4.12	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 2 kW ke 4 kW (C=3500 Var).....	73
4.13	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 2 kW ke 4 kW (C=5000 Var).....	74
4.14	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 4 kW ke 3 kW (C=2000 Var).....	75
4.15	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 4 kW ke 3 kW (C=3500 Var).....	76
4.16	Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi Beban Resistif Variatif 4 kW ke 3 kW (C=5000 Var).....	77
4.17	Contoh Grafik Frekuensi Beban Resistif 4 kW dengan Beban Komplemen.....	81
4.18	Pemodelan PID pada Pengatur Beban Komplemen.....	83
4.19	Percobaan Tuning $K_p = 1$, $K_i = 0$, $K_d = 0$	84
4.20	Percobaan Tuning $K_p = 10$, $K_i = 0$, $K_d = 0$	85
4.21	Respon Sistem Metode Kurva Reaksi dengan $K_p = 10$	86
4.22	Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resisitif 0 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	88
4.23	Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resisitif 1 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	89
4.24	Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resisitif 2 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	89
4.25	Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resisitif 3 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol	

	dan Kontrol PID	90
4.26	Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 4 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	90
4.27	Profil Tegangan Rms Generator Induksi Beban Resistif 0 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	92
4.28	Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 1 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	93
4.29	Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 2 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	94
4.30	Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 3 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	95
4.31	Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 4 kW (C=3500 Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID	96

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan sumber daya alam yang kaya, namun belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu sumber daya yaitu sumber daya energi. Indonesia merupakan negara dengan sumber daya energi yang sangat besar baik itu sektor fosil maupun non-fosil. Energi fosil antara lain energi batubara, minyak bumi, gas alam, dan *Coal Bed Methane* (CBM). Energi non fosil terdiri dari panas bumi, tenaga angin, tenaga surya, tenaga air, mikrohidro, dan bahan bakar nabati. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2011) terjadi peningkatan penggunaan energy setiap tahunnya. Komponen yang paling banyak digunakan adalah minyak mentah diikuti oleh gas alam dan batubara. Setiap tahunnya terjadi kenaikan sekitar 22% pada setiap komponen energi primer, terkecuali tenaga air yang mencapai 95% [Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2011)]. Seiring dengan pertambahan jumlah penduduk, maka permintaan terhadap kebutuhan energi juga meningkat, sementara cadangan energi yang dimiliki semakin terbatas dan menipis baik dalam hal kuantitas maupun kualitasnya. Hal ini yang mendorong perlu adanya konservasi dan diversifikasi energi.

Listrik merupakan salah satu unsur yang penting dalam kehidupan manusia. Seperti yang diungkapkan oleh Kadir (1995) bahwa energi listrik mempunyai peranan sebagai pendorong perekonomian. Hal ini mempunyai dua sebab, pertama adalah karena energi listrik merupakan bahan bakar bagi industri. Tersedianya tenaga listrik akan memudahkan perkembangan industri, demikian juga dengan pertumbuhan ekonomi. Kedua adalah dengan adanya penerangan listrik memungkinkan manusia belajar di malam hari, sehingga energi listrik merupakan faktor penting dalam mencerdaskan masyarakat, yang berperan pula pada produktivitas bangsa dan secara langsung mempengaruhi keadaan perekonomian. Khusus pada daerah terpencil, pemerintah memiliki kewajiban

untuk menyediakan energi listrik bila daerah tersebut berpotensi bagi sumber energi alternatif terbarukan

Berdasarkan informasi-informasi tersebut, maka dibutuhkan pengembangan sumber energi alternatif yang dapat mencukupi kebutuhan manusia, terutama seperti Pembangkit Listrik Mikrohidro. Pembangkit Listrik Mikrohidro merupakan salah bentuk pembangkit energi alternatif dengan tenaga air sebagai penggerak dengan kapasitas 5 kW hingga 1 MW. Pembangkit listrik Tenaga Mikrohidro saat ini telah banyak dikembangkan di Indonesia, terutama daerah yang terpencil yang sulit dijangkau oleh PLN Indonesia sehingga diharapkan dengan adanya PLTMH ini maka masyarakat desa dapat secara mandiri menyuplai kebutuhan listriknya sendiri. Pengembangan dari Mikrohidro diperlukan agar efektivitas dan efisiensi kerjanya dapat dioptimalkan.

Secara umum, suatu pembangkit listrik tenaga mikrohidro menggunakan dua sistem, yaitu pengaturan frekuensi melalui *governor* dengan mengatur input air yang masuk dan pengaturan frekuensi dengan beban secara elektronik. Penggunaan dari *Governor* ternyata kurang menguntungkan karena kurang ekonomis dimana harganya hampir sama bahkan melebihi harga turbin generator (Hasan, Ahmad, 2006). Kekurangan yang lain adalah mengontrol aliran air secara langsung akan menghasilkan reaksi yang lambat bila beban berubah dengan cepat (Sandhy, Ardha, 2009). Untuk itu diperlukan desain pengontrolan beban secara elektronik yang dilengkapi dengan algoritma dengan harapan dapat menghemat biaya dan tingkat respons yang baik, oleh karena itu perlu dilengkapi dengan teknologi yang diharapkan dapat beradaptasi dengan perubahan beban dengan lebih cerdas terutama pada aplikasi dengan beban yang berubah-ubah. Sistem pengaturan beban secara elektronik atau lebih dikenal dengan sebutan IGC (*Induction Generator Control*) yang dilengkapi PID bekerja dengan mengatur daya yang disalurkan ke beban komplemen setiap terjadi perubahan frekuensi akibat perubahan beban pada beban utama konsumen sehingga terjadi keseimbangan antara daya turbin (daya input) dan daya beban (daya output). Mode aksi kontroler PID merupakan kombinasi dari aksi pengontrol proportional,

integral dan derivatif, menggabungkan ketiga sifat dan karakteristik yang dimiliki oleh ketiga aksi pengontrol tersebut sehingga dihasilkan respon yang cukup cepat

1.2 Batasan Masalah

Adapun pembahasan masalah dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Generator yang digunakan adalah mesin induksi sebagai generator (Asinkron)
2. Masukan dari generator induksi merupakan masukan torsi yang bernilai tetap
3. Beban konsumen yang digunakan adalah beban resistif
4. Beban komplemen yang digunakan adalah beban resistif bernilai 4 kW
5. Simulasi menggunakan software Matlab 7.10

1.3 Perumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka muncullah beberapa masalah yang dapat dirumuskan antara lain :

1. Bagaimana memodelkan Sistem Pembangkit Mikrohidro pada jaringan terisolasi dengan berbasis PID ?
2. Bagaimana menganalisis serta mengendalikan sistem kendali PID yang telah dimodelkan agar optimal?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah:

- a. Memberikan informasi mengenai identifikasi model pengaturan beban komplemen pada Sistem Mikrohidro Jaringan Terisolasi
- b. Mengatur Sistem Mikrohidro Jaringan Terisolasi berbasis PID agar optimal
- c. Sebagai bahan rujukan untuk penelitian yang terkait.

1.4.2 Manfaat

Adapun manfaat yang diperoleh dari skripsi ini adalah sebagai berikut:

- a. Mendapatkan tinjauan yang berguna untuk membantu memperbaiki serta meningkatkan kinerja dari PLTMH.
- b. Sebagai bahan pertimbangan dalam membuat kebijakan dan keputusan yang berkaitan dengan pembangunan PLTMH.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Mikrohidro

PLTMH atau bisa disebut sebagai mikrohidro adalah suatu pembangkit listrik kecil yang menggunakan tenaga air di bawah kapasitas 200 kW yang dapat berasal dari saluran irigasi, sungai atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjun (*head*) dan debit air. Umumnya PLTMH adalah pembangkit listrik tenaga air jenis yang diperoleh tidak dengan cara membangun bendungan besar, tetapi dengan mengalihkan sebagian aliran air sungai ke salah satu sisi sungai dan menjatuhkannya lagi ke sungai yang sama pada suatu tempat dimana head yang diperlukan sudah diperoleh. Dengan melalui pipa pesat air diterjunkan untuk memutar turbin yang berada di dalam rumah pembangkit. Energi mekanik dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator. PLTMH sebagai sumber energi terbarukan dikembangkan di banyak negara termasuk Indonesia, karena beberapa keuntungan yaitu:

- a. Berdasarkan aspek teknologi terdapat keuntungan dan kemudahan pada pembangunan dan pengelolaan PLTMH dibandingkan pembangkit listrik jenis lain, yaitu:
 - 1) Konstruksinya relatif sederhana
 - 2) Mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang
 - 3) Dapat dioperasikan dan dirawat oleh masyarakat desa
 - 4) Biaya operasi dan perawatan rendah.
- b. Selain dapat menyediakan listrik untuk kebutuhan rumah tangga, kehadiran PLTMH juga dapat menyediakan energi yang cukup besar dan dapat dimanfaatkan kegiatan-kegiatan produktif terutama pada siang hari ketika beban listrik rendah. Berdasarkan sudut pandang ini kelebihan PLTMH yaitu:
 - 1) Meningkatkan produktivitas dan aktivitas ekonomi masyarakat melalui munculnya atau meningkatnya produktivitas industri kecil rumah tangga
 - 2) Menciptakan lapangan-lapangan kerja baru di desa.

- c. Pengoperasian PLTMH menuntut adanya suatu lembaga tersendiri yang menjalankan fungsi-fungsi pengelolaan dan perawatan. Lembaga tersebut akan menambah keberadaan lembaga yang sudah ada di desa dan secara tidak langsung dapat menjadi media pengembangan kapasitas masyarakat dalam pengelolaan kelembagaan dan pelayanan publik.
- d. PLTMH ramah terhadap lingkungan karena tidak menghasilkan polusi udara atau limbah lainnya dan tidak merusak ekosistem sungai. Penyediaan listrik menggunakan PLTMH akan mengurangi pemakaian bahan bakar fosil (misalnya minyak tanah dan solar) untuk penerangan dan kegiatan rumah tangga lainnya. Selain itu tambahan manfaat langsung yang dirasakan oleh masyarakat dari sumberdaya air diharapkan dapat mendorong masyarakat untuk memelihara daerah tangkapan air demi menjamin pasokan air bagi kelangsungan operasi PLTMH (Octaviani,Anggi, 2012)

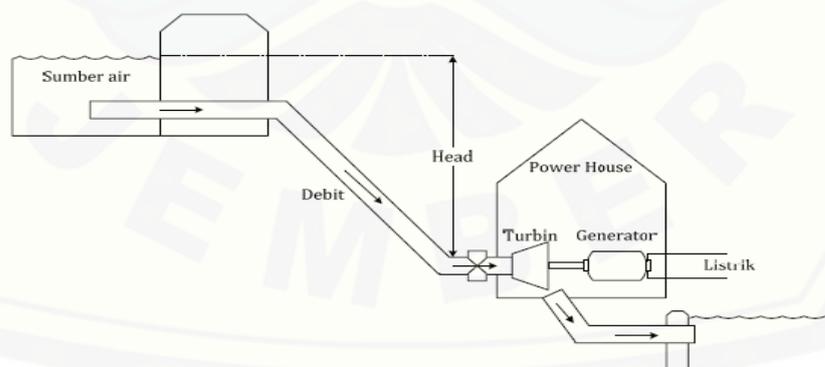
Indonesia memiliki potensi alam yang sangat luas baik dalam sumber daya alam hasil bumi maupun yang masih berpotensi untuk diolah dan dikembangkan. Potensi energi listrik merupakan salah satu yang banyak tersebar dan perlu untuk digalakkan terutama untuk daerah terpencil dan pedesaan yang jauh dari jaringan PLN. Mengingat kapasitas dan jaringannya yang terkadang tidak melingkupi seluruh daerah, sedangkan peningkatan kebutuhan dari masyarakat terhadap listrik kian waktu terus bertambah tahun ke tahun maka diharapkan terus diadakannya suatu pengembangan yang tiada henti untuk penggalian sumber energi baru demi kesejahteraan yang merata di setiap tempat.

Di suatu sisi yang lain, dimana Kenaikan harga BBM juga telah mengurangi daya beli konsumen terutama masyarakat pedesaan dan masyarakat terpencil sehingga menyebabkan permasalahan-permasalahan baru yang dapat menurunkan tingkat ekonomi masyarakat desa. Diharapkan dengan adanya peningkatan dan pengembangan dari Pembangkit tenaga listrik dapat meringankan dan menjadikan mandiri masyarakat desa dan terpencil.

2.1.1 Prinsip Kerja PLTMH

PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan listrik. (Asidik, Nur, 2011). Pembangunan PLTMH perlu diawali dengan pembangunan bendungan untuk mengatur aliran air yang akan dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak PLTMH. Bendungan perlu dilengkapi dengan pintu air dan saringan sampah untuk mencegah masuknya kotoran atau endapan lumpur. Bendungan sebaiknya dibangun pada dasar sungai yang stabil dan aman terhadap banjir

Di dekat bendungan dibangun bangunan pengambilan (intake). Kemudian dilanjutkan dengan pembuatan saluran penghantar yang berfungsi mengalirkan air dari intake. Saluran ini dilengkapi dengan saluran pelimpah pada setiap jarak tertentu untuk mengeluarkan air yang berlebih. Saluran ini dapat berupa saluran terbuka atau tertutup. Di ujung saluran pelimpah dibangun kolam pengendap. Kolam ini berfungsi untuk mengendapkan pasir dan menyaring kotoran sehingga air yang masuk ke turbin relatif bersih. Saluran ini dibuat dengan dilengkapi casing yang berfungsi mengarahkan air ke runner. Pada bagian bawah casing terdapat pengunci turbin. Bantalan (bearing) terdapat pada sebelah kiri dan kanan poros dan berfungsi untuk menyangga poros agar dapat berputar dengan lancar.



Gambar 2.1 Skema Pembangkit Tenaga Listrik Mikrohidro

(Sumber: Muhammad, Anggi. 2008)

Daya poros dari turbin ini harus ditransmisikan ke generator agar dapat diubah menjadi energi listrik. Generator yang dapat digunakan pada mikrohidro adalah generator sinkron dan generator induksi namun pada penelitian ini menggunakan generator induksi.

Sistem transmisi daya ini dapat berupa sistem transmisi langsung (daya poros langsung dihubungkan dengan poros generator dengan bantuan kopling), atau sistem transmisi daya tidak langsung, yaitu menggunakan sabuk atau belt untuk memindahkan daya antara dua poros sejajar. Keuntungan sistem transmisi langsung adalah lebih kompak, mudah dirawat, dan efisiensinya lebih tinggi. Tetapi sumbu poros harus benar-benar lurus dan putaran poros generator harus sama dengan kecepatan putar poros turbin. Masalah ketidaklurusan sumbu dapat diatasi dengan bantuan kopling fleksibel.

Gearbox dapat digunakan untuk mengoreksi rasio kecepatan putaran. Sistem transmisi tidak langsung memungkinkan adanya variasi dalam penggunaan generator secara lebih luas karena kecepatan putar poros generator tidak perlu sama dengan kecepatan putar poros turbin. Jenis sabuk yang biasa digunakan untuk PLTMH skala besar adalah jenis flat belt, sedang V-belt digunakan untuk skala di bawah 20 kW. Komponen pendukung yang diperlukan pada sistem ini adalah pulley, bantalan dan kopling. Listrik yang dihasilkan oleh generator dapat langsung ditransmisikan lewat kabel pada tiang-tiang listrik menuju rumah konsumen

Karakteristik input-output dari pembangkit tenaga listrik mikrohidro menggambarkan hubungan antara penggerak *prime mover* (turbin air) yang berupa jumlah air yang disalurkan pada sudu turbin air dalam persamaan waktu dengan daya keluaran dari generator. Daya keluaran generator sebagai fungsi dari tinggi terjun dan debit air dinyatakan sebagai:

$$P = 9.8 \cdot Q_1 \cdot H \cdot \eta_T \cdot \eta_G \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

P_1 = Daya Keluaran Pembangkit (MW)

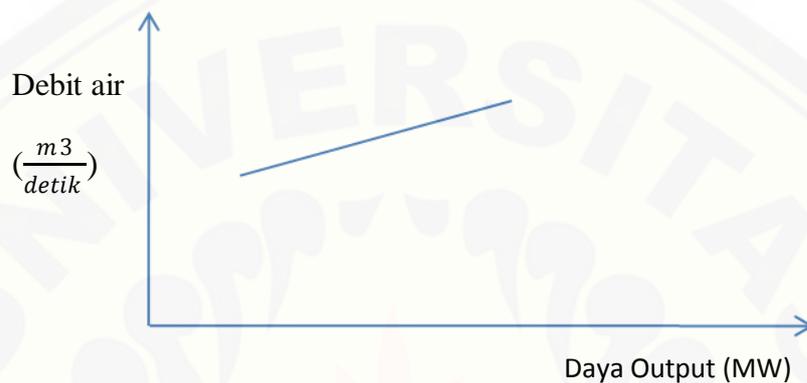
Q_1 = Debit air rata-rata ($m^3/detik$)

H = Tinggi air (*head*) m

η_T = Efisiensi Turbin

η_G = Efisiensi Generator

Untuk ketinggian air yang konstan bentuk karakteristik tersebut dapat digambarkan seperti pada gambar



Gambar 2.2 Karakteristik Input-Output Pembangkit Listrik Mikrohidro

Oleh karena air terjun dianggap konstan, maka besar debit air sebagai fungsi daya keluaran pembangkit dapat didekatkan dengan persamaan orde dua :

$$Q_1 = \alpha_1 + \beta_1 P_{hi} + \gamma_1 P_{hi}^2 \quad (2.2)$$

Keterangan

Q_1 =- Debit air rata-rata (m3/detik)

P_{hi} = Keluaran Pembangkit Hidro

$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ = Konstanta

Keluaran Daya ideal merupakan daya listrik yang dapat dihasilkan dengan asumsi semua komponen Pembangkit Mikrohidro terpasang tepat. Pembangkit Mikrohidro memiliki kelebihan dibanding pembangkit listrik fosil diantaranya bebas polusi, biaya operasional rendah, dan cocok untuk daerah terpencil dan pelosok. Debit air diperoleh dengan mengalikan luas penampang saluran air

dengan kecepatan air sedangkan tinggi jatuh air atau head dapat diukur dengan meteran

2.1.2 Komponen Utama Pembangkit Mikrohidro

Pada umumnya PLTM mempunyai tiga komponen utama yang masing-masing fungsinya sangat menentukan, yaitu : turbin air, generator, dan *governor* (IGC). Pada pembangkit, pengendalian putaran dimaksudkan untuk mengendalikan putaran (frekuensi) generator sehingga pengendalian putaran dalam hal ini diutamakan berfungsi sebagai pengendali frekuensi generator. Perubahan putaran (frekuensi) generator dapat disebabkan karena adanya perubahan daya penggerak. Jika daya air yang masuk ke turbin dibuat selalu tetap sehingga daya penggerak turbin selalu tetap, maka frekuensi dan respon generator akan menjadi fungsi dari beban. Agar frekuensi yang dihasilkan oleh generator besarnya selalu tetap, maka besar beban dari generator harus selalu tetap. Untuk itu diperlukan beban tiruan yang besar bebannya dapat diatur sesuai dengan pengurangan beban dari PLTM. Beban tiruan ini disebut beban komplemen. Pada suatu kondisi beban tertentu (misal pada beban sebesar 75% beban penuh), daya air yang masuk ke turbin diatur sehingga diperoleh putaran generator yang dikehendaki. Jika pada beban konsumen terjadi penurunan beban sebesar ΔI , maka beban komplemen akan dilewati arus yang rata-ratanya akan sebesar penurunan arus akibat turunnya beban konsumen (ΔI). Dengan demikian generator akan dibebani dengan total beban yang selalu konstan. (Sandy, Ardha.2009)

a. Turbin

Turbin merupakan bagian penting dari sistem mikro hidro yang menerima energi potensial dari air dan mengubahnya menjadi energi putaran (mekanik). kemudian energi mekanik ini akan memutar sumbu turbin pada generator. Terdapat beberapa jenis turbin menurut teknologinya, antara lain :

- 1) Turbin Tradisional, biasanya terbuat dari bambu atau kayu.

- 2) Turbin Modern, biasanya digunakan pada proyek – proyek PLTMH berdana besar. Turbin jenis ini yang paling banyak digunakan adalah turbin jenis Kaplan, Francis, Cross Flow, dan Pelton.
 - 3) Turbin Modifikasi, dibuat dengan memodifikasi jenis turbin yang telah ada di Indonesia, Balitbang telah membuat beberapa turbin jenis ini
- Berikut adalah beberapa contoh turbin yang biasa digunakan:

Tabel 2.1 Klasifikasi Jenis turbin untuk PLTMH (Kudip, 2002)

Tinggi Terjun (m)	Debit (m3/detik)	Kapasitas (KW)	Jenis Turbin
0.5 - 10	-	-	<i>Simple wood and metal wheel</i>
0.5 - 12	0.05 – 8	-	<i>Scheider hydro engine</i>
2 – 50	3 – 20	-	<i>Axial Flow :</i>
2 – 15	15 – 40	50- 5000	a. <i>Straflo</i>
1.25 - 25	3 – 25	150 – 3500	b. <i>Turbular</i>
			c. <i>Bulb</i>
1 – 70	3 – 40	-	<i>Kaplan</i>
8 – 300	0.3 – 20	500 – 5000	<i>France</i>
45 – 300	1 – 8	-	<i>Turgo</i>
1 – 200	0.03 – 9	50 – 1000	<i>Cross Flow, Banki, Michael, or Obserger</i>
45 – 1000	0.06 – 3	100 – 5000	<i>Pelton</i>

Diamter turbin dinyatakan dalam persamaan :

$$D = \frac{60 \times U1}{3.14 \times N} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan

D	= Diameter turbin m
U1	= Kecepatan turbin m/s
N	= kecepatan putaran turbin Rpm

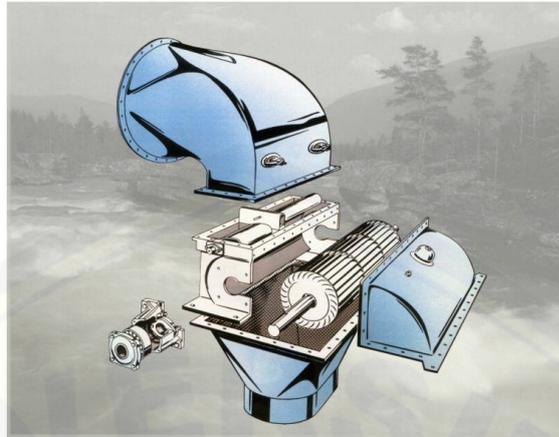
Spesifikasi turbin yang akan dievaluasi meliputi kecepatan spesifik dan diameter turbin. Jika kecepatan spesifik turbin telah diketahui maka dimensi turbin dapat diketahui melalui persamaan:

$$Ns = \frac{N \sqrt{P_{out \text{ turbin}}}}{H^{\frac{5}{4}}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

Ns	= Kecepatan spesifik
P out turbin	= Daya keluaran turbin, kW
H	= Head (m)

Pada Pembangkit Mikrohidro Suger memiliki data debit yang rendah dan tinggi terjun air sungai yang tidak terlalu tinggi sehingga turbin yang paling cocok dan efektif untuk pembangkit listrik Suger adalah turbin *Cross-flow* yang prinsipnya bekerja ketika aliran air mengenai bagian luar satu sisi sudu dan masuk serta mengenai sisi sudu seberangnya sehingga kinerja lebih efektif karena air mengenai sudu dua kali.



Gambar 2.3 Penampakan Turbin *Crossflow*

(Sumber: Dani, Aditya. 2010)

Bila debit air Q dan air terjun H , maka :

Kecepatan di sudu terluarnya:

$$V = C \sqrt{2Gh} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :

C : konstanta Turbin

Kecepatan tangensial Sudu :

$$U = V \cos \alpha$$

α : sudut masuk air terhadap sudu

Efisiensi Turbin:

$$\eta = 2CU1 \frac{2CU1}{V1} (1 + \psi) (\cos \alpha 1 - \frac{U1}{V1}) \dots \dots \dots (2.6)$$

Ψ : perbandingan kecepatan tangensial masuk dan keluar sudu

Efisiensi maksimum:

$$U1 = \frac{V1 \cos \alpha 1}{2} \dots \dots \dots (2.7)$$

Kecepatan putar turbin:

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} = \frac{60U}{\pi.D} \text{ (Rpm)} \dots\dots\dots(2.7)$$

D: Diameter turbin π

a. Generator Induksi

Generator induksi merupakan sejenis generator AC yang menerapkan prinsip motor induksi untuk menghasilkan daya karena karakteristiknya yang sama dengan motor, maka kecepatan medan putar dalam motor induksi sebagai generator dinyatakan oleh persamaan:

$$N_s = 120.f.P \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan:

- N_s = Kecepatan putar medan magnet
- f = frekuensi sumber daya (Hz)
- P = Jumlah Kutub mesin induksi

Generator induksi dioperasikan dengan menggerakkan rotornya secara mekanis lebih cepat daripada kecepatan sinkron sehingga menghasilkan nilai slip negatif. Untuk menghitung slip, dinyatakan dalam:

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

- s = slip
- n_s = kecepatan putar medan magnet
- n_r = kecepatan putar rotor

Motor induksi biasa umumnya dapat digunakan sebagai sebuah generator tanpa ada modifikasi internal. Alasan mengapa digunakan generator induksi untuk dianalisa karena generator induksi ini memiliki keunggulan dari segi harga dan

perawatannya selain itu konstruksinya yang sederhana rotor tanpa sikat (rotor sangkar), tidak memakai penguatan DC (Djoekardi, 1996: 2-3). Di negara maju dan berkembang dimana upaya konservasi energi merupakan suatu kebutuhan pemakaian generator induksi telah banyak dijumpai pada sistem pembangkit listrik tenaga mikrohidro, tenaga angin atau untuk menurunkan aliran gas bertekanan tinggi ke tekanan rendah.

Motor induksi yang digunakan sebagai generator adalah motor induksi sangkar tupai 1. Pada MISG (Motor Induksi sebagai Generator) yang bekerja stand-alone (terisolasi) diperlukan kapasitor untuk membangkitkan arus eksitasi. Dengan C sebagai konstanta perbandingan antara daya generator dengan daya nominal motor.

Proses perubahan motor induksi menjadi generator induksi membutuhkan daya reaktif atau daya magnetisasi untuk membangkitkan tegangan terminal keluaran. Disini yang berfungsi sebagai penyedia daya reaktif adalah kapasitor yang besarnya disesuaikan dengan daya reaktif yang dibutuhkan.

Kelebihan Generator Induksi:

- 1) Sempel dan Handal
- 2) Lebih murah dibandingkan dengan Generator Sinkron Konvensional
- 3) Butuh perawatan sedikit
- 4) Bisa diaplikasikan pada jaringan terisolasi pada frekuensi yang stabil
- 5) Harga material lebih murah karena penggunaan elektromagnet dibandingkan dengan Magnet permanen
- 6) Lebih tahan terhadap beban lebih (*Overload*)

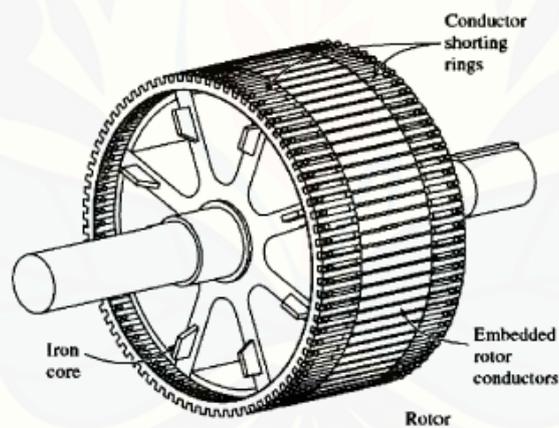
Kekurangan Generator Induksi

- 1) Membutuhkan Daya reaktif yang signifikan
- 2) Memiliki Faktor Daya yang buruk
- 3) Memiliki pengaturan tegangan dan frekuensi yang buruk

(Sumber: Khandelwa dkk, 2013)

a) Konstruksi Generator Induksi

Generator Induksi tentu saja memiliki konstruksi sama dengan motor induksi yang terdiri atas rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang bergerak sedangkan Stator adalah bagian yang diam (statis) dan memiliki kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnet pada kumparan rotor. Pada umumnya terdapat dua tipe karakteristik rotor pada mesin induksi yang dapat diletakkan di dalam stator. Yang pertama disebut sangkar rotor (Cage Rotor) dan lilit (Wound Rotor). Konstruksi sangkar rotor tersusun atas beberapa batangan logam yang dimasukkan melewati slot-slot yang ada pada rotor mesin induksi kemudian setiap bagian disatukan oleh cincin sehingga membuat batangan logam terhubung singkat dengan batangan logam yang lain. Sedangkan konstruksi rotor lilit adalah tipe rotor yang memiliki rotor terbuat dari lilitan yang sama dengan lilitan statornya.



Gambar 2.4 Sketsa Rotor Sangkar (Sumber: Chapman. 2005)

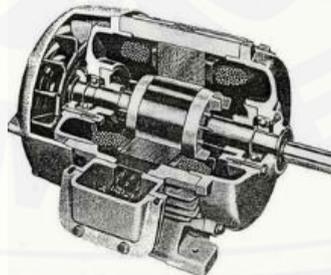


Gambar 2.5 Stator pada Mesin Induksi yang menunjukkan kumparan stator
(Sumber: Chapman. 2005)

Rotor merupakan bagian mesin induksi yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan kemudian diinduksikan ke rotor.

Konstruksi rotor mesin induksi terdiri dari beberapa bagian:

- (1) Inti rotor yaitu bahannya dari besi lunak dan baja silikon sama dengan inti stator
- (2) Alur, yaitu bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti. Alur merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan) rotor.
- (3) Belitan rotor, yaitu bahannya dari tembaga



Gambar 2.6 Konstruksi Motor Induksi Sebagai Generator Rotor Sangkar
(Sumber: Eko Prasetyo, 2009)

Stator adalah bagian yang terluar dari motor merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus fase. Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas Gambar (b). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi Gambar (a). Tiap lembaran besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fase dimana untuk mesin tiga fase belitan tersebut terpisah sejauh 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapisi

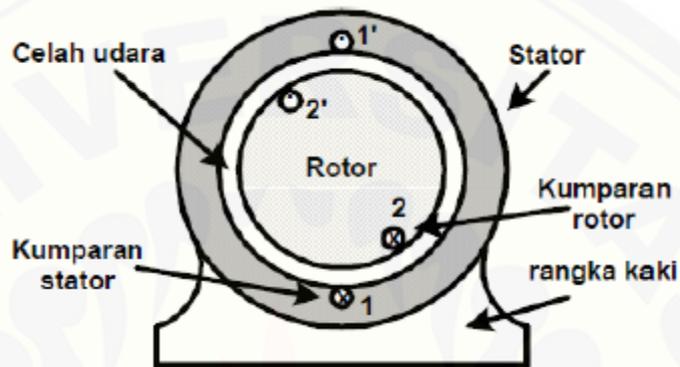
isolasi tipis, kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris. Dibawah ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan rotor yang telah didekatkan pada cangkang luar untuk mesin induksi tiga fase



Gambar 2.7 Komponen Stator Mesin Induksi Tiga Fase (a) Lempengan inti (b) Tumpukan inti dengan kertas isolasi pada beberapa alurnya
(Sumber: Muspida, Haqi. 2009)

Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Pada celah udara lewat fluks induksi stator yang memotong kumparan rotor sehingga menyebabkan rotor berputar. Celah udara

yang terletak antara stator dan rotor ini dapat diatur sedemikian rupa sehingga didapatkan kerja mesin induksi yang optimum. Bila celah udara antara stator dan rotor terlalu besar akan mengakibatkan efisiensi mesin induksi rendah sebaliknya bila jarak celah terlalu kecil, maka menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin. Contoh gambaran sederhana penempatan stator dan rotor mesin induksi diperlihatkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Mesin Induksi Satu Kumparan Stator dan Satu Kumparan Rotor (Sumber: Eko Prasetyo, 2009)

(1) Prinsip Kerja Mesin Induksi Tiga Fase

Jika pada belitan stator diberi tegangan tiga fasa, maka pada stator akan dihasilkan arus tiga fasa yang menghasilkan medan magnetik yang berputar dengan kecepatan sinkron.

$$N_s = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots(2.10)$$

Perputaran medan putar pada stator akan memotong batang-batang konduktor pada bagian rotor. Akibatnya pada rotor akan timbul tegangan induksi (ggl) sebesar $E_{2s} = 4,44 f_2 N_2$ (Untuk satu fasa) dimana E_{2s} adalah tegangan induksi saat rotor berputar. Karena pada rotor timbul tegangan induksi dan rotor merupakan rangkaian yang tertutup sehingga rotor akan menghasilkan arus (I). Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul beban kopel, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar

stator. Agar terinduksi diperlukan adanya perbedaan antara kecepatan medan putar stator (N_s) dan kecepatan putar rotor (N_r) yang dinyatakan dalam:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.11)$$

Nilai slip akan bernilai positif jika mesin induksi bekerja sebagai motor dan slip bernilai negatif jika mesin induksi bekerja sebagai generator. Apabila $N_s = N_r$ tegangan tidak terinduksi dan arus tidak mengalir melalui jangkar rotor. Yang tidak dihasilkan kopel. Kopel mesin akan ditimbulkan apabila N_r lebih kecil dari N_s . Berubahnya kecepatan mesin induksi mengakibatkan berubahnya nilai slip dari 100% start sampai 0% ketika diam. ($N_r = N_s$)

Hubungan frekuensi dengan slip dilihat sebagai berikut:

$$N_s = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots (2.12)$$

Pada rotor berlaku hubungan,

$$f_2 = \frac{p(N_s - N_r)}{120} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan f_2 = frekuensi arus rotor

$$f_2 = \frac{pN_s}{120} \times \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots\dots\dots (2.14)$$

sesuai dengan

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dan

$$F = \frac{pN_s}{120} \dots\dots\dots (2.16)$$

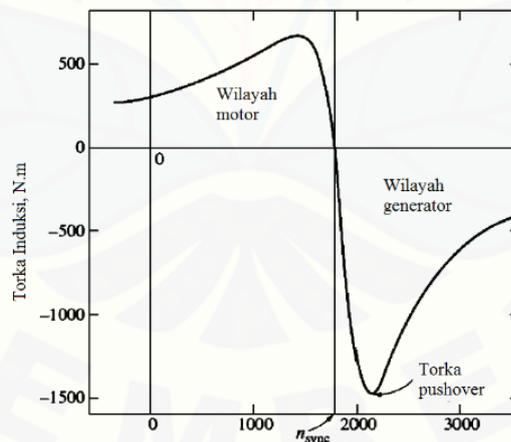
Maka

$$F_2 = f_1 \times N_s \dots\dots\dots (2.17)$$

Ketika start, $S = 100\%$ dan $f_2 = f_1$ (Sumber: Muspida, Haqi 2009)

Generator induksi dioperasikan dengan menggerakkan rotornya secara mekanis lebih cepat daripada kecepatan sinkron sehingga menghasilkan slip negatif. Untuk mengoperasikannya generator induksi membutuhkan eksitasi menggunakan tegangan yang leading, itu biasanya dilakukan dengan menghubungkan generator pada sistem tenaga eksiting. Pada operator induksi yang bekerja *stand-alone*, bank kapasitor harus digunakan untuk menyuplai daya reaktif. Daya reaktif yang diberikan harus sama atau lebih besar dari daya reaktif yang diperlukan mesin induksi ketika bekerja sebagai motor. Tegangan terminal generator akan bertambah dengan penambahan kapasitansi (Amri, Khoirul. 2005)

Karakteristik Torsi mesin induksi diperlihatkan pada kurva Gambar 2.9 memperlihatkan bahwa mesin induksi yang diputar melampaui kecepatan sinkronnya oleh sebuah penggerak eksternal (*Prime Mover*), Semakin bertambah torsi yang diberikan penggerak pada porosnya, semakin besar daya yang dihasilkan oleh generator induksi. Seperti diperlihatkan pada gambar, nilai torsi induksi maksimum yang mungkin pada operasi mode generator. Torsi ini disebut torsi *pushover* generator. Jika torsi yang diberikan penggerak eksternal melebihi torsi *pushover*, generator akan *overspeed*



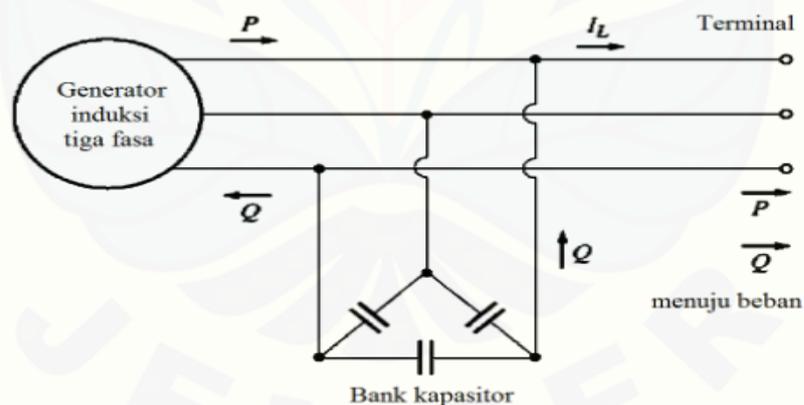
Gambar 2.9 Karakteristik torsi-kecepatan pada mesin induksi memperlihatkan wilayah operasi generator dan motor (Lihat torsi *pushover*)

(Sumber: Chapman. 2005)

Generator induksi sering dipasang guna mencukupi suplai daya tambahan untuk beban di daerah terpencil dimana layanan saluran transmisinya terbatas. Dengan segala keunggulan yang disebutkan diatas adalah pilihan yang tepat pada kasus ini digunakan mesin induksi sebagai generator. Penggunaan generator induksi pada sistem pembangkit tenaga angin dimana turbin yang memutar generator tidak mengharuskan pada kecepatan sinkronnya. Dengan demikian, jika daya yang dibangkitkan tidak mensyaratkan frekuensi dan tegangan tetap maka generator dapat dioperasikan stand alone, atau terisolasi, terlepas dari saluran publik (Chan, 1993: 2-3).

(2) Generator Induksi Bereksitasi Sendiri

Secara umum, teknik pengoperasian pembangkit tenaga listrik terbagi menjadi dua, yaitu Terisolasi atau *Stand Alone* dan Terhubung jalan-jala atau *On-Grid*. Sistem Terisolasi adalah pembangkit listrik terpisah atau tidak terhubung oleh jala-jala (PLN atau suatu jaringan listrik), sedangkan On-Grid bersifat terhubung oleh jaringan PLN. Ketika suatu pembangkit bersifat stand alone, maka diperlukan sumber daya reaktif mandiri yang dapat mengeksitasi sistem.



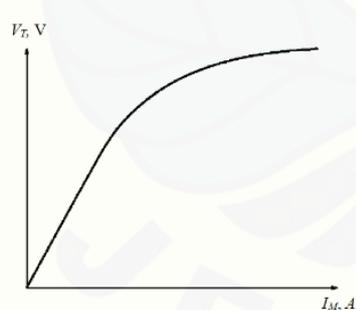
Gambar 2.10 Sebuah Generator Induksi Bereksitasi Sendiri Dengan Bank Kapasitor untuk Mensuplai Daya Reaktif. (Sumber : Amri, Khoirul. 2005)

Mesin induksi sebagai generator juga dimungkinkan untuk beroperasi sebagai generator terisolasi yang tidak terhubung pada sistem tenaga maupun jaringan listrik luar selama terdapat kapasitor yang dapat mensuplai daya reaktif

yang dibutuhkan generator dan beban-beban lainnya yang dihubungkan. seperti diperlihatkan pada Gambar 2.10

Arus magnetisasi I_m yang dibutuhkan mesin induksi sebagai fungsi tegangan terminal dapat dicari dengan menjalankan mesin sebagai motor pada keadaan tanpa beban dan mengukur tegangan kangkarnya sebagai fungsi tegangan terminal. Kurva magnetisasi seperti ini diperlihatkan pada Gambar 2.11 (a) . Untuk mencapai level tegangan yang diberikan pada generator induksi, kapasitor eksternal harus mensuplai arus magnetisasi yang sesuai dengan level tersebut

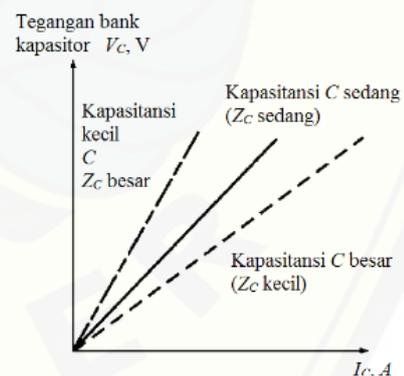
Karena arus reaktif yang dihasilkan oleh sebuah kapasitor berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, lokus dari semua kemungkinan kombinasi tegangan dan arus yang melalui kapasitor berupa garis lurus. Plot tegangan vs arus seperti pada frekuensi tertentu diperlihatkan pada Gambar 2.11 (b). Jika sekelompok kapasitor tiga fasa dihubungkan kepada terminal generator induksi, tegangan tanpa beban generator induksi adalah perpotongan kurva magnetisasi generator dengan garis beban kapasitor (Amri, Khoirul. 2005). Tegangan terminal tanpa beban generator induksi untuk tiga kelompok kapasitor berbeda diperlihatkan pada Gambar 2.11 (c)



(I_M =Arus jangkar tanpa beban)

(Ampere lagging)

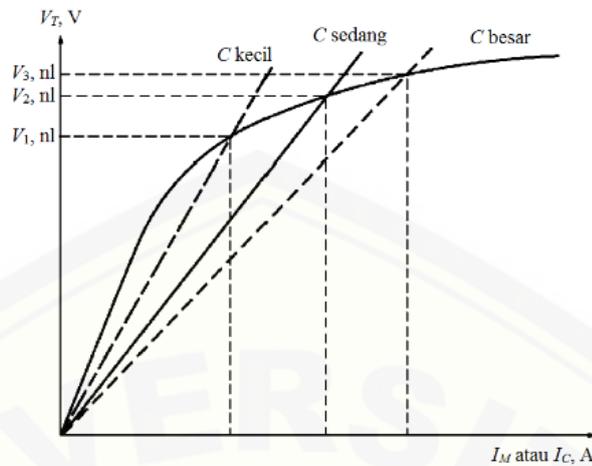
(a)



(Arus Bank Kapasitor)

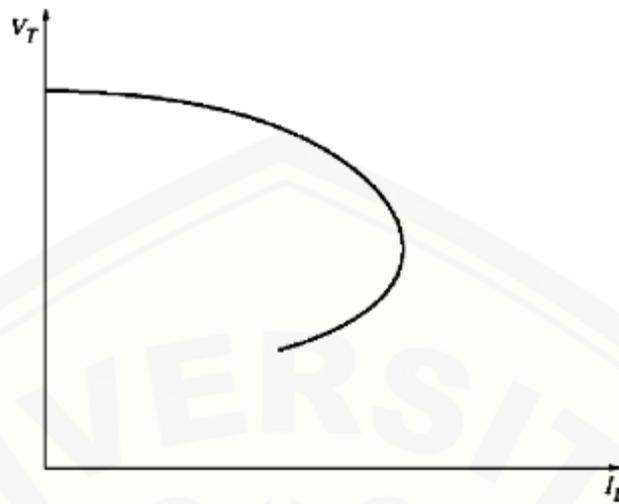
(Ampere Leading)

(b)



Gambar 2.11 (a) Kurva magnetisasi generator induksi. Ini adalah plot tegangan terminal mesin sebagai fungsi arus magnetisasinya. (yang tertinggal dari tegangan fasa sekitar 90°) (b) Plot Karakteristik tegangan-arus bank kapasitor. Semakin besar Kapasitansi, semakin besar arusnya untuk tegangan yang sama. Arus ini mendahului tegangan fase sekitar 90° . (c) tegangan terminal tanpa beban untuk generator induksi terisolasi yang dapat diperoleh dengan mem-plot bersama-sama karakteristik terminal generator dan karakteristik tegangan – arus kapasitor. Perpotongan kedua kurva adalah titik dimana daya reaktif yang diminta generator tepat diberikan oleh kapasitor dan titik ini menghasilkan tegangan terminal tanpa beban generator (Sumber: Amri, Khoirul. 2005)

Permasalahan paling utama pada generator induksi adalah tegangannya yang berubah drastis ketika beban berubah, terutama pada beban reaktif. Pada kasus pembebanan induktif, tegangan jatuh sangat cepat. Ini terjadi karena kapasitor yang konstan harus mensuplai semua daya reaktif yang dibutuhkan baik oleh beban maupun generator. Dan semua daya reaktif yang dialihkan ke beban mengembalikan generator kembali ke kurva magnetisasinya, menyebabkan penurunan besar pada tegangan generator.



Gambar 2.12 Karakteristik Tegangan-Arus Terminal Generator Induksi untuk Beban dengan Faktor Daya *Lagging* yang Konstan
(Sumber : Amri, Khoirul. 2005)

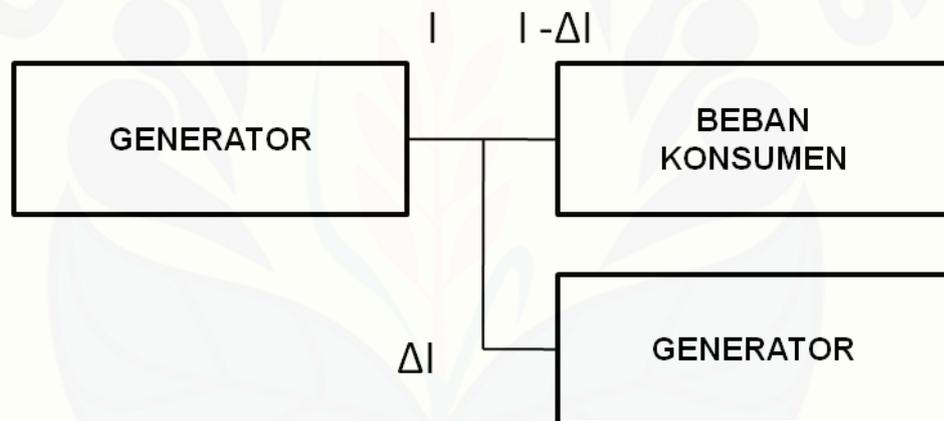
Karena sifat alami karakteristik torsi-kecepatan mesin induksi, frekuensi generator induksi berubah-ubah dengan perubahan beban, tapi karena karakteristik torsi-kecepatan sangat curam pada wilayah operasi normal, variasi frekuensi total biasanya dibatasi di bawah 5%.

b. Beban Komplemen

Beban komplemen digunakan sebagai tempat pengalihan daya dari perubahan yang terjadi pada beban sebenarnya dengan tujuan untuk menjaga agar putaran generator tetap konstan meskipun terjadi perubahan kebutuhan pada beban sebenarnya. Pada suatu keadaan, jika beban konsumen berubah maka tegangan generator dan frekuensinya juga berubah pula. Jika beban yang digunakan rendah sedangkan kecepatan generator bertambah akan terjadi keadaan lepas kendali. Pengendalian diperlukan untuk mengatur tegangan generator dan frekuensi pada nilai yang sesuai untuk menyesuaikan dengan total beban yang terhubung kepada mesin mendekati konstan dengan menggunakan beban komplemen atau dapat disebut beban ballast. Karena tegangan awal dalam kondisi konstan maka untuk menentukan tegangan dikendalikan dengan beban ballast (Sandy, Ardha. 2009)

Dengan kata lain, jika debit airkonstan maka generator harus dibebani dengan daya konstan agar putaran generator selalu tetap. Oleh karena beban konsumen tidak selalu konstan, maka untuk menjaga kestabilan putaran turbin generator diperlukan beban komplemen yang besarnya diatur oleh IGC sehingga tegangan generator stabil . Pada IGC diperlukan kapasitor exitasi untuk membangkitkan daya reaktif. Rotor dari generator ini sangat kuat karena terbuat dari lempengan alumunium dan besi sehingga generator Induksi atau asinkron mempunyai kelebihan tahan terhadap runaway speed (putaran liar). Generator ini hanya mampu menerima beban induktif maksimum kecuali ada kompensator tambahan. Berdasarkan Kapasitas Nominal generator sedemikian rupa sehingga :

Beban Konsumen + Beban Komplemen = Kapasitas Nominal Generator



Gambar 2.13 Skema Pengaturan Beban dengan Beban Komplemen

(Sumber: Sandy, Ardha. 2009)

Resistor yang digunakan sebagai beban komplemen bernilai statis sedangkan dibutuhkan nilai yang bervariasi sesuai dengan perubahan arus sampling, maka untuk mengatasi hal tersebut diakali dengan menggunakan beban komplemen yang cukup banyak. Saat arus sampling bernilai kecil, maka jumlah resistor yang terhubung ke rangkaian lebih banyak dari pada saat arus sampling kecil. Nilai dan jumlah resistor yang digunakan bergantung pada seberapa tingkat

sensifitas beban komplemen yang diinginkan. Semakin banyak resistor yang digunakan, semakin sensitif rangkaian IGC yang dihasilkan. Jika Pembangkit Mikrohidro menghasilkan daya sebesar P (watt) dan diinginkan IGC dengan tingkat sensifitas Q (watt) maka jumlah resistor yang digunakan dimasukkan pada persamaan:

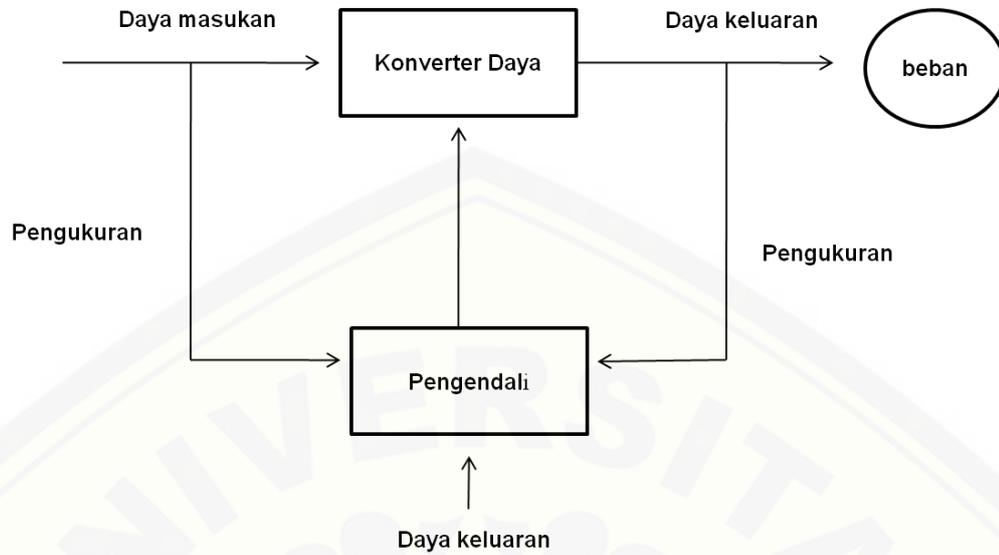
$$n = \frac{P}{Q} \text{ atau } R = \frac{V.V}{Q}$$

Keterangan:

- n = Jumlah resistor
- R = Resistor, ohm
- v = Tegangan, Volt

Keuntungan dan Kerugian Kontrol Beban dengan Beban Komplemen:

- 1) Respon cepat cocok untuk daya kecil (terbatas < 250 kW)
 - 2) Murah
 - 3) Pemasangan mudah
 - 4) Perawatan mudah
 - 5) Sederhana/simple
 - 6) Gelombang tegangan mempunyai distorsi harmonic yang besar
 - 7) Ada gangguan suara menderu pada beban audio
 - 8) Flow air kontinyu sehingga tidak dapat dilakukan penghematan penggunaan energi air
 - 9) Bisa digunakan untuk mode interkoneksi atau pun stand alone operation
- (Sumber: Soddiq, Dja'far. 2011)

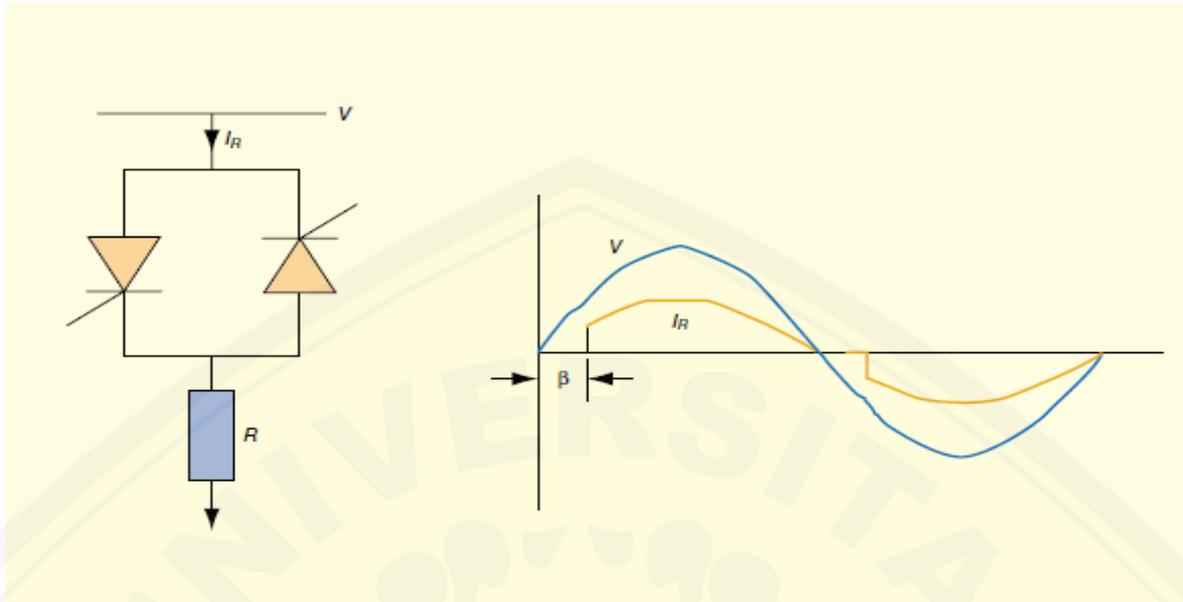


Gambar 2.14 Blok diagram *Induction Generator Controller* secara Umum

(Sumber: Soddiq, Dja'far. 2011)

Konverter daya pada Pembangkit Mikrohidro menggunakan : Thyristor, triac, transistor. Beban merupakan beban komplementer atau disebut Ballast. Pengendali/Kontrol bisa menggunakan sistem Kontrol analog atau Digital.

Beban komplementer memiliki berbagai konfigurasi. Salah satunya untuk memperoleh beban variabel yaitu dengan menggunakan sebuah resistor dan dua buah thyristor seperti pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Contoh Susunan Thyristor Pengontrol Beban Komplemen

(sumber: Darwin, Clark. 2012)

Susunan thyristor pengontrol beban komplemen diatas memiliki karakteristik faktor daya *lagging* Faktor daya beban akan dipengaruhi oleh faktor daya *lagging* dari kontroler sehingga generator juga akan terpengaruh oleh susunan ini yang memiliki karakteristik induktif

Susunan ini akan menyerap kapasitansi dalam generator induksi yang disediakan oleh kapasitor bank, akibatnya mempengaruhi flux eksitasi dan tegangan yang dibangkitkan (Darwin, Clark. 2012)

2.2 PID (*Proportional Integral Derivatives*)

Didalam suatu sistem kontrol kita mengenal adanya beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral dan aksi kontrol derivative. Masing-masing aksi kontrol ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kontrol proporsional mempunyai keunggulan rise time yang cepat, aksi kontrol integral mempunyai keunggulan untuk memperkecil error dan aksi kontrol derivative mempunyai keunggulan untuk memperkecil error atau meredam overshoot/undershoot.

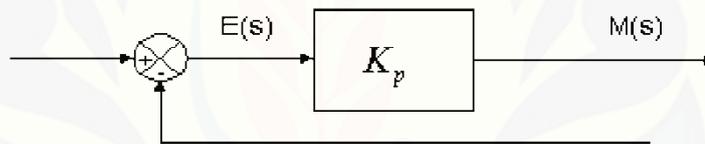
Parameter pengontrol Proporsional Integral derivative (PID) selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang di atur (plant). Dengan demikian bagaimanapun rumitnya suatu plant, perilaku plant tersebut harus di ketahui terlebih dahulu sebelum pencarian parameter PID itu dilakukan

Langkah awal dalam pembelajaran perancangan sistem kontrol yaitu menjelaskan bagaimana membuat diagram blok sistem. Diagram blok digunakan sebagai bahan analisis yaitu dengan memberikan aksi pengontrolan yang berbeda. Tanggapan sistem dapat dilihat setelah sistem diberikan sinyal masukan yang berbeda. Kombinasi antara sinyal masukan dan aksi pengontrolan ini akan menghasilkan tanggapan yang berbeda-beda. Langkah-langkah yang harus dilakukan dalam perancangan sistem kontrol sebagai berikut:

- a. Memahami cara kerja sistem.
- b. Mencari model sistem dinamik dalam persamaan differensial.
- c. Mendapatkan fungsi alih sistem dengan Transformasi Laplace.
- d. Memberikan aksi pengontrolan dengan menentukan konstanta K_p , K_i dan K_d .
- e. Menggabungkan fungsi alih yang sudah didapatkan dengan jenis aksi pengontrolan.
- f. Menguji sistem dengan sinyal masukan fungsi langkah, fungsi undak dan impuls ke dalam fungsi alih yang baru.
- g. Melakukan Transformasi Laplace balik untuk mendapatkan fungsi dalam kawasan waktu.
- h. Menggambar tanggapan sistem dalam kawasan waktu. (Sumber : Katsuhiko Ogata, 1985).

2.2.1 Proportional

Pengontrol proposional memiliki keluaran yang sebanding atau proposional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran pengontrol proporsional merupakan perkalian antara konstanta proposional dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengeluarkan output sinyal sebesar konstanta pengalinya. Sinyal kesalahan (error) merupakan selisih antara besaran setting dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi pengontrol, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga setting) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan. Pengontrol *proporsional* memiliki 2 parameter, pita *proporsional* (*proportional band*) dan konstanta *proporsional*.

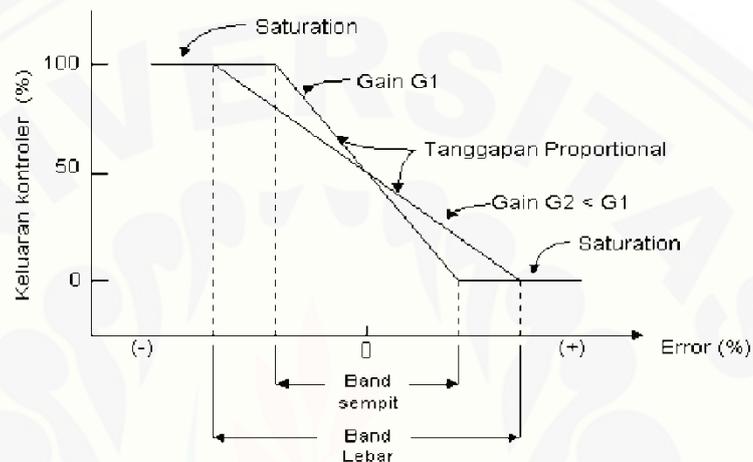


Gambar 2.16 Diagram Blok Kontroler *proporsional*

Daerah kerja kontroler efektif dicerminkan oleh pita *proporsional* sedangkan konstanta *proporsional* menunjukkan nilai faktor penguatan sinyal terhadap sinyal Kesalahan K_p . Hubungan antara pita *proporsional* (PB) dengan konstanta *proporsional* (K_p) ditunjukkan secara persentasi oleh persamaan berikut :

$$PB = 1 \frac{1}{K_p} \times 100\% \dots\dots\dots(2.18)$$

Gambar 2.15 menunjukkan grafik hubungan antara PB, keluaran pengontrol dan kesalahan yang merupakan masukan pengontrol. Ketika konstanta *proporsional* bertambah semakin tinggi, pita *proporsional* menunjukkan penurunan yang semakin kecil, sehingga lingkup kerja yang dikuatkan akan semakin sempit.



Gambar 2.17 *Proportional Band* dari Pengontrol *proportional* Tergantung pada Penguatan (Sumber: Sedy.2013)

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

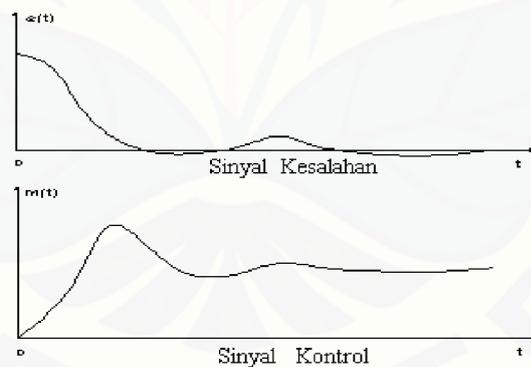
- Kalau nilai K_p kecil, pengontrol *proporsional* hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
- Kalau nilai K_p dinaikan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai *setpoint* dan keadaan stabil.
- Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil atau respon sistem akan berosolasi

2.2.2 Pengontrol *Integral*

Pengontrol *integral* berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan stabil nol. Jika sebuah *plant* tidak memiliki unsur integrator ($1/s$), pengontrol *proporsional* tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan stabilnya nol. Dengan pengontrol *integral*, respon sistem dapat diperbaiki yaitu mempunyai kesalahan keadaan stabilnya nol.

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

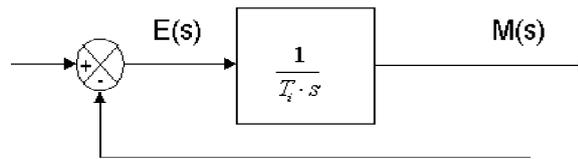
Sinyal keluaran pengontrol *integral* merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol. Gambar 2.16 menunjukkan contoh sinyal kesalahan yang dimasukkan ke dalam pengontrol integral dan keluaran pengontrol integral terhadap perubahan sinyal tersebut



Gambar 2.18 Kurva Sinyal Kesalahan $e(t)$ terhadap t pada Pembangkit Kesalahan Nol.

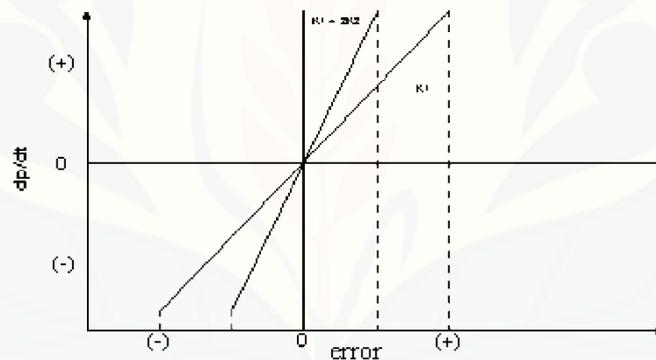
(Sumber: Sedy.2013)

Gambar 2.19 menunjukkan blok diagram antara besaran kesalahan dengan keluaran suatu pengontrol *integral*.



Gambar 2.19 Blok Diagram Hubungan antara Besaran Kesalahan dengan Pengontrol *integral* (Sumber: Sedy. 2013)

Pengaruh perubahan konstanta *integral* terhadap keluaran *integral* ditunjukkan oleh Gambar 2.20 Ketika sinyal kesalahan berlipat ganda, maka nilai laju perubahan keluaran pengontrol 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 2.20 Perubahan Keluaran sebagai Akibat Penguatan dan Kesalahan (Sumber: Sedy.2013)

Ketika digunakan, pengontrol *integral* mempunyai beberapa karakteristik berikut ini:

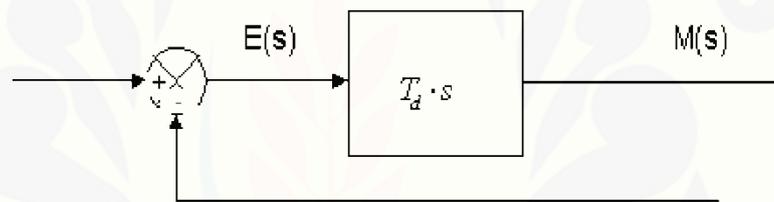
- Keluaran pengontrol membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengontrol *integral* cenderung memperlambat respon.
- Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengontrol akan bertahan pada nilai sebelumnya.
- Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan

kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .

- d. 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 pengontrol.

2.2.3 Pengontrol *Derivative*

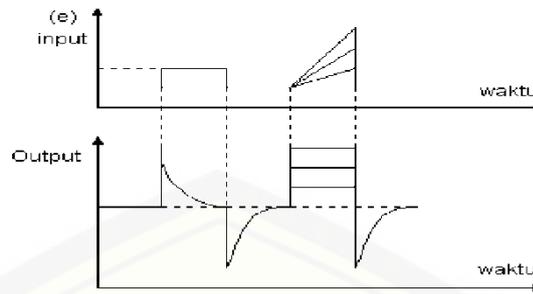
Keluaran pengontrol *Derivative* memiliki sifat seperti halnya suatu operasi differensial. Perubahan yang mendadak pada masukan pengontrol, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Gambar 2.21 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan dengan keluaran pengontrol.



Gambar 2.21 Blok Diagram Pengontrol *Derivative*

(Sumber: Sedy.2013)

Gambar 2.22 menyatakan hubungan antara sinyal masukan dengan sinyal keluaran pengontrol *Derivative*. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran pengontrol 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 *magnitude*-nya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta diferensialnya.



Gambar 2.22 Kurva Waktu Hubungan *input-output* Pengontrol *Derivative*
(Sumber: Sedy.2013)

Karakteristik pengontrol *derivative* adalah sebagai berikut:

- a. Pengontrol ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
- b. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan pengontrol tergantung pada nilai T_d dan laju perubahan sinyal kesalahan. (Powel, 1994:184).
- c. Pengontrol *derivative* mempunyai suatu karakter untuk mendahului sehingga pengontrol ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi pengontrol *derivative* dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif, dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem.

Berdasarkan karakteristik pengontrol tersebut, pengontrol *derivative* umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan stabilnya. Kerja pengontrol *derivative* hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh sebab itu pengontrol *derivative* tidak pernah digunakan tanpa ada pengontrol lain sebuah sistem (Sedy. 2013)

2.3 Tuning atau Penalaan Paramater Pengontrol PID

Langkah yang sangat penting dalam desain kontroler PID ialah penentuan parameter kontroler PID supaya sistem memenuhi kriteria performansi yang

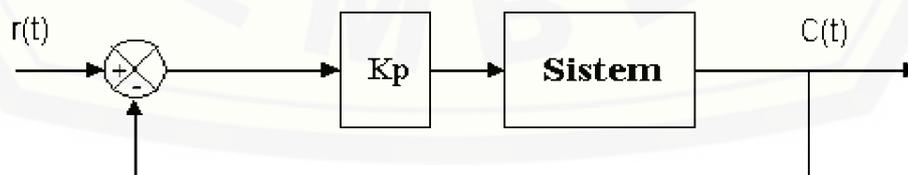
diinginkan. Hal ini disebut juga dengan tuning kontroler. Penalaan atau tuning parameter pengontrol PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (plant). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu plant, perilaku plant tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter 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 pengontrol PID telah dapat dilakukan. Penalaan bertujuan untuk mendapatkan kinerja sistem sesuai spesifikasi perancangan. Ogata menyatakan hal itu sebagai alat control (controller tuning). Metode pendekatan eksperimen adalah Ziegler-Nichols.

2.4 Metode Ziegler-Nichols

Metode ini memiliki dua cara, metode kurva reaksi dan osilasi. Kedua metode ditujukan untuk menghasilkan respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25%

2.4.1 Metode osilasi

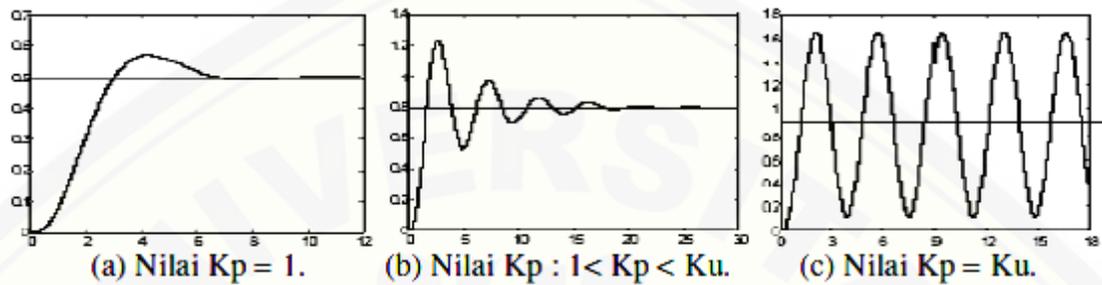
Metode ini didasarkan pada reaksistem untaian tertutup. *Plant* disusun serial dengan pengontrol PID. Pertama parameter parameter integrator diatur tak berhingga dan parameter *derivative* diatur nol ($T_i = \infty$; $T_d = 0$). Parameter *proporsional* kemudian dinaikkan bertahap. Mulai dari nol sampai mencapai hargayang mengakibatkan reaksi sistem berosilasi. Reaksi sistem harus berosilasi dengan magnitud tetap (*Sustain oscillation*).



Gambar 2.23 Sistem Untaian Tertutup dengan Alat Pengontrol *proporsional*

(Sumber: Sedy.2013)

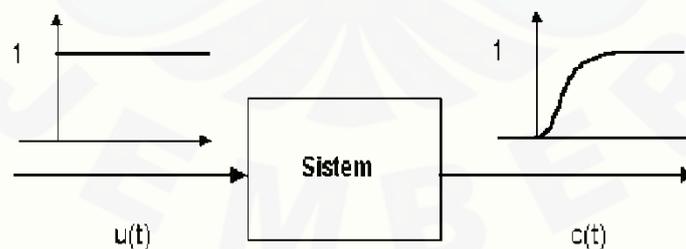
Nilai penguatan *proposional* pada saat sistem mencapai kondisi berosilasi dengan magnitud tetap (*sustain oscillation*) disebut *ultimate gain* K_u . Periode dari *sustain oscillation* disebut *ultimate period* P_u (Perdikaris, 1991,433). Gambar 2.24 menggambarkan kurva reaksi untai tertutup ketika berosilasi.



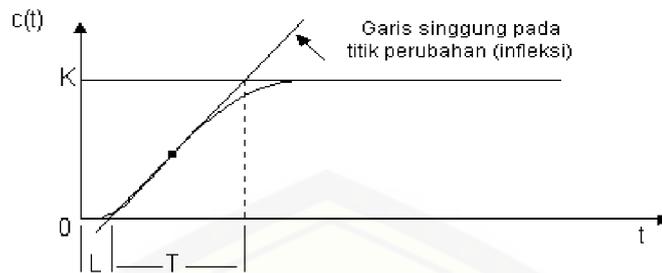
Gambar 2.24 Kurva Respon *sustain oscillation* (Sumber: Sendy.2013)

2.4.2 Metode Kurva Reaksi

Metode ini didasarkan terhadap reaksi sistem untai terbuka. *Plant* sebagai untai terbuka dikenai sinyal fungsi tangga satuan (Gambar 2.24). Jika *plant* minimal tidak mengandung unsur integrator ataupun *pole-pole* kompleks, reaksi sistem akan berbentuk S. Gambar 2.25 menunjukkan kurva berbentuk S tersebut. Kelemahan metode ini terletak pada ketidakmampuannya untuk *plant* integrator maupun *plant* yang memiliki *pole* kompleks.



Gambar 2.25 Respons Tangga Satuan Sistem (Sumber: Sendy.2013)



Gambar 2.26 Kurva Respons Berbentuk S (Sumber: Sendy.2013)

Kurva berbentuk Sine mempunyai dua konstanta, waktu mati (*deadtime*) L dan waktu tunda T . Dari Gambar 2.26 terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik, setelah selang waktu L . Sedangkan waktu tunda menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan stabilnya. 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 Nichol melakukan eksperimen dan menyarankan parameter pengaturan nilai K_p , T_i , dan T_d dengan didasarkan pada kedua parameter tersebut.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Dalam Penelitian ini secara keseluruhan menggunakan metode Action Research. Metode ini dipilih karena pada tahap awal akan dilakukan kajian mengenai Sistem Pembangkit Mikrohidro di Daerah Suger dan Pengatur PID melalui studi literatur. Hasil kajian ini merumuskan satu model Sistem Pembangkit Energi Mikrohidro Jaringan Terisolasi dengan pengaturan beban komplemen berbasis PID.

No	Kegiatan	Bulan ke-/Minggu*											
		Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Tahap Persiapan	■											
2	Studi Literatur		■										
3	Perencanaan dan Penentuan parameter data Pembangkit		■	■									
4	Pemodelan sistem dan algoritma PID				■	■	■						
5	Pengujian respons simulasi							■					
6	Analisa hasil								■				
7	Kesimpulan saran									■			
8	Penulisan laporan										■		

Tabel 3.1 Tabel Perencanaan Penelitian

3.1.1 Tahap Penelitian

Dalam meneliti dan merancang sistem kendali beban komplemen dengan PID dibutuhkan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Tahap persiapan

Mempersiapkan proposal dan alat pendukung penelitian seperti Laptop dan Matlab

b. Studi literatur

Tahap awal dari penelitian ini menggali materi dan mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya, buku maupun internet untuk mengetahui karakteristik, prinsip kerja serta teori yang menunjang lainnya. Bahan pustaka yang diperlukan berkaitan dengan perancangan Sistem Pembangkit Mikrohidro, Datasheet, komponen-komponen, IGC (*Induction Generator Controller*), Kendali PID. Diharapkan dengan literatur yang didapat bisa memberikan arahan untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian

c. Perencanaan dan penentuan parameter data

Kajian dilakukan untuk mendapatkan informasi secara detail mengenai komponen, parameter Mikrohidro dan sistem kendali PID. Data yang diperoleh melalui Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro baik secara terkait dengan pihak terkait akan diolah secara kualitatif dan kuantitatif yang akan dianalisa secara deskriptif.

d. Pemodelan sistem dan algoritma PID

Membuat pemodelan sistem *Simulink* dengan software Matlab 7.11.1 yang dijadikan sebagai uji respon terhadap Sistem Pembangkit Mikrohidro yang mampu memodelkan perangkat keras sebagai bahan analisa dan laporan data.

e. Pengujian respons simulasi

Melakukan pengujian dengan menentukan konstanta P, I dan D kemudian melakukan tuning dengan metode Ziegler-Nichols Untaian Terbuka

f. Analisa hasil

Menganalisa dan mengolah hasil simulasi PID pada Pembangkit Mikrohidro

g. Kesimpulan dan saran

Pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data yang telah diteliti yang berkaitan dengan teori yang dijelaskan

h. Penulisan laporan

Menuangkan hasil dan pembahasan yang telah didapat ke dalam laporan yang sistematis

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang diperlukan dalam menunjang simulasi ini adalah:

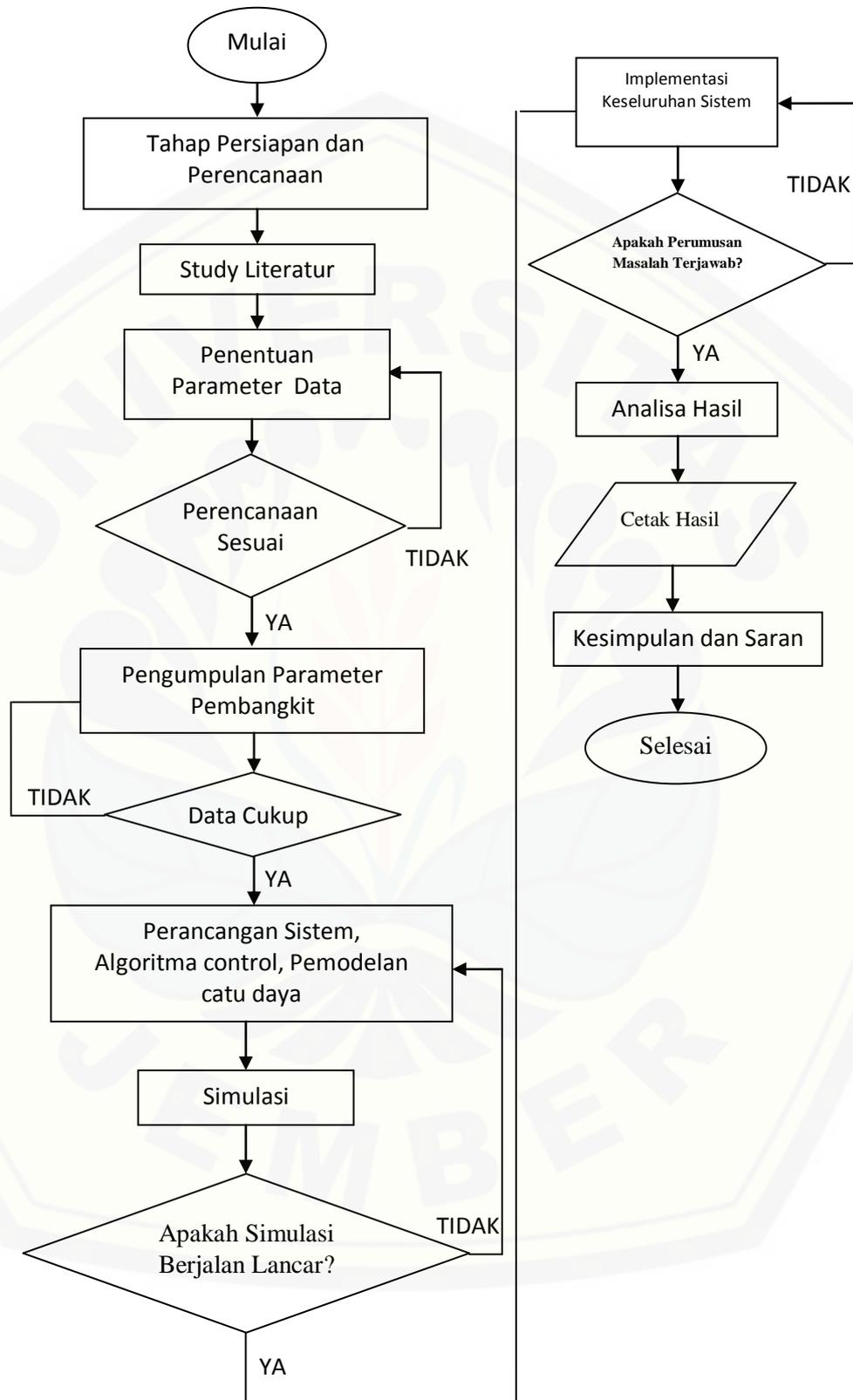
a. PC atau Laptop

Peralatan elektronik yang digunakan untuk melakukan simulasi rancangan sistem dan analisa hasil simulasi

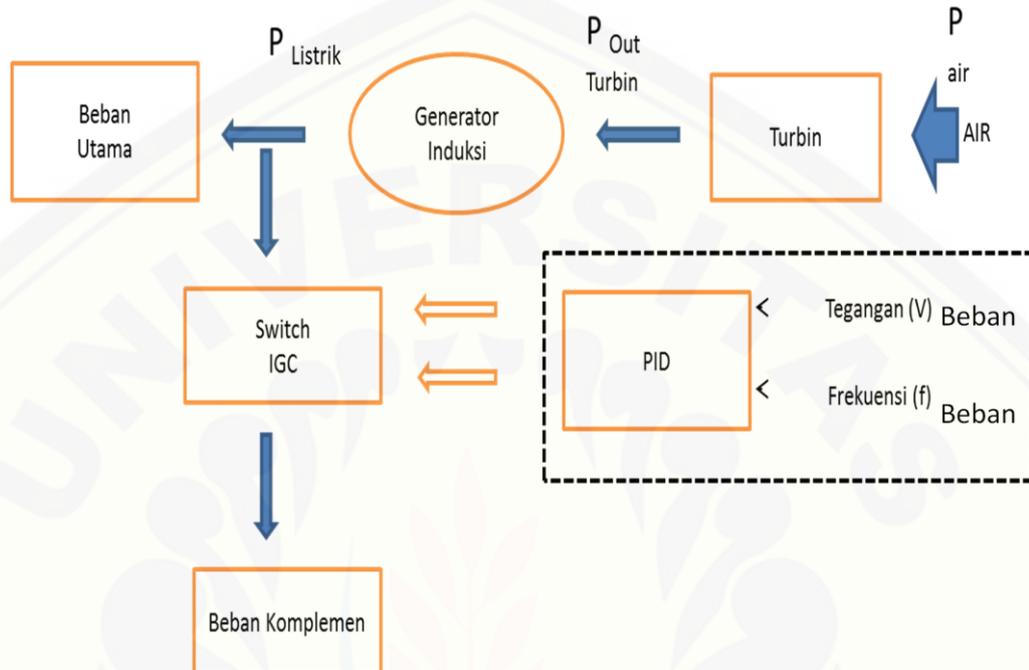
b. Software Matlab 7.1.1

Perancangan dan simulasi sistem kendali PID menggunakan software Matlab 7.11.1 yang telah memiliki kelengkapan untuk merancang dan melakukan simulasi.

3.3 Diagram Alur Tugas Akhir



3.4 Pemodelan Sistem Pembangkit Mikrohidro



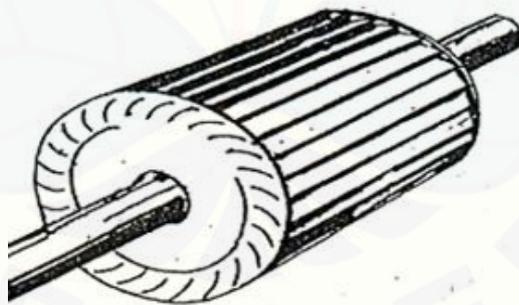
Gambar 3.1 Blok diagram pemodelan sistem

Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1, Komponen utama dari Pembangkit Mikrohidro terdiri dari generator Induksi, Sistem Kontrol yang terdiri atas Pengukur frekuensi, beban komplemen dan beban utama tiga fase. Sumbu turbin air secara langsung disambung ke rotor generator induksi yang bekerja ketika terdorong oleh air dimana debit air dibuat secara tetap sehingga tegangan output generator induksi dan frekuensi selalu tetap. Tegangan yang dihasilkan berupa tegangan AC. Kapasitor disusun secara delta sebagai penyuplai daya reaktif dan pengoreksi faktor daya. Sistem kontrol PID digunakan untuk menyesuaikan frekuensi dengan mengatur penyerapan daya yang tidak digunakan oleh beban utama ke beban komplemen. Beban komplemen terdiri atas tiga set resistor yang tersambung seri dengan saklar (Ideal Switch). Frekuensi diukur oleh blok diagram

Frequency Regulator. blok ini menggunakan tiga-fase Locked Loop sistem standart untuk mengukur frekuensi sistem. frekuensi yang dihitung dibandingkan dengan frekuensi referensi (50Hz) untuk mendapatkan *error*. *Error* diintegrasikan untuk mendapatkan fase error. Fase error dipadukan dengan rangkaian komparator dan logika AND serta tegangan fase beban yang dikonversi ke dalam bentuk *zero crossing* yang dilengkapi Proportional-Integral-Derivatif (PID) kontroler untuk memproduksi sinyal yang mempresentasikan kebutuhan jumlah dari beban komplemen. Sinyal akan men-*trigger* saklar yang mengatur *switch* dari beban komplemen.

3.5 Pemodelan Turbin Air

Turbin akan mengekstrak energi dari debit air dan mengubahnya ke energi mekanik yang memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. turbin haruslah kuat dan sebaiknya dibuat dari besi (dibandingkan plastik). Pada pembangkit Listrik Daerah Suger spesifikasi teknis turbin yang digunakan memakai tipe Cross flow C4-16, panjang runner 480 mm, Kapasitas putaran turbin 750 Rpm dengan kapasitas Daya turbin maksimal 4.99 kW dan menghasilkan Daya listrik dengan kapasitas 4kW



Gambar 3.2 Penampang *runner* turbin crossflow

(Sumber : Haimerl, L.A., 1960)

Persamaan Efisiensi Turbin:

$$\eta = 2C \cdot U_1 \frac{2CU_1}{v_1} (1 + \psi) (\cos\alpha_1 - \frac{U_1}{v_1}) \dots\dots\dots(3.1)$$

Dengan U sebagai $V \cos \alpha$, C sebagai konstanta, Ψ sebagai perbandingan kecepatan tangensial masuk dan keluar sudu,

3.6 Pemodelan Generator

Generator yang terhubung dengan turbin air adalah motor induksi yang digunakan sebagai generator dengan kapasitas daya 4kW memiliki kapasitas putaran 1430 Rpm, frekuensi 50Hz, tegangan 230 / 400V. Selama daya air dan daya output turbin sama maka putaran turbin/frekuensi tegangan generator tetap terjaga. Pada IGC berfungsi mengendalikan tegangan generator sehingga stabil 230//400 V. Kita dapat menganalisa besar tegangan generator yang kemudian dihubungkan dengan analisa frekuensi dengan persamaan

$$\text{Tegangan generator (E)} = C.n.F \text{ (Volt)} \dots\dots\dots(3.2)$$

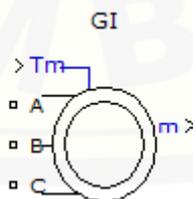
Dengan C sebagai Konstanta, n sebagai Kecepatan turbin, F sebagai Fluks generator

Daya air dan daya listrik dihitung dengan persamaan:

$$\text{Daya air} = \eta \cdot g \cdot H \cdot Q \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\text{Daya listrik} = 3 \cdot V \cdot I \cos \alpha \dots\dots\dots(3.4)$$

Dengan η sebagai efisiensi keseluruhan, g sebagai konstanta gravitasi (9,8), H sebagai tinggi *head* air (m), Q sebagai debit air (m³/detik) . Pada daya listrik, V sebagai tegangan (V), I sebagai arus (A), α sebagai sudut fase (derajat)



Gambar 3.3 Blok Diagram Generator Induksi

Spesifikasi dan Parameter dari Generator Induksi dapat ditunjukkan sebagai berikut :

No	Variabel	Keterangan
1	Input mekanik	Torsi T_m
2	Tipe rotor	Sangkar tupai
3	Jumlah pasang kutub	2

Tabel 3.2 Tabel Spesifikasi Generator Induksi

Pada mesin induksi tidak terdapat hubungan listrik antara stator dengan rotor karena arus pada rotor merupakan arus induksi. Jika belitan stator diberi tegangan tiga fase, maka pada stator akan dihasilkan arus tiga fase, arus ini kemudian akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron (N_s) dan kemudian akan melakukan pengisian muatan ke kapasitor yang dipasang paralel dengan stator tujuannya untuk menyuplai tegangan ke stator nanti untuk mempertahankan kecepatan sinkron (N_s) mesin induksi ketika dilakukan pelepasan sumber tegangan tiga fase pada stator. Turbin sebagai *prime mover* yang dikopel dengan mesin induksi diputar secara perlahan memutar rotor mesin induksi sehingga mencapai putaran sinkron ($N_r = N_s$), kapasitor bank yang telah tidak terisi atau *discharge* akan bekerja dan mempertahankan besar N_s . ketika Turbin berputar hingga melewati kecepatan sinkron mesin induksi ($N_r > N_s$) maka slip yang timbul antara putaran rotor dan putaran medan magnet menghasilkan slip negatif ($s < 0$) dan akan menghasilkan tegangan sehingga motor induksi akan berubah fungsi menjadi generator induksi.

Pada sebuah generator, beban pada dasarnya merupakan beban listrik. Apabila beban tersebut dikonversikan sebagai torsi, maka torsi tersebut dapat diterjemahkan sebagai torsi elektrik. Pada pengoperasian generator dalam keadaan tetap, nilai torsi mekanik akan sama dengan torsi elektrik

$$T_m = T_e \dots \dots \dots (3.5)$$

Dengan T_m sebagai torsi mekanik yang dihasilkan generator, T_e sebagai torsi beban elektrik. Namun pada prakteknya kondisi beban selalu berubah-ubah baik berupa kenaikan maupun penurunan. Selisih daya antara sisi generator dengan sisi beban dapat diterjemahkan sebagai torsi percepatan dengan persamaan:

$$T_m = T_e + T_a \dots\dots\dots(3.6)$$

Dimana,

$$T_a = M \times \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots(3.7)$$

Dengan T_m sebagai torsi mekanik yang dihasilkan generator, T_e sebagai torsi beban elektrik, T_a sebagai torsi percepatan, M sebagai Momen inersia dari generator, $\frac{d\omega}{dt}$ sebagai perubahan kecepatan sudut terhadap waktu.

Torsi percepatan akan menyebabkan percepatan maupun perlambatan pada putaran rotor yang akan mempengaruhi frekuensi generator. Hubungan antara torsi dengan kecepatan putar rotor dapat dirumuskan sebagai:

$$T = \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots(3.8)$$

Dengan T sebagai torsi generator, P sebagai daya aktif kelauran generator, ω sebagai kecepatan sudut putaran generator. Frekuensi yang dihasilkan generator merupakan fungsi kecepatan sudut putaran generator dengan persamaan:

$$F = \frac{\omega}{2\pi} \dots\dots\dots(3.9)$$

Sehingga perubahan frekuensi terkait perubahan beban dapat dituliskan sebagai berikut:

- a. $T_m - T_e = T_a < 0$, maka $\frac{d\omega}{dt} < 0$ sehingga frekuensi menurun
- b. $T_m - T_e = T_a > 0$, maka $\frac{d\omega}{dt} > 0$ sehingga frekuensi naik

3.7 Pemodelan Kapasitor

Kapasitor diperlukan untuk menambah suplai VAR atau daya reaktif ke generator untuk magnetisasi dan memperbaiki faktor daya. Untuk mengetahui rating kapasitor yang diperlukan yaitu:

$$C = \frac{1}{6,28 \times f \times X_c} \dots \dots \dots (3.12)$$

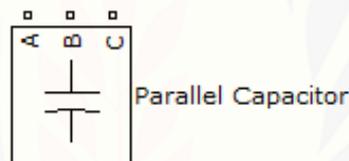
Dengan,

C = Kapasitansi

f = frekuensi

Xc = reaktansi ohm

Pada simulasi ini, Kapasitor yang digunakan adalah kapasitor paralel tiga fase, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4:



Gambar 3.4 Blok Diagram Kapasitor Paralel Tiga Fase

3.8 Pemodelan Sistem Pengaturan Generator

Sistem Pengaturan Generator atau *Induction Generator Controller* yang digunakan memiliki dua bagian utama, yaitu Kontrol Saklar dan beban komplemen. IGC memiliki kapasitas 4kW untuk setiap fasenya dengan beban komplemen yang merupakan beban resistif yang mengaplikasikan *Immersion Air Heater*

3.8.1 Sistem Regulator

Bekerja mengukur frekuensi dengan menggunakan Phase Locked Loop (PLL) yang dapat mengukur frekuensi sistem. frekuensi yang diukur akan dibandingkan dengan frekuensi referensi (50 Hz) untuk mengetahui tingkat ke-*error*-an. kemudian gelombang akan dimodulasi dengan PWM yang mengubah

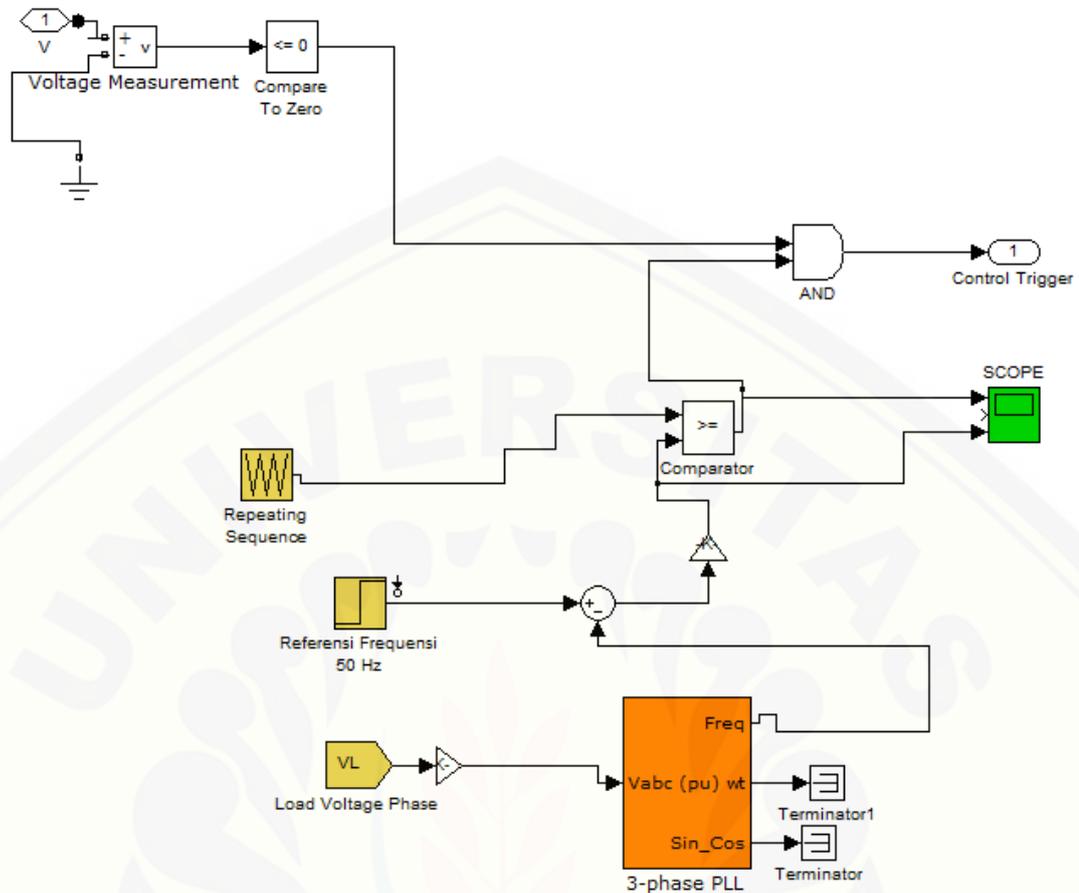
tegangan menjadi gelombang diskrit. Rangkaian PWM akan men-trigger ideal switch yang akan menutup dan membuka untuk menyalurkan beban berlebih ke beban komplemen,



Gambar 3.5 Blok Diagram Discrete Frequency Regulator

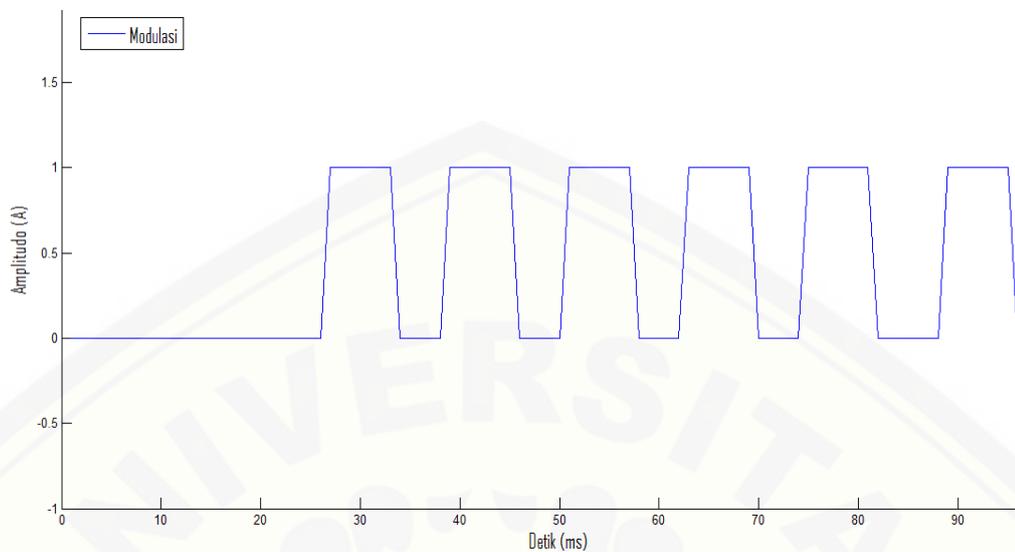
3.8.2 Pemodelan Switching PWM

Teknik Switching PWM menggunakan rangkaian *zero crossing detector* yang berguna mengubah tegangan fase sistem menjadi gelombang diskrit yang bernilai 1 dan 0 dengan menggunakan blok diagram *Compare to Zero* kemudian outputnya digabungkan dengan persamaan logika AND dengan rangkaian komparator. Rangkaian komparator yang terdiri atas gelombang segitiga dan frekuensi eror (Δf) atau selisih antara frekuensi referensi (50 Hz) dan frekuensi sistem dimana frekuensi sistem diketahui dengan menggunakan diagram blok *3-phase locked loop*. Frekuensi eror atau delta frekuensi akan digunakan sebagai informasi yang berguna bagi pensaklaran *switch*.



Gambar 3.6 Pemodelan Switching PWM pada Simulasi Generator Induksi

Gelombang segitiga yang digunakan sebagai *carrier* memiliki frekuensi 1 kHz dan amplitudo sebesar 6. Rangkaian komparator juga difungsikan sebagai *duty cycle* yang nantinya akan men-trigger saklar (switch) yang akan menutup dan membuka dan menyalurkan beban yang berlebihan ke rangkaian beban komplement. Pada tahap pengujian simulasi ini menggunakan beban resistif terpasang yang berjarak antara 0 sampai 4 kW dengan konfigurasi Y dan beban komplement bernilai tetap sebesar 4kW dengan konfigurasi Y



Gambar 3.7 Hasil Modulasi Gelombang Switching PWM

Lebar dari gelombang hasil modulasi PWM berbeda-beda bergantung pada seberapa banyak daya yang akan disalurkan ke beban komplemen. Semakin besar daya yang dibuang ke beban komplemen, maka semakin lebar hasil gelombang modulasi. Hasil gelombang dikirim ke *port control trigger* selanjutnya akan memberi aktivitas pada saklar.

3.9 Pemodelan Beban

Pembebanan tiga fase dalam pemodelan simulasi ini menggunakan dua jenis beban, beban yang digunakan adalah beban tiga fase tetap dan beban tiga fase yang fluktuatif sehingga konsep pembebanan menjadi dua tahapan. Untuk beban komplemen menggunakan beban resistif sebesar 4 kW



Gambar 3.8 Blok Diagram Beban Tiga Fase dan Beban Komplemen

Beban menggunakan tegangan rata-rata (V_{rms}) sebesar 400 V dan Frekuensi (f) 50 Hz dengan nilai daya reaktif yang diatur berbeda.

3.10 Pemodelan PID

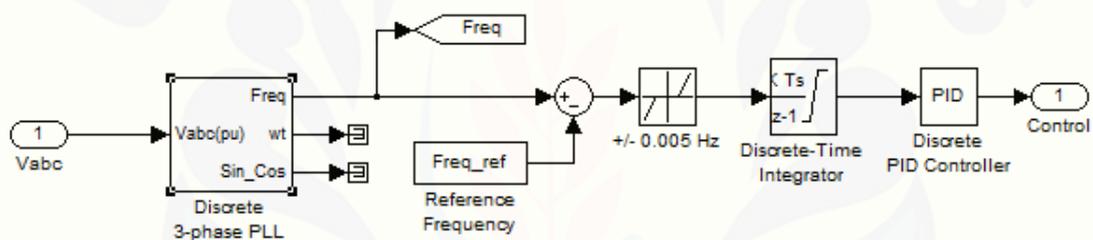
PID controller digunakan pada dua tahapan, tahap pertama adalah tahap perancangan PID controller agar mengompensasi nilai *error* pada sistem. tahap kedua adalah penentuan konfigurasi dari nilai K_p , K_i atau K_d yang sesuai agar mampu mengompensasi nilai *error* pada sistem yang berubah

3.10.1 Perancangan kontrol PID

Blok diagram control PID pada *Induction Generator Controller (IGC)*

Pada

Sistem Regulator:



Gambar 3.9 Blok Diagram subsistem *3-Phase Locked Loop* pada IGC

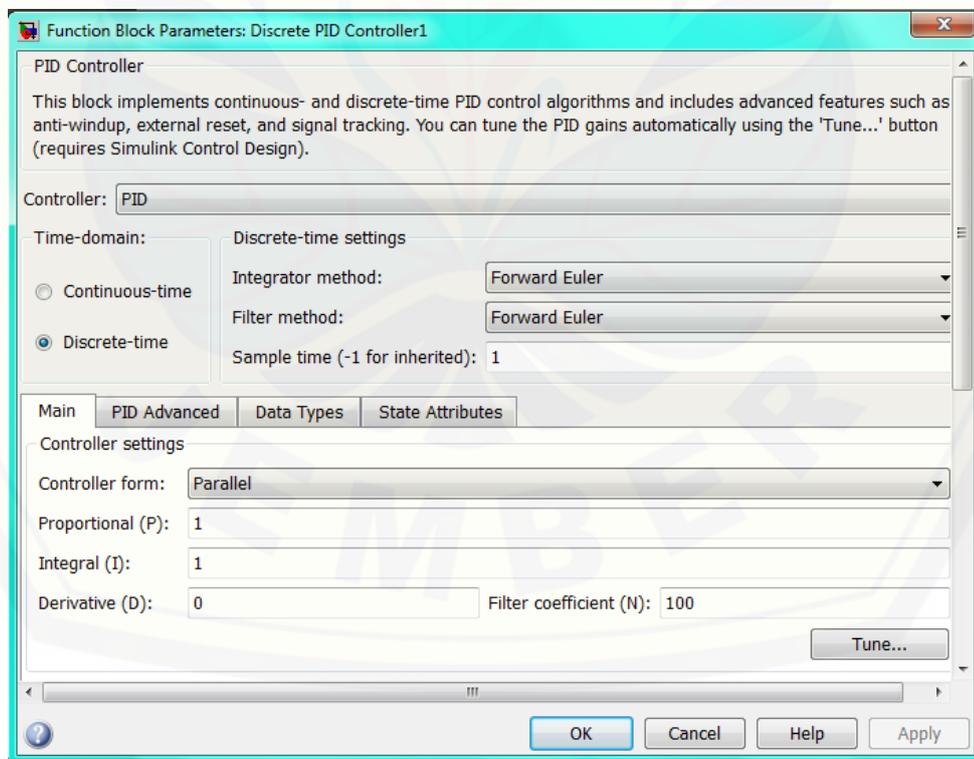
Pada gambar diatas, skema PID *controller* yang memproses frekuensi berupa hasil pengukuran pada pada *3-phase Locked Loop*. Pengukuran didapat melalui tegangan sistem (V_{abc}) yang diukur oleh *3-Phase Locked Loop (PLL)* dengan tegangan referensi yang diatur sistem *3-Phase Locked Loop* bisa digunakan untuk mensinkronkan sebuah set variabel frekuensi, sinyal sinus 3 fase. Output dari *3-Phase Locked Loop (PLL)* berupa frekuensi sistem yang telah diukur yang kemudian dibandingkan dengan frekuensi referensi (50Hz) untuk mendapatkan *error* yang selanjutnya akan menjadikan input dari kendali PID yang selanjutnya akan dilanjutkan ke pembagian beban komplemen

3.10.2 Penentuan konfigurasi nilai K_p , K_i dan K_d

Aspek berikutnya yang sangat penting dalam desain kontroler PID ialah penentuan parameter kontroler PID supaya sistem memenuhi kriteria performansi yang diinginkan. Hal ini disebut juga dengan *tuning* kontroler. *tuning* parameter atau penalaan pada pengontrol 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.

Pada pengujian sistem ini akan dilakukan beberapa pengujian pada respon sistem *plant* antara lain :

- Identifikasi *plant* pada saat open loop tanpa kontroler dengan Sinyal uji berupa unit step.
- Tanpa kontrol P, PI dan PID metode Ziegler-Nichols.
- Dengan kontroler PID metode Ziegler-Nichols tanpa beban dan penggunaan beban.



Gambar 3.10 Blok Parameter pada PID *controller*

Untuk mengetahui set parameter PID (K_p , K_i , dan K_d) serta parameter lainnya seperti *time sampling*, *set point*, dan lain-lain dilakukan langkah metode berikut ini:

- a. Penentuan dilakukan dengan tindakan kontrol proporsional dengan $K_i=0$ dan $K_d=0$, nilai K_p ditingkatkan dari nol hingga ke nilai kritis K_{cr} sehingga mula-mula keluaran memiliki osilasi yang berkesinambungan.
- b. Dari keluaran yang berkesinambungan, penguatan kritis K_{cr} dan periode P_{cr} dapat ditentukan
- c. Menghitung nilai K_p , T_i dan T_d sesuai aturan Ziegler-Nichols yaitu

$$\begin{aligned} K_p &= 0,6 \times K_{cr} \\ T_i &= 0,5 \times P_{cr} \\ T_d &= 0,125 \times P_{cr} \dots\dots\dots (3,13) \end{aligned}$$

- d. Nilai K_i dan K_d dapat dihitung dengan persamaan

$$\begin{aligned} K_i &= \frac{K_p}{T_i} \\ K_d &= K_p \times T_d \dots\dots\dots (3,14) \end{aligned}$$

(Hidayat Pribadi. 2013)

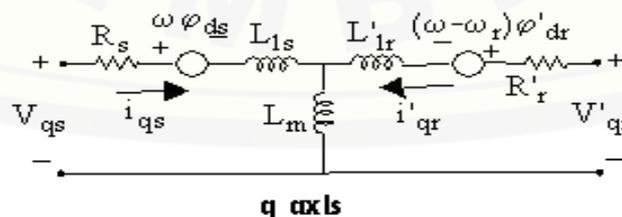
Setelah mendapatkan nilai-nilai tertentu selanjutnya dilakukan percobaan *trial and error* setelah melihat hasil dan perkembangan dari *respons time* (RT) yang lebih baik lagi

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian sistem berdasarkan teori penunjang dan hasil perancangan yang ada pada bagian sebelumnya. pengujian dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap pengujian sistem pembangkit tanpa kontrol beban komplemen dan sistem pembangkit dengan menggunakan kontrol disertai beban komplemen. Pada pengujian dengan kontrol, terdapat dua jenis kontrol yaitu dengan kontrol trigger menggunakan PWM dan kontrol PID berdasarkan pemberian variasi beban konsumen yang telah direncanakan. Data akan ditampilkan dalam bentuk grafik serta dilakukan perbandingan antara satu tahap dengan yang lain.

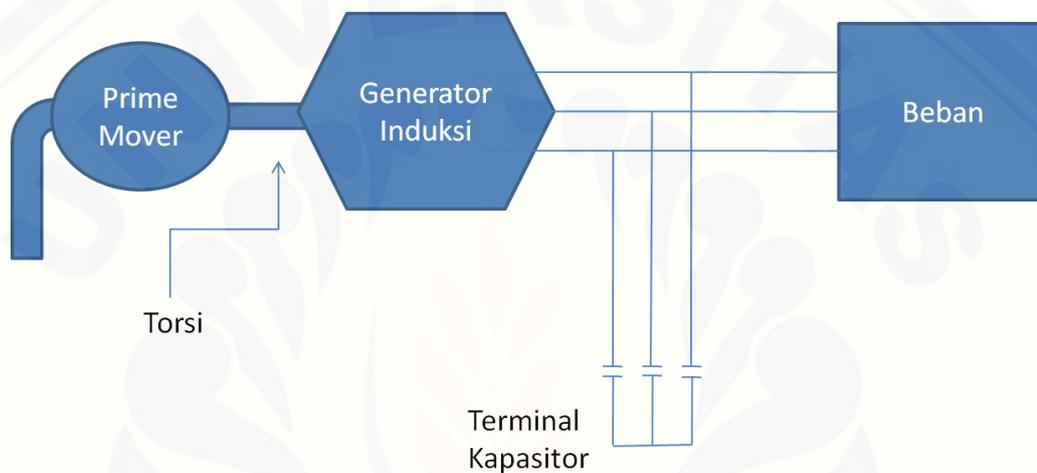
4.1 Pemodelan Mesin Induksi Sebagai Generator

Pengujian pertama adalah memodelkan mesin induksi yang bertujuan agar mesin induksi dapat bekerja sebagai generator. Oleh karena itu, prinsip pemodelan mesin induksi tersebut harus dieksitasi dengan menggunakan tegangan yang leading yang biasanya dihubungkan kepada sistem eksitasi yang pada sistem ini menggunakan kapasitor. Pada simulasi dari skripsi ini, generator bersifat Standalone atau berpenguat sendiri yang artinya terpisah dari jaringan tenaga listrik seperti PLN. Sehingga pada generator induksi ini kapasitor digunakan untuk menyuplai daya reaktif. Daya reaktif yang diberikan harus sesuai dengan daya yang diambil mesin induksi beroperasi sebagai motor. Pada simulasi ini, Generator induksi yang digunakan memiliki kapasitas 4 kW dengan pf 0.8 dengan kriteria Daya aktif atau P sama dengan 3500 W.



Gambar 4.1 Sistem Elektris Mesin Induksi Rotor Sangkar pada Simulasi

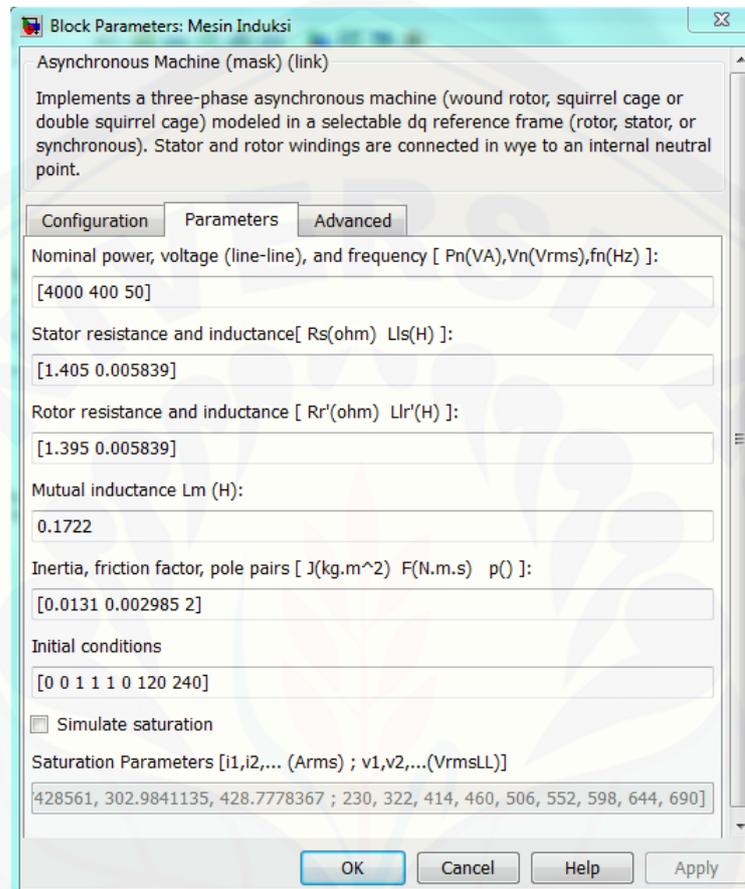
Ketika mesin induksi (generator) diputar yang dalam simulasi ini berupa torsi, magnet sisa pada rangkaian medannya menghasilkan tegangan yang kecil. Tegangan yang kecil ini menghasilkan aliran arus kapasitif hingga mencapai tegangan terbangkit penuh. Jika tidak ada fluks sisa pada yang terdapat pada mesin induksi sehingga generator harus dimagnetisasi terlebih dahulu dengan menjalankannya sebagai motor.



Gambar 4.2 Skema Model Generator Induksi Berpenguat Sendiri

Pada model simulasi, mesin induksi atau mesin asinkron termodelkan dalam bentuk yang ideal. Ketika mesin induksi yang diharapkan dapat bekerja sebagai generator, terdapat kondisi tertentu yang harus dimiliki mesin induksi yaitu salah satunya harus tersedia flux sisa pada inti besi mesin induksi yang dibutuhkan untuk emf balik yang nantinya bisa digunakan untuk membangkitkan medan magnet pada rotor. Untuk mengatasi itu maka pada parameter mesin induksi ditentukan nilai kondisi awal (initial conditions) pada arus stator sebesar 1 A pada setiap fasanya dengan perbedaan 120° antar fasanya. Berdasarkan karakteristik torsi seperti yang dicantumkan pada bab sebelumnya, generator Induksi agar dapat beroperasi harus diputar melebihi kecepatan sinkronnya oleh sebuah penggerak mula eksternal sehingga menghasilkan nilai slip negatif yang

dalam sistem pembangkit tenaga air ini adalah turbin air itu namun disimulasikan dalam bentuk masukan torsi. Maka pada simulasi, slip diberi nilai 0 (no) pada parameter kondisi awal.



Gambar 4.3 Parameter Generator Induksi pada simulasi

Jenis mesin induksi yang digunakan sebagai generator adalah tipe sangkar tupai (squirrel-cage) karena jenis ini lebih sering digunakan untuk dunia industri karena konstruksinya yang sederhana dan kokoh dibandingkan jenis mesin induksi yang lain, serta lebih efisien, lebih murah, dari segi perbaikan, lebih murah biaya, berat, volume, serta menyesuaikan dengan PLTMh Suger. Kerangka acuan (reference frame) yang digunakan berupa synchronous dengan asumsi tegangan rotor dan stator seimbang.

Tabel 4.1 Spesifikasi Mesin Induksi sebagai Generator

No	Keterangan	Nilai
1	Daya	4 kW
2	Jumlah Pasang Kutub	2
3	Tahanan Stator	1.405
4	Tahanan Rotor	1.395
5	Induktansi Stator	0.005839
6	Induktansi Rotor	0.005839
7	Induktansi bersama	0.1722
8	Momen Inersia	0.0131
9	Kondisi Awal :	
	Slip	0
	Arus Stator ab dan Besar Sudut	$1 < 0^\circ$ A
	Arus Stator bc dan Besar Sudut	$1 < 120^\circ$ A
	Arus Stator ca dan Besar Sudut	$1 < 240^\circ$ A

Untuk menentukan besar daya reaktif yang diperlukan suatu mesin induksi sebagai generator, maka menggunakan persamaan dengan kriteria mesin induksi sebagai berikut:

Daya reaktif

$$Q = \sqrt{(S^2 - P^2)}$$

Generator Induksi kapasitas 4kW dan *pf*Daya penuh penuh 0.8 maka:

$$S = 4000$$

$$P = 4000 \cdot 0.8 = 3200$$

$$Q = \sqrt{4000^2 - 3200^2}$$

$$= 2395.01 \text{ dibulatkan } 2400 \text{ Var}$$

Maka nilai kapasitor yang digunakan 2400 Var.

Namun, nilai tersebut apabila dimasukkan ke dalam simulasi belum memenuhi daya reaktif dari generator induksi yang digunakan. Hal ini dibuktikan dari frekuensi yang dihasilkan masih terlalu rendah dari frekuensi normal (50 Hz). Untuk itu diperlukan perhitungan kembali dengan melakukan penyesuaian dengan reaktansi magnetik pada generator induksi.

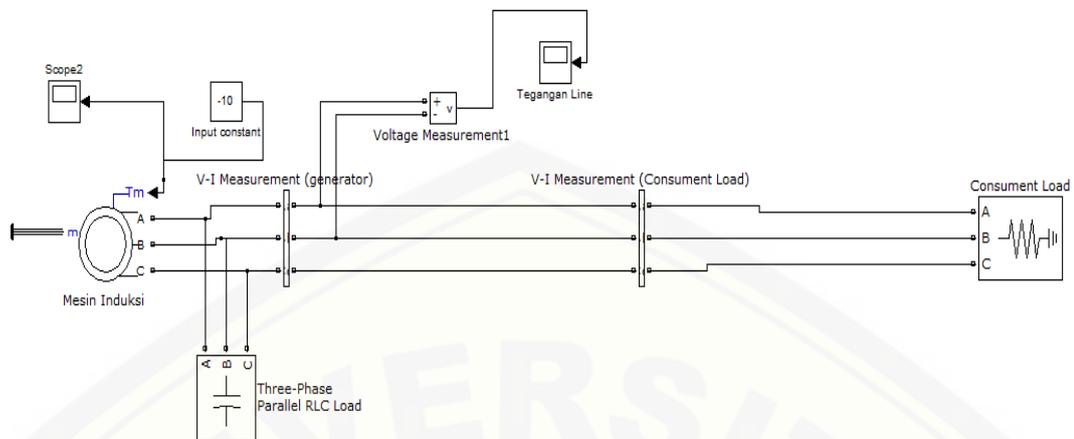
Tabel 4.2 Penentuan Nilai Kapasitor pada Generator Induksi Beban Penuh
4 kW

Kapasitor	Frekuensi	Keterangan
2000	66.71	Frekuensi yang dihasilkan terlalu tinggi (>50 Hz)
3500	49.6	Frekuensi yang dihasilkan hampir sesuai (~50 Hz)
5000	40.41	Frekuensi yang dihasilkan terlalu rendah (<50 Hz)

Penulis melakukan sistem *trial and error* sehingga didapatkan nilai kapasitor yang sesuai yaitu 3500 Var pada sistem 3 fase dengan beban resistif 4 Kw yang berfrekuensi 50 Hz (hasil simulasi 49.76 Hz). Namun, pada pengujian generator induksi tanpa beban komplemen dengan beban resistif variatif, nilai kapasitor ditentukan secara uji coba untuk mengetahui setiap pengaruhnya yang akan dijelaskan lebih lanjut di sub-bab berikutnya.

4.2 Pengujian Generator Induksi Tanpa Beban Komplemen

Simulasi pertama menjalankan sistem dasar generator induksi eksitasi sendiri tanpa dilengkapi beban komplemen. Beban yang digunakan beban resistif sebesar 4kW dengan konfigurasi wye. Karakteristik torsi seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, ketika mesin induksi diputar dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada kecepatan sinkronnya maka arah torsi akan berbalik dan mesin induksi bekerja sebagai generator. Pada pengujian mesin Induksi sebagai generator, input awal yang digunakan berupa torsi sebesar 15 Nm dengan nilai yang konstan. Karena mesin bersifat generator maka torsi bernilai negatif (-15 Nm) dengan detik 0 sampai 5.



Gambar 4.4 Blok Diagram Simulasi Generator Induksi Tanpa Beban Komplemen

Pada simulasi generator induksi tereksitasi sendiri ini menggunakan kapasitor yang bernilai statis ketika simulasi dijalankan. Berdasarkan hasil tabel diatas dengan variasi beban 1 kW, 2 kW dan 4 kW dengan variasi nilai kapasitor yang berbeda untuk setiap uji simulasi menghasilkan pengaruh tegangan dan frekuensi yang berbeda

Tabel 4.3 Hasil Data Simulasi Generator Induksi Sebagai Generator dengan Torsi Masukan 15 Nm

Torsi Masukan : 15 Nm							
No	Beban Resistif terpasang (kW)	Kapasitas Kapasitor 3-fase (Var)	Tegangan Peak line-line (Volt)	Frekuensi (Hz)	Daya (kW)	Arus Puncak (A)	Kec. Putar (rad/s)
1	1	2000	907	59.93	2.57	3.27	190.3
2		3500	780.6	45.7	1.9	2.82	145
3		5000	700	37.55	1.53	2.53	119.3
4	2	2000	653.2	61.39	2.67	4.72	196.7
5		3500	566	46.62	2	4.1	149.4
6		5000	510.6	38.26	1.63	3.69	122.6
7	4	2000	479	66.71	2.8	6.95	217.6
8		3500	413.8	49.6	2.14	5.97	162.3
9		5000	372.4	40.41	1.734	5.37	131.8

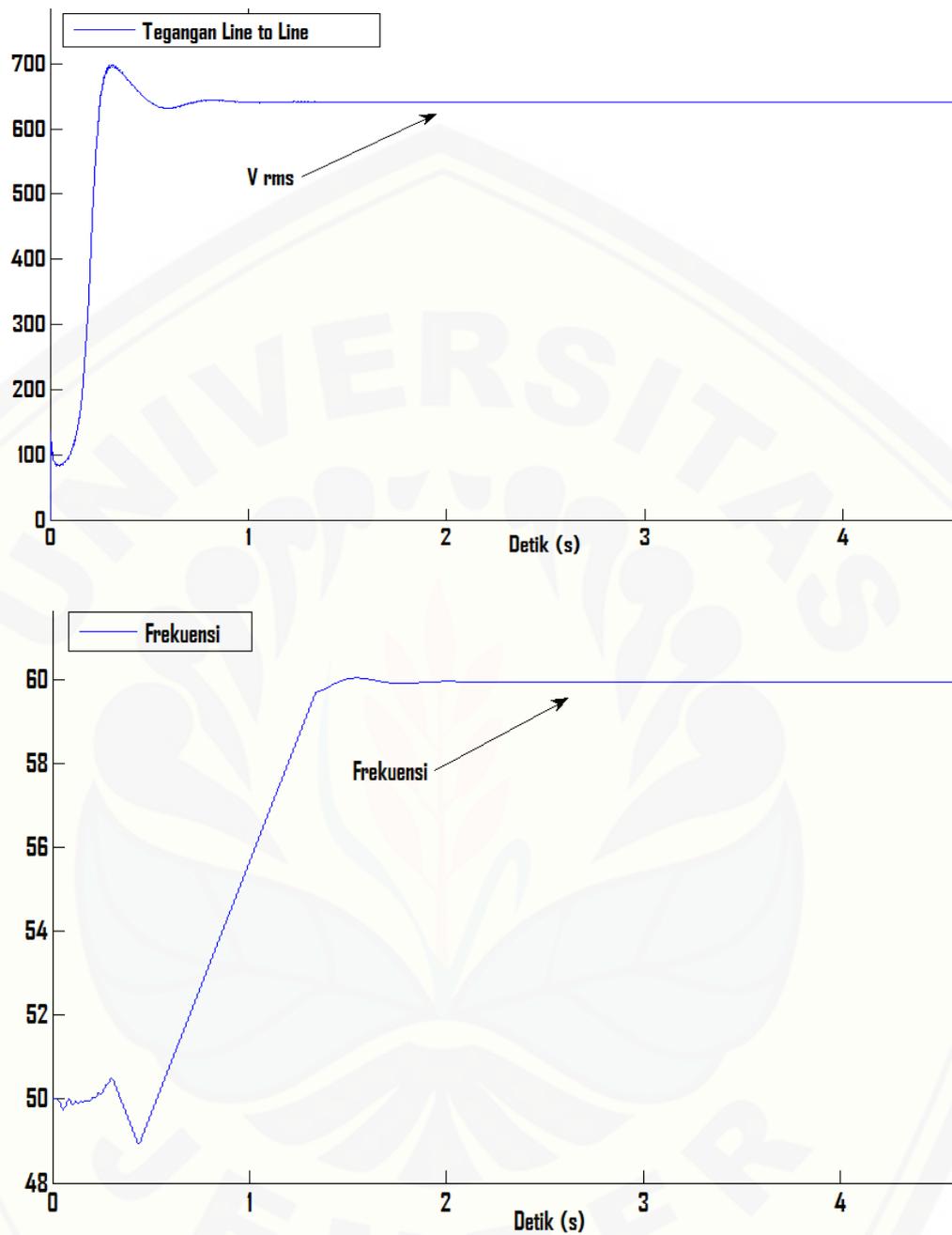
. Kita ambil contoh pada beban resistif 2 kW dengan kapasitor 2 kVar menghasilkan tegangan peak line to line sebesar 653.2 V dan Frekuensi sebesar 61.39 Hz. Ketika nilai kapasitor ditambah menjadi 3,5 kVar dan disimulasikan kembali menghasilkan nilai tegangan peak Line to Line sebesar 566 V dan Frekuensi sebesar 46.62 Hz. Dari hasil tabel kita bisa menyimpulkan bahwa dengan beban tetap dan torsi tetap, semakin besar nilai kapasitor maka semakin kecil nilai tegangan yang dihasilkan dan semakin kecil pula frekuensi yang dihasilkan

Hasil tabel berbanding terbalik dengan teori generator induksi bahwa ketika torsi masukan tetap, sedangkan beban semakin kecil maka frekuensi akan semakin besar. Pada simulasi, Hal ini disebabkan kapasitor pada sistem daya listrik menimbulkan daya reaktif yang memperbaiki tegangan dan faktor daya sehingga dengan penambahan kapasitor akan mengurangi tegangan dan frekuensi

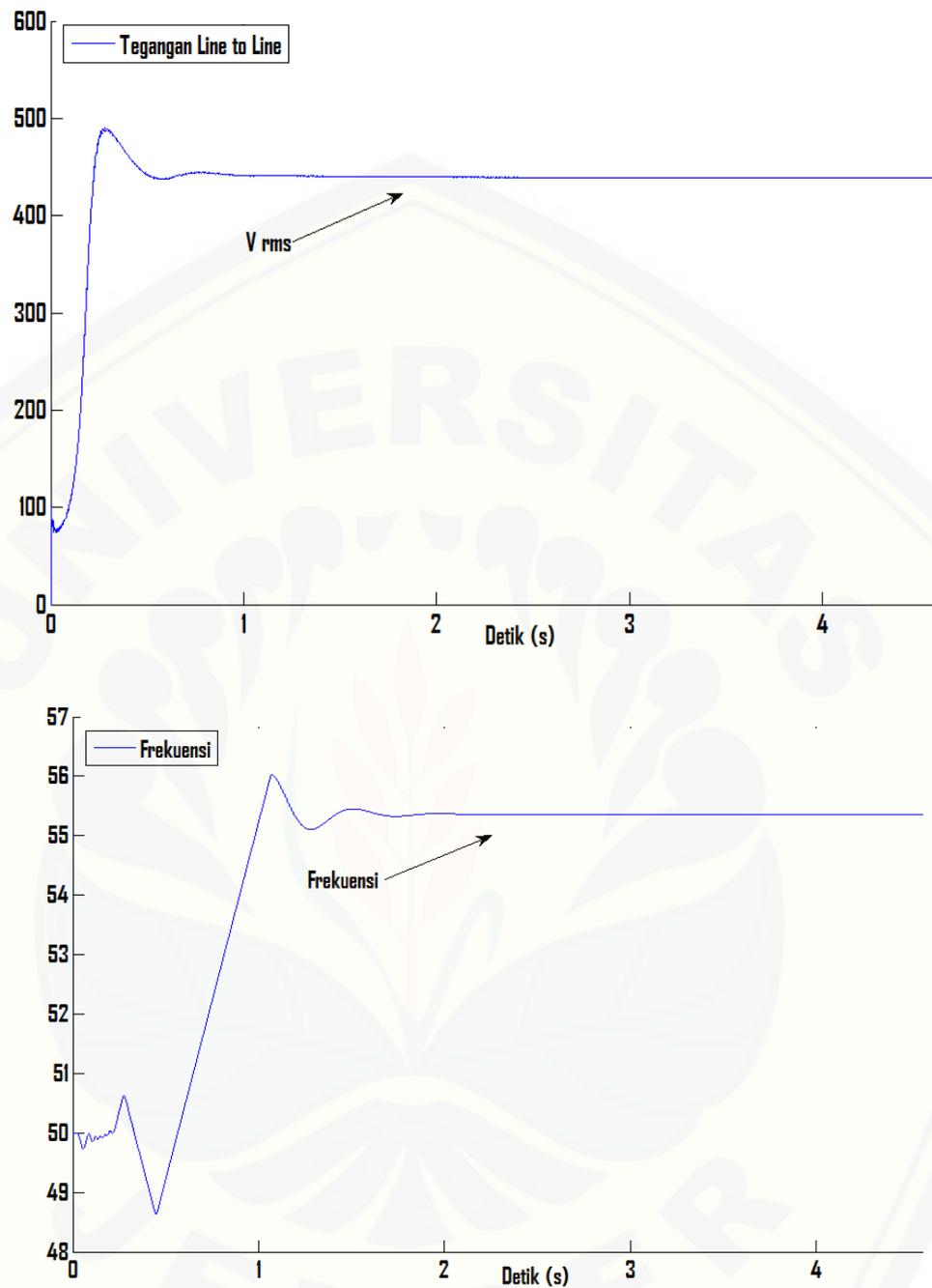
yang berimbas pada berkurangnya daya yang dihasilkan. Frekuensi yang semakin kecil mengakibatkan kecepatan putaran juga semakin kecil.

Pada simulasi ini, kapasitor yang digunakan merupakan kapasitor statis sehingga untuk menyesuaikan kebutuhan daya reaktif dengan beban resistif pada generator induksi yang digunakan perlu diubah-ubah untuk mendapatkan nilai frekuensi dan tegangan yang sesuai dengan sistem. Karena pada simulasi ini tidak terdapat pengatur tegangan yang dapat menyesuaikan tegangan ketika beban berubah namun hanya berupa kapasitor statis yang nilainya diubah secara manual.

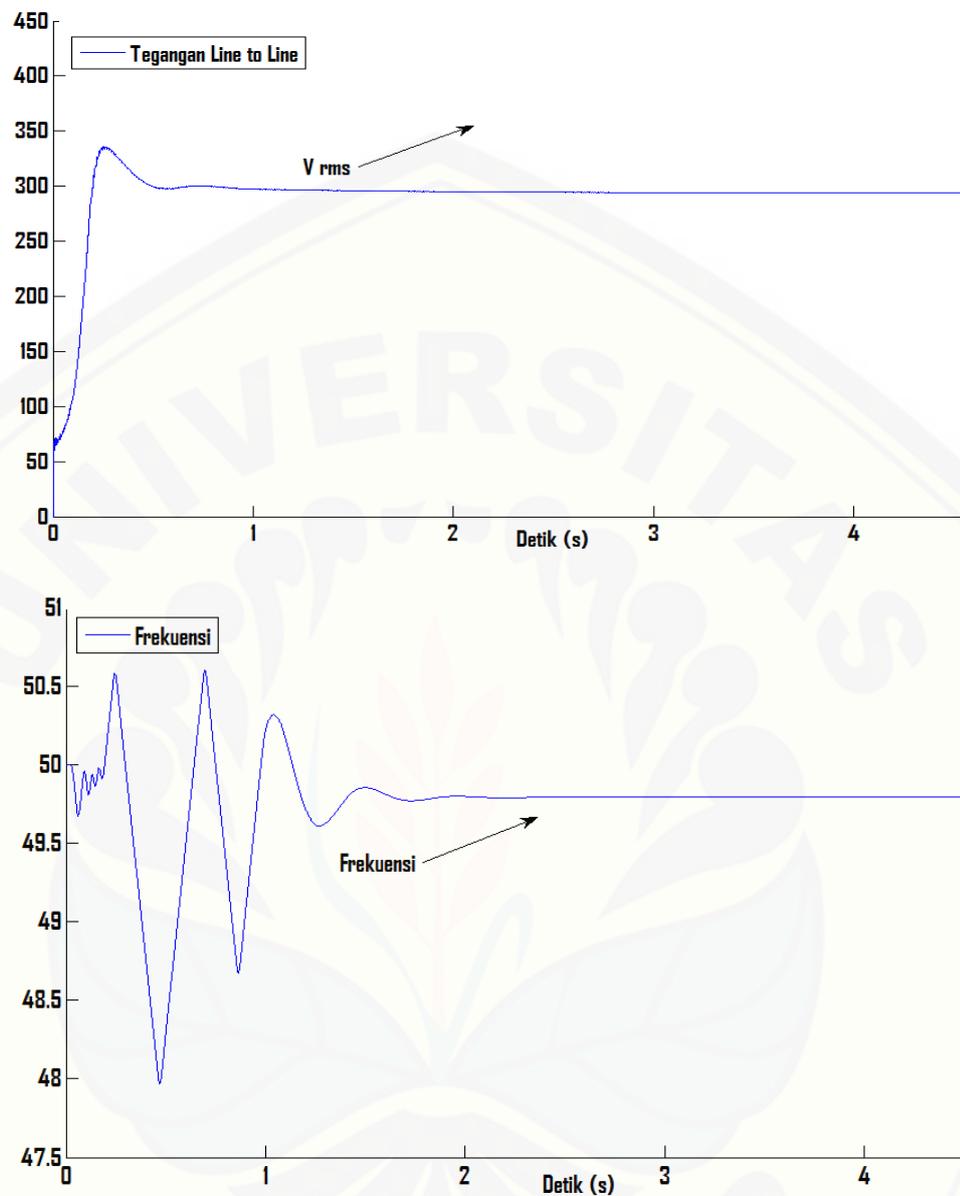
Selanjutnya akan ditampilkan gambar profil grafik antara tegangan Rms. dan frekuensi. Berdasarkan gambar profil grafik pada gambar 4.5 hingga gambar 4.7 menampilkan beban resistif terpasang 1 kW, 2 kW, 3 kW dan 4 kW dengan nilai kapasitor yang berbeda pada setiap pengujian. Penulis mengambil contoh pada grafik beban resistif 4 kW dengan nilai kapasitor 3500 Var. Dari gambar grafik terlihat bahwa ketika simulasi dijalankan gelombang tegangan dan kecepatan putar beresilasi hingga terjadi keadaan transien pada detik 0.57 dan Tegangan line to line Rms yang dihasilkan bernilai 293.5 V sedangkan untuk frekuensi yang ditampilkan pada profil grafik mencapai keadaan setimbang ketika mencapai detik 1.37 dan Frekuensi yang dihasilkan bernilai 49,79 Hz.



Gambar 4.5 Profil Grafik V_{rms} dan Frekuensi pada Beban Resistif 1 kW
($C=2000 \text{ Var}$)



Gambar 4.6 Profil Grafik Vrms dan Frekuensi pada Beban Resistif 2 kW
(C=2500 Var)



Gambar 4.7 Profil Grafik Vrms dan Frekuensi pada Beban Resistif 4 kW
($C=3500$ Var)

Dari grafik diatas kita dapat mengambil beberapa hasil. Percobaan pertama yaitu beban resistif 1 kW dengan kebutuhan daya reaktif sebesar 2000 Var. Tegangan Peak Line to Line yang dihasilkan sebesar 907 V. Frekuensi yang dihasilkan sebesar 59.93 Hz. Kecepatan Putar yang dihasilkan bernilai 190.3 rad/s dan daya yang dihasilkan sebesar 2,57 kW. Percobaan kedua dengan beban resistif

2 kW dengan kebutuhan daya reaktif sebesar 2500 Var. Tegangan Peak Line to Line yang dihasilkan sebesar 620 V. Frekuensi yang dihasilkan sebesar 55,36 Hz. Kecepatan Putar yang dihasilkan bernilai 177,3 rad/s dan daya yang dihasilkan sebesar 2,4 kW.

Percobaan ketiga yaitu beban resistif 4 kW dengan kebutuhan daya reaktif sebesar 3500 Var. Tegangan Peak Line to Line yang dihasilkan sebesar 413,8 V. Frekuensi yang dihasilkan sebesar 49,6 Hz. Kecepatan Putar yang dihasilkan bernilai 162,3 rad/s dan daya yang dihasilkan sebesar 2,14 kW. Dari percobaan kita dapat menyimpulkan bahwa dengan perubahan beban resistif mempengaruhi kebutuhan nilai kapasitor (suplai daya reaktif). Selanjutnya, Semakin kecil beban resistif yang digunakan maka semakin tinggi pula frekuensi yang dihasilkan. Dengan semakin kecilnya nilai beban resistif yang digunakan juga mempengaruhi nilai tegangan. Tegangan yang dihasilkan semakin besar.

4.3 Pengujian Generator Induksi dengan Beban Berubah Tanpa Beban Komplemen

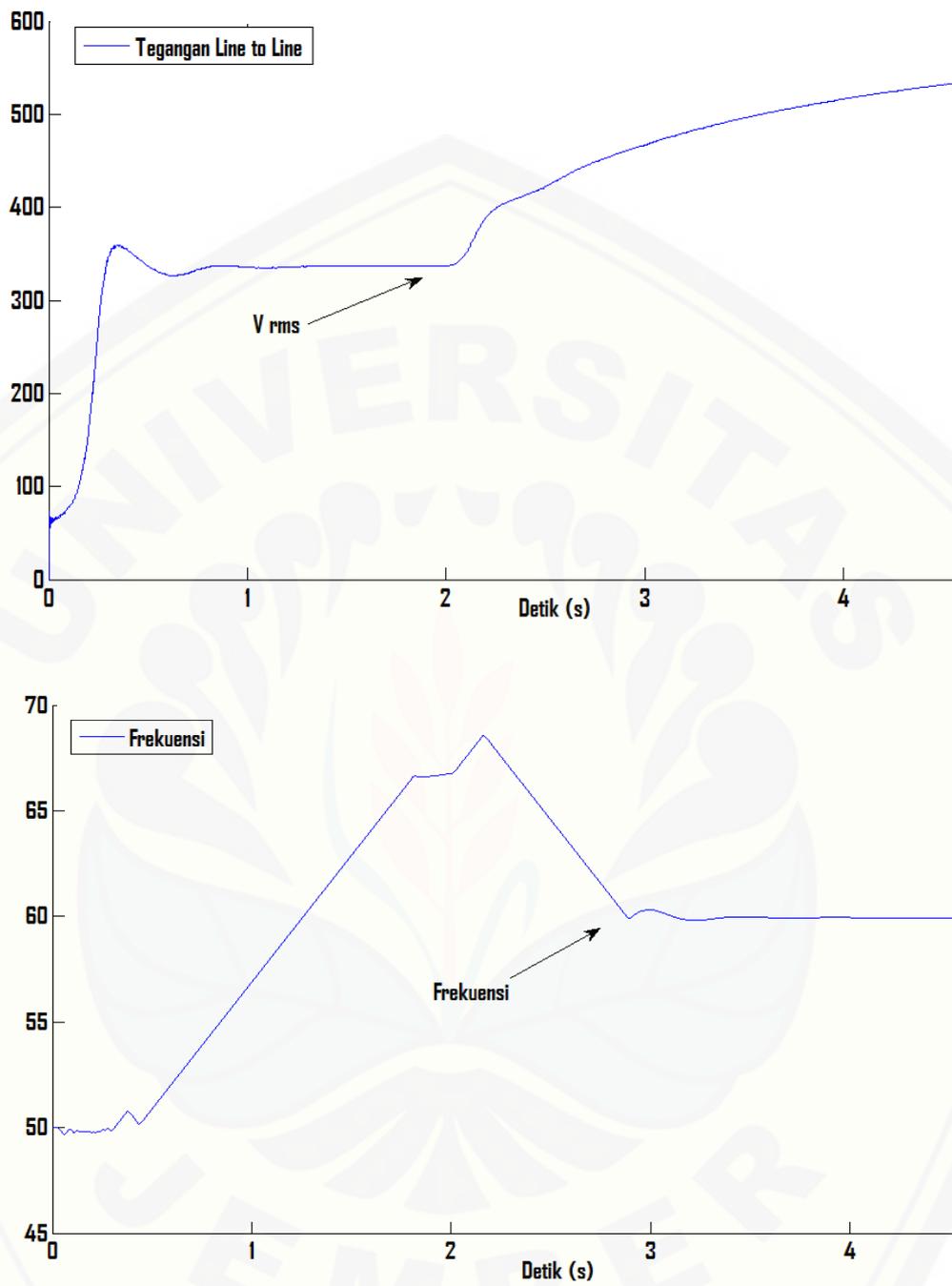
Pengujian selanjutnya dengan memodelkan Mesin induksi sebagai generator dengan beban berubah dengan menggunakan dua tipe pembebanan. Pada simulasi ini memiliki susunan sistem yang hampir sama dengan pengujian simulasi sebelumnya, hanya saja yang membedakan adalah beban konsumen yang digunakan. Pertama, beban yang menggunakan beban resistif sebesar 1 kW dengan konfigurasi Y dan Beban resistif kedua yang dilengkapi breaker dan akan nonaktif setelah waktu 2 detik dengan besar 3kW dengan konfigurasi Y sehingga total beban antara 0 sama 2 detik adalah 4 kW dan setelah 2 detik hingga 5 detik adalah 1 kW. Kedua, beban menggunakan beban resistif sebesar 2 kW dengan konfigurasi Y dan beban resistif kedua sebesar 2 kW dengan konfigurasi Y sehingga total beban antara 0 sampai 2 detik adalah 2 dan setelah 2 detik hingga 5 detik adalah 4 kW. Yang terakhir, beban menggunakan beban resistif sebesar 3 kW dengan konfigurasi Y dan beban resistif kedua sebesar 1 kW dengan konfigurasi Y sehingga total beban antara 0 sampai 2 detik adalah 4 dan setelah 2

detik hingga 5 detik adalah 4 kW. Hasil dari simulasi akan dibandingkan antara satu sama lain.

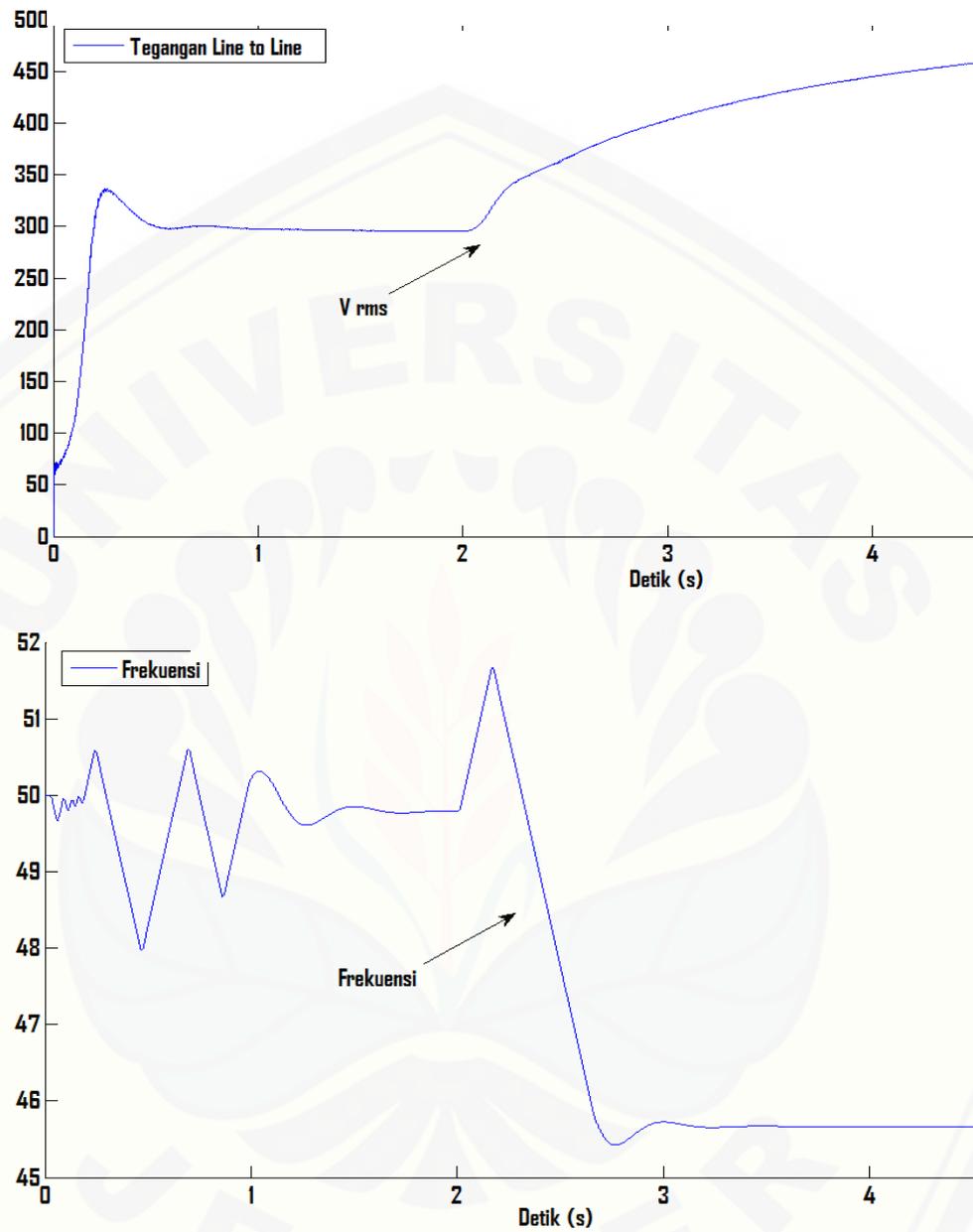
Tabel 4.4 Hasil Data Generator Induksi dengan Beban Berubah Tanpa Beban Komplemen

Torsi Masukan : 15 Nm							
No	Beban Resistif terpasang (kW)	Beban Resistif terhubung saklar	Kapasitor (Var)	Frekuensi (Hz)	Daya (kW)	V peak Line-to-Line (V)	Kec. Putar (rad/s)
1	1	3	2000	59.93	2.57	907	190.3
2			3500	45.7	1.9	780.6	145
3			5000	37.55	1.53	700	119.3
4	2	2	2000	61.39	2.67	653.2	196.7
5			3500	46.62	2	566	149.4
6			5000	38.26	1.63	510.6	122.6
7	3	1	2000	64.95	2.75	542	205.6
8			3500	47.76	2.07	470	155.1
9			5000	38.74	1.68	423.8	128.7

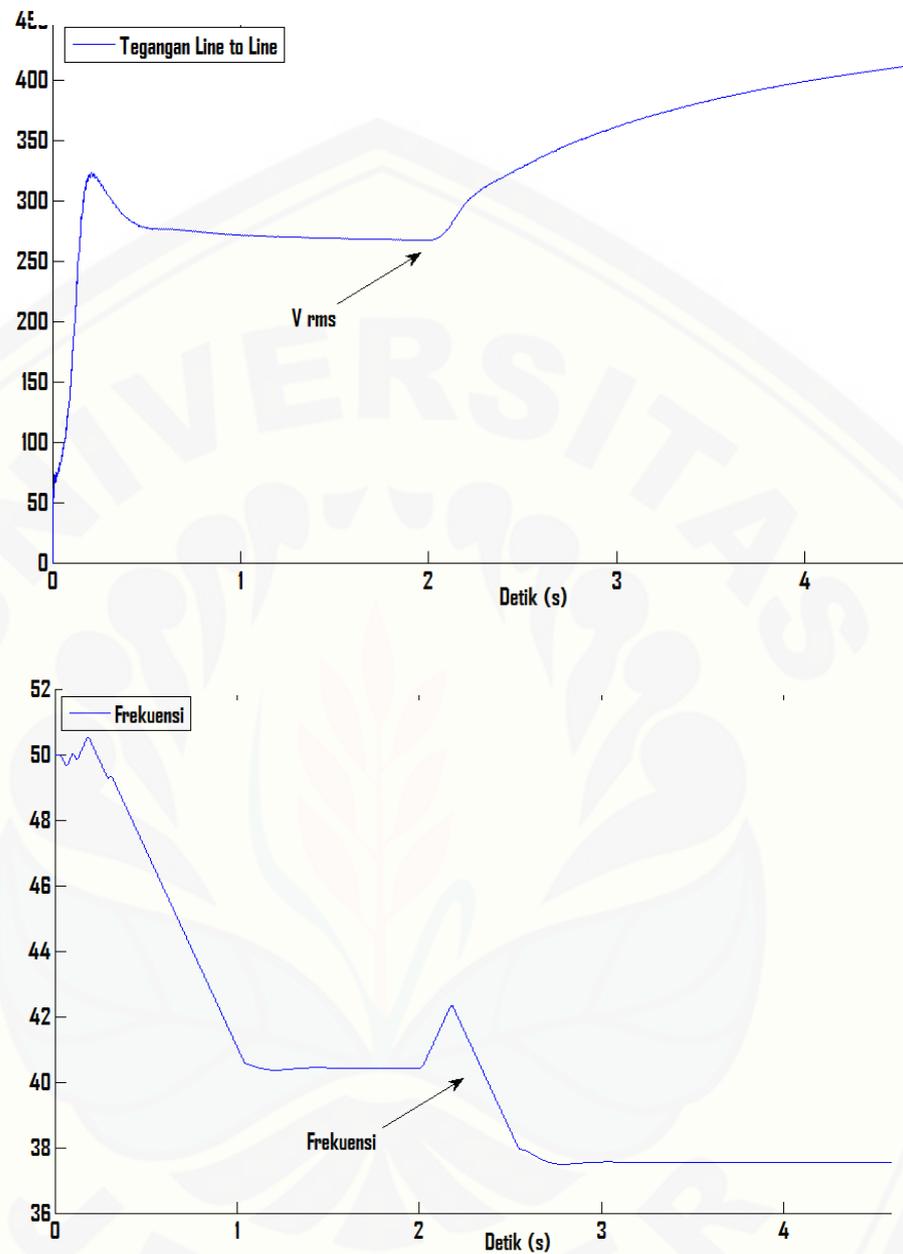
Pengujian ini menggunakan menggunakan dua beban dimana pada kondisi awal total beban konsumen dibuat 4 kW, kemudian setelah 2 detik beban resistif terhubung saklar akan non-aktif (switch off) sehingga beban yang digunakan hanya beban resistif terpasang.



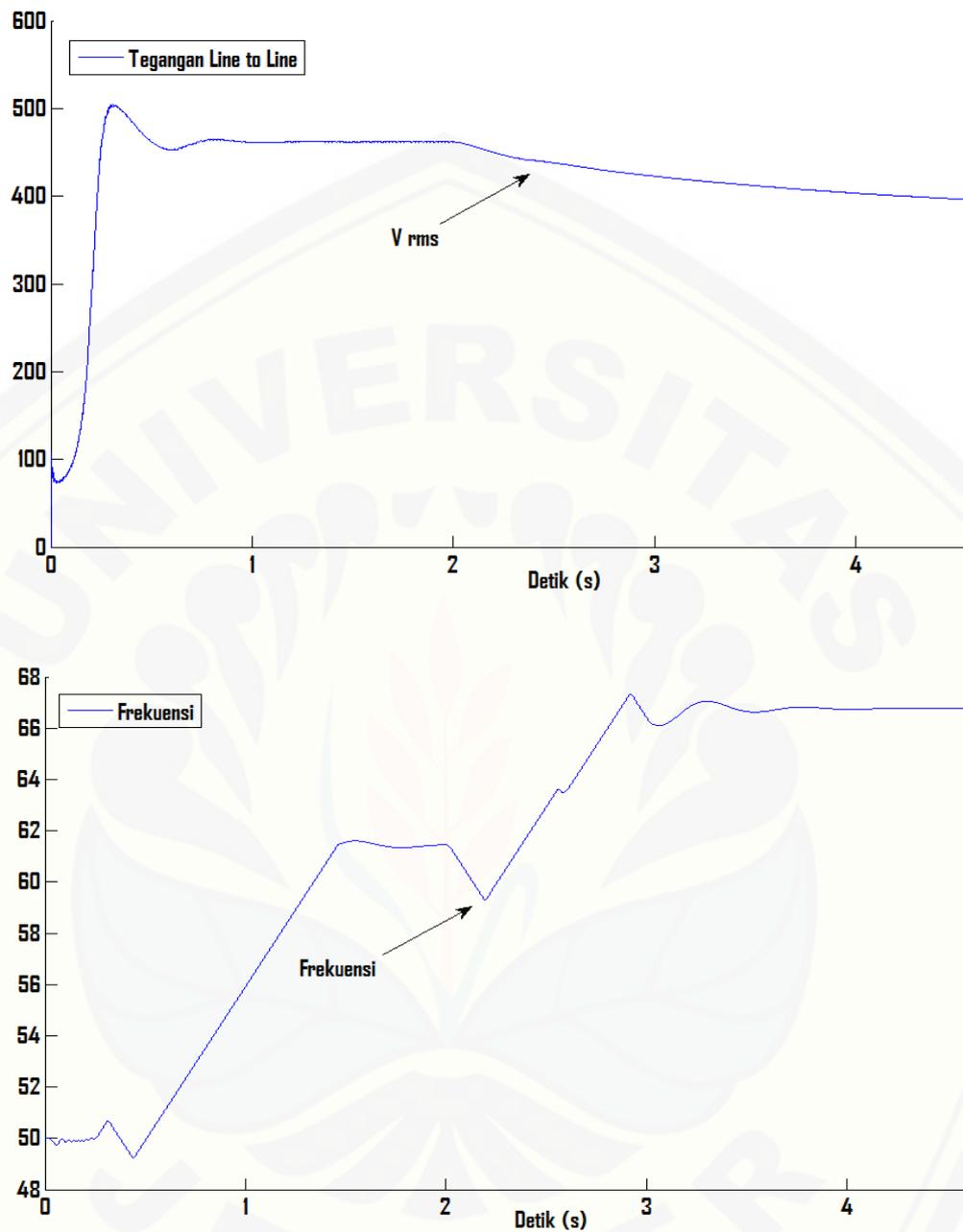
Gambar 4.8 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
 Beban Resistif Variatif 4 kW ke 1 kW ($C=2000$ Var)



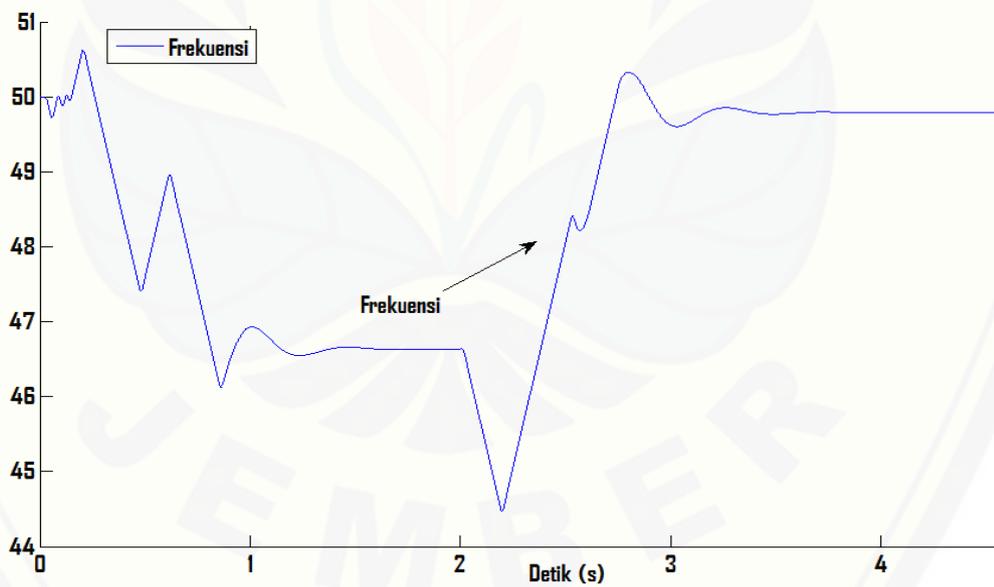
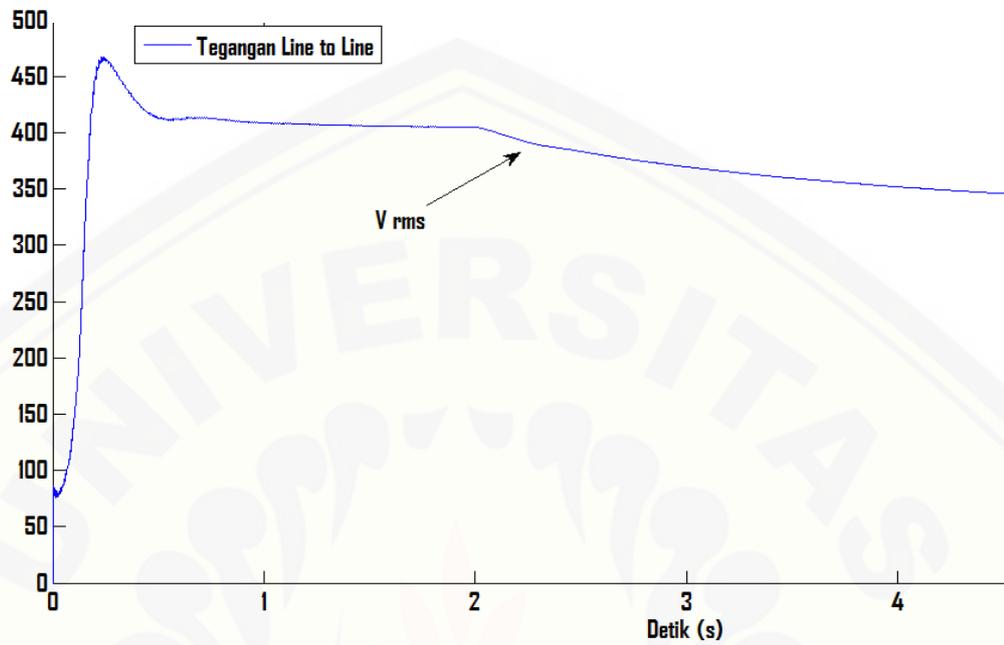
Gambar 4.9 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 4 kW ke 1 kW ($C=3500$ Var)



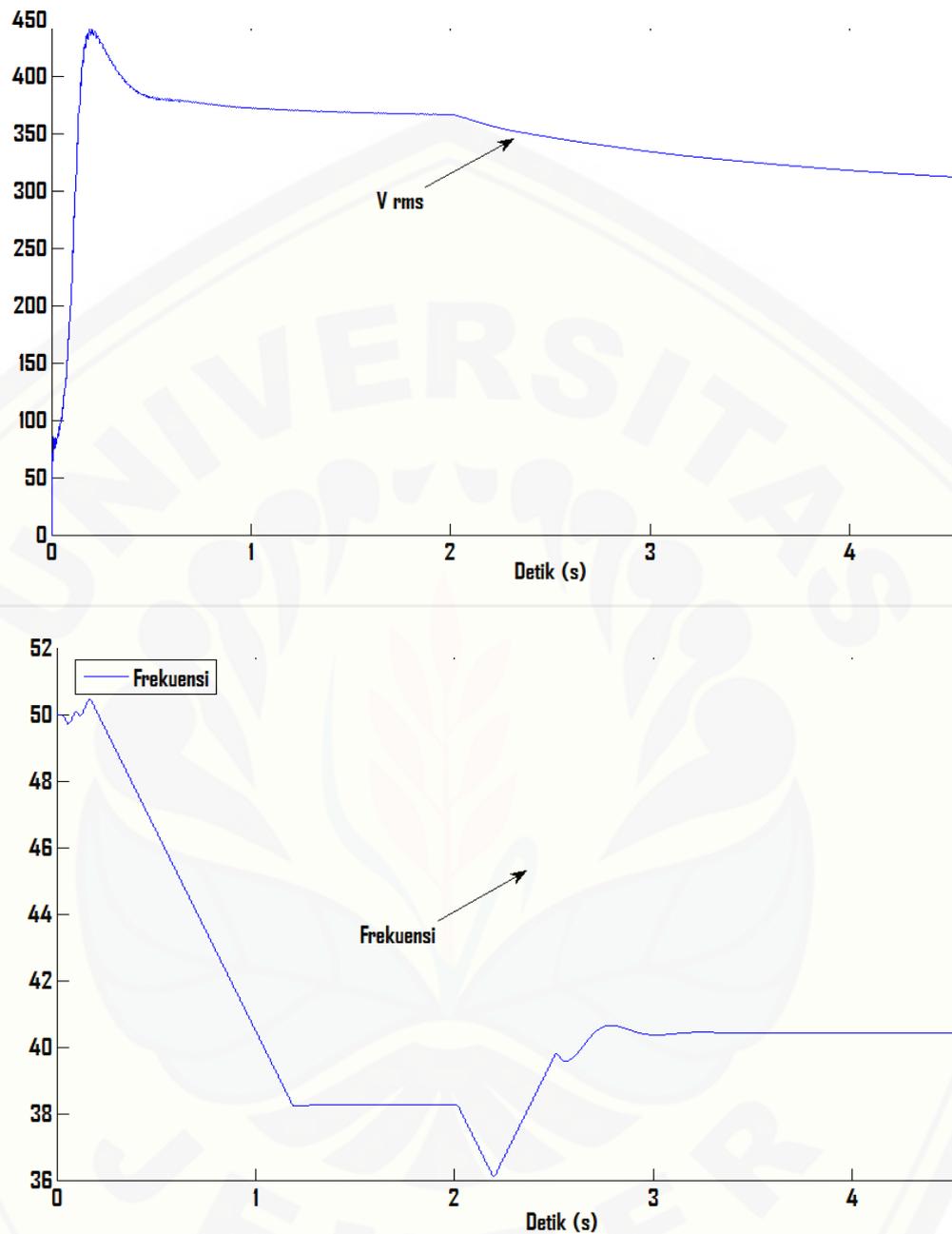
Gambar 4.10 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 4 kW ke 1 kW ($C=5000$ Var)



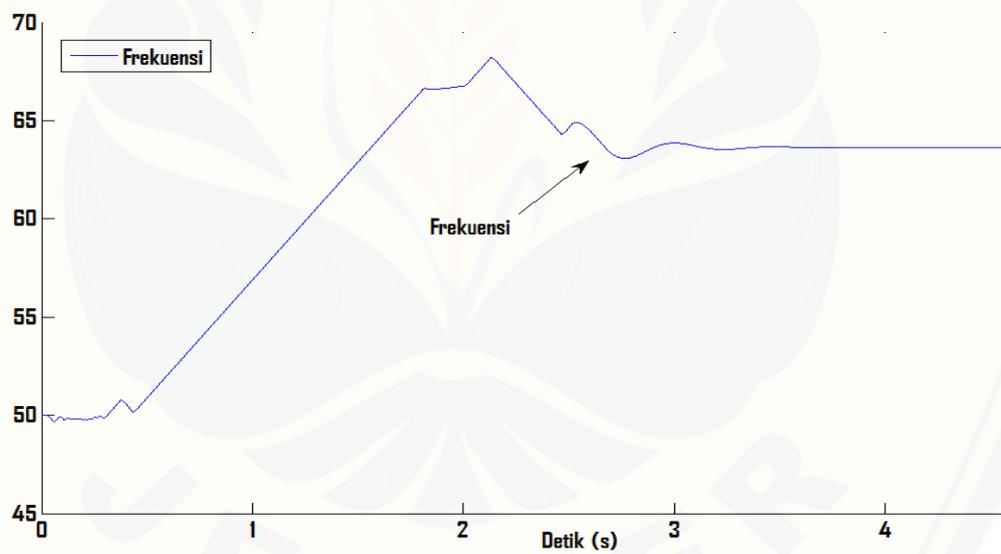
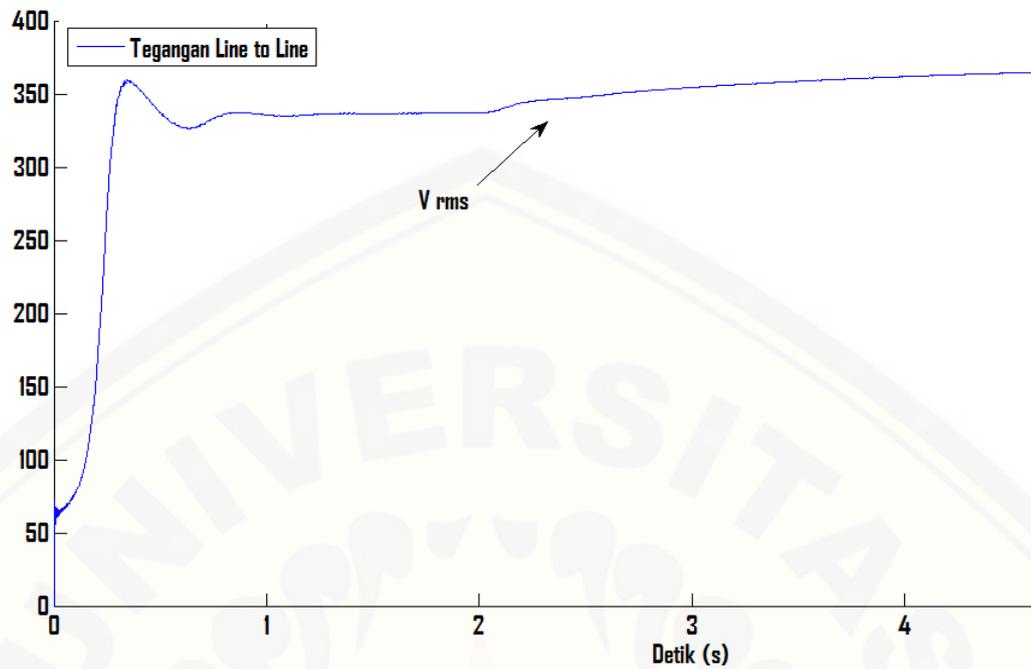
Gambar 4.11 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 2 kW ke 4 kW ($C=2000$ Var)



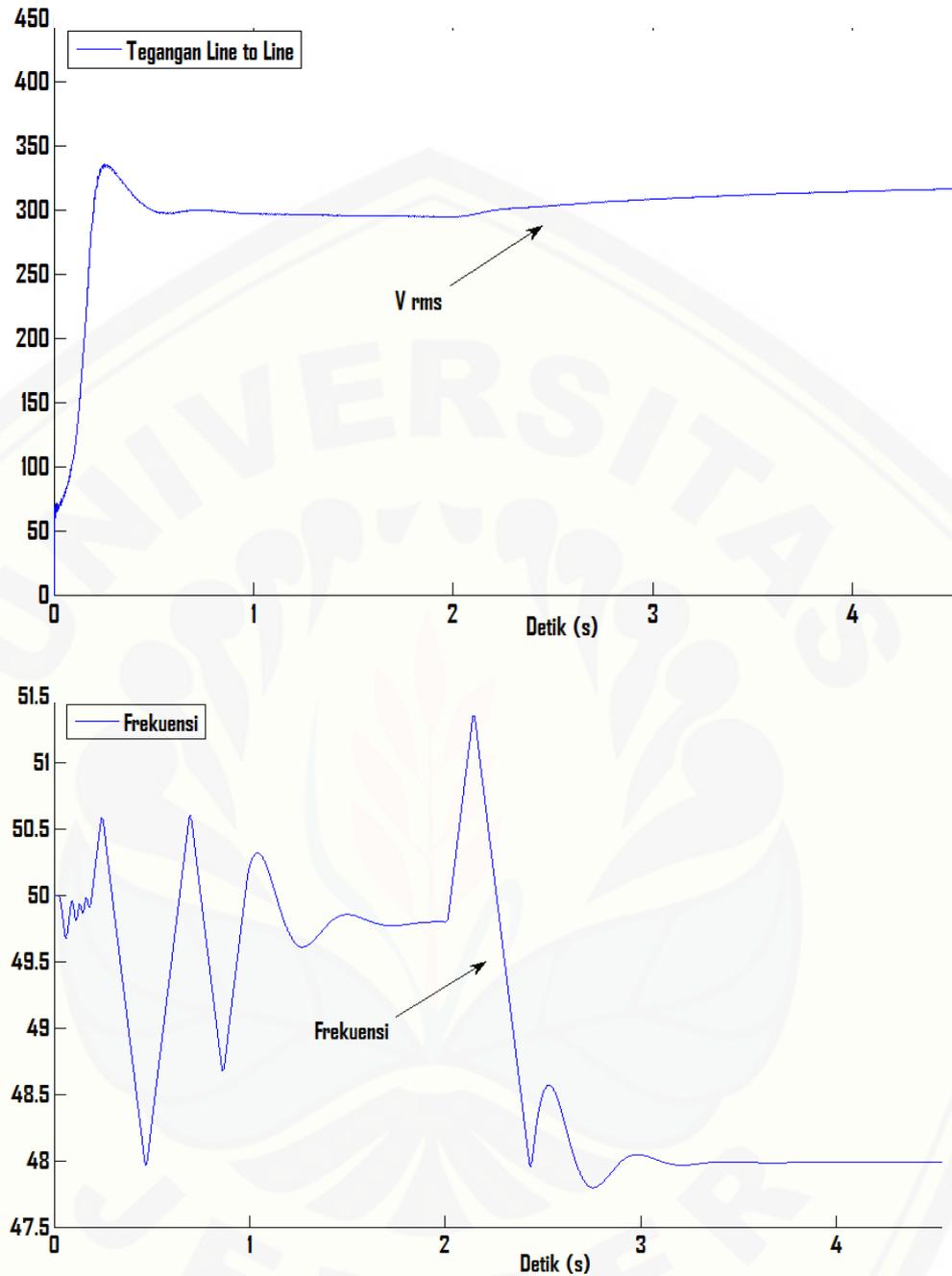
Gambar 4.12 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 2 kW ke 4 kW ($C=3500$ Var)



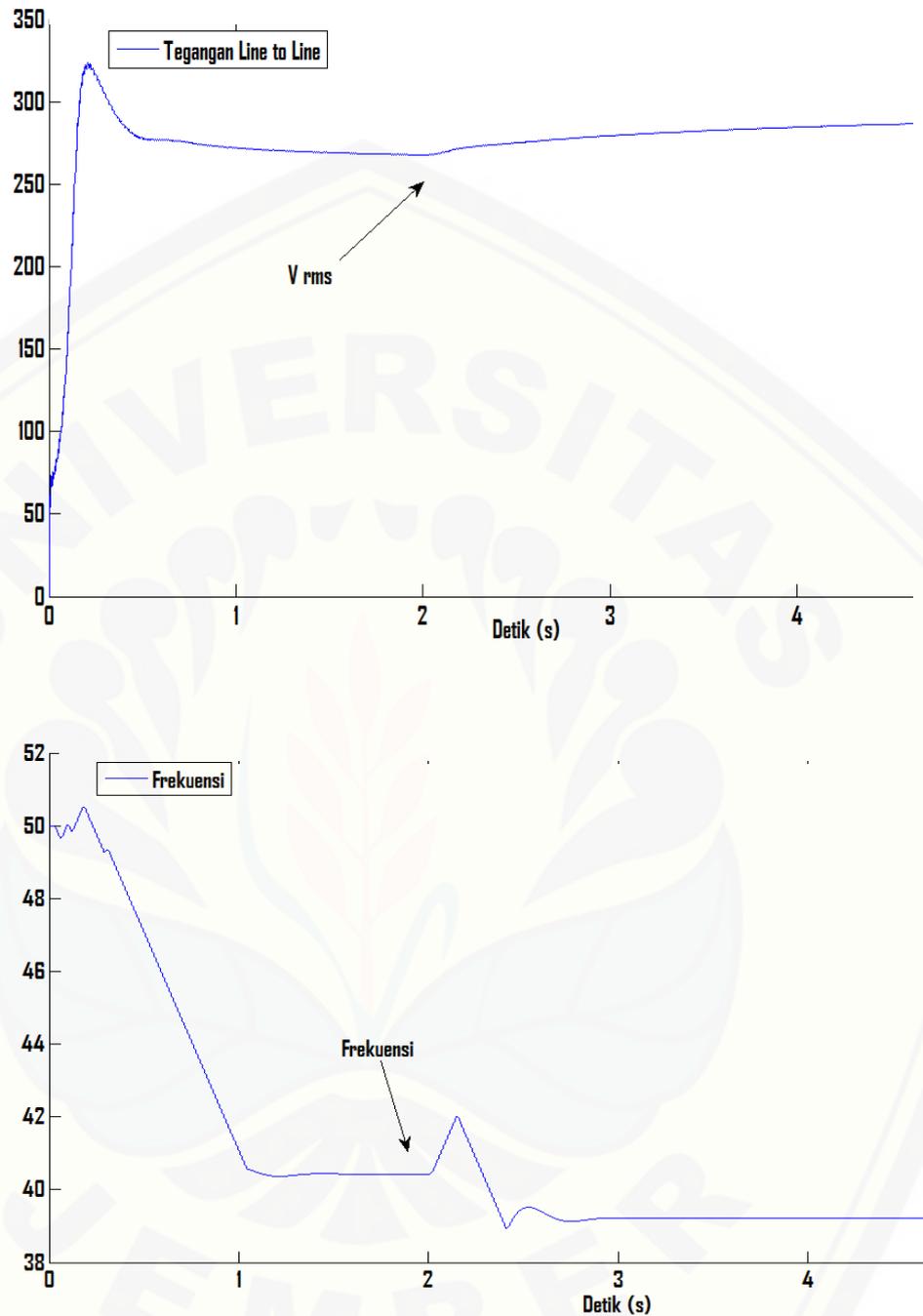
Gambar 4.13 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 2 kW ke 4 kW ($C=5000$ Var)



Gambar 4.14 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 4 kW ke 3 kW ($C=2000$ Var)



Gambar 4.15 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 4 kW ke 3 kW ($C=3500$ Var)



Gambar 4.16 Grafik Profil Tegangan Line to Line Rms dan Frekuensi
Beban Resistif Variatif 4 kW ke 3 kW ($C=5000$ Var)

Seperti yang ditampilkan pada grafik, tegangan keluaran yang dihasilkan generator mencapai puncak kemudian mengalami osilasi hingga menjadi transien setelah melewati detik 0.57. hampir seperti simulasi sebelumnya dimana terjadi

pembangkitan tegangan dan penyesuaian keadaan hingga transien. Tegangan keluaran setelah transien stabil dengan nilai 415.7 V untuk tegangan line to line dan 239 V untuk tegangan fase to groundnya sampai waktu 2 detik. Setelah 2 detik terjadi osilasi dengan mencuatnya tegangan sehingga kembali ke transien dengan nilai tegangan baru 780.5 V sampai detik ke 5. Dengan nilai torsi masukan sebesar -15 Nm, tegangan yang dihasilkan pada simulasi pertama ini lebih besar dari pengujian kedua. Hal ini disebabkan karena nilai torsi masukan yang digunakan tetap sedangkan beban berubah menjadi berkurang dari pengujian kedua. Sesuai dengan persamaan sebelumnya

$$V.I = \tau \omega_m$$

$$\frac{V.V}{R} = \tau \omega_m$$

Dimana nilai resistansi berbanding terbalik dengan nilai torsi masukan dan tegangan. Ketika semakin kecil nilai beban resistansi yang digunakan, maka semakin besar tegangan keluaran yang dihasilkan dengan nilai torsi masukan yang tetap seperti pengujian sebelumnya. Terbukti ketika pada waktu 2 detik pada pengujian pertama, beban resistif kedua terlepas sambung sehingga total beban menjadi sebesar 1kW, nilai tegangan akan kembali mengalami osilasi hingga menuju transien dan tegangan keluaran yang dihasilkan mengalami kenaikan yang signifikan demi menyesuaikan beban resistif. Tegangan keluaran menjadi bernilai 780.5 V untuk tegangan fase to fase dan 450.7 V untuk tegangan fase to ground.

Tambahan mengenai kecepatan rotor, nilai kecepatan rotor yang bernilai 162 rad per detik ketika bebannya 4 kW dan kecepatan putarnya bernilai 162 rad per detik ketika bebannya berubah menjadi 1 kW Hal ini disebabkan ketika torsi masukan yang diberikan tetap, sedangkan beban yang digunakan berkurang dengan kondisi kapasitor yang digunakan bernilai tetap (3500 Var) maka kecepatan rotor juga semakin turun. Semakin kecil kecepatan rotor, maka nilai GGL pada terminal generator juga akan semakin kecil dan mempengaruhi arus terminal generator atau arus stator generator menjadi semakin kecil. Semakin

kecil arus generator maka torsi elektromagnetik generator akan semakin rendah. Torsi elektromagnetik akan melawan torsi masukan generator, torsi mekanik akan menyesuaikan besarnya dengan torsi elektromagnetik hingga besarnya grafik kecepatan berosilasi sehingga dalam keadaan transien.

Pada grafik, nilai frekuensi pada sistem yang ditampilkan menggunakan blok diagram 3-phase locked loop dengan input berupa tegangan beban. Tegangan diubah menggunakan Transformasi Park sehingga menjadi kerangka acuan dq0 Frekuensi yang ditampilkan bernilai normal atau 50 Hz antara detik 0 hingga 0.148 dimana pada keadaan beban belum terdeteksi oleh sistem. Kemudian berosilasi hingga mencapai keadaan frekuensi 49.76 Hz Ketika mencapai 2 detik selanjutnya hingga 5 detik, frekuensi melonjak dan semakin turun drastis dan stabil hingga mencapai 45.6 Hz. Kejadian dapat dijelaskan dalam rumusan berikut:

$$2\pi f = \omega_m$$

$$f = \frac{\omega_m}{2\pi}$$

Hal ini disebabkan frekuensi berbanding terbalik dengan kapasitor yang menimbulkan daya reaktif. Seperti dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, kapasitor memperbaiki faktor daya dan mengurangi tegangan. Pada simulasi ini, kapasitor sebagai pembangkit daya reaktif yang berpengaruh terhadap besar tegangan dan frekuensi bersifat statis atau tetap pada setiap pengujian simulasi. Dengan nilai torsi masukan tetap dan beban berubah sedangkan sistem tidak dilengkapi dengan komponen pengatur tegangan dan frekuensi, maka tegangan dan frekuensi akan menyesuaikan dengan besar beban. Ketika kapasitor tetap, semakin kecil beban yang digunakan maka semakin kecil pula frekuensinya

Hal ini juga disebabkan frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan putar generator sehingga ketika tegangan semakin berkurang, semakin kecil kecepatan putar nya dan semakin kecil frekuensi. Berdasarkan pengujian simulasi dengan torsi masukan -15 Nm dan beban resistif 4 kW yang mengalami

penurunan menjadi 1 kW, kecepatan putarnya menurun menjadi 145.5 rad per detik dan frekuensinya setelah 5 detik mencapai 45.6 Hz.

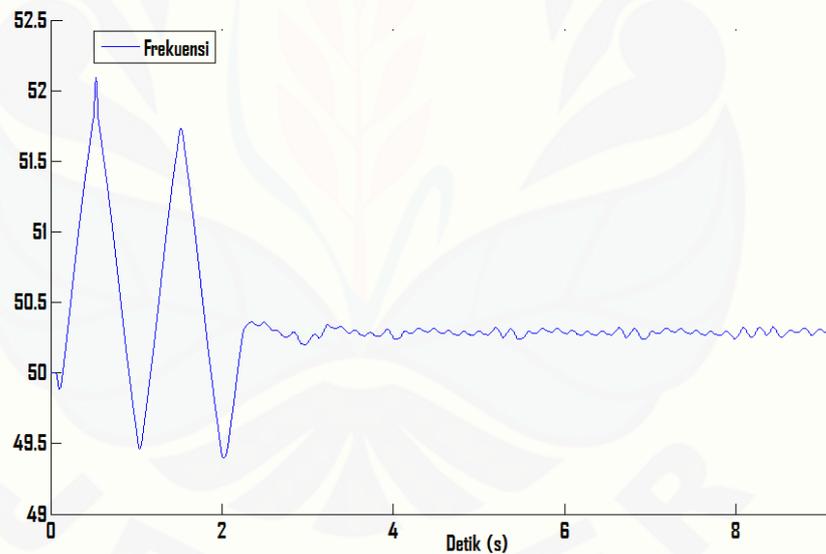
4.4 Pengujian Generator Induksi dengan Beban Komplemen Menggunakan Kendali PWM

Pada pengujian simulasi menggunakan beban komplemen, dibagi menjadi dua tahap. Tahap pertama pengujian generator induksi dengan beban komplemen menggunakan kendali PWM (*Pulse-Width Modulator*) dan PID (*Proporsional Integral Derivative*) kemudian diantara dua tahapan pengujian tersebut akan dibandingkan untuk mengetahui performa dari masing-masing tahapan

Pada simulasi ini, pengaturan beban komplemen diatur oleh saklar (Switch) yang dikendalikan oleh PWM (*Pulse-Width Modulator*). PWM terdiri atas rangkaian *zero crossing detector* yang berguna mengubah tegangan menjadi gelombang diskrit yang bernilai 1 dan 0 kemudian outputnya digabungkan dengan persamaan logika AND dengan rangkaian komparator. Rangkaian komparator yang terdiri atas gelombang segitiga dan frekuensi eror atau selisih antara frekuensi sistem dan frekuensi referensi (50 Hz). Gelombang segitiga yang digunakan memiliki frekuensi 1 kHz dan amplitudo sebesar 6. Rangkaian komparator juga difungsikan sebagai *duty cycle* yang nantinya akan men-trigger saklar (switch) yang akan menutup dan membuka dan menyalurkan beban yang berlebihan ke rangkaian beban komplemen.. Pada tahap pengujian simulasi ini menggunakan beban resistif terpasang yang berjarak antara 0 sampai 4 kW dengan konfigurasi Y dan beban komplemen bernilai tetap sebesar 4kW dengan konfigurasi Y

Tabel 4.5 Hasil Data Generator Induksi dengan Beban Komplemen menggunakan PWM

Torsi Masukan : 15 Nm								
No	Beban Resistif terpasang (kW)	Beban Resistif Komplemen	Kapasitor (Var)	F Terendah (Hz)	F Rms (Hz)	Arus Rms (A)	V Rms Line-to-Line (V)	Kec. Putar (rad/s)
1	0	4	3500	46.86	47.7	4	466.89	147.9
2	1	4	3500	47	48	4.03	371.4	161.7
3	2	4	3500	46.85	48.83	4.35	319.7	155.2
4	3	4	3500	48.86	50.19	4.5	300,5	155.1
5	4	4	3500	49.4	50..5	4.84	275.9	171.6



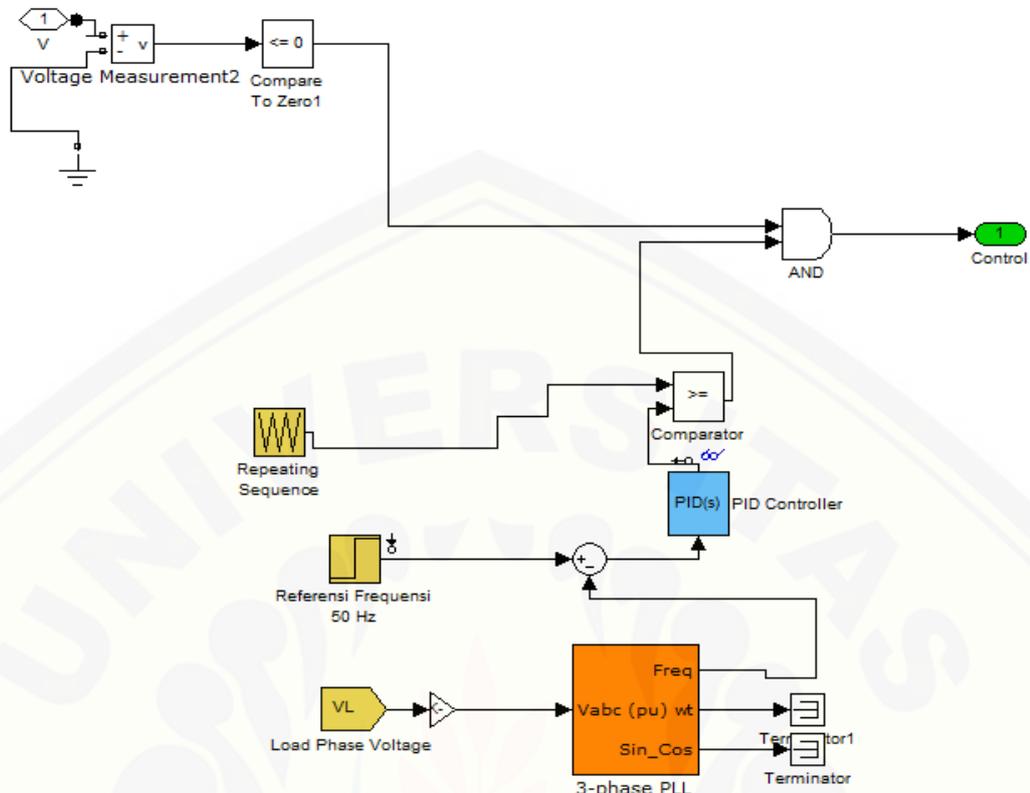
Gambar 4.17 Contoh Grafik Frekuensi Beban Resistif 4 kW dengan Beban Komplemen

Dari data hasil simulasi tersebut, kita ambil contoh pada pengujian dengan beban resistif terpasang 1 kW. Tegangan line-to-line Rms bernilai sebesar 371.4 V kecepatan putarnya sebesar 147.9 rad/s

Pada gambar grafik diatas, frekuensi mengalami osilasi dalam jangka waktu tertentu. Frekuensi berada pada titik terendah pada nilai 46,15 Hz kemudian mengalami kenaikan hingga di titik 49.78 Hz. Hal ini disebabkan ketika pada titik frekuensi terendah, rangkaian komparator akan mengirim sinyal yang kemudian menjadi PWM. PWM akan mentrigger saklar (switch) untuk mengirim daya berlebih ke beban komplemen demi menyesuaikan frekuensi sistem dengan frekuensi referensi sehingga frekuensi puncak berada pada 49.78 hz (~50Hz). Namun ketika frekuensi sudah sama atau hampir sama dengan frekuensi referensi, saklar akan membuka dan penyaluran daya ke beban komplemen terputus sehingga frekuensi akan kembali turun sesuai dengan beban resistif terpasang, begitu seterusnya hingga simulasi dihentikan.

4.5 Identifikasi Sistem dan Penentuan Konstanta Kontrol PID

Penentuan konstanta PID pada simulasi ini merupakan penyempurnaan dari Metode Switching PWM dimana eror frekuensi atau Δf akan diproses dengan algoritma PID kemudian dilanjutkan ke dalam rangkaian komparator dan logika AND untuk mendapatkan gelombang modulasi yang digunakan untuk mentrigger saklar. PID menggunakan Metoda Ziegler-Nichols dan *Trial and Error*. Metode ini diharapkan dapat mempersingkat waktu dan memberikan hasil yang lebih efektif karena menggunakan rumus sederhana dan *Trial and Error* digunakan untuk mencari parameter K_p .

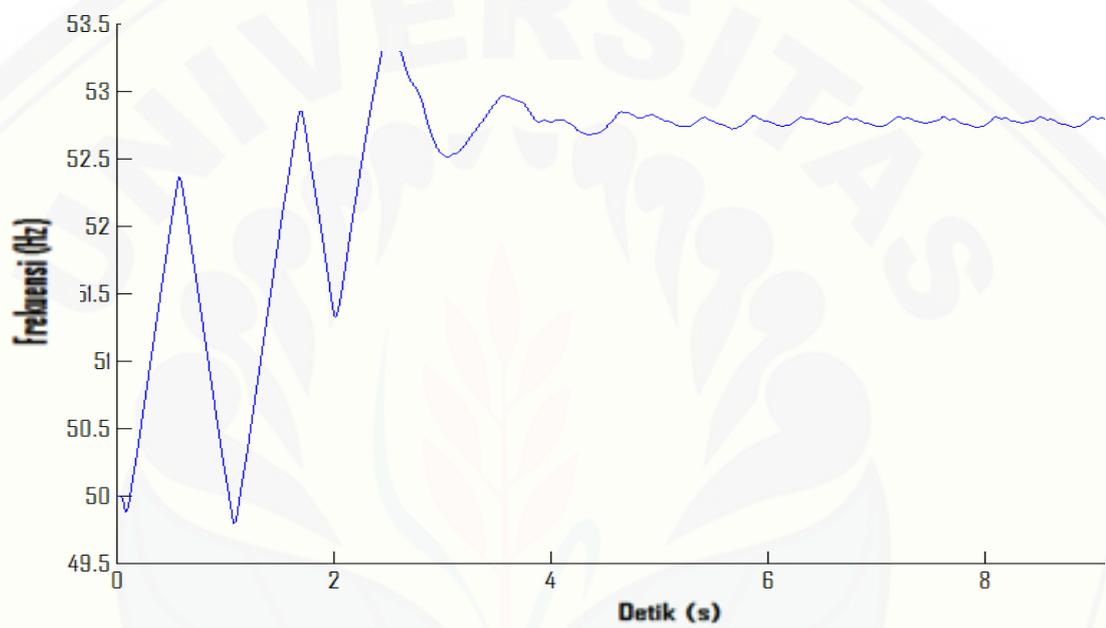


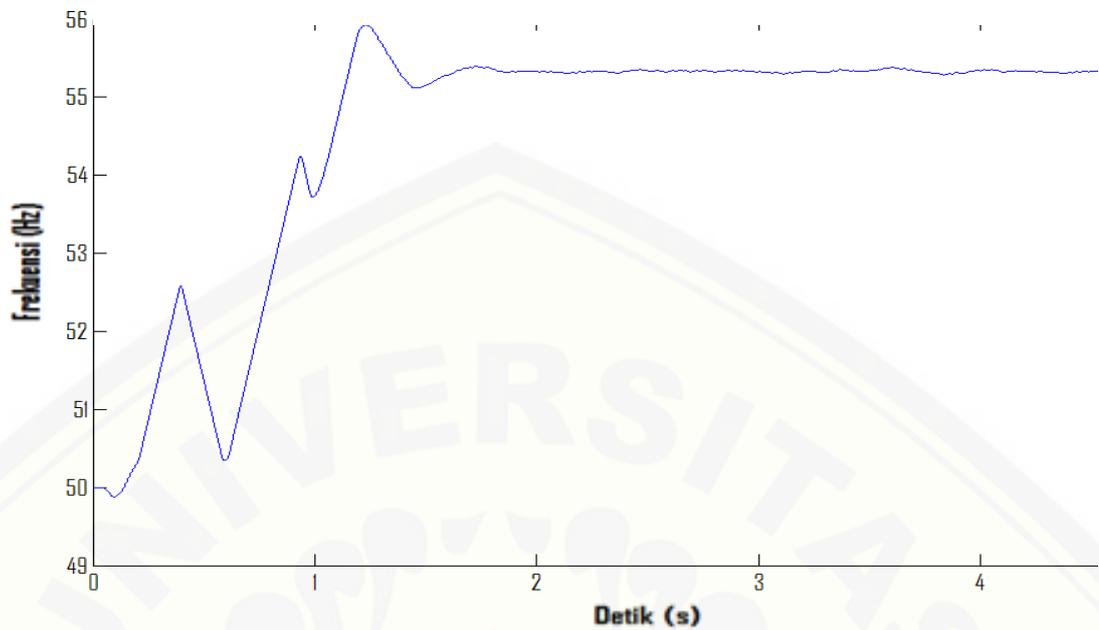
Gambar 4.18 Pemodelan PID pada pengatur beban komplemen

Penentuan dilakukan dengan cara menentukan nilai K_p secara acak dengan nilai $K_i = 0$ dan $K_d = 0$ kemudian melihat hasil *response time* dan dari hasil keluaran yang berkesinambungan menentukan waktu mati (dead time) L dan waktu tunda (T) dan , selanjutnya menghitung nilai K_p , T_i dan T_d sesuai dengan aturan Metode Kurva Reaksi yang didasarkan pada untai terbuka (Open-Loop) dengan Metode Kurva Reaksi.

Tabel 4.6 Tuning PID dengan Metode Kurva Reaksi

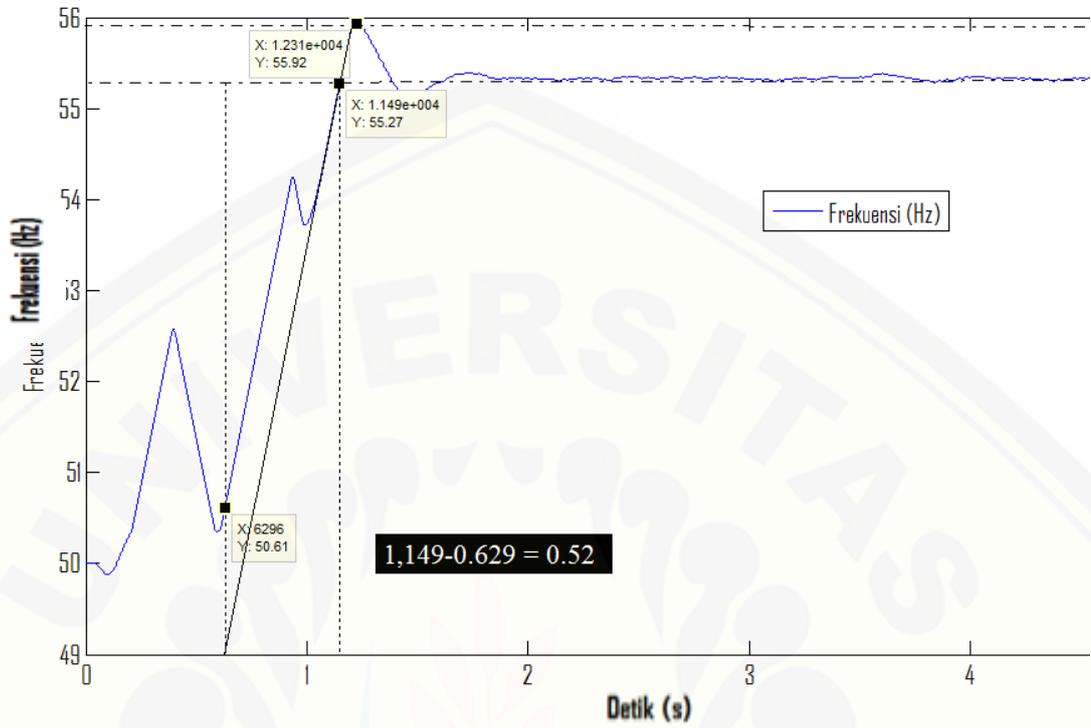
Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	K_o	~	0
PI	$0.9 K_o$	$3,3\tau_{dead}$	0
PID	$1,2 K_o$	$2 \tau_{dead}$	$0.5 \tau_{dead}$

Gambar 4.19 Percobaan Tuning $K_p = 1$, $K_i = 0$, $K_d = 0$



Gambar 4.20 Percobaan $K_p = 10$, $K_i = 0$, $K_d = 0$

Pada pengidentifikasian dengan menggunakan metode kurva reaksi, langkah awal yang diperlukan adalah sistem harus mencapai keadaan transien, Penulis menggunakan $K_p = 10$ karena dianggap paling sesuai dan keadaan telah transien. Kemudian pada hasil yang muncul diidentifikasi adanya *disturbance* atau gangguan, X_o . Selanjutnya mengidentifikasi parameter seperti waktu mati atau *dead time*, τ_{dead} dan waktu respons τ .



Gambar 4.21 Respon Sistem Metode Kurva Reaksi dengan $K_p = 10$

Dengan,

τ = waktu respons kejadian

τ_{dead} = waktu mati

X_o = nilai set point gangguan perubahan

M_u = nilai ketika sistem menjadi keadaan transien

$$K_o = \frac{X_o}{M_u} \cdot \frac{\tau}{\tau_{dead}}$$

$$X_o = 55,92$$

$$Mu = 55,27$$

$$\tau_{\text{dead}} = 0,629$$

$$\tau = 1,149 - 0,629$$

$$= 0,52$$

$$K_o = \frac{55,92}{55,27} \cdot \frac{0,525}{0,629}$$

$$= 0,836$$

$$K_p = 1,2 \times K_o = 1,2 \times 0,836 = 1,0032$$

$$T_i = 2 \times \tau_{\text{dead}} = 2 \times 0,629 = 1,258$$

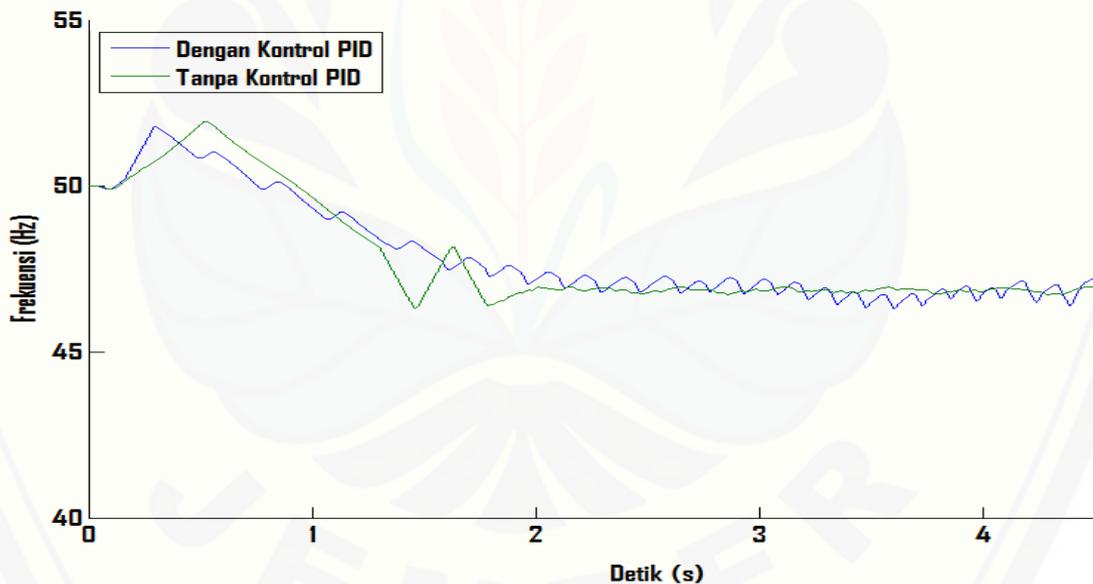
$$T_d = 0,5 \times \tau_{\text{dead}} = 0,5 \times 0,629 = 0,3145$$

Sehingga didapatkan parameter PID dengan metode kurva reaksi Ziegler-Nichols adalah nilai $K_p = 1,0032$ $T_i = 1,258$, $T_d = 0,3145$

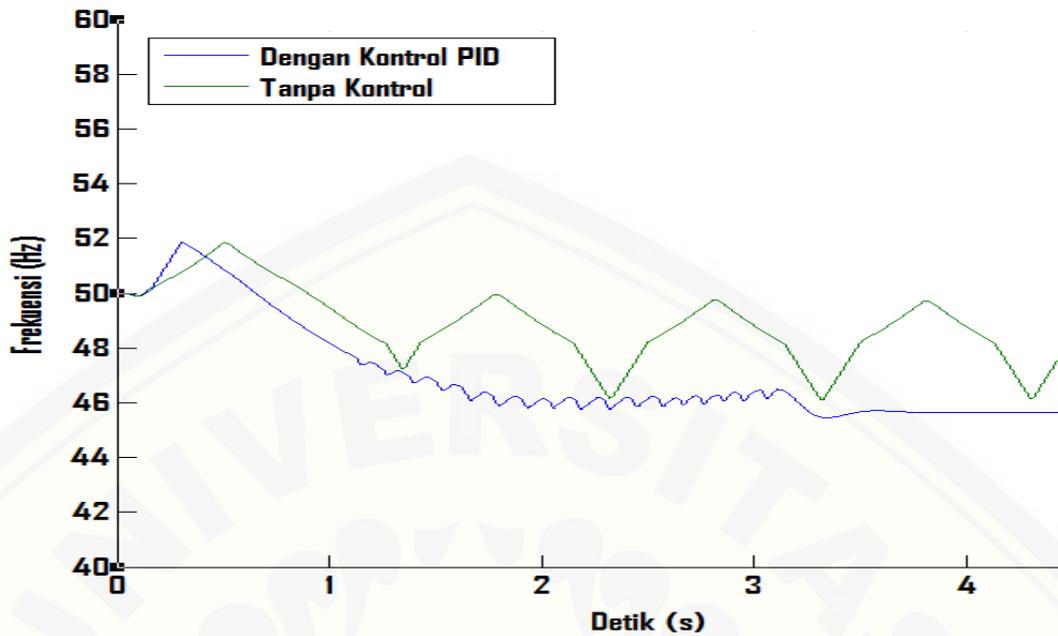
4.6 Pengujian Generator Induksi dengan Beban Komplemen dan Kontrol PID

Untuk membuktikan apakah kontrol PID yang diimplementasikan ke dalam sistem dapat memperbaiki respon untuk mencapai frekuensi set point dan menguji kehandalan untuk menyesuaikan frekuensi dibandingkan dengan tanpa kontrol dan beban bervariasi. Data yang didapat akan diolah berdasarkan performansi plant. Kriteria performansi yang digunakan adalah settling time dan maksimum overshoot. Maksimum overshoot adalah prosentase selisih nilai set point aktual terhadap nilai puncak setelah transien

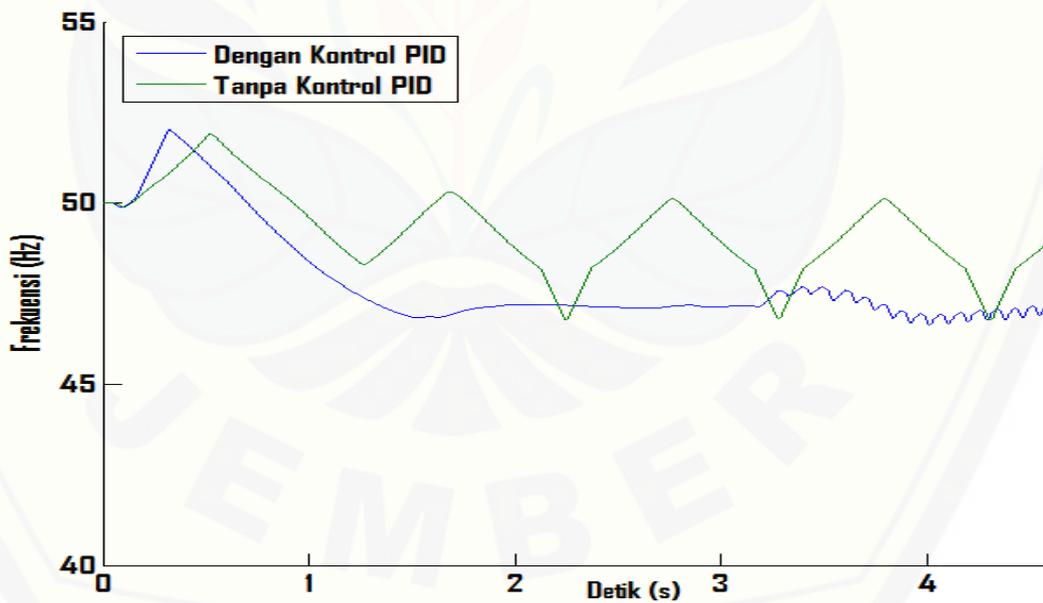
Pada pengujian simulasi ini, penulis akan mengambil beberapa contoh variasi beban resistif yang terbagi menjadi kondisi beban resistif tanpa beban bernilai 0 kW, beban resistif 1 kW, 2 kW, 3 kW dan beban resistif penuh 4 kW. Data hasil simulasi ditampilkan pada grafik dengan perbandingan profil antara sistem generator induksi dengan kontrol PID dan tanpa kontrol.



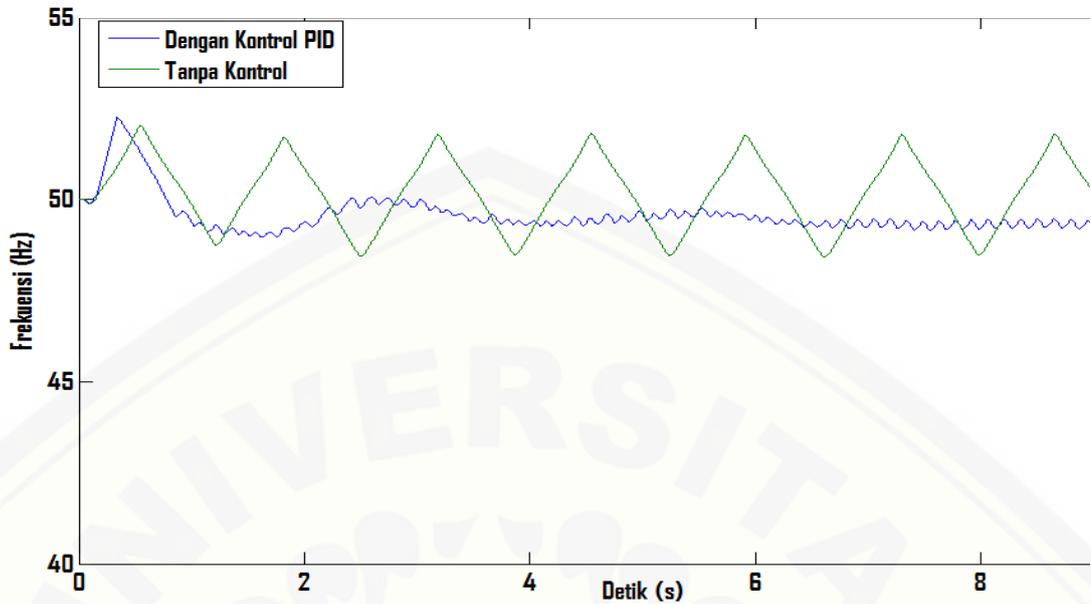
Gambar 4.22 Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 0 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID



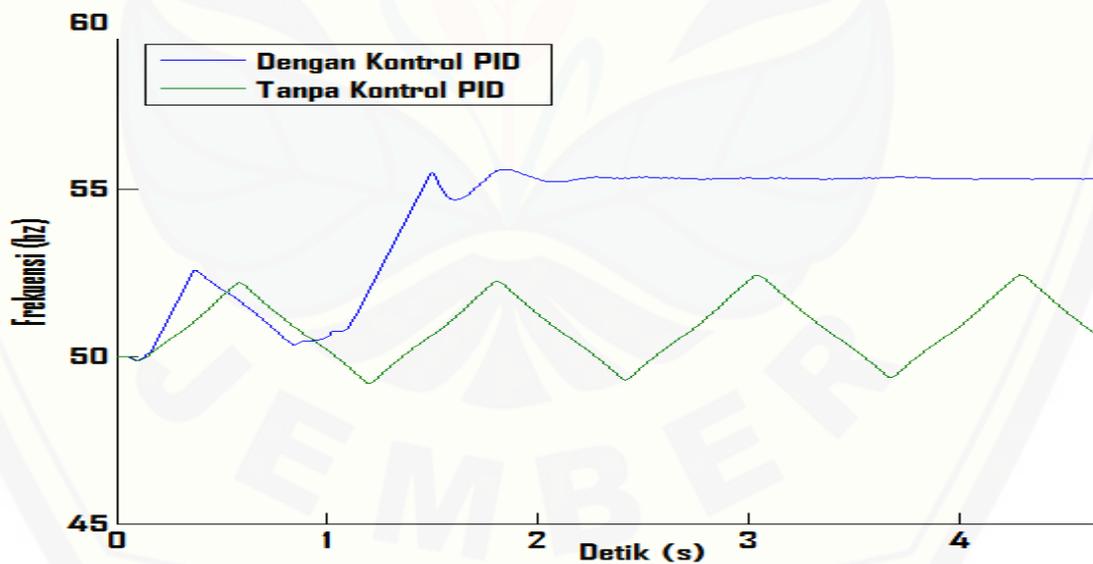
Gambar 4.23 Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 1 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID



Gambar 4.24 Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 2 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID



Gambar 4.25 Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 3 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID



Gambar 4.26 Profil Frekuensi Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 4 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID

Dengan perubahan variasi beban resistif yang diuji coba didapatkan beberapa hasil. Hasil grafik tanpa beban (0 kW) pada Gambar 4.22 didapatkan ketika simulasi tanpa kontrol batas bawah frekuensi bernilai 46,9 Hz sehingga maksimum overshootnya bernilai 6,2 %. Pada simulasi dengan kontrol PID, settling point bernilai 49,29 Hz dan nilai puncak setelah transien bernilai 45,9 Hz sehingga maksimum overshootnya sebesar 8,2%

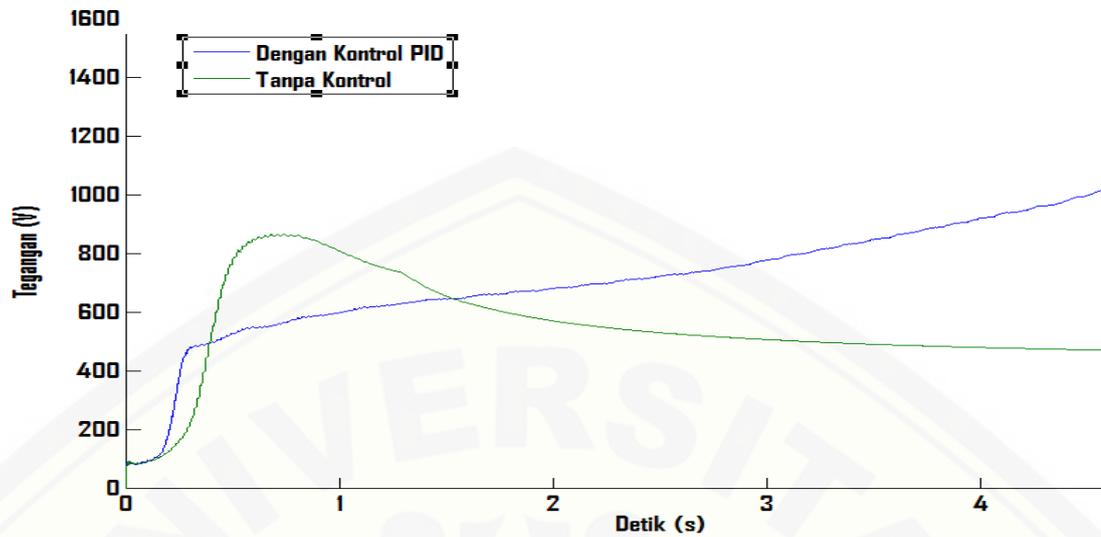
Hasil grafik beban 1 kW pada Gambar 4.23 didapatkan ketika simulasi tanpa kontrol batas bawah frekuensi bernilai 47,3 Hz sehingga maksimum overshootnya bernilai 5,4 %. Pada simulasi dengan kontrol PID, settling point bernilai 46,3 Hz dan nilai puncak setelah transien bernilai 47,5 Hz sehingga maksimum overshootnya sebesar 1,2%

Berdasarkan hasil grafik beban 2 kW pada Gambar 4.24 dapat diperhatikan bahwa ketika simulasi tanpa kontrol, batas bawah frekuensi bernilai 46 Hz sehingga maksimum overshootnya bernilai 8%. Pada simulasi dengan kontrol PID, settling point bernilai 45 dan nilai puncak setelah transien bernilai 47.67 sehingga maksimum overshootnya sebesar 6%.

Hasil grafik beban 3 kW pada Gambar 4.25 didapatkan ketika simulasi tanpa kontrol batas bawah frekuensi bernilai 48,7 Hz sehingga maksimum overshootnya bernilai 2,6 %. Pada simulasi dengan kontrol PID, settling point bernilai 49,29 Hz dan nilai puncak setelah transien bernilai 48,9 Hz sehingga maksimum overshootnya sebesar 0,7%

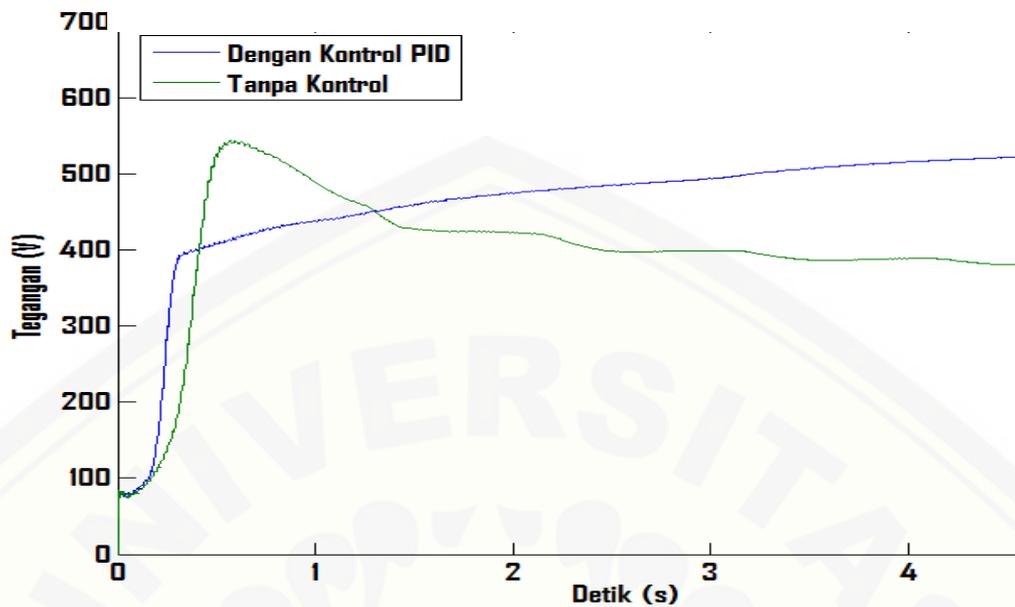
Untuk hasil grafik beban 4 kW yang ditampilkan Gambar 4.26 didapatkan ketika simulasi tanpa kontrol batas atas frekuensi bernilai 52,7 Hz sehingga maksimum overshootnya bernilai 2,6 %. Pada simulasi dengan kontrol PID, settling point bernilai 55,35 Hz dan nilai puncak setelah transien bernilai 54,6 Hz sehingga maksimum overshootnya sebesar 1,35%.

Untuk selanjutnya, penulis akan menganalisa hasil tegangan line to line pada setiap variasi beban yang diharapkan dapat membawa ke dalam sebuah hasil dari kesimpulan.



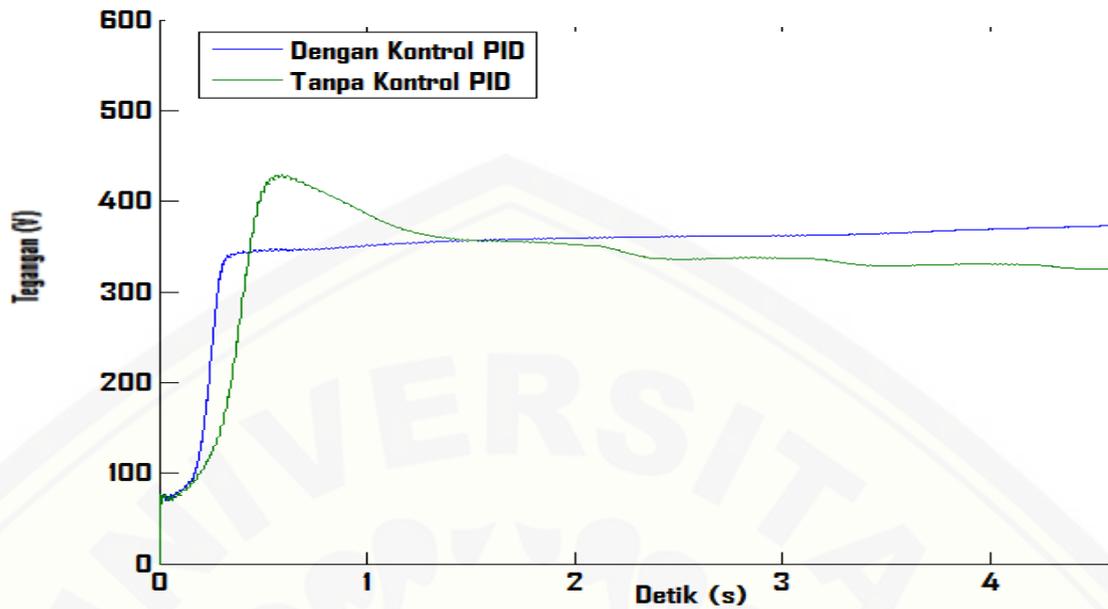
Gambar 4.27 Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 0 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID

Sedangkan pada Gambar 4.27 profil tegangan simulasi generator induksi beban resistif 0 k ($C=3500$ var) dengan beban komplemen dengan PID dan tanpa Kontrol, nilai tegangan rms pada tanpa kontrol juga terdapat selisih dengan nilai tegangan tanpa kontrol PID 798 V dan dengan menggunakan kontrol PID sebesar 1505 V.



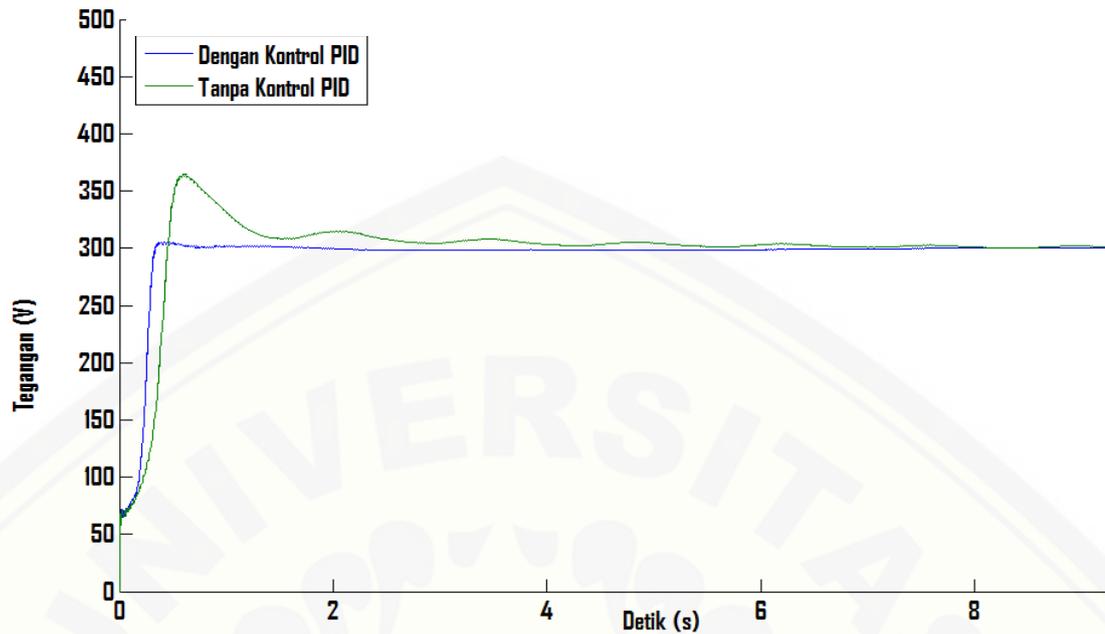
Gambar 4.28 Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 1 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID

Sedangkan pada Gambar 4.28 profil tegangan simulasi generator induksi beban resistif 1 kW ($C=3500$ var) dengan beban komplemen dengan PID dan tanpa Kontrol, nilai tegangan rms pada tanpa kontrol juga terdapat selisih dengan nilai tegangan tanpa kontrol PID 408 V dan dengan menggunakan kontrol PID sebesar 505 V.



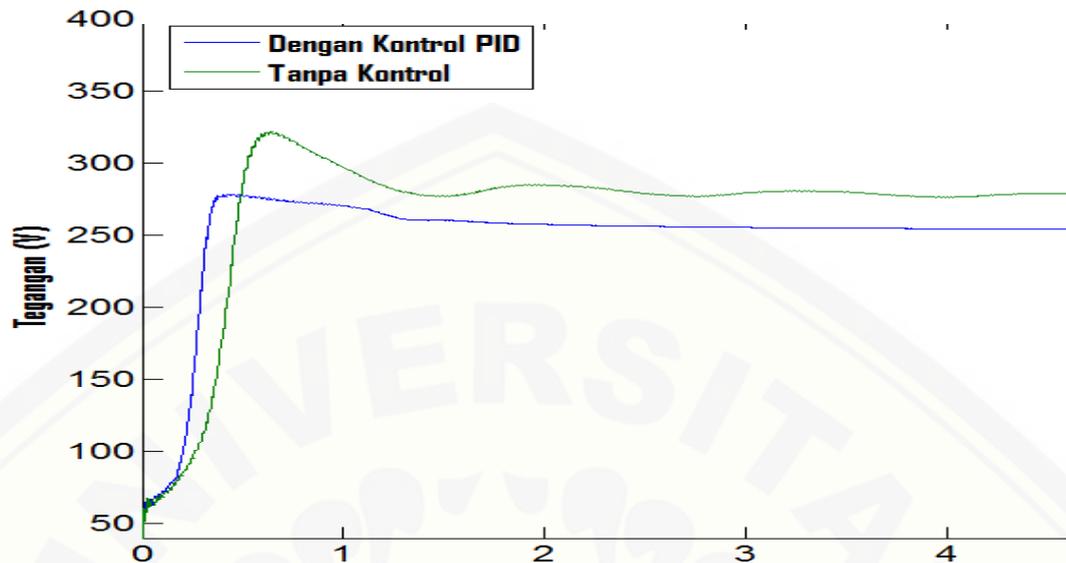
Gambar 4.29 Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 2 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID.

Sedangkan pada Gambar 4.26 profil tegangan simulasi generator induksi beban resistif 2 k ($C=3500$ var) dengan beban komplemen dengan PID dan tanpa Kontrol, nilai tegangan rms pada tanpa kontrol mengalami osilasi kenaikan kemudian mengalami penurunan hingga keadaan setimbang dengan nilai tegangan tanpa kontrol PID 365 V dan nilai tegangan dengan menggunakan kontrol PID bernilai sebesar 380 V.



Gambar 4.30 Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 3 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID

Sedangkan pada Gambar 4.28 profil tegangan simulasi generator induksi beban resistif 3 k ($C=3500$ var) dengan beban komplemen dengan PID dan tanpa Kontrol, nilai tegangan rms pada tanpa kontrol dengan nilai tegangan tanpa kontrol PID 305 V dan dengan menggunakan kontrol PID sebesar 305 V. Perbedaannya ialah pada sistem tanpa kontrol, terjadi osilasi yang cukup tinggi sehingga setpoint mencapai nilai tegangan diatas 350V, kemudia mengalami penurunan hingga keadaan setimbang di 305V.



Gambar 4.31 Profil Tegangan Rms Simulasi Generator Induksi Beban Resistif 4 kW ($C=3500$ Var) dengan Beban Komplemen Tanpa Kontrol dan Kontrol PID

Sedangkan pada Gambar 4.30 profil tegangan simulasi generator induksi beban resistif 4 k ($C=3500$ Var) dengan beban komplemen dengan PID dan tanpa Kontrol, nilai tegangan rms pada tanpa kontrol juga terdapat selisih dengan nilai tegangan tanpa kontrol PID 253,6 V dan dengan menggunakan kontrol PID sebesar 253,3 V

Berdasarkan tiga percobaan simulasi diatas dengan variasi beban resistif yang berbeda dapat disimpulkan bahwa kontrol PID dapat menghasilkan respons yang lebih cepat mencapai kesetimbangan serta lebih kokoh jika dibandingkan dengan kendali Switching PWM tanpa kontrol Namun terdapat beberapa nilai penggunaan variasi beban resistif dimana PID terlalu berpengaruh secara signifikan. Untuk lebih jelasnya mengenai hasil simulasi antara tanpa kontrol dan dengan kontrol PID, maka dilakukan variasi beban yang lebih lengkap yang dicantumkan dalam Tabel 4,7 berikut.

Tabel 4.7 Hasil Simulasi Generator Induksi dengan Kontrol PID dan Tanpa Kontrol PID (C=3500 Var)

No	Beban resistif (kW)	Beban Komplemen (kW)	Kp	Ki	Kd	Frekuensi (Hz)		Tegangan Line RMS (V)		Daya (kW)	
						PID	Tanpa PID	PID	Tanpa PID	PID	Tanpa PID
						1	0	4	1,0032	1,258	0,315
2	1	4	1,0032	1,258	0,315	46,36	46,6	532,2	529	1,905	1,905
3	2	4	1,0032	1,258	0,315	47,25	47,56	387,7	378,1	2	2,18
4	3	4	1,0032	1,258	0,315	49,29	48,8	301,7	288,4	3,47	3,41
5	4	4	1,0032	1,258	0,315	54,67	52,34	253,6	253,3	4,5	3,9

Dari hasil tabel 4.7 kita dapat mengetahui bahwa besaran – besaran antara simulasi dengan kontrol PID dan tanpa kontrol PID. Nilai Daya mengalami kenaikan terhadap bertambahnya nilai beban konsumen yang digunakan seperti pada contoh beban resistif konsumen 2 kW memiliki daya sebesar 2 kW pada kondisi terkontrol PID dan 2,18 tanpa kontrol PID sedangkan pada beban resistif konsumen 3 kW memiliki daya sebesar 3,47 kW pada kondisi terkontrol PID dan 3,9 kW pada kondisi tanpa kontrol.

Tegangan Line mengalami penurunan nilai terhadap besarnya beban konsumen yang digunakan. Pada tegangan Line dengan beban resistif konsumen 0 kW, tegangan yang dihasilkan sebesar 1505 V pada kondisi terkontrol PID dan 1187 V pada kondisi tanpa kontrol. Sedangkan pada beban resistif konsumen 1 kW, tegangan mengalami penurunan hingga menjadi 532,2 V pada kondisi terkontrol PID dan 529 V pada kondisi tanpa kontrol.

Nilai frekuensi mengalami kenaikan terhadap bertambahnya besar beban, seperti pada contoh beban resistif konsumen sebesar 1 kW dengan frekuensi yang

dihasilkan sebesar 46,36 Hz pada kondisi terkontrol PID dan 47,56 pada kondisi tanpa kontrol sedangkan pada beban resistif konsumen 3 kW frekuensi yang dihasilkan 48,8 Hz pada kondisi terkontrol PID dan 49,8 pada kondisi tanpa kontrol. Namun pada 4 kW frekuensi yang dihasilkan terlalu besar yaitu 54,67 Hz.pada kondisi terkontrol PID. Hal ini bisa disebabkan beberapa hal yaitu beban komplemen yang digunakan bersifat statis sehingga pengaturan tidak optimal, alih-alih membuang daya berlebih ke beban komplemen, sebaliknya beban komplemen malah menambah daya berlebih kepada generator. Kemudian bisa disebabkan kurang optimalnya respons dari kontrol PID.



BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada skripsi berjudul “Sistem Kontrol Generator Induksi Dengan Beban Komplemen Berbasis PID Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro” maka dapat ditarik kesimpulan

1. Nilai Kapasitor sebagai penyuplai daya reaktif memiliki pengaruh terhadap tegangan sistem. Semakin besar nilai kapasitor (daya reaktif) yang digunakan, maka besar tegangan keluaran yang dihasilkan ketika kondisi beban tetap dan torsi tetap. Contoh pada beban resistif 1 kW dengan kapasitor 2000 Var bertegangan 907 V sedangkan pada kapasitor 3500 Var bertegangan 780,6 V
2. Nilai kapasitor juga memiliki pengaruh terhadap frekuensi, semakin besar nilai kapasitor (daya reaktif) yang digunakan, maka semakin kecil frekuensi yang dihasilkan dengan kondisi beban tetap dan torsi tetap. Contoh pada beban resistif 2 kW dengan kapasitor 2000 Var berfrekuensi 61,39 Hz sedangkan ketika kapasitor bernilai 3500 Var maka berfrekuensi 46,62 Hz
3. Untuk memodelkan motor induksi sebagai generator maka diperlukan spesifikasi parameter kapasitor yang sesuai dengan beban yang digunakan.
4. Perubahan PWM (duty cycle) dipengaruhi oleh delta frekuensi atau selisih antara frekuensi referensi dan frekuensi keluaran. Semakin besar delta frekuensi, maka semakin sering saklar akan di-*trigger* dan daya disalurkan ke beban komplemen.
5. Dari hasil tuning PID dengan metode kurva reaksi Ziegler-Nichols adalah nilai $K_p = 1,0032$ $T_i = 1,258$, $T_d = 0,3145$
6. Pada profil pengujian simulasi antara dengan kontrol PID dan tanpa kontrol, kontrol PID memiliki maksimum overshoot yang lebih rendah dan set point yang relatif cepat. Pada beban resistif 4 kW ketika simulasi tanpa kontrol menghasilkan frekuensi 48,8 Hz sehingga maksimum overshootnya bernilai 2,6 %, sedangkan pada PID frekuensinya 49,29 dan maximum overshoot 9,7%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan simulasi yang dilakukan, terdapat beberapa saran yang diharapkan dapat memberi kesempurnaan pada hasil penelitian ini atau bersifat memberi masukan agar dapat dikembangkan lebih lanjut:

1. Tuning konstanta PID sebaiknya dilakukan secara *auto tuning* atau mencari nilai konstanta secara otomatis, karena ketika besar beban konsumen yang diubah, maka nilai konstanta PID juga akan berubah pula.
2. Sistem pengaturan generator induksi dapat dikembangkan dengan metode fuzzy, fuzzy-PI, Algoritma Genetika atau *neural network*
3. Penyuplai daya reaktif yang digunakan bisa diganti dari kapasitor menjadi kondenser sinkron dimana daya reaktif dapat diatur secara otomatis oleh mesin sinkron.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, Khoirul. Teknik Universitas Brawijaya *disadur* dari Chapman, J. Steven. *Electric Machinery Fundamental 4th Edition*. 2005.
- Arif, Miftachul. 2014. *Kontrol Motor BLDC Berbasis Mikrokontroler Dengan Metode Six Step Commutation*. Teknik Universitas Jember.
- Asidik, Nur dkk. 2011. Jurnal Penelitian Teknik Elektro Vol.4 No.3 September 2011. *Studi Evaluasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Cokro Tulung di Desa Daleman Kecamatan Tulung Kabupaten Klaten*. Universitas Gajah Mada.
- Chapman, J. Steven. *Electric Machinery Fundamental 4th Edition*. 2005.
- Dani, Aditya. 2012. *Perencanaan Turbin Crossflow Dengan Head 10 M Dan Diameter Pipa Penstock 4m* . Teknik Mesin Institut Teknologi Surabaya
- Darwin, Clark dkk. 2012. *Induction Generator Controller and Monitoring System for Micro Hydro Plants*. Mindanao-State University-Iligan Institute of Technology
- Effendy, Machmud.2009.*Rancang Bangun Motor Induksi Sebagai Generator (Misg) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro*. Jurusan Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang
- Evelina,Winna. 2008. *Analisis Karakteristik Pengaturan Var Pada Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Menggunakan Kondenser Sinkron*. [Skripsi] Teknik Elektro. Universitas Indonesia
- Hasan, Ahmad. 2006. *Pengontrol Beban Elektronik pada Pembangkit Mikrohidro*
- Hidayat Pribadi. 2013. *Sistem Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Pada Mesin Pemutar Gerabah Menggunakan Kontroller Proporsional Integral Deferenisial (PID) Berbasis Miktrokontroller*. Teknik Elektro Universitas Brawijaya
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2010. Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2010. Kementerian ESDM. Jakarta

- Khandelwa and friends. 2013. *Matlab Based Analysis of 3- \emptyset Self-Excited Induction Generator with Nonlinear Load*. Electrical Engineering Department, ITM Bhilwara from www.iosrjournals.org
- Muhammad, Anggi. 2008. *Studi Pemodelan Electronic Load Controller Sebagai Alat Pengatur Beban Pembangkit Listrik Tenaga Mikro-Hidro*. Teknik Elektro dan Informatika. Institut Teknologi Bandung
- Muspida, Haqi. 2013 *Rancang Bangun Soft Starting Motor Induksi 3 Fasa Dengan Kontrol PID Menggunakan Mikrokontroler*. Universitas Jember
- Nugraha, Sedy. 2013. *Sistem Kendali Proportional Integral Derivative Kecepatan Motor Brushless Dc Dengan Sensor Kecepatan Putar*. Universitas Jember
- Octaviani Anggi. 2012. *Analisis Ekonomi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Desa Megamendung Kecamatan Megamendung, Kabupaten Bogor [Skripsi], Jawa Barat*. Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Sandy, Ardha. 2009. *Studi Pengontrol Beban Elektronik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Seloliman, Trawas Kabupaten Mojokerto*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Soddiq, Dja;far. Oktober 2011. *Kontrol dan Proteksi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Tinjauan Pustaka Pembangkit Mikrohidro Universitas Diponegoro*
- Sudargana dkk. 2005. *Studi Kelayakan Dan Prancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Dukuh Pekuluran Kec. Doro Kab. Pekalongan*. Universitas Diponegoro Semarang
- <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDTuningClassical> diakses pada bulan Maret 2015