

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGATURAN EKSITASI PADA  
GENERATOR SINKRON 3 FASA MENGGUNAKAN *AUTOMATIC  
VOLTAGE REGULATOR (AVR)***

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RIZKY PERDANA PUTRA**  
**NIM. 125060301111036**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**  
**2016**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGATURAN EKSTIASI PADA  
GENERATOR SINKRON 3 FASA MENGGUNAKAN *AUTOMATIC  
VOLTAGE REGULATOR (AVR)***

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**Rizky Perdana Putra**  
**NIM. 125060301111036**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 03 November 2016

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Ir. Hery Purnomo, M.T.**

**NIP. 19550708 198212 1 001**

**Ir. Soeprapto, M.T.**

**NIP. 19561020 198903 1 001**

**Mengetahui,**  
**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.**

**NIP. 19741203 200012 1 001**

JUDUL SKRIPSI:

RANCANG BANGUN SISTEM PENGATURAN EKSITASI PADA  
GENERATOR SINKRON 3 FASA MENGGUNAKAN *AUTOMATIC  
VOLTAGE REGULATOR (AVR)*

Nama Mahasiswa : Rizky Perdana Putra  
NIM : 125060301111036  
Program Studi : Teknik Elektro  
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Ir. Hery Purnomo, M.T. ....

Anggota : Ir. Soeprapto, M.T. ....

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji I : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. ....

Dosen Penguji II : Lunde Ardhenta, S.T, M.Sc. ....

Dosen Penguji III : Ir. Teguh Utomo, M.T. ....

Tanggal Ujian : 28 Oktober 2016

SK Penguji : 1340/UN10.6/SK/2016

### PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi ini dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 3 November 2016

Mahasiswa



Rizky Perdana Putra

NIM. 125060301111036

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada :  
Ayahanda Samuji dan Ibunda Nurul Hidayati tercinta  
Adik Ananda Isna F. dan Aulia Masyitah F. Tersayang*

## RINGKASAN

**Rizky Perdana Putra**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Agustus 2016. **Rancang Bangun Sistem Pengaturan Eksitasi Pada Generator Sinkron 3 Fasa Menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR)**. Dosen Pembimbing : Ir. Hery Purnomo, M.T. dan Ir. Soeprpto, M.T.

Pada suatu pembangkit energi listrik yang menggunakan generator sinkron ada dua hal pengaturan yang harus dilakukan yaitu pengaturan tegangan keluaran yang berhubungan dengan daya reaktif dan frekuensi keluaran yang berhubungan dengan daya aktif generator. Perubahan tegangan keluaran bisa menimbulkan bermacam-macam efek pada generator. Kondisi stabilitas generator bisa mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik secara umum. *Automatic Voltage Regulator* (AVR) merupakan peralatan kontrol otomatis yang digunakan untuk menjaga agar tegangan terminal generator selalu konstan dengan cara mengatur tegangan eksitasi yang diberikan pada kumparan medan generator sinkron 3 fasa.

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat pengendali eksitasi otomatis generator sinkron 3 fasa yang dapat beroperasi sendiri agar menghasilkan tegangan pada batas yang diijinkan dengan memanfaatkan AVR.

Dalam penelitian ini sistem AVR dilakukan dua kali pengujian. Pengujian pertama yaitu generator sinkron dibebani beban elektrik yang diberikan naik secara bertahap. Pengujian kedua yaitu generator dibebani secara acak untuk mengetahui tanggapan AVR ketika terjadi fluktuasi beban. Dari pengujian tersebut didapatkan bahwa semakin besar beban elektrik yang diberikan, maka tegangan eksitasi yang diberikan ke kumparan medan juga akan semakin besar. Waktu yang dibutuhkan sistem AVR untuk menstabilkan kembali tegangan keluaran generator sinkron 3 fasa masih dalam batas toleransi (orde detik) dikarenakan beban yang digunakan mempunyai arus *starting* yang besar sehingga respon AVR menunjukkan adanya osilasi sebelum mencapai keadaan tunak (*steady state*).

**Kata kunci** – eksitasi, *automatic voltage regulator*, generator sinkron 3 fasa

## SUMMARY

**Rizky Perdana Putra**, Department Of Electrical Engineering, Faculty Of Engineering, University Of Brawijaya. August 2016. **Design of Excitation Settings System on 3 Phase Synchronous Generator Use Automatic Voltage Regulator (AVR)**. Supervising lecturer: Ir. Hery Purnomo, M.T. and Ir. Soeprpto, M.T.

Power plant that using a synchronous generator there are two settings to be note. It's setting the output voltage that is related with reactive power and frequency output related to the active power generator. The change of the output voltage can cause various effects for the generator. Stability condition of generators can affect the stability of the power system in General. Automatic Voltage Regulators (AVR) is automatic control equipment which used to keep the terminal voltage of generator to be constant by set up the excitation voltage which given on the field coil of 3 phase synchronous generator.

The purpose of this research is to develop an automatic excitation controller of 3 phases synchronous generator that can operate on its own in order to generate the voltage on the limits allowed by utilizing the AVR.

In this research the AVR system tested twice. First testing, synchronous generator given by electrical load that given rise gradually. The second testing, generator saddled randomly to know the response of AVR when load fluctuations. From these tests are obtained that the greater the electrical load is given, then the excitation voltage is given to the field coil also will be even greater. The time it takes the AVR system back to stabilize the output voltage of 3 phase synchronous generator is still within the limits of tolerance (seconds) due to the load being used has a great starting currents so that response AVR showed oscillation before reaching steady state.

**Keywords** – excitation, automatic voltage regulator, 3 phase synchronous generator





## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Rancang Bangun Sistem Pengaturan Eksitasi Pada Generator Sinkron 3 Fasa Menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR)” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. dan Ir. Soeprpto, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Adharul Muttaqin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik, beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu penulis selama perkuliahan.
5. Keluarga tercinta Ayah Samuji dan Ibu Nurul Hidayati yang selalu memberikan kasih sayang dan do'anya yang tiada akhir, adik tercinta Ananda Isna Fajrin dan Aulia Masyitah Firdausi atas segala macam dukungan yang telah diberikan.
6. Laboran Laboratorium Mesin Elektrik Mas Indra Setyawan S.ST yang telah banyak memberikan masukan, solusi, semangat dan motivasi dalam proses pengerjaan alat.
7. Seluruh Asisten Mesin Elektrik dan Asisten Elektronika Daya yang telah turut andil memberikan memberikan waktu, tenaga, pikiran, kebersamaan, semangat, dan saling mendukung dalam pengerjaan skripsi.
8. Seluruh teman-teman BK atas bantuan, motivasi, kerjasama, dan kebersamaan dalam proses pengerjaan skripsi.
9. Seluruh teman-teman angkatan 2012 (Voltage), terutama teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik (Power 2012) yang telah berbagi suka dan duka dalam perkuliahan dan memberikan semangat dalam proses pengerjaan skripsi ini.
10. Seluruh teman-teman Sparrow atas bantuan, motivasi dan kebersamaan dalam proses pengerjaan skripsi.

11. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

Pada akhirnya, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Malang, 3 November 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	1
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	ix
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xi
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Automatic Voltage Regulator (AVR) .....	5
2.1.1 <i>Voltage Error Sensing Circuit (VESC)</i> .....	6
2.1.2 <i>Amplifier</i> .....	6
2.1.3 Eksiter .....	7
2.2 Generator Sinkron .....	8
2.2.1 Umum .....	8
2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron .....	9
2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron .....	11
2.3.1 Generator Sinkron Tanpa Beban .....	13
2.3.2 Generator Sinkron Berbeban .....	13
2.3.3 Menentukan Parameter-Parameter Generator Sinkron .....	15
2.4 Sistem Eksitasi .....	16
2.4.1 Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa .....	17
2.4.2 <i>Buck Converter</i> .....	18
2.4.3 Mikrokontroler Arduino Uno R3 .....	20
2.4.4 Sensor Tegangan .....	23
<b>BAB III. METODE PENELITIAN</b> .....	25
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	25
3.2 Studi Literatur .....	25



3.3 Blok Diagram Sistem.....	26
3.4 Diagram Alir Alat .....	27
3.5 Perancangan Alat dan Simulasi .....	27
1. Perancangan Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa .....	28
2. Perancangan <i>Buck Converter</i> .....	28
3. Perancangan Perangkat Lunak Untuk Mikrokontroler .....	28
3.6 Pembuatan Alat.....	28
3.7 Pengujian dan Analisis.....	29
3.8 Pengambilan Kesimpulan dan Saran .....	30
<b>BAB IV. PERANCANGAN DAN SIMULASI ALAT .....</b>	<b>31</b>
4.1 Gambaran Umum Sistem.....	31
4.2 Penentuan Jenis Komponen Yang Digunakan Pada Setiap Balok Sesuai Yang Ada Di Pasaran .....	32
4.3 Perancangan Sistem <i>Automatic Voltage Regulator (AVR)</i> .....	32
4.3.1 Perancangan <i>Buck Converter</i> .....	32
4.3.2 Perancangan Kontroler Sistem Keseluruhan.....	36
4.3.3 Perancangan Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa .....	39
4.3.4 Perancangan Sensor Tegangan.....	40
4.4 Simulasi Menggunakan MATLAB Simulink.....	41
4.4.1 Simulasi <i>buck converter</i> menggunakan saklar elektronik MOSFET dengan metode PWM.....	41
4.4.2 Simulasi Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa .....	45
<b>BAB V. PENGUJIAN DAN ANALISIS .....</b>	<b>49</b>
5.1 Pengujian Pembangkit sinyal picu .....	49
5.1.1 Tujuan .....	49
5.1.2 Peralatan.....	49
5.1.3 Prosedur Pengujian .....	49
5.1.4 Hasil Pengujian .....	50
5.1.5 Analisis Hasil Pengujian .....	51
5.2 Pengujian Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa .....	51
5.2.1 Tujuan .....	51
5.2.2 Peralatan.....	51
5.2.3 Prosedur Pengujian .....	52
5.2.4 Hasil Pengujian .....	52

5.2.5 Analisis Hasil Pengujian .....	53
5.3 Pengujian Sensor Tegangan .....	54
5.3.1 Tujuan.....	54
5.3.2 Peralatan .....	54
5.3.3 Prosedur Pengujian.....	54
5.3.4 Hasil Pengujian.....	55
5.3.5 Analisis Hasil Pengujian .....	56
5.4 Pengujian <i>Buck Converter</i> .....	56
5.4.1 Tujuan.....	56
5.4.2 Peralatan .....	56
5.4.3 Prosedur Pengujian.....	56
5.4.4 Hasil Pengujian.....	57
5.4.5 Analisis Hasil Pengujian .....	58
5.5 Pengujian <i>Buck Converter</i> Dengan Umpan Balik.....	58
5.5.1 Tujuan.....	58
5.5.2 Peralatan .....	58
5.5.3 Prosedur Pengujian.....	59
5.5.4 Hasil Pengujian.....	59
5.5.5 Analisis Hasil pengujian.....	60
5.6 Pengujian Sistem AVR .....	60
5.6.1 Tujuan.....	60
5.6.2 Peralatan .....	60
5.6.3 Prosedur Pengujian.....	61
5.6.4 Hasil Pengujian.....	61
5.6.5 Analisis Hasil Pengujian .....	64
<b>BAB VI. PENUTUP</b> .....	65
6.1 Kesimpulan .....	65
6.2 Saran.....	65
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	67
<b>LAMPIRAN</b> .....	69





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Blok diagram AVR generator sinkron.....	5
Gambar 2.2 Rotor Kutub Menonjol.....	10
Gambar 2.3 (a) Rotor Silindris (b) Cross section view .....	11
Gambar 2.4 Karakteristik Tanpa Beban Generator Sinkron.....	13
Gambar 2.5 Karakteristik Generator Sinkron Berbeban .....	14
Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron .....	15
Gambar 2.7 Karakteristik Hubung Singkat Generator .....	16
Gambar 2.8 Blok diagram sistem eksitasi statis .....	16
Gambar 2.9 Rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa.....	17
Gambar 2.10 Gelombang tegangan masukan dan keluaran penyearah tak terkontrol 3 fasa .....	18
Gambar 2.11 Rangkaian ekuivalen <i>buck converter</i> .....	18
Gambar 2.12 Arduino UNO R3.....	21
Gambar 2.13 Pemetaan pin atmega328 pada Arduino .....	21
Gambar 2.14 Rangkaian sederhana pembagi tegangan .....	23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	25
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem AVR .....	26
Gambar 3.3 Diagram Alir Sistem Kerja AVR.....	27
Gambar 4.1 Diagram balok rancangan sistem AVR .....	31
Gambar 4.2 Karakteristik suhu terhadap arus drain MOSFET IRF730 .....	35
Gambar 4.3 Skematik diagram <i>buck converter</i> yang telah dirancang .....	36
Gambar 4.4 Skematik kontroler sistem AVR.....	37
Gambar 4.5 Diagram Alir Program Arduino.....	38
Gambar 4.6 Skematik rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa.....	39
Gambar 4.7 Diagram skematik perancangan sensor tegangan .....	41
Gambar 4.8 Rangkaian simulasi <i>buck converter</i> MOSFET .....	42
Gambar 4.9 Gelombang tegangan dan arus buck converter ( $V_s = 200 \text{ V}$ ; $D = 10 \%$ ) .....	43
Gambar 4.10 Karakteristik <i>dutycycle</i> terhadap tegangan keluaran <i>buck converter</i> .....	45
Gambar 4. 11 Rangkaian simulasi penyearah tak terkontrol 3 fasa .....	46
Gambar 4.12 Hasil simulasi penyearah tak terkontrol 3 fasa .....	47
Gambar 5.1 Rangkaian pengujian pembangkit sinyal picu .....	49
Gambar 5.2 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 85.3% .....	50



Gambar 5.3 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 50.2% .....	50
Gambar 5.4 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 10.3% .....	51
Gambar 5.5 Rangkaian pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa.....	52
Gambar 5.6 Hasil pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa .....	53
Gambar 5.7 Bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah tak terkontrol 3 fasa.....	53
Gambar 5.8 Rangkaian pengujian sensor tegangan .....	54
Gambar 5.9 Hasil pengujian sensor tegangan .....	55
Gambar 5.10 Rangkaian pengujian <i>buck converter</i> .....	56
Gambar 5.11 Hasil pengujian <i>buck converter</i> .....	58
Gambar 5.12 Rangkaian pengujian <i>buck converter</i> dengan umpan balik.....	59
Gambar 5.13 Hasil pengujian <i>buck converter</i> dengan umpan balik .....	60
Gambar 5.14 Grafik hasil pengujian sistem keseluruhan AVR .....	62
Gambar 5.15 Grafik respon AVR $V = f(t)$ dengan perubahan beban 100 watt.....	62
Gambar 5.16 Grafik respon AVR $V = f(t)$ dengan perubahan beban sebesar 200 watt.....	63





## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Uno .....	21
Tabel 4.1 Penentuan parameter perancangan <i>buck converter</i> .....	32
Tabel 4.2 Hasil simulasi <i>buck converter</i> dengan beban $813 \Omega$ dan frekuensi 50 kHz pada beberapa variasi nilai <i>dutycycle</i> .....	34
Tabel 4.3 Komponen <i>buck converter</i> .....	36
Tabel 4.4 Penentuan komponen simulasi <i>buck converter</i> .....	42
Tabel 4.5 Hasil simulasi <i>buck converter</i> .....	44
Tabel 4.6 Perbandingan tegangan keluaran <i>buck-converter</i> antara teori dan simulasi dengan $V_{in} = 200 \text{ V}$ .....	44
Tabel 4.7 Komponen simulasi <i>buck converter</i> .....	46
Tabel 4.8 Hasil simulasi penyearah tak terkontrol 3 fasa .....	47
Tabel 5.1 Hasil pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa .....	52
Tabel 5.2 Hasil pengujian sensor tegangan .....	55
Tabel 5.3 Hasil pengujian <i>buck converter</i> dengan beban $813 \Omega$ pada beberapa variasi nilai <i>dutycycle</i> .....	57
Tabel 5.4 Hasil pengujian <i>buck converter</i> dengan umpan balik .....	59
Tabel 5.5 Hasil pengujian sistem keseluruhan dengan beban linier .....	61
Tabel 5.6 Hasil pengujian dengan variasi pembebanan secara acak .....	62



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Listing Program Arduino .....	70
Lampiran 2. Data sheet .....	73
Lampiran 3. Dokumentasi .....	79





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan energi listrik mendorong peningkatan penyediaan pembangkitan energi listrik yang memadai. Generator adalah salah satu peralatan utama dalam suatu pembangkit tenaga listrik, baik pada pembangkit listrik tenaga air, pembangkit listrik tenaga gas, pembangkit listrik tenaga uap, dan pembangkit listrik tenaga diesel. Pembebanan sistem interkoneksi selalu berubah-ubah setiap saat, sehingga unit-unit generator pada masing-masing pembangkit yang berkontribusi pada sistem interkoneksi harus selalu siap menghadapi berbagai kondisi sistem (Weedy, 1988: 77).

Pada suatu pembangkit energi listrik yang menggunakan generator sinkron ada dua hal pengaturan yang harus dilakukan yaitu pengaturan tegangan keluaran yang berhubungan dengan daya reaktif dan frekuensi keluaran yang berhubungan dengan daya aktif generator. Ketika beban naik terjadi penurunan tegangan keluaran dan ketika beban turun terjadi kenaikan tegangan keluaran maka diperlukan pengaturan tegangan keluaran dengan cara mengatur arus eksitasi (Chapman, 2002).

Perubahan tegangan keluaran bisa menimbulkan bermacam-macam efek pada generator. Kondisi stabilitas generator bisa mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik secara umum. Stabilitas sistem tenaga listrik adalah permasalahan penting dalam menunjang kehandalan sistem tenaga listrik. Oleh karena itu fenomena pengaruh perubahan tegangan generator perlu dianalisis dalam rangka mendukung stabilitas dan kehandalan sistem tenaga listrik. Untuk itu diperlukan peralatan kontrol yang digunakan untuk mengatur besaran input guna mencapai titik keseimbangan. *Automatic Voltage regulator* (AVR) merupakan peralatan kontrol otomatis yang digunakan untuk menjaga agar tegangan terminal generator selalu konstan.

Sistem eksitasi merupakan komponen yang sangat penting dalam pengoperasian generator sinkron. Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator sinkron atau sebagai pembangkit medan sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada

besarnya arus eksitasi. Pengaturan arus eksitasi ini akan mempengaruhi tegangan terminal (tegangan keluaran) generator (Priyadi : 2012).

Sistem eksitasi pada generator sinkron terus mengalami perkembangan seiring dengan peningkatan kapasitas generator itu sendiri. Pada generator sinkron, arus medan yang diperlukan untuk membangkitkan medan magnet stator disuplai dari sumber arus searah tertentu seperti generator DC (Penguatan Terpisah) , Permanen Magnet Generator, dan Penguatan Sendiri. Untuk generator konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator dc kecil yang disebut *exciter*. Tegangan yang dihasilkan oleh generator dc ini diberikan pada rotor melalui sikat arang dan *slip ring*. Pada generator konvensional ini ada beberapa kerugian : generator dc kecil (*exciter*) merupakan beban tambahan untuk penggerak utamanya (*prime over*). Walaupun arus searah diperoleh dari sumber dc tambahan yang juga diberikan ke rotor generator.

Generator sinkron yang terdapat pada laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya yang utamanya digunakan untuk tujuan praktikum Mesin Elektrik tentang kerja parallel generator sinkron umumnya menggunakan sistem eksitasi dengan sumber penguat terpisah. Dan untuk pengaturannya sumber DC masih menggunakan *mode manual* sehingga diperlukan *monitoring* secara terus menerus ketika terjadi fluktuasi beban.

Karena hal-hal seperti diatas, maka diajukan proposal tugas akhir ini dengan judul “ Rancang Bangun Sistem Pengaturan Eksitasi Pada Generator Sinkron 3 Fasa Menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Inti dari pembahasan ini adalah membuat sistem eksitasi beroperasi secara otomatis tanpa *monitoring* terus menerus ketika beban naik ataupun turun.

## 1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang dikaji di dalam penelitian ini disusun dalam rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan *Sistem Pengaturan Eksitasi Pada Generator Sinkron 3 Fasa* menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR).
2. Berapa kisaran tegangan eksitasi yang dibutuhkan generator sinkron 3 fasa untuk beban yang bervariasi.
3. Berapa lama waktu yang dibutuhkan generator sinkron 3 fasa untuk mencapai *setpoint* ketika dibebani.

### 1.3 Batasan Masalah

Permasalahan dalam penulisan penelitian ini dibatasi dengan batasan masalah sebagai berikut :

1. Generator Sinkron 3 fasa yang digunakan terdapat di Laboratorium Mesin Elektrik TEUB dan memiliki kapasitas daya 300 watt.
2. Beban elektrik yang digunakan yaitu resistor variabel 3 fasa
3. Tidak membahas mengenai prinsip kerja peralatan proteksi pada sistem eksitasi.
4. Tidak membahas tentang pengaturan daya reaktif generator sinkron.
5. Kontroler yang digunakan yaitu kontroler PID dengan nilai  $K_p = 1.6325$  ;  $K_i = 5$  ;  $K_d = 0.1$  dan tidak membahas kontroler secara detail.
6. Pengaruh pengaturan tegangan generator sinkron terhadap frekuensi yang dihasilkan tidak dibahas dalam tugas akhir ini.
7. *Prime Over* yang digunakan untuk menggerakkan generator sinkron adalah motor DC shunt.
8. AVR diaplikasikan dalam praktikum mesin elektrik tentang kerja paralel generator sinkron.
9. Tidak membahas AVR ketika pada kondisi abnormal (*underspeed/overspeed*).

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah membuat sistem pengaturan eksitasi otomatis generator sinkron 3 fasa yang dapat beroperasi sendiri agar menghasilkan tegangan pada batas yang diijinkan dengan memanfaatkan *Automatic Voltage Regulator (AVR)*.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### **BAB I : PENDAHULUAN**

Bab ini berisikan latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

#### **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi teori yang digunakan untuk penelitian dan untuk mendukung permasalahan yang diteliti.

**BAB III : METODE PENELITIAN**

Berisi tahapan penyelesaian penelitian ini yang meliputi studi literature, perancangan alat, pembuatan alat, pengujian alat, pengambilan data, perhitungan, dan analisis data.

**BAB IV : PERANCANGAN SISTEM DAN SIMULASI ALAT**

Berisi tentang perancangan sistem yang diajukan dalam penelitian serta disimulasikan dalam program matlab.

**BAB V : PENGUJIAN DAN ANALISIS**

Berisi pengujian dan pengambilan data hasil perancangan alat yang kemudian digunakan untuk analisis.

**BAB VI : PENUTUP**

Berisi kesimpulan dari analisis hasil penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya.









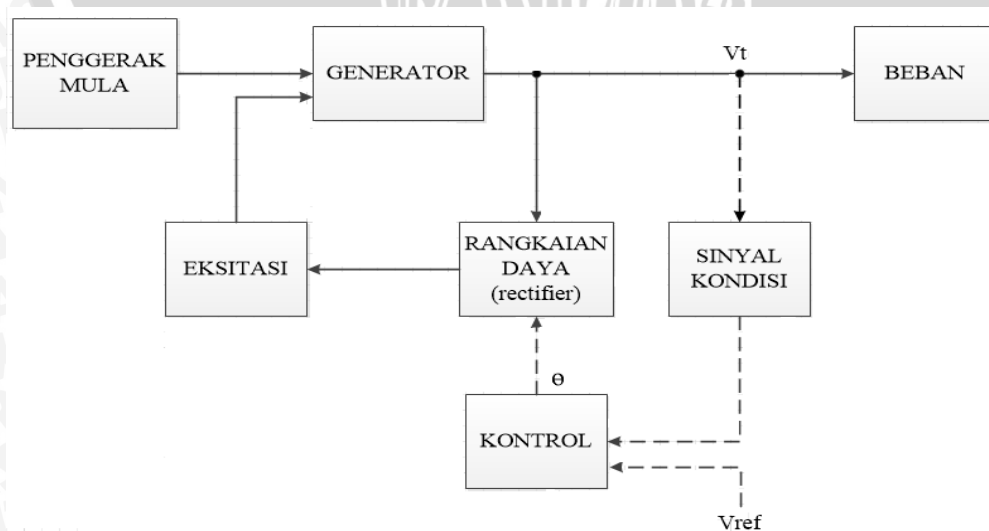
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Automatic Voltage Regulator (AVR)

*Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah sebuah peralatan yang berfungsi sebagai pengatur atau penstabil tegangan yang berfungsi secara otomatis. *Automatic voltage regulator* berbentuk rangkaian circuit yang dipasang pada suatu generator pembangkit listrik. Prinsip kerja yang digunakan pada sistem penyetabil tegangan ini adalah dengan mengatur tegangan keluaran DC dari *exciter* untuk kemudian diinjeksikan ke lilitan medan generator atau biasa disebut dengan eksitasi atau penguatan.

Besarnya tegangan yang diberikan ke kumparan medan generator akan selalu berubah-ubah tergantung kondisi beban generator. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan pada exciter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output Generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis (Sumardjati, 2006). Blok diagram dari *Automatic Voltage Regulator* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok diagram AVR generator sinkron

Gambar 2.1 merupakan blok diagram AVR generator Sinkron. Penjelasan blok diagram adalah sebagai berikut :

1. Unit eksitasi mencatu arus listrik searah ke lilitan medan (rotor) dengan cara memberikan tegangan listrik searah ke terminal lilitan medan.
2. Unit rangkaian daya megkonversikan arus listrik bolak-balik dari generator menjadi arus listrik searah.
3. Unit sinyal kondisi membaca keluaran generator yang akan disampaikan kepada unit kontrol.
4. Unit kontrol melakukan pengendalian keluaran pada unit rangkaian sehingga didapat arus listrik dc yang diinginkan dan melakukan pengendalian pada unit eksitasi sehingga tegangan listrik searah ke terminal medan dapat di kontrol.

Bagian-bagian pada unit AVR :

### **2.1.1 Voltage Error Sensing Circuit (VESC)**

Tugas utama sirkuit ini adalah untuk mendeteksi jika terjadi penurunan ataupun kenaikan tegangan keluaran dari generator. Prinsip kerjanya adalah dengan mematok nilai referensi (*set point*) pada AVR controller, dimana jika terjadi kenaikan atau penurunan dan itu sudah diluar batas toleransi maka akan terdeteksi. kemudian bacaan sinyal kesalahan ini akan diperkuat juga oleh Amplifier.

### **2.1.2 Amplifier**

Fungsi utama Amplifier adalah penguat sinyal. Tegangan dan arus masukan dapat diperkuat menjadi 10000 kali lipat. Selain dapat menguatkan VESC, rangkaian ini juga dapat menguatkan voltase dan arus yang dibutuhkan untuk menguatkan medan di eksiter. Dalam pengoperasinya penguat daya ini membutuhkan daya tambahan dari luar agar bisa bekerja. Ada banyak cara untuk mendapatkan daya tambahan ini antara lain:

1. Sumber eksternal
2. Eksitasi sendiri
3. Ekister utama

Berdasarkan sinyal yang dikuatkan amplifier dibagi menjadi berikut,

#### **a. Comparative amplifier**

Rangkaian *comparative amplifier* digunakan sebagai pembanding *antara sensing circuit* dengan *set voltage*. Besarnya hasil sensor dengan tegangan nominal

mempunyai nilai yang tidak sama sehingga akan terdapat selisih/rentang besar tegangan tersebut. Selisih tegangan disebut dengan *error voltage*. *Error* tersebut akan dihilangkan dengan cara memasang VR (*variable resistance*) pada *set voltage* dan *sensing voltage*.

#### b. *Exiter Amplifier*

Pada kinerja penguat ini yang dikuatkan adalah kumparan medan yang akan di eksitasi. Mekanisme penguatan ini adalah dengan menguatkan tegangan dan arus pada eksiter. Penguat ini merupakan tanggapan dari rangkaian pendeteksi jika ternyata keluaran generator tidak pada nilai nominal.

### 2.1.3 Eksiter

Pada generator yang dilengkapi dengan eksiter, besar tegangan listrik yang dihasilkan sebanding dengan medan magnet di dalamnya. Sedangkan besarnya arus ini sebanding dengan arus yang dibangkitkan oleh eksiter. Pada generator yang mengalami penurunan tegangan maka besar arus eksiter harus di tambah, dan juga generator ketika tegangan keluran terlalu tinggi maka eksiter harus diturunkan arusnya. Secara umum eksiter digolongkan menjadi dua yaitu, eksiter berputar dan eksiter statis.

#### 1. Eksiter berputar

Eksiter ini membangkitkan arus listrik DC dengan menggunakan generator kecil yang dipasang dan ikut berputar dengan generator utama. dimana lilitan pada rotor dan stator sudah dibalik. Ada dua tipe generator berputar, yaitu:

#### 2. Eksiter statis

Model eksiter ini adalah eksiter dengan sumber tambahan dari generator kecil yang dipasang diluar generator utama sebagai penyuplai daya. Jenis ini disebut juga *External power supply*. Kelebihan sistem ini adalah daya yang diberikan bersifat sumber yang tak terputus artinya daya memang terfokus dan terus menerus diberikan untuk eksiter utama. Tetapi kekurangannya adalah menambah biaya yang relatif lebih mahal dari metode *pilot exciter* bahkan juga membutuhkan perawatan yang lebih.

Sebenarnya ada metode lain untuk mensuplai arus eksitasi yaitu dengan metode eksitasi sendiri yaitu dengan memanfaatkan sisa medan magnet (remanensi) pada shaft rotor generator utama. Kelebihannya memang anggaran dana yang dikeluarkan bisa dibilang paling minim. tetapi performa yang dihasilkan juga paling buruk karena daya berasal dari sisa

medan magnet saat gerator dimatikan karena penjadwalan sistem daya. Dan buruknya lagi jika terjadi hubungan pendek di generator utama atau disekitar generator utama maka arus akan langsung mati dan tidak memberikan daya.

Jadi gambaran kinerja AVR secara umum adalah pertama output dari generator terukur oleh rangkaian pengukuran dan kemudian terjadi pendeteksian juga apakah terjadi perbedaan nilai tegangan dan arus yang keluar dari generator dengan nilai referensi yang sudah di set di AVR kontroler. Jika terjadi penurunan daya output maka penguat akan bekerja memperkuat medan di sekitar eksiter dengan cara memperkuat arus medan di kumparan generator utama sehingga daya keluaran generator bisa naik. Jika terjadi kenaikan tegangan maka eksiter akan menurunkan medan di generator utama sehingga output generator bisa turun sesuai dengan yang diinginkan.

Terdapat komponen tambahan diluar tiga komponen utama yang telah diuraikan diatas antara lain:

a.) *Limited circuit*

Rangkaian pembatas adalah untuk penentuan pembatasan lebih dan kurang penguatan (*excitation*) untuk pengaturan tegangan output pada sistem eksitasi.

b.) *Dumping circuit*

Rangkaian peredam akan memberikan sensor besarnya penguatan tegangan dari AC eksiter dan untuk diberikan ke rangkaian penguat dengan dijadikan umpan balik ke terminal masukan penguat.

## 2.2 Generator Sinkron

### 2.2.1 Umum

Mesin sinkron merupakan suatu mesin arus bolak-balik yang kecepatannya dalam keadaan mantap (*steady state*) berbanding lurus dengan frekuensi dan arus yang mengalir pada gandar-kumparannya. Sebuah mesin sinkron dapat dipakai sebagai generator ataupun sebagai motor. Sebagai generator, mesin sinkron dapat dioperasikan sebagai mesin tunggal, akan tetapi biasanya mesin ini akan tergabung dalam suatu interkoneksi, sehingga bekerja parallel dengan generator-generator lain. (Abd. Kadir, 1983).

Sebagai motor, mesin sinkron bekerja sebagai suatu alat sinkron, yang berputar dengan suatu putaran tetap yang ditentukan oleh frekuensi dan jumlah putaran kutub. Jika mengalami beban lebih, ataupun mendapat suatu beban kejut, keadaan sinkro tersebut dapat

terlepas atau lebih dikenal dengan istilah lepas sinkron (Abd. Kadir,1983). Penelitian ini hanya membahas mengenai mesin sinkron sebagai generator.

### 2.2.2 Konstruksi Generator Sinkron

Bagian-bagian utama generator sinkron terdiri dari :

#### 1. Stator

Stator adalah bagian yang diam dari generator, berfungsi untuk menopang dan sebagai tempat kumparan jangkar. Kumparan jangkar ini berfungsi untuk menyalurkan tegangan terinduksi akibat adanya medan magnet utama yang berputar memotong kumparan jangkar tersebut. Bagian-bagian stator yaitu :

- a. Rangka stator merupakan rumah dari bagian-bagian generator yang lain dan merupakan tempat pemasangan kumparan-kumparan stator.
- b. Inti magnetis merupakan jalan bagi fluksi magnet yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet dari rotor.
- c. Kumparan stator merupakan bagian yang menghasilkan tegangan listrik (generator kutub dalam). Kumparan stator terdiri atas tiga kelompok kumparan yaitu : kelompok kumparan fasa R, kelompok kumparan fasa S, kelompok kumparan fasa T.

#### 2. Rotor

Rotor merupakan bagian generator yang berputar. Pada rotor terpasang belitan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet utama ketika dialiri arus searah.

Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

##### a. Slip ring

*Slip ring* merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasang ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (*brush*) yang letaknya menempel pada *slip ring*.

##### b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

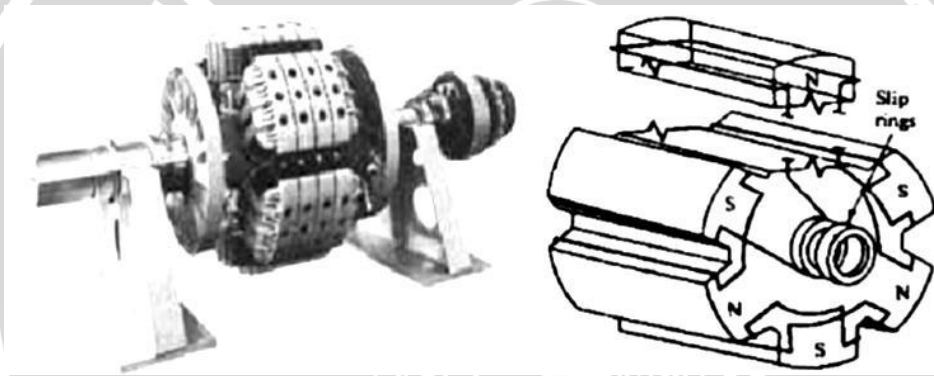
Kumparan medan merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

### c. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah dibentuk slot-slot secara parallel terhadap poros rotor. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient pole* (kutub menonjol) dan *non salient pole* (kutub silinder).

#### a) Jenis Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Pada jenis *salient pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Gambaran bentuk kutub menonjol generator sinkron seperti pada gambar 2.2 berikut :



Gambar 2.2 Rotor Kutub Menonjol

Sumber : Chapman, 1985

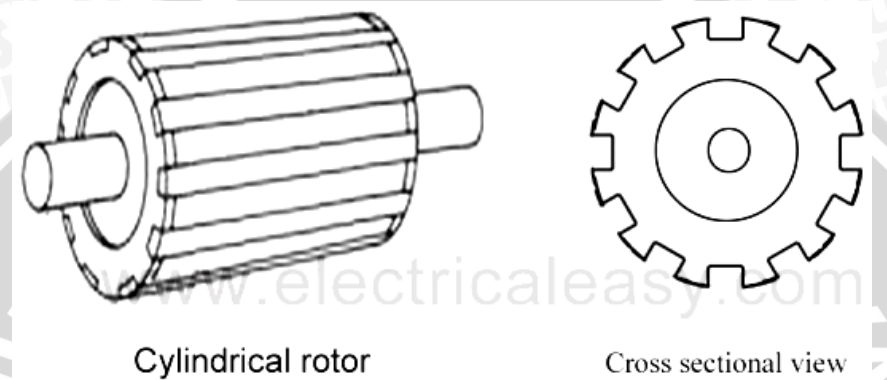
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena:

1. Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
2. Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.



### b) Jenis Kutub Silindris (*Non Salient Pole*)

Pada jenis *non salient pole*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya dan terhubung seri yang dienerjais oleh Eksiter. Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada Gambar 2.3 berikut :



Gambar 2.3 (a) Rotor Silindris (b) Cross section view

Sumber : Jadic,1998

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena:

1. Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi
2. Distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

### 2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh *primemover*, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks yang bersifat bolak-balik atau fluks putar. Fluks putar ini akan memotong kumparan stator sehingga pada ujung-ujung kumparan stator timbul gaya gerak listrik yang disebabkan oleh induksi dari fluks putar tersebut. Gaya gerak listrik (GGL) yang timbul pada kumparan stator juga bersifat bolak-balik atau berputar

dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor (Surya : 2006). Besar GGL induksi pada generator sinkron dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.1 :

$$E_{eff} = 4,44. f. N. \varphi \quad (2-1)$$

dimana :

E - ggl induksi (Volt)

f - frekuensi (Hz)

N - Jumlah lilitan

$\varphi$  - Fluks magnetic (weber)

Frekuensi listrik yang dihasilkan oleh generator sinkron adalah serempak dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC dimana dalam elektromagnet terdapat medan magnet. Medan magnet yang ditimbulkan oleh rotor bergerak searah putaran rotor. Hubungan antara putaran medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yaitu:

$$f = \frac{n.p}{60} \quad (2-2)$$

Dimana :

f - Frekuensi listrik (Hz)

n - Kecepatan putaran rotor (rpm)

p - Jumlah kutub magnet

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor harus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm (Zuhal : 1998)

Pada generator sinkron tiga fasa, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di rotor yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang

sama tetapi berbeda fasa  $120^\circ$  satu sama lain. Kemudian ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik.

Regulasi tegangan pada generator sinkron merupakan persentase perubahan tegangan terminal generator dari kondisi beban nol menjadi kondisi beban penuh. Regulasi tegangan dapat dihitung dengan persamaan yaitu :

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (2-3)$$

Dimana :

$V_{NL}$  - Tegangan tanpa beban

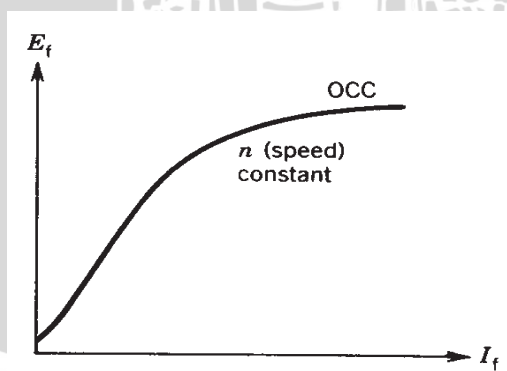
$V_{FL}$  - Tegangan bebekan

### 2.3.1 Generator Sinkron Tanpa Beban

Pada saat generator sinkron diputar dengan kecepatan yang serempak dengan rotor yang diberi arus medan ( $I_f$ ), maka tegangan ( $E_0$ ) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator (Chapman : 2005).

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator sehingga tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ) dimana apabila arus medan ( $I_f$ ) diubah harganya maka akan diperoleh harga  $E_0$  seperti yang terlihat pada kurva di Gambar 2.4.

Bila besarnya arus medan dinaikkan maka tegangan output juga akan naik sampai mencapai titik saturasi (jenuh) seperti diperlihatkan oleh Gambar 2.4.



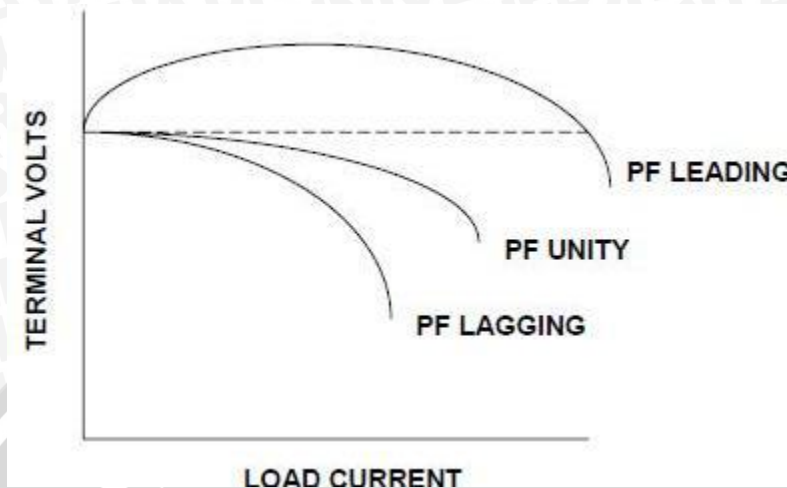
Gambar 2.4 Karakteristik Tanpa Beban Generator Sinkron

Sumber : Sen,1997

### 2.3.2 Generator Sinkron Berbeban

Pada saat generator dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar yang terjadi bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi dan disebut reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ).

Reaktansi pemagnet ( $X_m$ ) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor ( $X_a$ ) dikenal sebagai reaktansi sinkron ( $X_s$ ). Karakteristik generator sinkron berbeban diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Karakteristik Generator Sinkron Berbeban

Sumber : Sumardjati, 2008

Bila generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan oleh adanya:

1. Jatuh tegangan karena resistansi jangkar ( $R_a$ )

Resistansi jangkar per fasa  $R_a$  yang dialiri oleh arus jangkar  $I_a$  menyebabkan terjadinya tegangan jatuh per fasa  $I_a R_a$  yang sefasa dengan arus jangkar  $I_a$ . Akan tetapi, pada praktiknya jatuh tegangan ini diabaikan karena pengaruhnya sangat kecil (Surya:2006).

2. Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar

Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang terjadi tidak memotong *air-gap*, melainkan mengambil jalur yang lain dan menghubungkan sisi-sisi kumparan (Zuhail:1998). Fluks-fluks tersebut dinamakan fluks bocor (*leakage flux*). Fluks bocor tersebut bergerak dengan arus jangkar dan memberikan induktansi diri (*self-inductance*) belitan yang disebut dengan reaktansi bocor jangkar.

3. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar

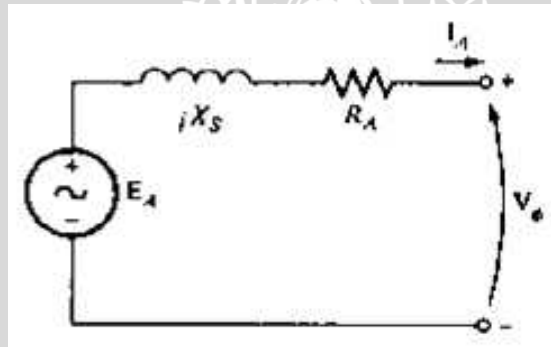
Pada saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udaranya fluksi arus medan rotor. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar  $I_a$  akan

mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal  $V_{\phi}$  generator sinkron yang dikenal sebagai reaksi jangkar. Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, pelemahan medan magnet pada celah udara.

### 2.3.3 Menentukan Parameter-Parameter Generator Sinkron

Parameter generator sinkron dibutuhkan untuk menggambarkan rangkaian ekivalen beserta karakteristiknya seperti Gambar 2.6 (Chapman:2005). Parameter yang dibutuhkan untuk menggambarkan karakteristik generator sinkron dalam penulisan ini yaitu tahanan jangkar ( $R_a$ ) dan reaktansi sinkron ( $X_s$ ).

Nilai ( $R_a$ ) dapat dihitung dengan melakukan pengujian tahanan jangkar dimana kumparan jangkar dihubungkan pada sumber tegangan arus searah (dc) ketika mesin dalam keadaan diam lalu diukur besar arus yang mengalir pada kumparan jangkar.



Gambar 2.6 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

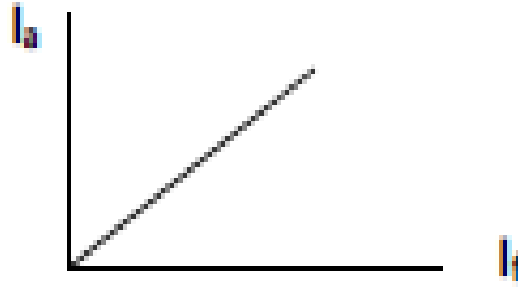
Sumber : Chapman:2005

Tahanan jangkar dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4.

$$R_a = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (2-4)$$

$$\sqrt{R_a^2 + X_s^2} = \frac{E_a}{I_a} \quad (2-5)$$

Untuk mendapatkan nilai ( $X_s$ ) dilakukan dengan percobaan tanpa beban dan percobaan hubung singkat. Pada pengujian tanpa beban, generator diputar pada kecepatan ratingnya sehingga didapat nilai  $E_a = V_{\phi}$ . Pada pengujian hubung singkat, mula-mula arus medan dibuat menjadi nol dan terminal jangkar dihubung singkat melalui ampermeter. Kemudian arus jangkar ( $I_a$ ) diukur dengan mengubah arus eksitasi medan sehingga didapat hubungan antara arus jangkar ( $I_a$ ) dan arus medan ( $I_f$ ) yang berbentuk linear karena tidak adanya efek saturasi seperti Gambar 2.7.



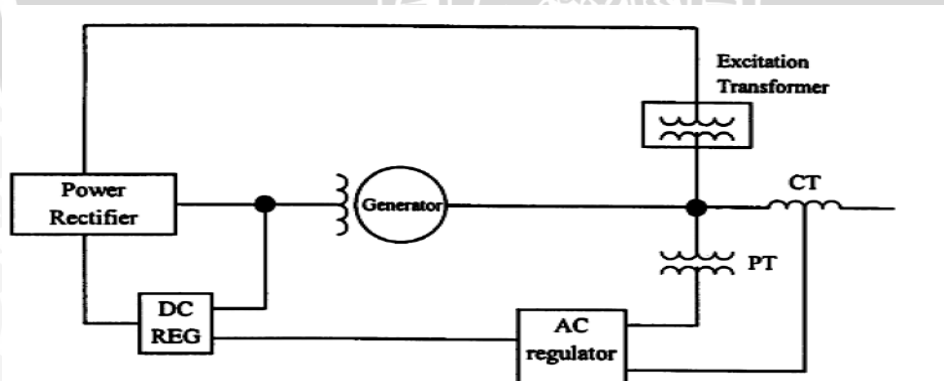
Gambar 2.7 Karakteristik Hubung Singkat Generator

Sumber : Chapman, 2005

## 2.4 Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi yang digunakan adalah sistem eksitasi statis, artinya sistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiter yang bukan mesin bergerak, yaitu dari sistem penyearah yang sumbernya disuplai dari output generator itu sendiri atau sumber lain dengan melalui transformator.

Suplai daya listrik untuk eksitasi mengambil dari output generator melalui *excitation transformer*, kemudian disearahkan melalui penyearah dan disalurkan ke rotor generator untuk eksitasi atau penguat medan dengan melalui sikat arang. Kemudian apabila generator tersebut pada waktu start awal belum mengeluarkan tegangan, maka untuk suplai arus eksitasi biasanya diambil dari baterai. Gambar 2.8 merupakan blok diagram sistem eksitasi statis.



Gambar 2.8 Blok diagram sistem eksitasi statis

Pada generator dengan sistem eksitasi, besar tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator sebanding dengan besar medan magnet di dalamnya, sedangkan besar medan magnet ini sebanding dengan besar arus eksitasi yang dibangkitkan. Maka, jika arus eksitasi sama dengan nol, maka tegangan listrik juga sama dengan nol. Atas dasar ini, sistem eksitasi dapat dikatakan sebagai sebuah sistem amplifier, dimana sejumlah kecil daya dapat

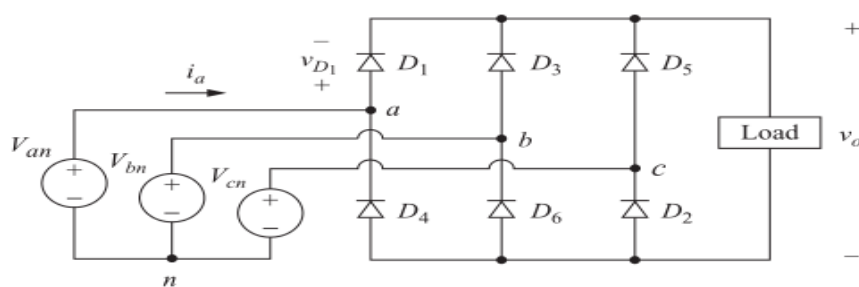
mengontrol sejumlah daya yang besar. Prinsip ini menjadi dasar untuk mengontrol tegangan keluaran generator, jika tegangan sistem turun maka arus eksitasi harus ditambah, dan jika tegangan sistem terlalu tinggi maka arus eksitasi dapat diturunkan (Listen, 1988 : 239).

Dengan kata lain Sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya (Listen, 1988 : 239).

#### 2.4.1 Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

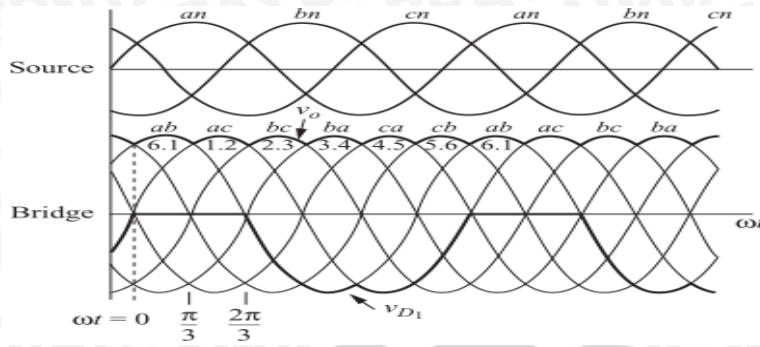
Tegangan keluaran dari generator sinkron adalah gelombang arus bolak-balik 3 fasa. Untuk mengubah gelombang arus bolak-balik dari generator sinkron menjadi gelombang arus searah dibutuhkan penyearah. Karena keluaran dari generator sinkron 3 fasa ini adalah gelombang arus bolak-balik 3 fasa, maka diperlukan penyearah 3 fasa untuk mengubah gelombang arus bolak-balik menjadi gelombang arus searah.

Pada penelitian ini, digunakan penyearah tak terkontrol 3 fasa. Penyearah ini membutuhkan 6 dioda yang disusun seperti gambar 2.9. Rangkaian ini mempunyai sifat bahwa dioda dengan nomor ganjil akan konduksi bila tegangan anodanya mempunyai harga yang paling tinggi dibandingkan dengan tegangan anoda dari komponen-komponen dengan nomor ganjil yang lain. Misalnya pada saat tegangan fasa a dalam keadaan paling tinggi dibandingkan dengan tegangan fasa b dan c, maka D1 konduksi. Sedangkan untuk dioda dengan nomor genap akan konduksi bila tegangan katodanya berada dalam keadaan paling rendah dibandingkan dengan tegangan katoda dari komponen-komponen dengan nomor genap yang lain. Jadi bila tegangan fasa b paling kecil dibandingkan dengan tegangan fasa b dan c, maka D6 konduksi. Jadi pada prinsipnya pada rangkaian tersebut selalu ada dua dioda yang konduksi dalam waktu yang bersamaan.



Gambar 2.9 Rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 144)



Gambar 2.10 Gelombang tegangan masukan dan keluaran penyearah tak terkontrol 3 fasa

Sumber: Daniel W. Hart (2011: 144)

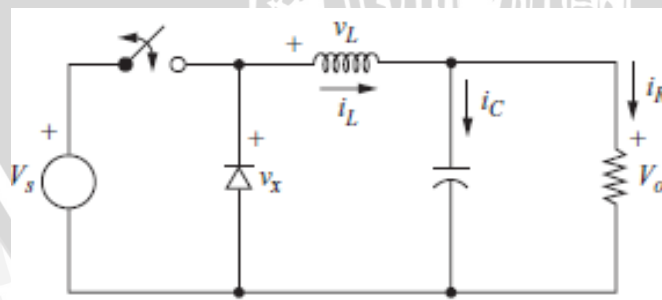
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, tegangan keluaran dari penyearah tak terkontrol hanya dipengaruhi oleh tegangan masukannya. Persamaan untuk menghitung tegangan keluarannya sebagai berikut: (Daniel W. Hart, 2011: 146)

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{m.L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3V_{m.L-L}}{\pi} = 0,955V_{m.L-L} \quad (2-6)$$

Dimana  $V_{m.L-L}$  merupakan tegangan puncak *line to line* dari sumber 3 fasa yaitu  $\sqrt{2}V_{L-L,rms}$ .

#### 2.4.2 Buck Converter

*Buck converter* berfungsi untuk merubah nilai tegangan keluaran generator sinkron 3 fasa sesuai tegangan *set point* karena besarnya tegangan keluaran dari generator akan naik turun sesuai dengan kondisi beban. Konverter ini menggunakan induktor, dioda, kapasitor, dan MOSFET yang dirangkai seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen *buck converter*

Sumber: Daniel W.Hart (2001:199)

Untuk memudahkan analisis, diasumsikan konverter ini:

1. Rangkaian beroperasi dalam keadaan tunak.
2. Arus induktor kontinyu (selalu positif).



3. Kapasitor sangat besar , dan tegangan output akan konstan pada tegangan  $V_0$
4. Periode pensaklaran adalah  $T$ , saklar menutup selama  $DT$  dan terbuka selama  $(1-D)T$ .
5. Seluruh komponen dianggap ideal.

**Analisis ketika saklar tertutup** - Ketika saklar tertutup, dioda dibias mundur. *Khirchhoff's voltage law* pada rangkaian tertutup adalah:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-7)$$

Besarnya perubahan dari arus induktor konstan, menunjukkan bahwa pertambahan arus induktor linier. Perubahan arus dari induktor dapat dihitung dari:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (2-8)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas didapat:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \left(\frac{V_s - V_0}{L}\right)DT \quad (2-9)$$

**Analisis ketika saklar terbuka** - Ketika saklar terbuka, arus induktor tidak bisa berubah secara instan, maka dioda menjadi dibias maju untuk mengalirkan arus dari induktor. Tegangan yang mengalir pada induktor ketika saklar terbuka adalah :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \text{ atau } \frac{di_L}{dt} \quad (2-10)$$

Besarnya perubahan arus induktor konstan, maka arusnya turun secara linier ketika saklar terbuka. Perubahan arus induktor ketika saklar terbuka adalah:

$$\frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_0}{L} \quad (2-11)$$

Dengan menyelesaikan persamaan diatas maka didapat:

$$(\Delta i_L)_{open} = -\left(\frac{V_0}{L}\right)(1-D)T \quad (2-12)$$

Untuk pengoperasian keadaan tunak, arus induktor yang mengalir pada saat akhir siklus pensaklaran adalah sama dengan arus induktor pada saat awal, artinya total arus induktor saat saklar tertutup dan terbuka dalam satu periode adalah nol.

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (2-13)$$

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)(DT) - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1 - D)T = 0 \quad (2-14)$$

$$V_L = (V_s - V_o)DT + (-V_o)(1 - D)T = 0 \quad (2-15)$$

Maka didapatkan,

$$V_o = V_s \cdot D \quad (2-16)$$

**Ripple tegangan keluaran-** *Ripple* tegangan keluaran *buck converter* dapat dihitung dari gelombang arus kapasitor.

$$\Delta Q = C\Delta V_o \quad (2-17)$$

$$\Delta V_o = \frac{T\Delta i_L}{8C} \quad (2-18)$$

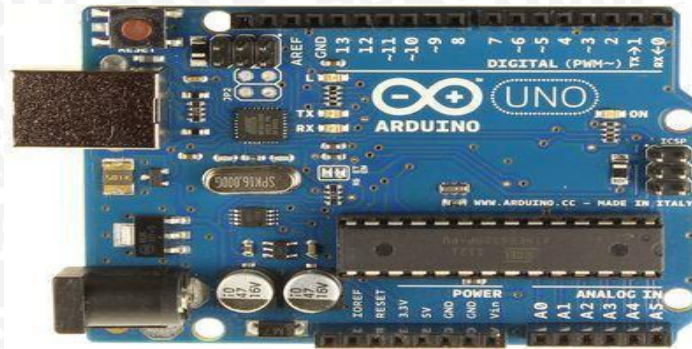
$$\Delta V_o = \frac{TV_o}{8CL}(1 - D)T = \frac{V_o(1-D)}{8LCf^2} \quad (2-19)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (2-20)$$

### 2.4.3 Mikrokontroler Arduino Uno R3

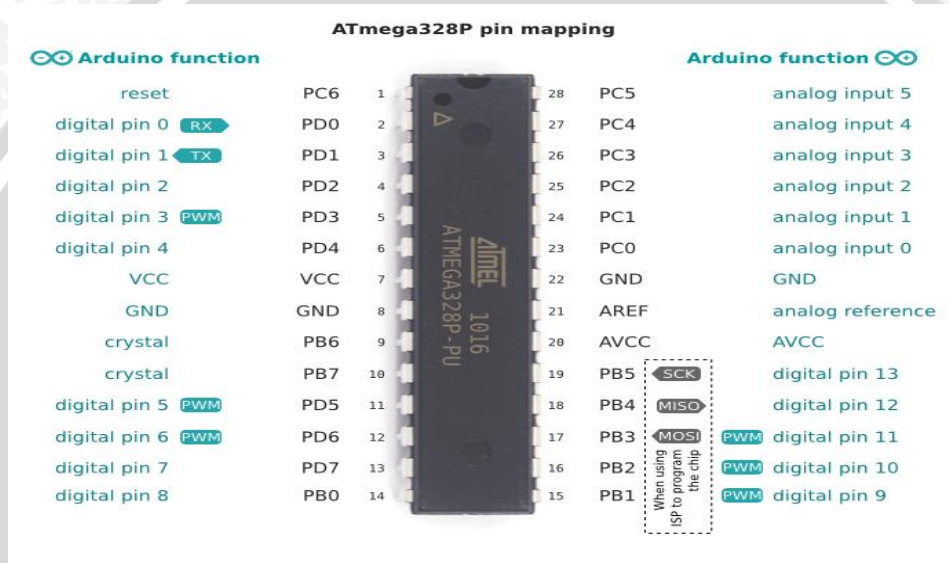
Mikrokontroler adalah piranti elektronik berupa IC (*integrated circuit*) yang memiliki kemampuan manipulasi data (informasi) berdasarkan suatu urutan instruksi (program). Dalam sebuah struktur mikrokontroler akan kita temukan juga komponen-komponen seperti *processor*, *memory*, *clock*, dll.

Dalam penelitian ini mikrokontroler digunakan sebagai pengatur *Duty cycle* pada rangkaian *buck converter*. Mikrokontroler yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Mikrokontroler Arduino Uno R3. Arduino atau Genuino adalah papan mikrokontroler yang menggunakan IC ATmega328P yang mempunyai 14 digital pin input atau output (yang mana 6 pin bisa digunakan sebagai PWM outputs), 6 analog input, 16 MHz quartz crystal (clock), fasilitas USB connection, sebuah power jack (DC), sebuah ICSP header dan tombol reset. Arduino Uno R3 berisi segala hal yang dibutuhkan sebagai mikrokontroler, contoh menghubungkan board dengan computer dengan kabel USB atau mencatunya dengan AC ke DC adapter atau baterai untuk menghidupkannya. Berikut merupakan gambar fisik dari Arduino Uno R3.



Gambar 2.12 Arduino UNO R3

(Sumber: Arduino, 2009:1)



Gambar 2.13 Pemetaan pin atmega328 pada Arduino

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Uno

Chip mikrokontroler	ATmega328P
Tegangan operasi	5V
Tegangan input (yang direkomendasikan, via jack DC)	7V - 12V
Tegangan input (limit, via jack DC)	6V - 20V
Digital I/O pin	14 buah, 6 diantaranya menyediakan PWM
Analog Input pin	6 buah

Arus DC per pin I/O	20 mA
Arus DC pin 3.3V	50 mA
Memori Flash	32 KB, 0.5 KB telah digunakan untuk bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock speed	16 Mhz
Dimensi	68.6 mm x 53.4 mm
Berat	25 g

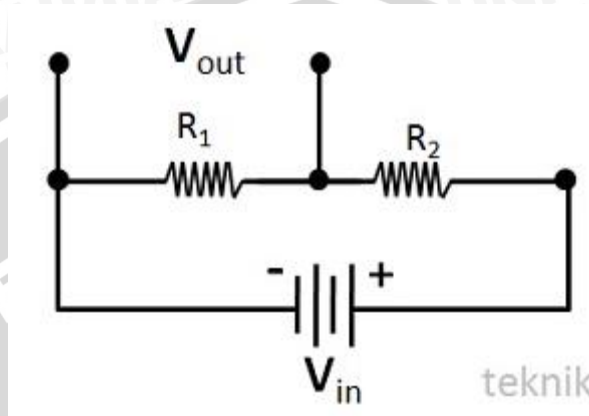
Sumber tegangan Arduino UNO dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan daya eksternal. Eksternal (non-USB) daya dapat berasal baik dari adaptor maupun baterai. Adaptor ini dapat dihubungkan dengan menancapkan plug jack pusat positif ukuran 2.1 mm konektor power. Ujung kepala dari baterai dapat dimasukkan kedalam Gnd dan Vin pin header dari konektor power. Arduino dapat beroperasi dengan catu daya eksternal 6 V sampai 20 V. Namun jika menggunakan lebih dari 12 V, regulator tegangan bisa panas dan merusak papan. Kisaran yang disarankan adalah 7 V sampai 12 V.

Arduino UNO R3 memiliki sejumlah fasilitas untuk berkomunikasi dengan komputer, Arduino lain, atau mikrokontroler lainnya. Arduino UNO R3 menyediakan 4 UART TTL (5V) untuk komunikasi serial. Sebuah Arduino UNO R3 sebagai saluran komunikasi serial melalui USB dan sebagai port virtual com untuk perangkat lunak pada komputer. Firmware '8 U2 menggunakan driver USB standar COM, dan tidak ada driver eksternal yang diperlukan. Namun pada Windows diperlukan sebuah file inf. Perangkat lunak Arduino terdapat monitor serial yang memungkinkan digunakan memonitor data tekstual sederhana yang akan dikirim ke atau dari papan Arduino. LED RX dan TX di papan tulis akan berkedip ketika data sedang dikirim melalui chip USB-to-serial dengan koneksi USB ke komputer (tetapi tidak untuk komunikasi serial pada pin 0 dan 1).

Sebuah *Software Serial Library* memungkinkan untuk berkomunikasi secara serial pada salah satu pin digital pada board Arduino UNO R3. Arduino UNO R3 juga mendukung I2C (TWI) dan komunikasi SPI. Perangkat lunak Arduino termasuk perpustakaan Kawat untuk menyederhanakan penggunaan bus I2C.

#### 2.4.4 Sensor Tegangan

Sensor tegangan atau *voltage divider* adalah suatu rangkaian sederhana yang mengubah tegangan besar menjadi tegangan yang lebih kecil. Rangkaian sensor tegangan memanfaatkan rangkaian pembagi tegangan. Fungsi rangkaian pembagi tegangan ini adalah untuk membagi tegangan input menjadi satu atau beberapa tegangan output yang diperlukan oleh komponen lainnya di dalam rangkaian.



Gambar 2.14 Rangkaian sederhana pembagi tegangan

Rumus pembagi tegangan :

$$V_{out} = V_{in} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2-21)$$

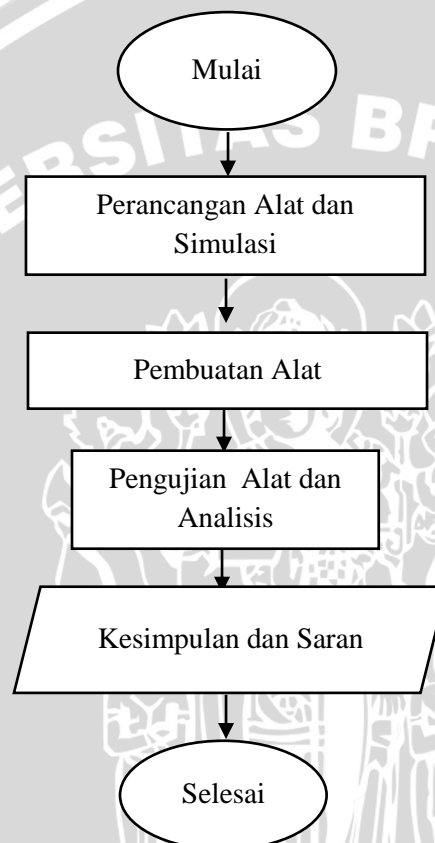


### BAB III

## METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang akan digunakan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini memiliki langkah - langkah sebagai berikut :

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.2 Studi Literatur

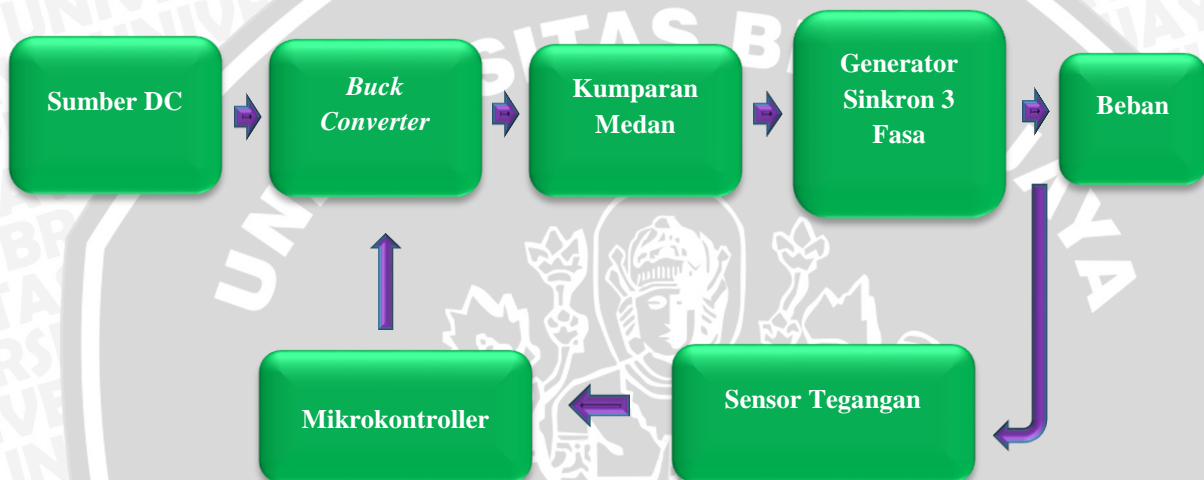
Penelitian ini dibuat dengan memanfaatkan beberapa literatur baik dari buku referensi maupun hasil penelitian sebelumnya. Studi literatur ini berkaitan dengan :

- Komponen *Automatic Voltage Regulator* (AVR)
- Karakteristik generator sinkron
- Penyearah tak terkontrol 3 fasa
- Buck Converter*
- Mikrokontroler Arduino Uno
- MOSFET

g. Simulasi Matlab Simulink

### 3.3 Blok Diagram Sistem

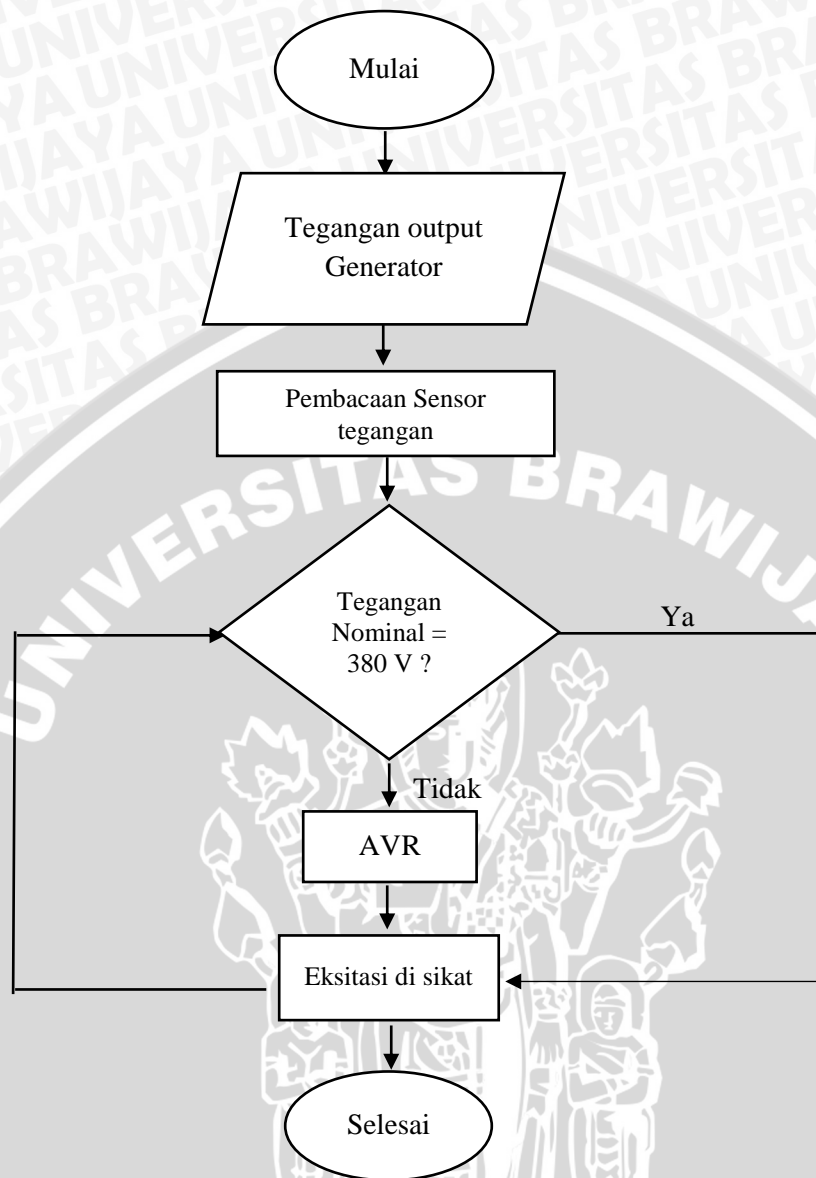
Pada pengerjaan tugas akhir ini dibagi menjadi 2 yaitu yang pertama adalah hardware dimana akan difokuskan pada pembuatan rangkaian AVR (*Automatic Voltage Regulator*) sebagai penstabil tegangan output generator. Dan yang kedua adalah software yang difokuskan pada pemrograman penyulutan mosfet melalui mikrokontroler dan pengaturan sinyal PWM. Berikut ini adalah perencanaan dari sistem pengerjaan



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem AVR



### 3.4 Diagram Alir Alat



Gambar 3.3 Diagram Alir Sistem Kerja AVR

### 3.5 Perancangan Alat dan Simulasi

Rancangan alat ini terdiri dari sebuah *exciter*, kontrol *exciter* dan penyearah AC to DC. Prinsip kerja dari AVR yaitu mula-mula tegangan keluaran dari generator sinkron 3 fasa akan di paralel menjadi dua terminal keluaran (*output*) dimana satu *output* akan digunakan untuk mensuplai beban elektrik dan *output* yang lain akan dimanfaatkan sebagai umpan balik untuk mikrokontroller. *Buck converter* dicatu oleh tegangan dc 200 V yang berasal dari regulator DC . Kemudian tegangan tersebut akan di turunkan level tegangannya menggunakan sebuah *buck converter* sebelum masuk ke mikrokontroller. Mikrokontroller

berfungsi sebagai pembangkit sinyal picu untuk konverter daya. Selanjutnya keluaran dari *buck onverter* akan digunakan sebagai sumber eksitasi dari generator itu sendiri.

Perancangan alat tersebut meliputi :

1. Perancangan Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

Rangkaian penyearah 3 fasa ini terdiri dari enam buah semikonduktor daya. Semikonduktor daya tersebut adalah dioda . Peneliti menggunakan penyearah gelombang penuh. Fungsi dari penyearah tak terkontrol 3 fasa ini adalah menyearahkan tegangan keluaran dari generator sinkron agar dapat masuk ke rangkaian mikronkontroller menggunakan rangkaian pembagi tegangan.

2. Perancangan *Buck Converter*

Rangkaian *buck converter* terdiri dari semikonduktor daya, kapasitor, dan induktor. Semikonduktor daya yang digunakan pada perancangan ini adalah MOSFET dan dioda schottky. Alasan pemilihan MOSFET adalah kemampuan komponen ini untuk bekerja dalam frekuensi *switching* yang tinggi dan daya yang besar, serta harga komponen ini yang terjangkau.

3. Perancangan Perangkat Lunak Untuk Mikrokontroler

Pada perancangan ini, dibutuhkan algoritma untuk memudahkan saat pembuatan perangkat lunak untuk mikrokontroler. Algoritma yang dibuat adalah algoritma pengontrolan *duty cycle*. Mikorokontroler digunakan untuk mengontrol *duty cycle* pada *buck converter*.

4. Sensor tegangan

Sensor tegangan ini berfungsi untuk membaca keluaran *buck converter* yang kemudian akan dikirimkan berupa data analog ke pembacaan ADC mikrokontroler.

Setelah melakukan perancangan alat, dibutuhkan simulasi guna memperkecil kemungkinan kegagalan. Software yang digunakan dalam perancangan Sistem Eksitasi Sendiri Generator Sinkron 3 Fasa Dengan Menggunakan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah Matlab Simulink untuk menganalisis rangkaian konverter daya.

### 3.6 Pembuatan Alat

Pembuatan alat dalam penelitian ini dibagi menjadi 4 tahapan, yaitu:

1. Pembuatan Penyearah

Pembuatan alat ini meliputi pembuatan rangkaian penyearah tidak terkontrol 3 fasa gelombang penuh.

## 2. Pembuatan *Buck Converter*

Rangkaian *buck converter* untuk mengatur nilai tegangan keluaran agar sesuai dengan sistem yang diinginkan.

## 3. Pembuatan perangkat lunak

Pembuatan perangkat lunak meliputi program yang telah dirancang sebelumnya untuk mengendalikan *duty cycle* dari konverter.

## 4. Pembuatan sensor tegangan

Pembuatan ini meliputi pembuatan sensor tegangan. Sensor tegangan berfungsi sebagai *feedback buck converter*.

### 3.7 Pengujian dan Analisis

Untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dan kesesuaian dengan perancangan maka dilakukan pengujian rangkaian. Pengujian dilakukan pada masing-masing blok secara keseluruhan. Pengujian yang dilakukan yaitu:

#### 1. Pengujian Pembangkit sinyal picu (PWM)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk sinyal picu dan nilai *duty cycle* maksimum dan minimum yang dapat dibangkitkan oleh mikrokontroler. Mikrokontroler diprogram untuk dapat menghasilkan gelombang kotak dengan frekuensi 40 kHz pada *duty cycle* (D) tertentu. Pada pengujian ini nilai *duty cycle* diatur menggunakan resistor variabel. Selanjutnya amati bentuk sinyal picu serta nilai *duty cycle* maksimum dan minimum pada osiloskop.

#### 2. Pengujian rangkaian penyearah 3 fasa tak terkontrol.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah penyearah 3 fasa tak terkontrol sudah bekerja sesuai dengan rancangan atau tidak. Prosedur pengujian ini adalah dengan membandingkan bentuk gelombang keluaran dari penyearah tak terkontrol 3 fasa dengan menggunakan osiloskop. Selain itu dilakukan pengukuran nilai tegangan keluaran dari rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa.

#### 3. Pengujian sensor tegangan.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui linearitas dari sensor tegangan. Hasil dari sensor ini berupa tegangan DC untuk dapat digunakan sebagai input ADC mikrokontroler. Prosedur dalam pengujian ini adalah dengan memberikan masukan tegangan pada sensor. Selanjutnya catat tegangan keluaran dari sensor pada setiap perubahan tegangan masukan

#### 4. Pengujian *buck converter*

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi dari *buck converter*. Prosedur dalam pengujian ini adalah dengan cara mengatur *duty cycle* (D) *buck converter* dan dilihat nilai tegangan dan arus keluarannya.

#### 5. Pengujian rangkaian *buck converter* dengan umpan balik.

Pengujian ini bertujuan untuk melihat nilai tegangan keluaran dengan variasi tegangan masukan. Parameter yang diamati pada pengujian ini adalah tegangan, arus, daya, efisiensi masukan dan keluaran serta nilai *duty cycle*.

#### 6. Pengujian *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari sistem AVR pada kondisi nyata. Pada pengujian ini dilakukan pengujian sistem secara *close loop*, dimana pada percobaan ini tegangan output diharapkan dapat tetap konstan pada saat beban berubah, perubahan tegangan tersebut harus berubah secara otomatis sesuai dengan program yang ada pada alat tersebut. Pengujian sistem ini akan dilakukan dalam 3 keadaan, yaitu ketika beban nol atau tanpa beban, beban 50% dan beban penuh 100%. Ketika AVR tersebut dapat merespon secara cepat pada saat variasi pembebanan, maka sistem tersebut berhasil.

Setelah melakukan pengujian, maka dilanjutkan ke tahapan analisis data hasil pengujian tersebut yang selanjutnya akan dijadikan acuan dalam pengambilan kesimpulan.

### 3.8 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

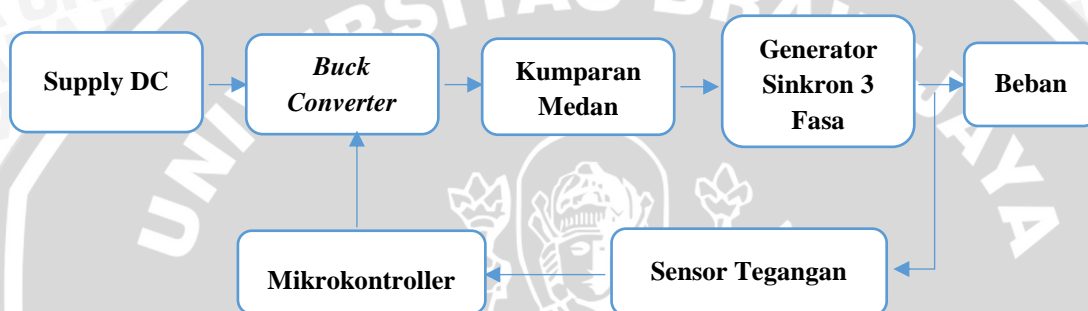
Kesimpulan diambil berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian. Jika hasil yang didapatkan telah sesuai dengan yang direncanakan sebelumnya, penelitian ini telah berhasil memenuhi harapan dan tentunya memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk penyempurnaan. Saran diberikan untuk memberikan masukan kepada pembaca yang akan meneliti lebih lanjut mengenai topik penelitian ini. Saran diberikan berdasarkan kesulitan-kesulitan yang dialami selama penelitian dan hal-hal lain yang perlu dikaji lebih mendalam.

## BAB IV

### PERANCANGAN DAN SIMULASI ALAT

#### 4.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem eksitasi sendiri menggunakan AVR adalah suatu alat yang berfungsi memberikan arus eksitasi ke kumparan medan. Alat ini dikemas dalam suatu modul sehingga bias disebut sistem AVR. Blok diagram sistem AVR yang akan dibangun pada penelitian ini seperti pada gambar berikut :



Gambar 4.1 Diagram balok rancangan sistem AVR

Sumber : Penulis

Pada blok diagram diatas terlihat bahwa sistem AVR beroperasi secara *close loop* dimana tegangan keluaran generator sinkron 3 fasa akan di umpan balik melalui sensor tegangan. Prinsip kerja dari AVR ini yaitu mula-mula tegangan keluaran dari generator sinkron 3 fasa akan di paralel menjadi dua terminal keluaran (*output*) dimana satu *output* akan digunakan untuk mensuplai beban elektrik dan *output* yang lain akan dimanfaatkan sebagai penguatan medan generator sinkron itu sendiri. Sumber eksitasi berasal dari regulator DC yang ditetapkan dengan nilai 200 volt karena generator sinkron 3 fasa ini membutuhkan tegangan eksitasi sebesar 60-180 volt. Kemudian regulator tersebut akan di turunkan level tegangannya menggunakan sebuah *buck converter* sebelum masuk ke mikrokontroler. Mikrokontroler berfungsi sebagai pembangkit sinyal picu untuk konverter daya. Selanjutnya keluaran dari *buck onverter* akan digunakan sebagai sumber eksitasi dari generator itu sendiri. Rancangan alat ini hanya meliputi penyearah tak terkontrol 3 fasa, *buck converter*, perangkat lunak untuk mikrokontroler dan sensor tegangan.

## 4.2 Penentuan Jenis Komponen Yang Digunakan Pada Setiap Balok Sesuai Yang Ada Di Pasaran

Kontroler yang digunakan pada penelitian ini adalah Arduino Uno karena kontroler tersebut mampu mengeluarkan sinyal PWM dengan frekuensi 16 MHz dan mudah didapatkan dipasaran. Untuk mengontrol nilai frekuensi, *duty cycle*,  $t_{on}$ , dan  $t_{off}$  dibutuhkan 1 buah potensiometer. Sebelum sinyal picu dari kontroler dimasukan pada *gate*-katoda SCR dan *drain-source* MOSFET, dibutuhkan *driver* yaitu IC *driver* IR2110 karena IC *driver* tipe itulah yang paling mudah didapatkan dipasaran.

Kontroler Arduino Uno membutuhkan catu daya sebesar 5 V yang didapatkan dari keluaran IC *Regulator* LM7805 dengan sumber DC 12 V. IC *driver* IR2110 membutuhkan catu daya sebesar 12 V dan 5 V, dua macam tegangan tersebut diambilkan masing-masing dari tegangan keluaran IC LM7812 dan tegangan keluaran IC *Regulator* LM7805.

## 4.3 Perancangan Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

### 4.3.1 Perancangan *Buck Converter*

Rangkaian *buck converter* terdiri dari MOSFET dan dioda *fast switching*. Alasan pemilihan MOSFET adalah kemampuan komponen ini untuk bekerja dalam frekuensi *switching* dan daya yang besar, serta harga komponen ini yang terjangkau. Fungsi MOSFET adalah untuk saklar elektronik. Penentuan parameter *buck converter* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Penentuan parameter perancangan *buck converter*

No.	Penentuan Parameter	Nilai	Keterangan
1.	$V_s$ (Tegangan masukan)	200 Volt	Tegangan dari sumber DC regulator
2.	$V_o$ (Tegangan keluaran)	60 – 180 Volt	Tegangan eksitasi generator sinkron tanpa beban 85 volt
3.	D ( <i>Duty cycle</i> )	10 – 90%	Nilai maksimal <i>duty cycle</i> didapat dari perhitungan
4.	$f_{switching}$	50 kHz	
5.	<i>Ripple</i> Tegangan ( $\Delta V_o$ )	0.02 Volt	
6.	Induktor		Nilai induktansi biasanya 25% lebih besar dari nilai induktansi minimal (Hart, 2011)
7.	Kapasitor	0.225 $\mu F$	Di pasaran 1 $\mu F$

Sebelum mencari nilai-nilai komponen *buck converter* ini, perlu dicari nilai resistansi pengganti dari beban ini. Nilai resistansi medan pengganti dapat dicari dengan cara

mengukur resistansi medan generator secara *line to line* menggunakan multimeter, karena tegangan dan arus dimasukkan melalui kumparan medan generator sinkron 3 fasa sebagai sumber eksitasi. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, nilai resistansi pengganti medan didapat sebesar 813 Ohm.

Dari Tabel 4.1 dapat dicari nilai dari induktor dan kapasitor *buck converter* ini. Pertama, nilai induktor dicari dengan mencari nilai  $L_{min}$  (induktansi minimal) terlebih dahulu. Nilai induktansi minimal dan induktansi *buck converter* pada *duty cycle* 10 % dapat dicari dengan:

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0,1)813}{2 \times 50000} = 7.317 \text{ mH} \quad (4-1)$$

$$L = 125\% \times L_{min} = 1,25 \times 9.144 = 9.146 \text{ mH} \quad (4-2)$$

Sedangkan, induktansi minimal dan induktansi *buck converter* pada *duty cycle* 90% dapat dicari dengan:

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-0,9)813}{2 \times 50000} = 0.813 \text{ mH} \quad (4-3)$$

$$L = 125\% \times L_{min} = 1,25 \times 0.813 = 1.016 \text{ mH} \quad (4-4)$$

Sehingga, pada perancangan *buck converter* ini nilai L dipilih mendekati 9.146 mH, yaitu 10 mH. Karena induktor yang berada di pasaran sekitar nilai induktansi tersebut adalah 10 mH. Untuk menentukan rating induktor, terlebih dahulu dicari nilai  $I_L$  (arus yang melewati induktor). Nilai  $I_L$  pada *duty cycle* 10% adalah :

$$I_L = \frac{V_s \times D}{R} = \frac{200 \times 0,1}{813} = 0,024 \text{ A} \quad (4-5)$$

Sedangkan, nilai  $I_L$  pada *duty cycle* 90% adalah:

$$I_L = \frac{V_s \times D}{R} = \frac{200 \times 0,9}{813} = 0,22 \text{ A} \quad (4-6)$$

Sehingga, pada perancangan ini dipilih nilai induktor dengan rating arus lebih dari 0,22 A.

Langkah kedua adalah menentukan nilai kapasitor. Nilai kapasitor pada *duty cycle* 10% adalah:

$$C = \frac{1-D}{8L \left( \frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} = \frac{1-0,1}{8 \times 10 \times 10^{-3} \times 0,02 \times 50000^2} = 0.225 \text{ } \mu\text{F} \quad (4-7)$$

Sedangkan, nilai kapasitor pada *duty cycle* 90 % adalah

$$C = \frac{1-D}{8L\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)f^2} = \frac{1-0.9}{8 \times 10 \times 10^{-3} \times 0,02 \times 50000^2} = 0.025 \mu F \quad (4-8)$$

Jadi nilai kapasitor dipilih lebih besar dari 0,225  $\mu F$ , yaitu sebesar 1  $\mu F$ .

Saat nilai tegangan sumber berubah maka induktor dan kapasitor yang dibutuhkan juga berubah. Dengan cara yang sama didapatkan nilai induktor dan kapasitor pada tegangan sumber yang berbeda-beda untuk mencapai nilai tegangan keluaran yang sama, yaitu 85 V.

Tabel 4.2 Hasil simulasi *buck converter* dengan beban 813  $\Omega$  dan frekuensi 50 kHz pada beberapa variasi nilai *dutycycle*

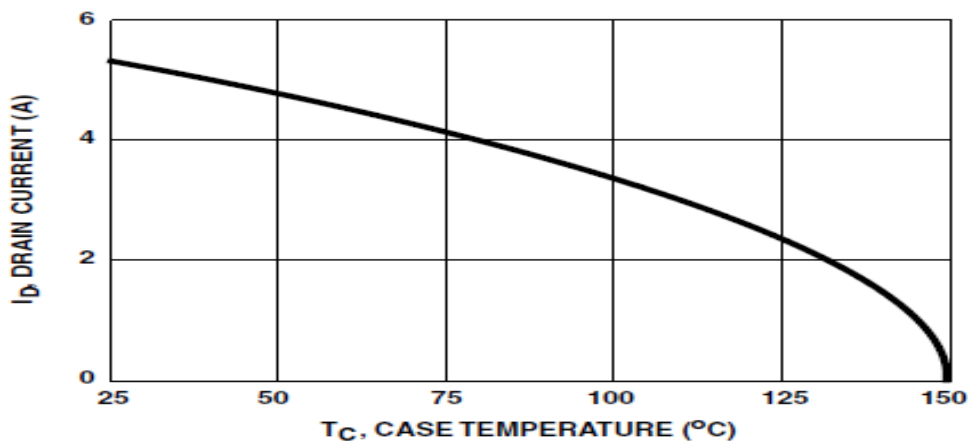
Vs (V)	D(%)	Ii (A)	Vo (V)	Io (A)	L (mH)	C (uF)
200	10	0.126	21.96	0.043	9.146	0,225
200	15	0.155	32.51	0.065	9.146	0,225
200	20	0.179	42.91	0.085	9.146	0,225
200	25	0.200	53.16	0.106	9.146	0,225
200	30	0.22	63.28	0.126	9.146	0,225
200	35	0.237	73.28	0.146	9.146	0,225
200	40	0.253	83.18	0.166	9.146	0,225
200	45	0.269	93	0.186	9.146	0,225
200	50	0.283	102.7	0.205	9.146	0,225
200	55	0.297	112.4	0.224	9.146	0,225
200	60	0.310	122.1	0.244	9.146	0,225
200	65	0.323	131.7	0.263	9.146	0,225
200	70	0.335	141.4	0.282	9.146	0,225
200	75	0.346	151	0.302	9.146	0,225
200	80	0.358	160.7	0.321	9.146	0,225
200	85	0.369	170.4	0.340	9.146	0,225
200	90	0.379	180.2	0.360	9.146	0,225

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa nilai induktor dan kapasitor terbesar yang dibutuhkan adalah 9.146 mH dan 0.225  $\mu F$ . Setelah nilai tersebut dicocokkan dipasaran, maka nilai inductor yang digunakan adalah 10 mH (pembulatan keatas) dan nilai kapasitor adalah 1  $\mu F$ .

Telah dibahas sebelumnya, saklar yang digunakan pada penelitian ini adalah MOSFET kanal N. Yang perlu diperhatikan dalam pemilihan MOSFET adalah  $I_D$  dan  $V_{DSS}$ , pada konverter ini, tegangan yang perlu diblokir oleh MOSFET paling tidak sama dengan tegangan keluaran dan arus maksimal pada MOSFET sama dengan arus maksimal pada



induktor. Sehingga  $V_{DSS} > 400$  V dan  $I_D > 5.5$  A, namun yang perlu diperhatikan lagi adalah MOSFET mempunyai karakteristik arus drain terhadap temperatur seperti pada gambar dibawah ini.



**FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE**

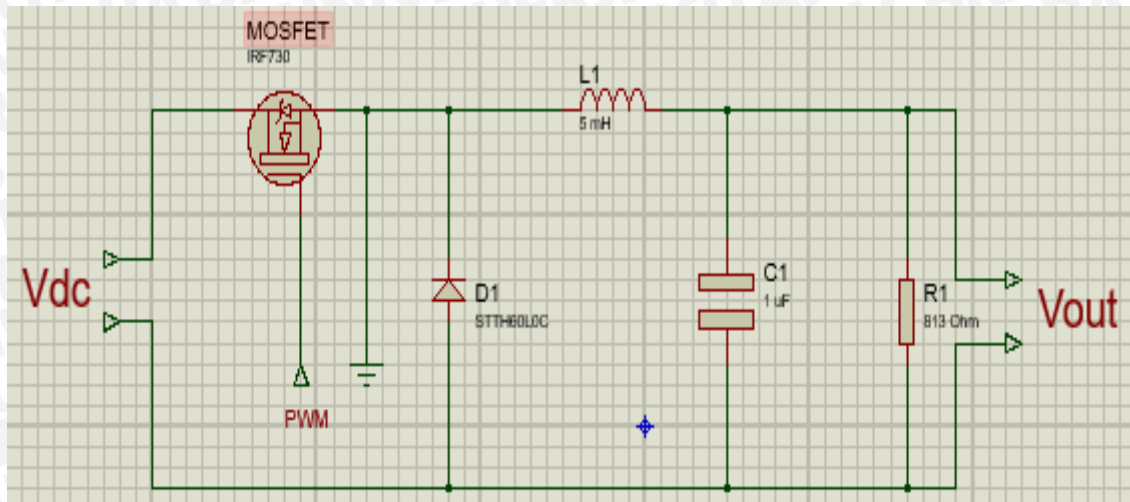
Gambar 4.2 Karakteristik suhu terhadap arus drain MOSFET IRF730

Dapat dilihat pada grafik diatas bahwa semakin panas suhu MOSFET, maka kemampuan MOSFET tersebut untuk menghantarkan arus semakin turun. Saat MOSFET bekerja, suhu MOSFET lama-kelamaan akan naik, akibatnya kemampuan menghantar arus MOSFET akan turun dengan sendirinya jika MOSFET tidak dilengkapi sistem pendinginan. Maka dari itu,  $I_D$  MOSFET yang dipilih lebih baik jauh lebih tinggi dari arus pada perhitungan. Dalam penelitian ini, MOSFET yang digunakan adalah IRF730 dengan  $V_{DSS} = 400$  V dan  $I_D = 5.5$  A.

Pada perancangan ini MOSFET yang digunakan adalah MOSFET kanal n. MOSFET kanal n memerlukan tegangan *gate-source* ( $V_{GS}$ ) positif untuk menyalakannya, tegangan *gate-source* nol untuk memadamkannya. Sehingga, *port* pulsa dari rangkaian picu dihubungkan ke *gate* MOSFET, sedangkan *ground* rangkaian picu dihubungkan ke *source* MOSFET. MOSFET yang dipilih pada perancangan ini adalah MOSFET yang memiliki nilai *rating* tegangan sebesar 150% dari  $V_s$  (tegangan masukan), yaitu lebih dari 150 V. Sedangkan, nilai *rating* arusnya lebih dari 300% ( $150\% \times 200\%$ ) dari arus masukan, yaitu 0.11 A. Menurut *rating-rating* tersebut maka MOSFET yang dipilih adalah IRF730.

Dioda sebagai *free wheeling* adalah *fast switching diode*. Dioda *fast switching* mempunyai *reverse recovery time* yang kecil sehingga dapat digunakan pada frekuensi

pensaklaran yang tinggi. Diagram skematik rangkaian *buck converter* ini dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Skematik diagram *buck converter* yang telah dirancang

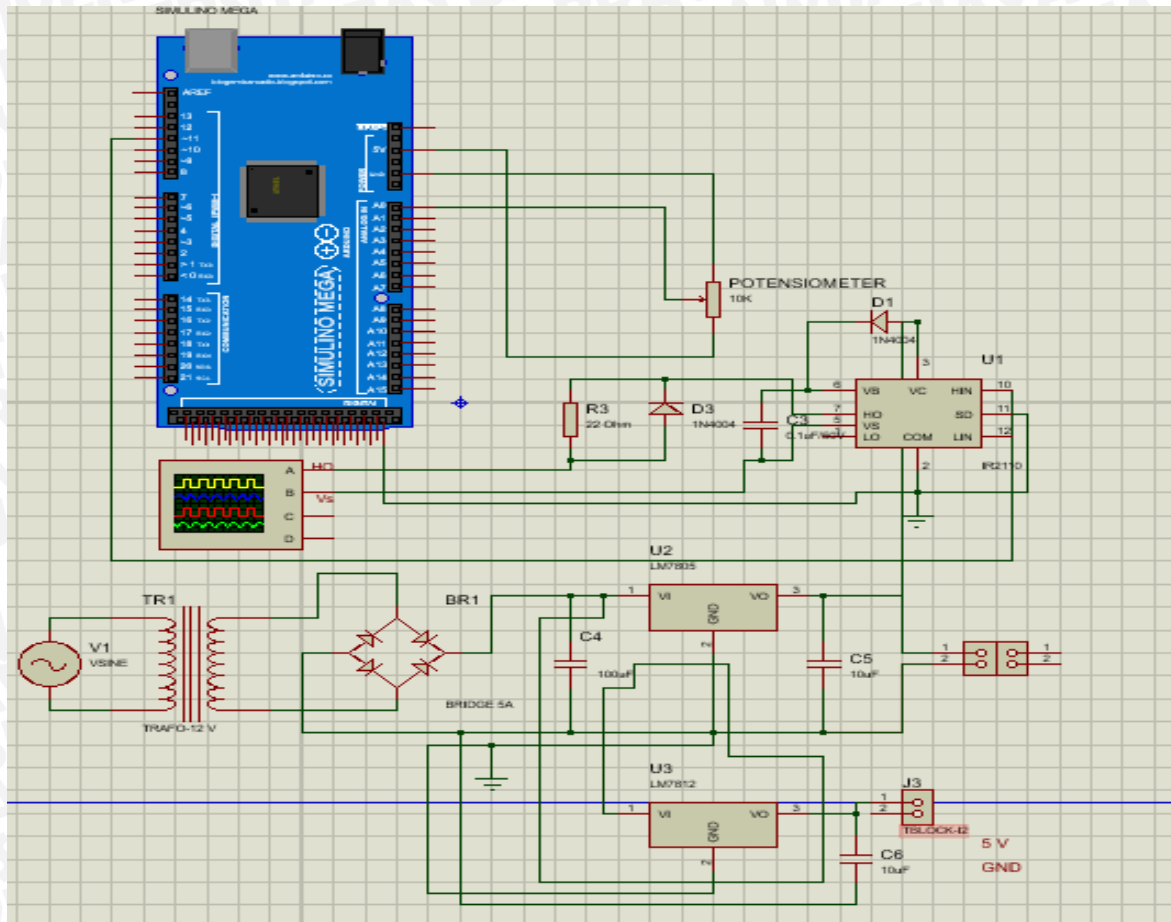
Tabel 4.3 Komponen *buck converter*

No.	Nama komponen	Jumlah	Keterangan
1.	Induktor daya 10 mH	1	
2.	Kapasitor elektrolit 1 uF 250V	1	
3.	MOSFET IRF730	1	
4.	Dioda STTH60L0C	1	

#### 4.3.2 Perancangan Kontroler Sistem Keseluruhan

##### 4.3.2.1 Perancangan Skematik Kontroler

Dari pembahasan sebelumnya, komponen kontroler pada sistem AVR meliputi Arduino Uno, IC Regulator LM7805, IC Regulator LM7805, potensiometer, dan saklar. Semua komponen tersebut akan dihubungkan seperti pada skematik dibawah ini.



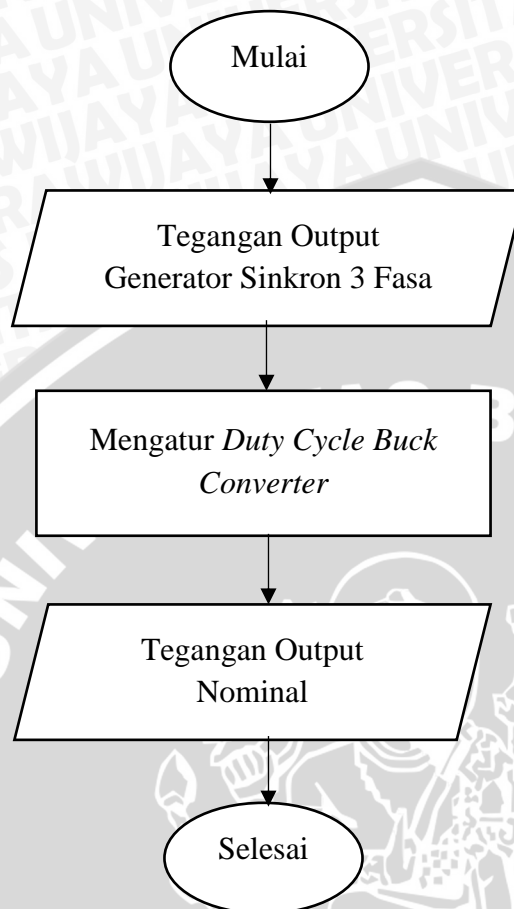
Gambar 4.4 Skematik kontroler sistem AVR

#### 4.3.2.2 Perancangan perangkat lunak kontroler

Pada perancangan ini, dibutuhkan algoritma untuk memudahkan saat pembuatan perangkat lunak untuk mikrokontroler. Mikrokontroler digunakan untuk mengatur *duty cycle* secara otomatis tanpa potensiometer manual. Untuk menampilkan tegangan keluaran generator sinkron 3 fasa melalui mikrokontroler Arduino, dibutuhkan sensor tegangan untuk mendeteksi tegangan dan selanjutnya akan di umpan balik untuk dijadikan input Arduino. Sensor tegangan juga berguna untuk mengkonversi tegangan menjadi lebih kecil, dimana range tegangan masukan pada arduino hanya 0-5V DC sedangkan tegangan output generator sekitar 380 AC yang disearahkan oleh penyearah 3 fasa mempunyai tegangan keluaran yaitu 513 V DC.

Kontroler pada penelitian ini bertugas untuk mengolah data yang selanjutnya akan menampilkan kecepatan secara *realtime* melalui LCD. Kontroler membutuhkan suatu perangkat lunak yang akan memberi perintah pada kontroler untuk melakukan tugas yang telah direncanakan. Pada tahap ini akan dibuat diagram alir perangkat lunak dan listing

program yang akan diberikan ke mikrokontroler untuk mengendalikan sistem secara keseluruhan. Pada gambar 4.5 menunjukkan flowchart pemrograman pada Arduino.



Gambar 4.5 Diagram Alir Program Arduino

Komponen utama rangkaian picu adalah mikrokontroler. Mikrokontroler digunakan untuk mengontrol *duty cycle* pada *buck converter*. Dalam perancangan ini pengendalian yang digunakan adalah *open loop* dan *closed loop*. Pengendalian *open loop* digunakan pada saat *startup*, sedangkan pengendalian *closed loop* digunakan pada saat mode operasi.

*Duty cycle* dikendalikan oleh potensiometer melalui metode pembagian tegangan. Semakin besar nilai resistansi pada potensiometer, maka akan semakin kecil level tegangan yang dibaca mikrokontroler. Pembacaan tegangan pada mikrokontroler menggunakan ADC. Setelah level tegangan dibaca, maka data akan diolah menjadi *duty cycle* yang nantinya akan mengendalikan *trigger* (picu) dari *buck converter*.

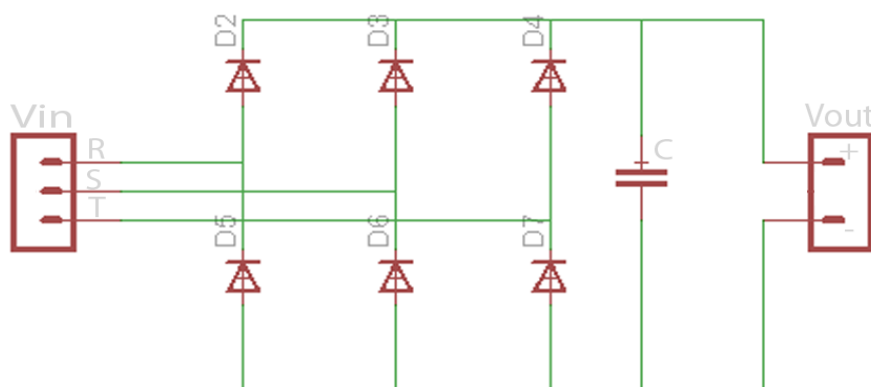
*Duty cycle* juga dikendalikan oleh sensor tegangan yang akan dibaca oleh ADC mikrokontroler ini. Bila pembacaan nilai sensor tegangan lebih rendah dari *set point*, maka

*duty cycle* akan bertambah. Bila pembacaan nilai sensor tegangan lebih besar dari *set point*, maka *duty cycle* akan berkurang.

Pada perancangan ini dirancang bahwa mikrokontroler dapat menghasilkan sinyal picu dengan nilai *duty cycle* berubah-ubah agar tegangan keluaran *buck converter* konstan. Mikrokontroler yang digunakan pada perancangan ini adalah mikrokontroler ARDUINO UNO R3.

#### 4.3.3 Perancangan Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

Perancangan penyearah tak terkontrol 3 fasa diperlukan untuk mengubah arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh generator sinkron 3 fasa menjadi arus searah (DC). Penyearah tak terkontrol 3 fasa terdiri dari dioda daya yang disusun seperti dalam gambar 4.6. Tegangan maksimal yang akan melewati rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa adalah 520 V DC sesuai dengan *rating* dari generator sinkron 3 fasa. Akan tetapi *rating* dioda yang digunakan harus diatas *rating* tegangan generator agar jika tegangan yang mengalir melebihi 520 V, rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa tidak rusak. Dioda yang ada dipasaran yang memiliki *rating* tegangan lebih dari 520 V adalah tipe 1N4007 . Maka dipilih dioda tipe 1N4007 yang memiliki *rating* tegangan sebesar 1000 volt. Untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran dari rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa maka digunakan filter kapasitor, semakin besar nilai filter kapasitor maka *ripple* tegangan keluaran akan berkurang (Hart, 2010:88). Pada perancangan ini ditentukan kapasitansi dari kapasitor sebesar 100  $\mu F$ .



Gambar 4.6 Skematik rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa

#### 4.3.4 Perancangan Sensor Tegangan

Pada perancangan ini, sensor tegangan dibuat dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan. Pembagi tegangan yang digunakan adalah trimpot sebesar  $1\text{M}\Omega$ . Pemilihan trimpot sebesar  $1\text{M}\Omega$  yang di seri sebanyak 9 didasari oleh meminimalisasi arus yang melewati sensor ini. Keluaran sensor akan dipasangkan ke ADC1 dan *ground* rangkaian picu. Fungsi resistor ini adalah untuk menurunkan tegangan dari tegangan keluaran generator dengan nilai maksimal 513 V menjadi tegangan yang dikehendaki yaitu maksimal 5 volt untuk dimasukkan pada mikrokontroler. Sensor tegangan diatur 4 V pada tegangan 380 V untuk perancangan ini. Maka dengan menggunakan persamaan pembagi tegangan didapatkan :

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad (4-9)$$

$$4 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 513$$

Ditentukan  $R_1 = 9\text{M}\Omega$

$$4 = \frac{R_2}{9\text{M} + R_2} \times 513$$

$$36\text{M} + 4R_2 = 513R_2$$

$$509R_2 = 36 \times 10^6$$

$$R_2 = 70.727\ \Omega = 70\text{ k}\Omega$$

Penentuan nilai  $R_2$  disesuaikan dengan nilai resistor yang tersedia di pasaran, maka dipilih nilai  $R_1 = 1\text{k}\Omega$  yang diseri sebanyak 7 kali.

Resistor yang digunakan harus kuat terhadap panas efek dari arus yang mengalir, maka dari itu perlu dihitung arus yang mengalir pada resistor:

$$i = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (4-10)$$

$$i = \frac{513}{9070000}$$

$$i = 0,000056\text{ A}$$

Perhitungan panas pada resistor  $R_1$ :

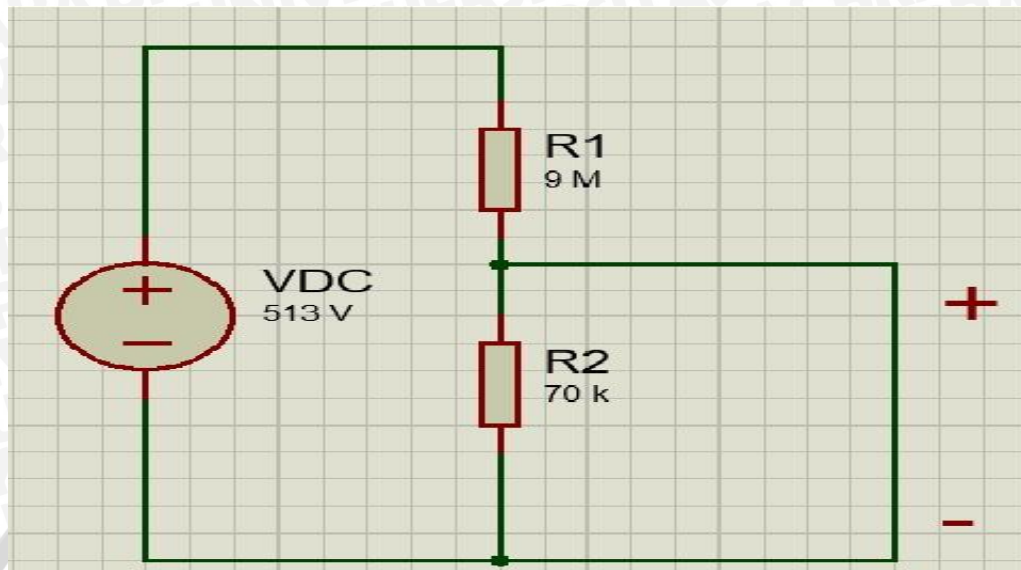
$$P = i^2 \times R \quad (4-11)$$

$$P = 0,000056^2 \times 9070000$$

$$P = 0,029\text{ watt}$$

Nilai daya pada resistor  $R_1$  dan  $R_2$  harus lebih besar dari 0,029 watt supaya resistor tidak terbakar. Maka dari itu pada penentuan resistor ini dipilih resistor  $R_1$  dan  $R_2$  dengan

daya masing-masing 0.25 watt. Diagram skematik sensor tegangan ini dapat dilihat pada Gambar 4.6.



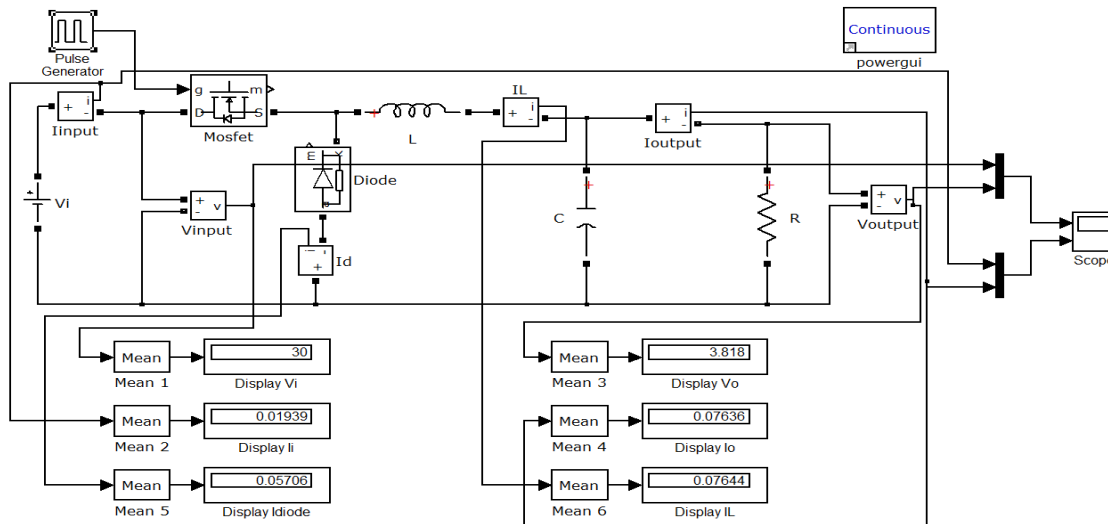
Gambar 4.7 Diagram skematik perancangan sensor tegangan

#### 4.4 Simulasi Menggunakan MATLAB Simulink

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* Matlab Simulink. Simulasi yang dilakukan adalah simulasi penyearah tak terkontrol satu fasa dan simulasi *buck-converter*. Dengan melakukan simulasi, diharapkan dapat memperkecil tingkat kegagalan sebelum membuat konverter yang sebenarnya. Hasil dari simulasi ini adalah nilai arus dan tegangan pada setiap komponen yang akan dibandingkan dengan nilai yang didapatkan dari perhitungan teori guna mendapatkan komponen yang sesuai dengan perhitungan dan ada dipasaran.

##### 4.4.1 Simulasi *buck converter* menggunakan saklar elektronik MOSFET dengan metode PWM

Simulasi *buck converter* menggunakan MOSFET metode PWM ini dilakukan dengan cara memberi tegangan sumber DC konstan 200 V dan resistansi beban konstan 813  $\Omega$  pada berbagai macam variasi *dutycycle* dari 0,10 s/d 0,9 (frekuensi = 50 kHz).



Gambar 4.8 Rangkaian simulasi *buck converter* MOSFET

#### 4.4.1.1 Penentuan Komponen Simulasi

Penentuan jenis dan nilai komponen simulasi ini ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Penentuan komponen simulasi *buck converter*

No.	Komponen	Jenis	Nilai	Keterangan
1.	Vs	DC	$V_{DCmax} = 200 \text{ V}$	Regulator DC
2.	PWM	Pulsa kotak	$V_{on} = 5\text{V}$ $T_{period} = 20 \mu\text{s}$	$f = 50 \text{ kHz}$
3.	MOSFET	IRF730		Mempunyai tegangan masukan 400 V
4.	D	MUR460		Paling mendekati STTH60L06
5.	L	-	10 mH	
6.	C	-	1 $\mu\text{F}/250 \text{ V}$	

#### 4.4.1.2 Prosedur Simulasi

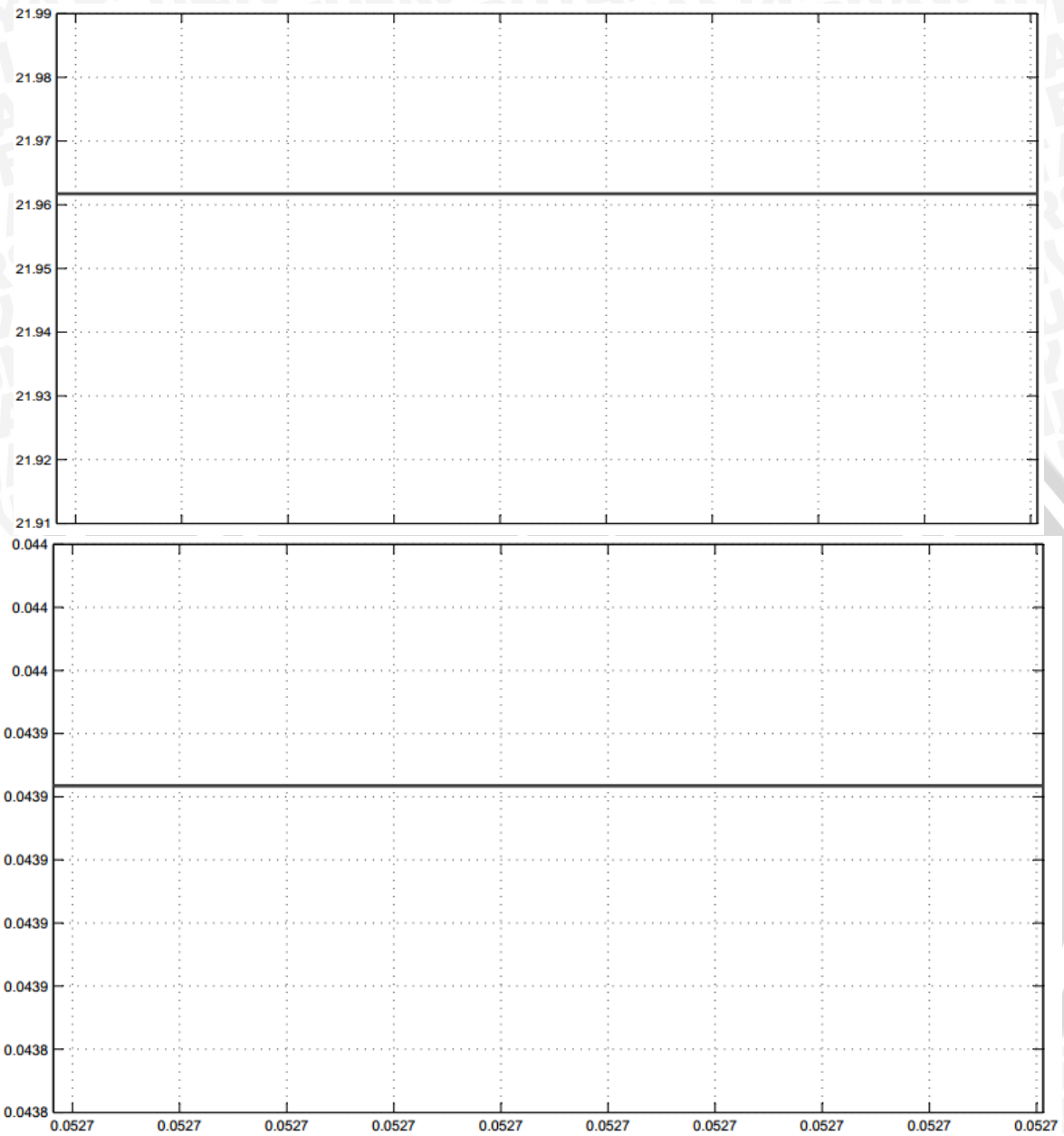
Prosedur simulasi *buck converter* adalah sebagai berikut:

1. Atur *duty cycle* menjadi 10%.
2. Ukur tegangan masukan ( $V_s$ ), arus masukan ( $I_s$ ), tegangan keluaran ( $V_o$ ), dan arus keluaran ( $I_o$ ) dalam besaran *average* dan rms.
3. Catat hasil pengukuran.
4. Ulangi langkah 2 sampai 4 dengan kenaikan 5% *duty cycle* sampai dengan *duty cycle* 90%.
5. Simpan tampilan tegangan dan arus keluaran *buck converter* pada *duty cycle* 10%.



#### 4.4.1.3 Hasil Simulasi *Buck Converter*

Hasil simulasi *buck converter* adalah sebagai berikut:



Gambar 4.9 Gelombang tegangan dan arus buck converter ( $V_s = 200 \text{ V}$ ;  $D = 10 \%$ )

Tabel 4.5 Hasil simulasi *buck converter*

Vs (V)	D (%)	Ii (A)	IL (A)	Ic (A)	Vo (V)	Io (A)
200	10	0.126	0.045	0.010	21.96	0.043
200	15	0.155	0.066	0.014	32.51	0.065
200	20	0.179	0.087	0.018	42.91	0.085
200	25	0.200	0.108	0.021	53.16	0.106
200	30	0.22	0.128	0.024	63.28	0.126
200	35	0.237	0.148	0.026	73.28	0.146
200	40	0.253	0.168	0.027	83.18	0.166
200	45	0.269	0.188	0.028	93	0.186
200	50	0.283	0.207	0.028	102.7	0.205
200	55	0.297	0.226	0.028	112.4	0.224
200	60	0.310	0.245	0.027	122.1	0.244
200	65	0.323	0.264	0.025	131.7	0.263
200	70	0.335	0.283	0.023	141.4	0.282
200	75	0.346	0.302	0.021	151	0.302
200	80	0.358	0.321	0.018	160.7	0.321
200	85	0.369	0.341	0.014	170.4	0.340
200	90	0.379	0.360	0.010	180.2	0.360

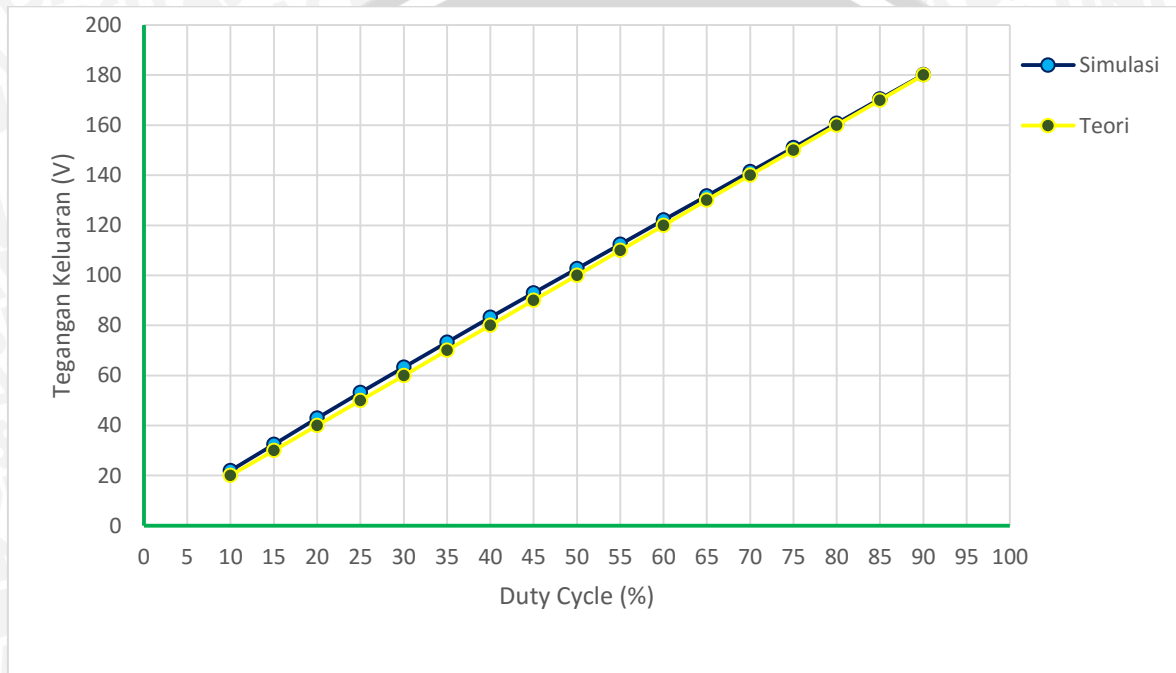
Tabel 4.6 Perbandingan tegangan keluaran *buck-converter* antara teori dan simulasi dengan

Vin= 200 V

Vin (V)	Duty Cycle (%)	Vout (V)		Kesalahan (%)
		Simulasi	Perhitungan	
200	10	21.96	20	8.92
200	15	32.51	30	7.72
200	20	42.91	40	6.78
200	25	53.16	50	5.94
200	30	63.28	60	5.18
200	35	73.28	70	4.47
200	40	83.18	80	3.82
200	45	93	90	3.22
200	50	102.7	100	2.62
200	55	112.4	110	2.13
200	60	122.1	120	1.71
200	65	131.7	130	1.29
200	70	141.4	140	0.99
200	75	151	150	0.66
200	80	160.7	160	0.43
200	85	170.4	170	0.23
200	90	180.2	180	0.11
Kesalahan rata-rata				3.311103

#### 4.4.1.4 Analisis Hasil Simulasi Buck Converter

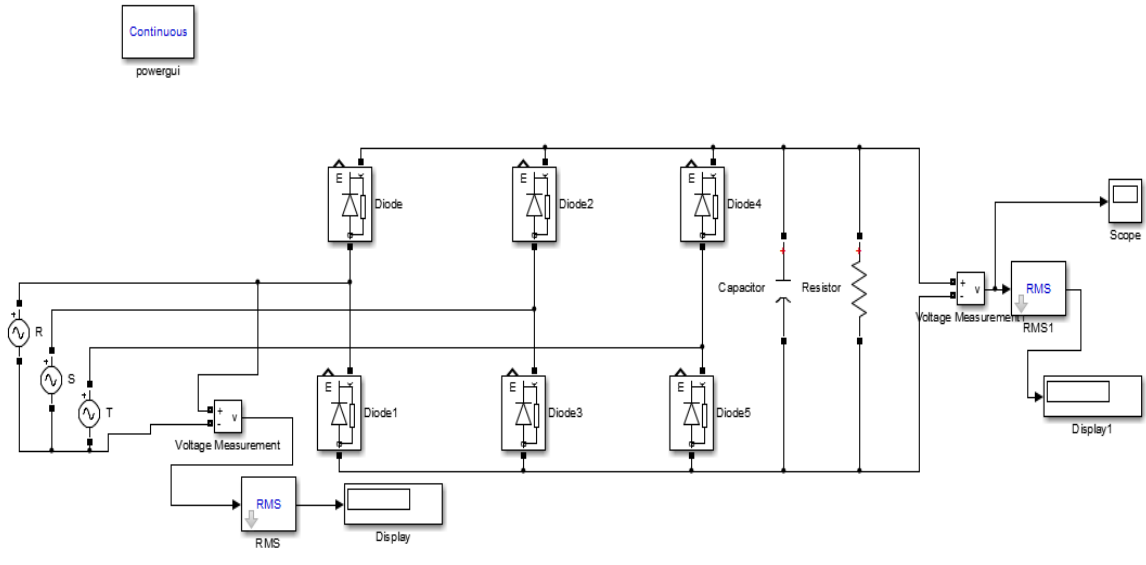
Dari hasil pengujian di atas terlihat bahwa semakin besar nilai *dutycycle* pada *buck converter*, maka semakin besar pula (linier) nilai tegangan keluaran (tetapi selalu dibawah nilai tegangan masukan) jika nilai tegangan masukan tetap. Perbedaan antara nilai teori dan simulasi di atas, diakibatkan saat perhitungan teori semua perhitungan dilakukan pada kondisi ideal, sedangkan pada realitanya pasti ada rugi-rugi pada induktor, mosfet, dan dioda. hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.10 Karakteristik *dutycycle* terhadap tegangan keluaran *buck converter* secara teori dan simulasi

#### 4.4.2 Simulasi Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan keluaran dan bentuk gelombang dari rangkaian penyearah tak terkontrol 3 fasa yang telah dirancang sebelumnya. Pada simulasi ini penyearah tak terkontrol 3 fasa diberi beban resistor 10 ohm. Gambar rangkaian pada simulasi ditunjukkan dalam gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Rangkaian simulasi penyearah tak terkontrol 3 fasa

#### 4.4.2.1 Komponen Simulasi

Tabel 4.7 Komponen simulasi *buck converter*

No.	Komponen	Jenis	Nilai	Keterangan
1.	Vs	AC	$V_{AC} = 380 \text{ V}$	Sumber AC 3 Fasa
2.	R		10 Ohm	
3.	Dioda	1N4007	$V_{max} = 1000 \text{ V}$	
4.	C	Elco	100 $\mu\text{F}$	

#### 4.4.2.2 Prosedur Simulasi

Prosedur simulasi penyearah 3 fasa adalah sebagai berikut:

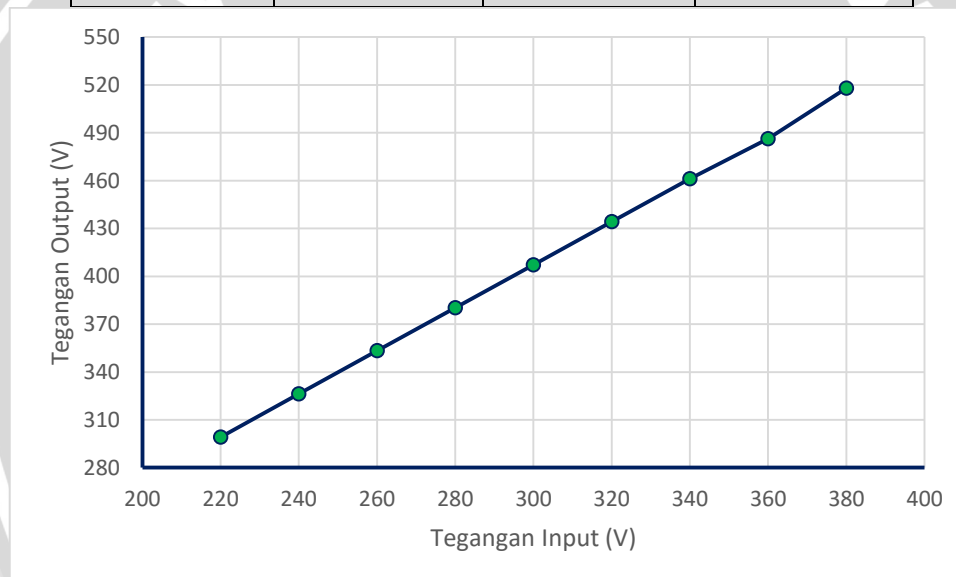
1. Atur tegangan sumber 220 V
2. Ukur tegangan masukan ( $V_s$ ), arus masukan ( $I_s$ ), tegangan keluaran ( $V_o$ ), dan arus keluaran ( $I_o$ ) dalam besaran rms.
3. Catat hasil pengukuran.
4. Ulangi langkah 2 sampai 4 dengan kenaikan 20 volt sampai dengan tegangan masukan sebesar 380 V.
5. Simpan tampilan tegangan dan arus keluaran penyearah 3 fasa pada tegangan 380 V.

#### 4.4.2.3 Hasil Simulasi Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

Hasil simulasi ditunjukkan dalam tabel 4.8 dan gambar 4.12.

Tabel 4.8 Hasil simulasi penyearah tak terkontrol 3 fasa

Vin rms (V)	Iin rms (A)	Vout rms (V)	Iout rms (A)
220	0.016	299.1	0.018
240	0.019	326.2	0.023
260	0.022	353.3	0.026
280	0.025	380.2	0.31
300	0.028	407.17	0.036
320	0.031	434.18	0.039
340	0.034	461.2	0.042
360	0.037	486.2	0.048
380	0.04	518	0.053



Gambar 4.12 Hasil simulasi penyearah tak terkontrol 3 fasa

#### 4.4.2.4 Analisis Hasil Simulasi Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat dilihat dalam gambar 4.12 dan tabel 4.8 bentuk kurva gelombang dan nilai tegangan keluaran penyearah 3 fasa sudah sesuai dengan dasar teori yang sudah disampaikan pada bab sebelumnya.



## BAB V

### PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 5.1 Pengujian Pembangkit sinyal picu

##### 5.1.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk pembangkit sinyal picu dan nilai *duty cycle* maksimum dan minimum yang bisa dibangkitkan mikrokontroler. Mikrokontroler diprogram untuk dapat menghasilkan gelombang kotak dengan frekuensi 50 kHz pada *duty cycle* (D) tertentu.

##### 5.1.2 Peralatan

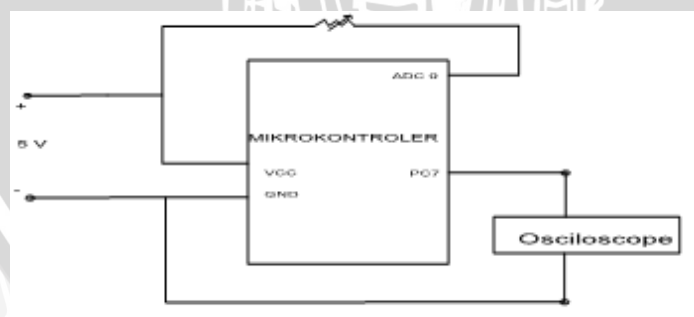
Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian ini adalah:

1. Mikrokontroler.
2. Resistor variabel.
3. Osiloskop.
4. Regulator DC 5 volt.

##### 5.1.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian pembangkit sinyal picu adalah sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti dalam gambar 5.1.



Gambar 5.1 Rangkaian pengujian pembangkit sinyal picu

2. Mencari nilai *duty cycle* maksimal dengan cara mengatur resistor variabel hingga nilai resistansinya 0  $\Omega$ .

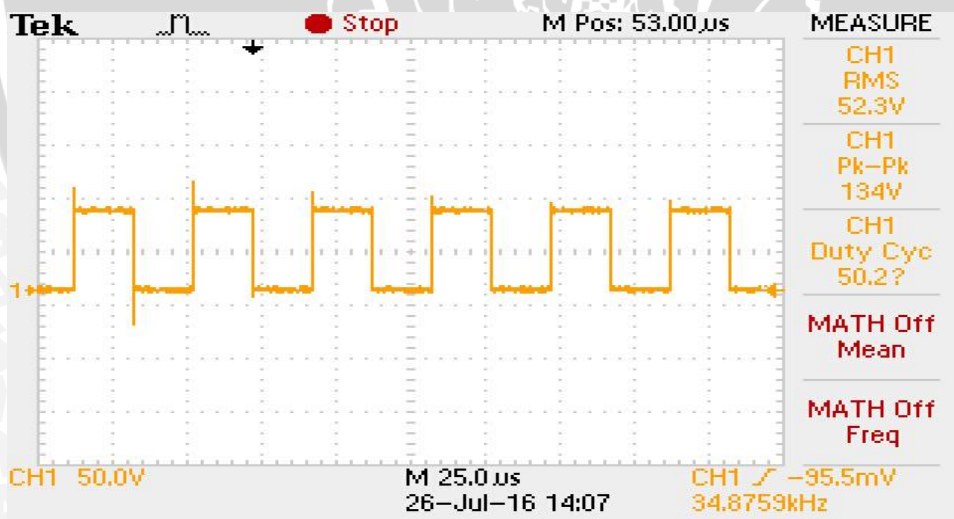
3. Mencari nilai *duty cycle* minimal dengan cara mengatur resistor variabel hingga nilai resistansinya maksimum.
4. Catat dan amati bentuk gelombang yang dihasilkan mikrokontroler pada osiloskop.

#### 5.1.4 Hasil Pengujian

Data hasil pengujian pembangkit sinyal picu dari hasil pengamatan di osiloskop pada nilai *duty cycle* 85,3%, 50,2%, dan 10,3% ditunjukkan dalam gambar 5.2, 5.3 dan 5.4.



Gambar 5.2 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 85.3%



Gambar 5.3 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 50.2%





Gambar 5.4 Hasil pengujian Pembangkit sinyal picu pada nilai duty cycle 10.3%

### 5.1.5 Analisis Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian yang didapatkan bahwa bentuk gelombang sesuai dengan apa yang telah dirancang yaitu gelombang kotak dengan dengan pengaturan lebar pulsa (PWM).

Nilai maksimal dan minimal *duty cycle* yang dapat dibangkitkan oleh rangkaian picu berturut-turut adalah sebesar 90% dan 10,0%. Bila nilai *duty cycle* diatur dibawah 10%, maka *duty cycle* yang dibangkitkan tetap akan bernilai 10% karena itu sudah melewati kemampuan dari rangkaian picu.

## 5.2 Pengujian Penyearah Tak Terkontrol 3 Fasa

### 5.2.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari penyearah tak terkontrol 3 fasa dalam menyearahkan arus bolak-balik. Pengujian ini dilakukan dengan cara menganalisis bentuk gelombang keluaran dan membandingkan nilai tegangan keluaran antara teori dan praktek pada setiap perubahan nilai tegangan masukan.

### 5.2.2 Peralatan

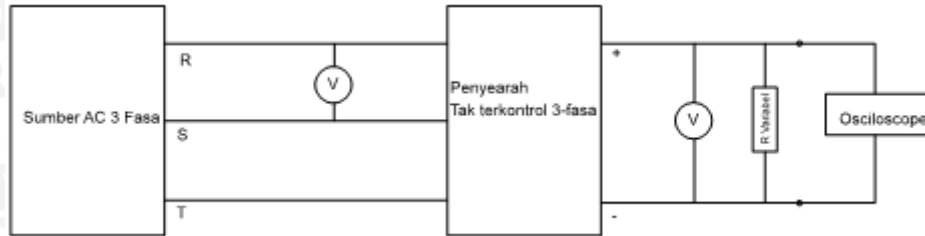
Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian ini adalah:

1. Penyearah tak terkontrol 3 fasa.
2. Sumber tegangan AC 3 fasa.
3. Voltmeter.
4. Osiloskop
5. Resistor variabel

### 5.2.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian penyearah 3 fasa tak terkontrol adalah sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti dalam gambar 5.5.



Gambar 5.5 Rangkaian pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa

2. Atur resistor variabel sehingga memiliki resistansi sebesar 10  $\Omega$ .
3. Naikan tegangan sumber tahap demi tahap dari 240 V hingga 380 V.
4. Mengukur tegangan keluaran dan amati gelombang keluaran di osiloskop.
5. Hitung dan bandingkan nilai teori dengan hasil pengukuran.

### 5.2.4 Hasil Pengujian

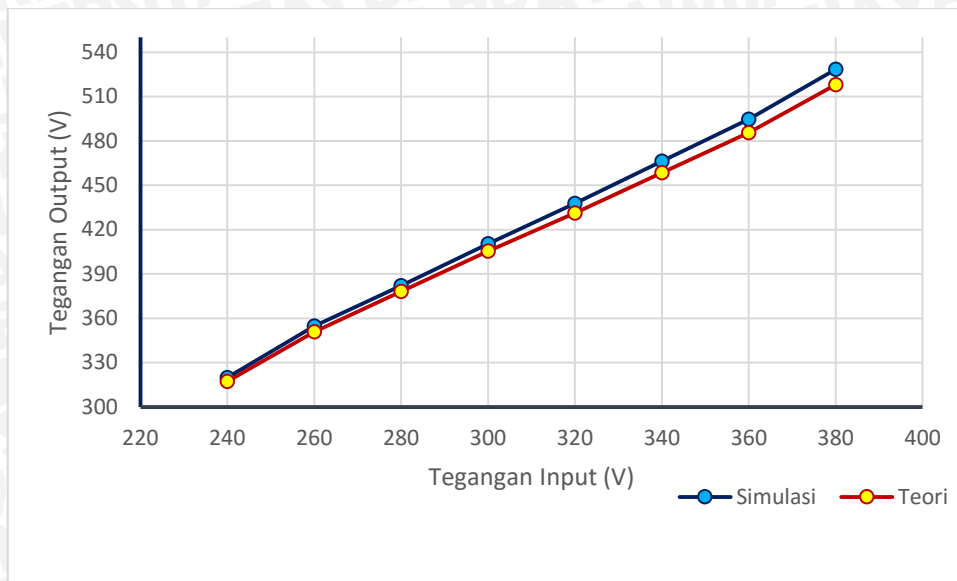
Data hasil pengujian rangkaian penyearah tak terkontrol 3-fasa adalah sebagai berikut:

1. Nilai tegangan keluaran penyearah tak terkontrol 3-fasa dalam setiap nilai tegangan masukan ditunjukkan dalam tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa

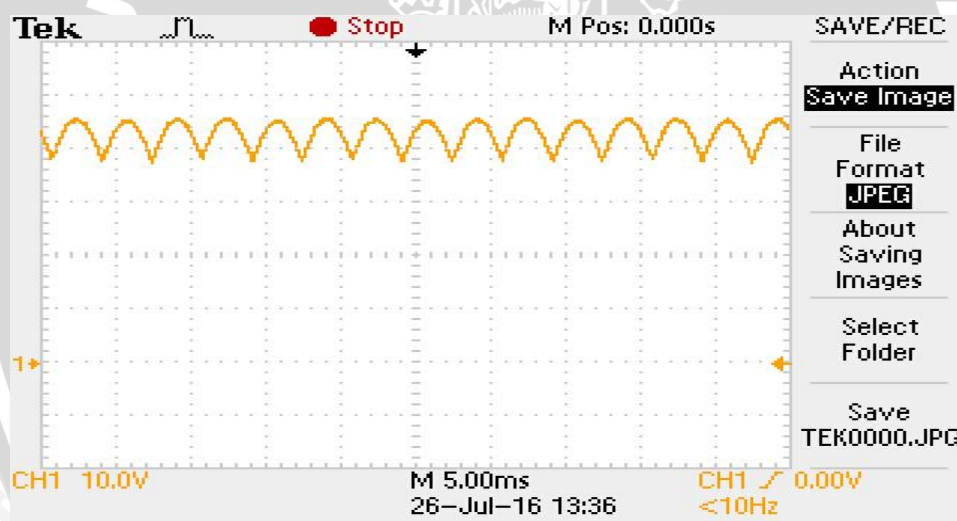
No.	Vin (volt)	Vout (volt)		Error (%)
		Praktek	Teori	
1	240	319.865	317.275	0.816327
2	260	354.83	350.945	1.107011
3	280	382.025	378.14	1.027397
4	300	410.515	405.335	1.277955
5	320	437.71	431.235	1.501502
6	340	466.2	458.43	1.694915
7	360	494.69	485.625	1.866667
8	380	528.36	518	2
Eror <sub>rata-rata</sub>				1.411472

2. Grafik  $V_{out}=f(V_{in})$  hasil pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa ditunjukkan dalam gambar 5.6.



Gambar 5.6 Hasil pengujian penyearah tak terkontrol 3 fasa

3. Contoh bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah tak terkontrol 3 fasa.



Gambar 5.7 Bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah tak terkontrol 3 fasa

### 5.2.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian rangkaian penyearah tak terkontrol 3-fasa menunjukkan bahwa terjadi kenaikan nilai tegangan keluaran dari penyearah tak terkontrol 3-fasa. Hal ini sesuai dengan teori yang dibuktikan dengan persamaan:

$$V_O = \frac{3V_{mL-L}}{\pi} = 0,955 \cdot V_{mL-L} \quad (5-1)$$

Berdasarkan data hasil pengujian dalam tabel 5.4, diperoleh nilai eror terendah, tertinggi, dan rata-rata berturut-turut sebesar 0.81%, 2%, dan 1.41%. Nilai eror yang cukup

tinggi dikarenakan perhitungan secara teori komponen dioda dianggap ideal, sedangkan pada prakteknya ada jatuh tegangan pada setiap dioda pada saat dioda konduksi.

### 5.3 Pengujian Sensor Tegangan

#### 5.3.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui linearitas dan nilai *error* dari sensor tegangan. Hasil dari sensor ini berupa tegangan DC untuk dapat digunakan sebagai input ADC mikrokontroller.

#### 5.3.2 Peralatan

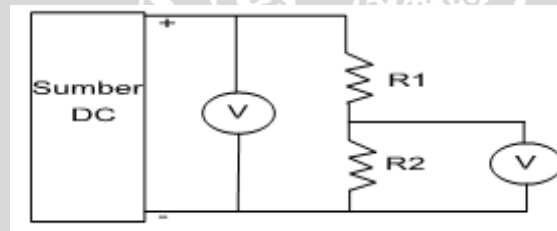
Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian ini adalah:

1. Sensor tegangan.
2. Sumber DC.
3. Voltmeter.

#### 5.3.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian sensor tegangan dan arus adalah sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti dalam gambar 5.8.



Gambar 5.8 Rangkaian pengujian sensor tegangan

2. Naikan tegangan sumber tahap demi tahap.
3. Mengukur tegangan keluaran sensor pada setiap kenaikan tegangan.
4. Hitung dan bandingkan nilai teori dengan praktek.

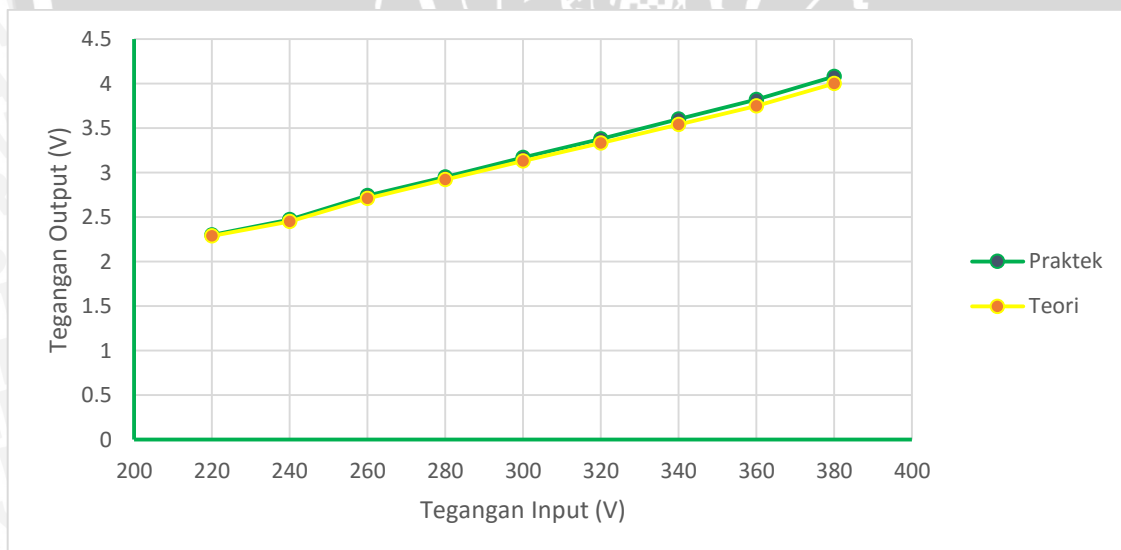
### 5.3.4 Hasil Pengujian

Data hasil pengujian sensor tegangan ditunjukkan dalam tabel 5.2

Tabel 5.2 Hasil pengujian sensor tegangan

Vin (V)	Vout (V)		Kesalahan (%)
	Pengujian	Perhitungan	
220	2.30	2.29	0.434
240	2.47	2.45	0.809
260	2.74	2.71	1.094
280	2.95	2.92	1.016
300	3.17	3.13	1.261
320	3.38	3.33	1.479
340	3.6	3.54	1.666
360	3.82	3.75	1.832
380	4.08	4.00	1.960
Kesalahan rata-rata			1.284

Dari data hasil pengujian sensor tegangan, dapat dibuat grafik  $V_{out} = f(V_{in})$  seperti ditunjukkan dalam gambar 5.9.



Gambar 5.9 Hasil pengujian sensor tegangan

### 5.3.5 Analisis Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian sensor tegangan didapatkan bahwa nilai eror terendah, terbesar, dan rata-rata adalah 0.434%; 1.960%; 1,284%. Nilai eror disini merupakan perbandingan nilai praktek dengan nilai teori. Didapatkan bahwa semakin besar nilai tegangan masukan dari sensor, maka nilai erornya pun meningkat. Hal ini dapat disimpulkan dengan melihat nilai *error* terbesar yang terjadi saat nilai tegangan masukan dari sensor sebesar 380 volt.

## 5.4 Pengujian *Buck Converter*

### 5.4.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi dari rangkaian *buck converter*.

### 5.4.2 Peralatan

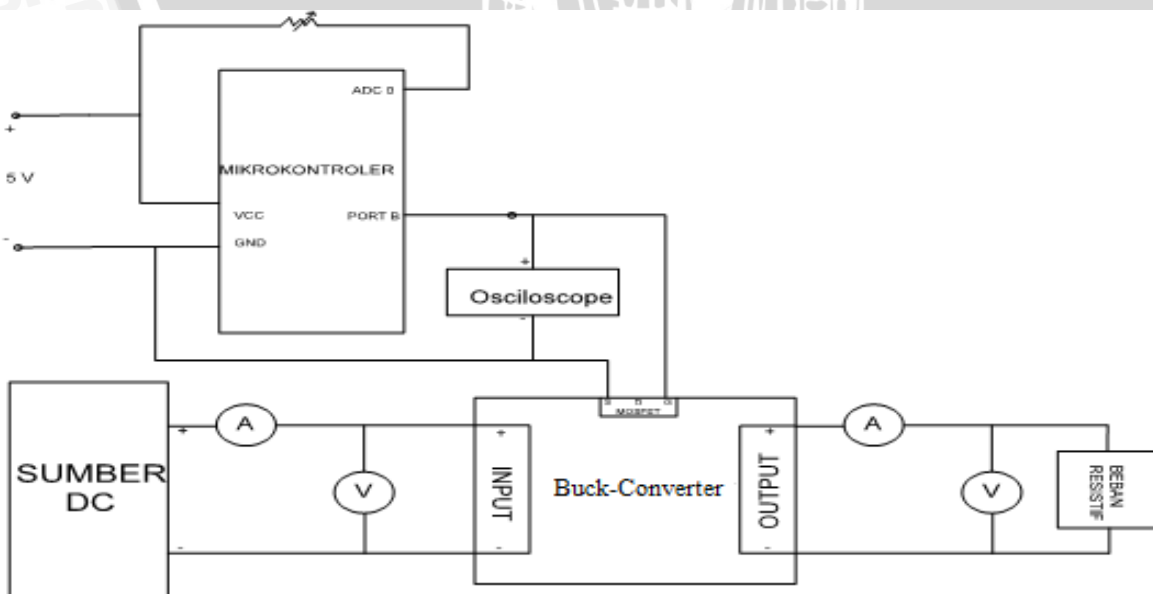
Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian ini adalah:

1. *Buck converter*.
2. Sumber DC.
3. Voltmeter.
4. Amperemeter.
5. Mikrokontroler.
6. Resistor variabel.
7. Beban resistif 813 Ohm(kumparan medan generator)
8. Osiloskop

### 5.4.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian *buck converter* adalah sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti dalam gambar 5.10.



Gambar 5.10 Rangkaian pengujian *buck converter*

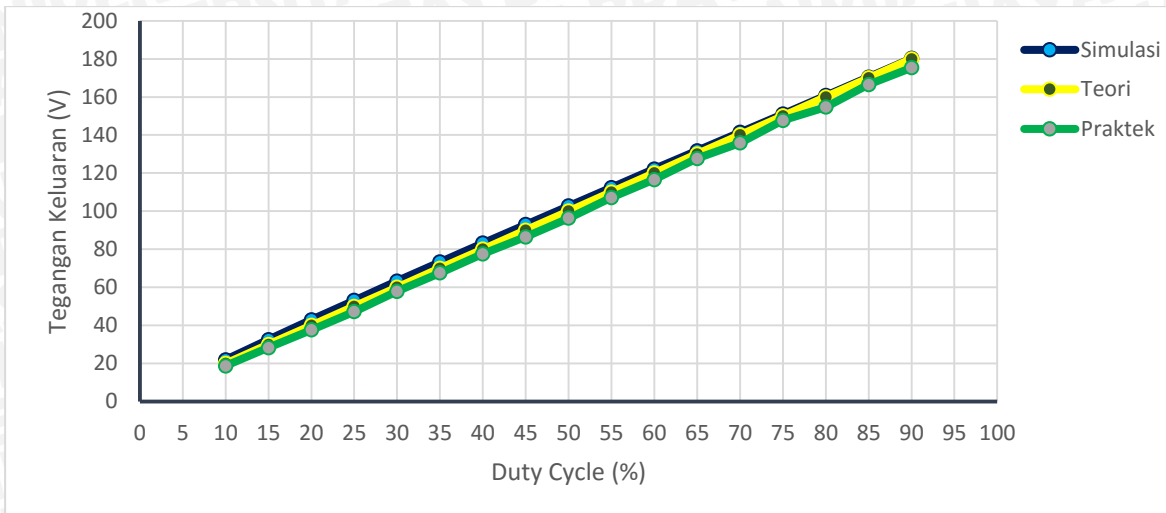
2. Naikan sumber DC sampai tegangan tertentu.
3. Naikan nilai *duty cycle* dari nilai terendah sampai nilai maksimal.
4. Ukur tegangan dan arus masukan serta tegangan dan arus keluaran *buck converter*.
5. Hitung daya masukan, daya keluaran, dan efisiensi dari *buck converter*.

#### 5.4.4 Hasil Pengujian

Data hasil pengujian *buck converter* ditunjukkan dalam tabel 5.3

Tabel 5.3 Hasil pengujian *buck converter* dengan beban  $813 \Omega$  pada beberapa variasi nilai *dutycycle*

Vs (V)	D	Ii (A)	Vo (V)	Io (A)
200	0.1	0.124	18.74	0.0386
200	0.15	0.152	28.34	0.0582
200	0.2	0.174	37.68	0.0744
200	0.25	0.196	47.24	0.089
200	0.3	0.216	57.88	0.1054
200	0.35	0.232	67.62	0.1188
200	0.4	0.248	77.54	0.1304
200	0.45	0.264	86.46	0.1476
200	0.5	0.278	96.36	0.155
200	0.55	0.292	107.14	0.1692
200	0.6	0.298	116.56	0.1766
200	0.65	0.316	127.72	0.1898
200	0.7	0.32	135.86	0.1962
200	0.75	0.338	147.72	0.2272
200	0.8	0.348	154.7	0.2634
200	0.85	0.358	166.56	0.3106
200	0.9	0.368	175.38	0.3284



Gambar 5.11 Hasil pengujian *buck converter*

#### 5.4.5 Analisis Hasil Pengujian

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa semakin bertambahnya nilai *dutycycle* akan mengakibatkan semakin bertambahnya tegangan keluaran *buck converter* secara linier. Dari gambar di atas terlihat bahwa grafik antara teori, simulasi dan pengujian hampir sama. Namun adanya perbedaan antara hasil simulasi dan pengujian karena adanya rugi komponen pada *buck converter* yang tidak ideal (adanya resistansi pada MOSFET, dioda, dan kapasitor).

### 5.5 Pengujian *Buck Converter* Dengan Umpan Balik

#### 5.5.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui efek dari perubahan tegangan keluaran *buck converter* dalam keadaan umpan balik dengan nilai *set point* sebesar 85 volt.

#### 5.5.2 Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian ini adalah:

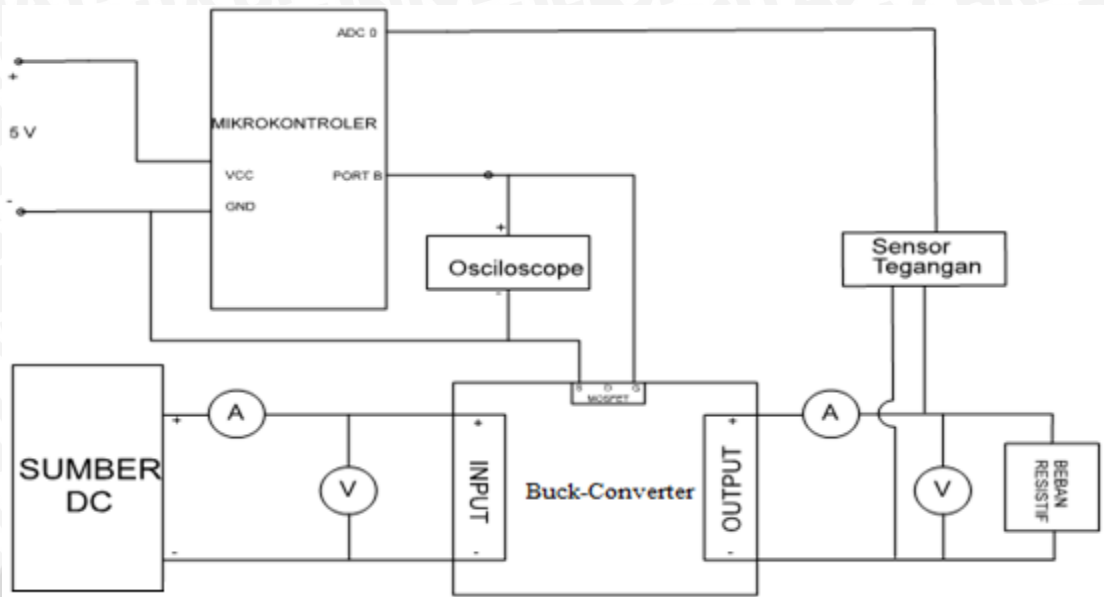
1. *Buck converter*.
2. Sumber DC.
3. Voltmeter.
4. Amperemeter.
5. Mikrokontroler.
6. Sensor Tegangan.
7. Beban resistif 813 Ohm.
8. Osiloskop.



### 5.5.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian *buck converter* dengan umpan balik adalah sebagai berikut:

1. Menyusun rangkaian seperti dalam gambar 5.12.



Gambar 5.12 Rangkaian pengujian *buck converter* dengan umpan balik

2. Naikan tegangan sumber DC secara bertahap mulai 20 V sampai 120 V.
3. Ukur tegangan dan arus masukan serta tegangan dan arus keluaran *buck converter*.
4. Baca nilai *duty cycle* pada osiloskop.
5. Catat hasil pembacaan dan pengukuran pada setiap tahap kenaikan tegangan.

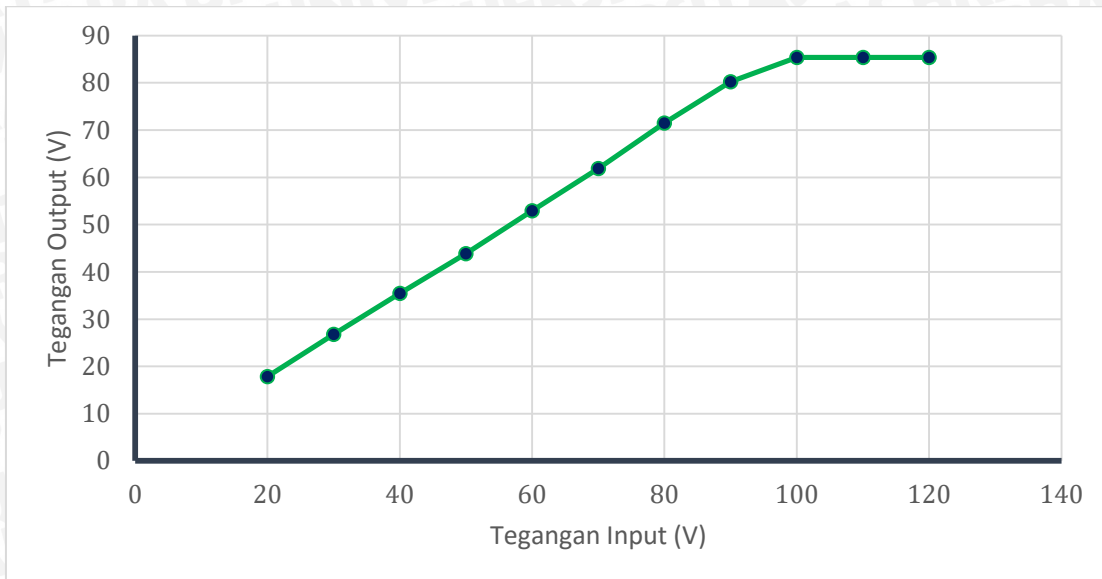
### 5.5.4 Hasil Pengujian

Data hasil pengujian *buck converter* dengan umpan balik ditunjukkan dalam tabel 5.4.

Tabel 5.4 Hasil pengujian *buck converter* dengan umpan balik

$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (A)	D (%)	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P_{in}$ (W)	$P_{out}$ (W)	Efisiensi (%)
20	0.024	90	17.82	0.023	0.48	0.40986	85.3875
30	0.036	90	26.77	0.0343	1.08	0.918211	85.01954
40	0.048	90	35.43	0.046	1.92	1.62978	84.88438
50	0.06	90	43.85	0.058	3	2.5433	84.77667
60	0.072	90	52.96	0.069	4.32	3.65424	84.58889
70	0.085	90	61.84	0.0812	5.95	5.021408	84.39341
80	0.097	90	71.47	0.0907	7.76	6.482329	83.53517
90	0.11	90	80.23	0.099	9.9	7.94277	80.23
100	0.12	87	85.38	0.104	12	8.87952	73.996
110	0.131	79	85.38	0.119	14.41	10.16022	70.50812
120	0.141	73	85.38	0.138	16.92	11.78244	69.63617

Dari data hasil pengujian tersebut, dapat digambarkan tegangan keluaran fungsi tegangan masukan seperti ditunjukkan dalam gambar 5.13.



Gambar 5.13 Hasil pengujian *buck converter* dengan umpan balik

### 5.5.5 Analisis Hasil pengujian

Berdasarkan tabel 5.4 dan gambar 5.13 didapatkan bahwa tegangan keluaran *buck converter* mencapai nilai *set point* ketika tegangan masuknya sebesar 100 volt dengan nilai *duty cycle* sebesar 87%. Bila tegangan masukan diturunkan maka tegangan keluaran dari *buck converter* akan berada dibawah tegangan *set point*-nya.

## 5.6 Pengujian Sistem AVR

### 5.6.1 Tujuan

Pengujian sistem keseluruhan bertujuan untuk mengetahui keberhasilan alat.

### 5.6.2 Peralatan

1. Regulator DC
2. Generator Sinkron
3. Resistor variable 3 fasa
4. Osiloskop
5. *Buck Converter*
6. Driver Mosfet
7. Sensor tegangann
8. Kabel penghubung

### 5.6.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian sistem keseluruhan adalah sebagai berikut:

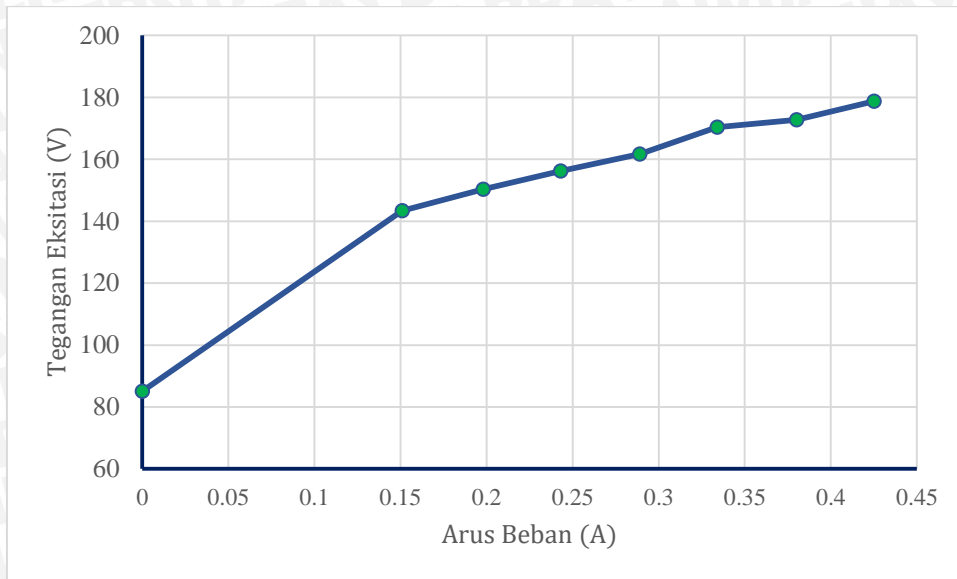
1. Menyusun sistem keseluruhan seperti blok diagram pada gambar 4.1
2. Memutar motor penggerak dengan kecepatan 1500 rpm dan memasukkan tegangan eksitasi supaya tegangan keluaran generator bernilai 380 volt.
3. Generator dibebani menggunakan resistor variabel 3 fasa yang diatur sesuai kebutuhan.
4. Ketika dibebani 100 watt, resistor 3 fasa diatur sebesar 1.5 k $\Omega$  dengan hubungan Y.
5. Ketika dibebani 200 watt, resistor 3 fasa diatur sebesar 700  $\Omega$  dengan hubungan Y.

### 5.6.4 Hasil Pengujian

Pengujian sistem keseluruhan merupakan hasil akhir untuk rancang bangun sistem AVR untuk generator sinkron 3 fasa. Selain itu, pengujian sistem juga bertujuan untuk mengetahui respon seberapa akurat kinerja AVR ketika generator sinkron dibebani. Kontroler yang digunakan dalam sistem ini adalah kontroler PID dengan nilai  $K_p=1.6325$  ;  $K_i=5$  ;  $K_d=0.1$ . Tujuan kontroler ini untuk memperbaiki respon *steady state*. Hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 5.5 dan grafik pengaruh tegangan keluaran terhadap tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa ditunjukkan pada gambar 5.14.

Tabel 5.5 Hasil pengujian sistem keseluruhan dengan beban linier

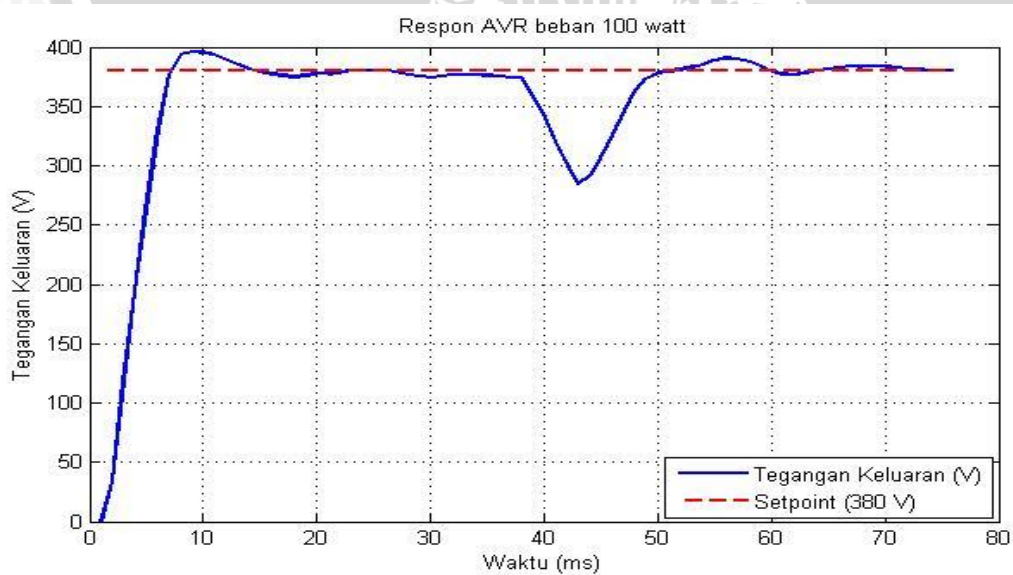
R (k $\Omega$ )	Arus Beban (A)	D (%)	Tegangan Eksitasi (V)	Arus Eksitasi (A)	Putaran (rpm)	Tegangan Output (V)
0	0	44	85.02	0.15	1500	380
1,457	0,151	68	143.4	0.196	1500	
1,112	0.198	74	150.3	0.208	1503	
0,905	0.243	77	156.2	0.217	1500	
0,762	0.289	79	161.7	0.226	1500	
0,658	0.334	86	170.4	0.238	1500	
0,579	0.38	88	172.8	0.246	1500	
0,517	0.425	90	178.7	0.255	1500	



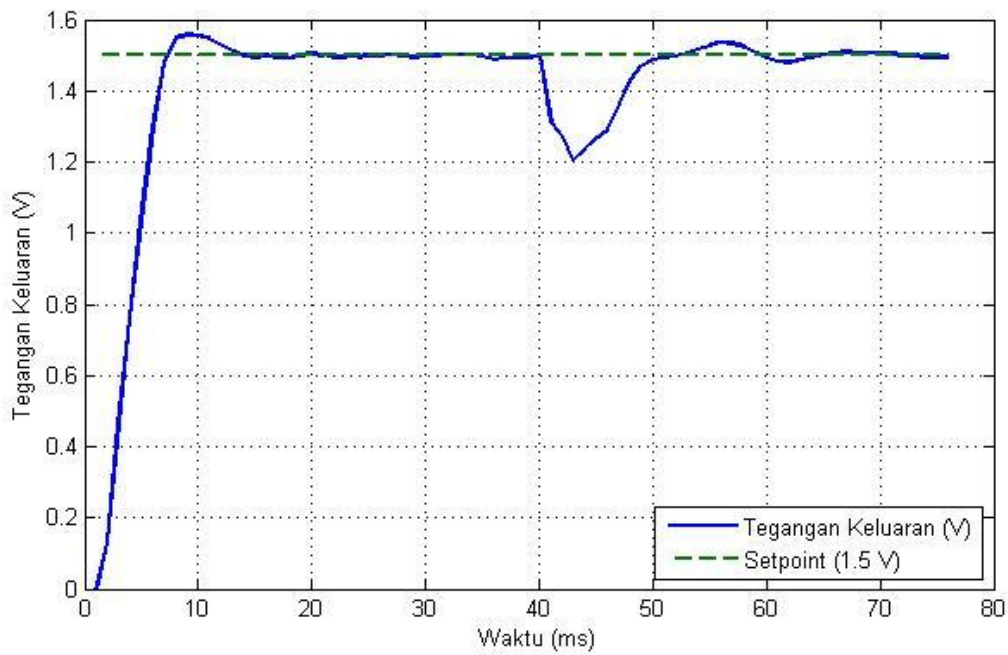
Gambar 5.14 Grafik hasil pengujian sistem keseluruhan AVR

Tabel 5.6 Hasil pengujian dengan variasi pembebanan secara acak

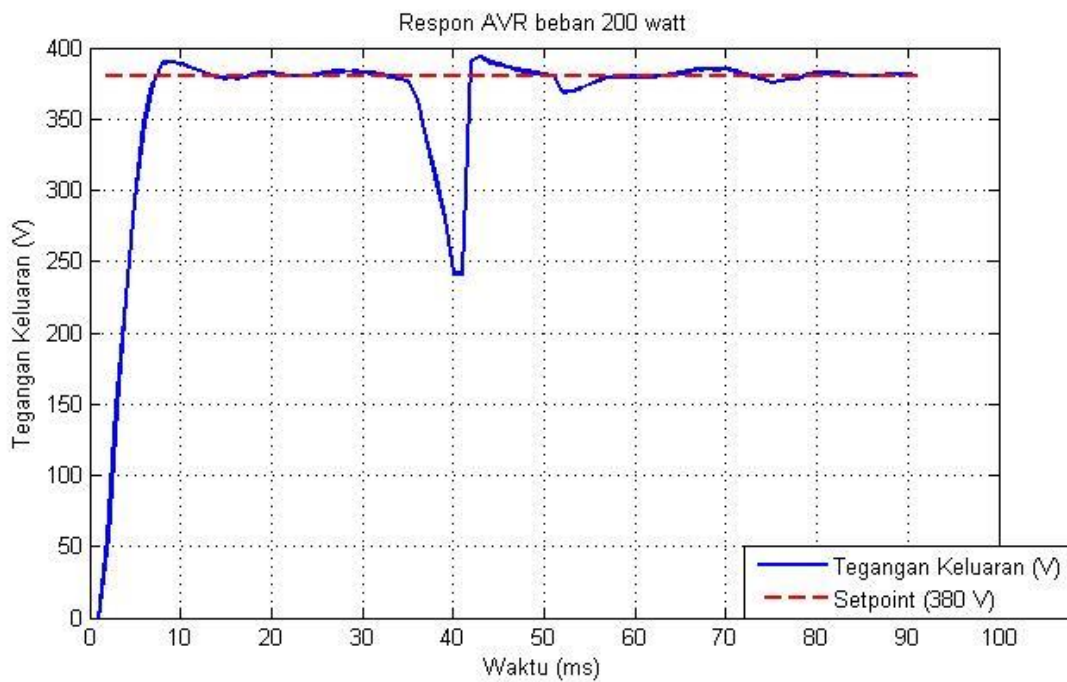
Arus Beban (A)	Tegangan Output (V)	Daya Output (W)	D(%)	Tegangan Eksitasi (V)	Arus Eksitasi (A)	Putaran (rpm)
0	380	0	43	84.6	0.147	1500
0.152		100	71	146.8	0.202	
0.304		200	84	166.3	0.232	
0.365		240	88	172.4	0.241	
0		0	44	85.2	0.152	
0.365		240	89	173.7	0.24	



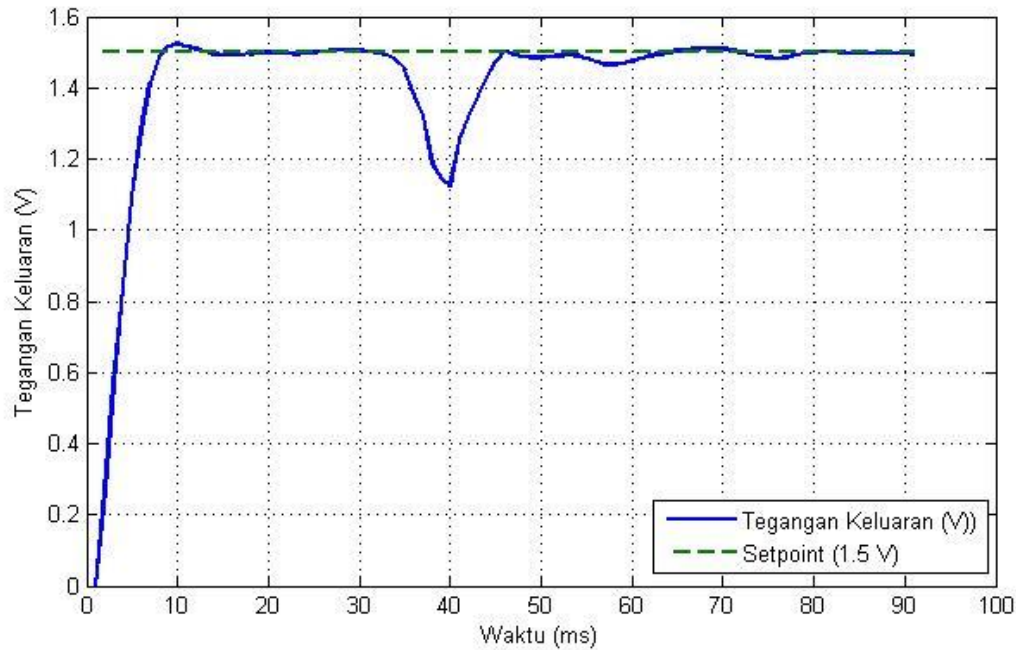
Gambar 5.15 Grafik respon generator sinkron  $V = f(t)$  dengan perubahan beban 100 watt



Gambar 5.16 Grafik respon motor dc shunt  $V = f(t)$  dengan perubahan beban 100 watt



Gambar 5.17 Grafik respon AVR  $V = f(t)$  dengan perubahan beban sebesar 200 watt



Gambar 5.18 Grafik respon motor dc shunt  $V = f(t)$  dengan perubahan beban 200 watt

### 5.6.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan tabel 5.5 dan gambar 5.14 didapatkan bahwa tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa akan naik secara linier ketika arus beban juga dinaikkan. Pada saat keadaan tanpa beban untuk memperoleh tegangan keluaran 380 volt, maka dibutuhkan tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa sebesar 85 volt dengan *duty cycle* sebesar 44%. Ketika generator dibebani sebesar 80%, maka dibutuhkan tegangan eksitasi sebesar 172.4 volt dengan *duty cycle* sebesar 88%.

Pada gambar 5.15 tampak bahwa tegangan keluaran generator turun ketika dibebani seperti pada tabel 5.6. Pengujian tersebut berfungsi untuk mengetahui tanggapan AVR ketika dibebani secara acak. Tampak pada gambar bahwa tegangan keluaran generator turun menjadi 280 volt ketika dibebani sebesar 30% (100 watt). Waktu yang dibutuhkan generator untuk mencapai *steady state* yaitu 13 milidetik. Sedangkan gambar 5.17 menunjukkan grafik respon AVR ketika dibebani 60% (200 watt). Waktu yang dibutuhkan generator untuk mencapai *steady state* yaitu 20 milidetik.

## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan pengujian pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perancangan *Sistem Pengaturan Eksitasi Pada Generator Sinkron 3 Fasa* menggunakan *Automatic Voltage Regulator (AVR)* dilakukan dengan cara menggunakan *buck converter*. Pengaturan tegangan eksitasi dilakukan dengan cara mengoperasikan *buck converter* untuk menurunkan level tegangan pada sisi regulator sumber. Dengan demikian tegangan penguatan pada kumparan medan dapat terpenuhi sesuai keadaan beban.
2. Tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa berkisar dari 60 volt sampai 180 volt dengan *duty cycle* 30% - 90%. Dalam keadaan tanpa beban untuk memperoleh tegangan keluaran 380 volt, maka dibutuhkan tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa sebesar 85 volt dengan *duty cycle* sebesar 44%. Ketika dibebani 200 watt, maka dibutuhkan tegangan eksitasi sebesar 166.3 volt dengan *duty cycle* sebesar 84%.
3. Pada saat generator dibebani sebesar 100 watt diperoleh respon selama 13 milidetik untuk mencapai *steady state*. Sedangkan pada saat dibebani 200 watt diperoleh respon selama 20 milidetik untuk mencapai keadaan *steady state*.

### 6.2 Saran

Saran untuk penelitian yang akan datang dari hasil penelitian ini sebagai berikut :

1. Pemilihan komponen *buck converter*, penyearah dan sensor tegangan diharapkan lebih memperhatikan toleransi nilai komponen terutama resistor agar kesalahan lebih kecil dan hasilnya lebih presisi.
2. Perlu dilakukan pembuatan driver mosfet selain menggunakan IC IR2110 karena dalam pengujiannya komponen tersebut mudah rusak/*short circuit* sehingga memakan waktu yang cukup lama untuk membuatnya.
3. Perlu dilengkapi proteksi *overcurrent* dan *overvoltage* supaya alat aman ketika terjadi arus atau tegangan berlebih.





## Daftar Pustaka

- Chapman, S.J., (1985), "Electric Machinery Fundamentals", Singapore : McGraw-Hill, Inc
- Chapman, Stephen J. 2002. *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. New York McGraw-Hill Companies.
- Chapman, Stephen J. 2005. *Electric Machinery Fundamentals*. New York : The McGraw-Hill Companies.
- Fitzgerald A.E., Charles Kingsley, Jr., dan Stephen D.U. 1992. *Mesin-Mesin Listrik* , Edisi 4 (Terjemahan Ir. Djoko Achyanto, M.Sc. EE). Jakarta :Erlangga.
- Hart, Daniel W. 2011. *Power Electronics*. McGraw-Hill: New York.
- Irnanda, Priyadi. 2012. *Analisis Pengaruh Eksitasi Terhadap Efek Harmonisa Pada Hubungan Belitan Generator Sinkron Dengan Beban LHE*, Jurnal Amplifier Vol. 2 No. 1.
- Jadic, I., 1998. *Modelling and Control of Synchronous Generator With Electronic Load*, Virginia :Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Kadir, A. 1983. *Mesin Serempak*. Jakarta : Djambatan.
- Listen, E.C. 1988. *Mesin dan Rangkaian Listrik* .Jakarta :Erlangga.
- Mismail, B. 1983. *Analisa Sistem Tenaga*. Malang :Universitas Brawijaya Malang.
- Sen, P. C. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, Inc. : New York.
- Sudirham, S. 2012. *Analisis Rangkaian Listrik* . Bandung : kanayakan D-30.
- Sumardjati, P. 2006. *AVR Untuk Generator Sinkron 3 Fasa*. Fakultas Teknik Elektro Universitas Diponegoro : Semarang.
- Sumardjati, Prih, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- Surya, D. 2006. *Induksi Elektromagnetik* . Jakarta : Universitas Indonesia.

Zuhal.1977. *Dasar Tenaga Listrik* , Bandung : Penerbit ITB.

Zuhal. 1998. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya* . Jakarta : PT. Rineka Cipta.

Weedy, B.M., Cory, B.J. 1998. *Electric Power System*. John Wiley & Sons Ltd: Chichester, England.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

**LAMPIRAN**



**Lampiran 1. Listing Program Arduino**

```
#include <PID_v1.h>
double Setpoint, Input, Output;

// TUNING PARAMETERS
float Kp=1.6325;
float Ki=5;
float Kd=0.1;

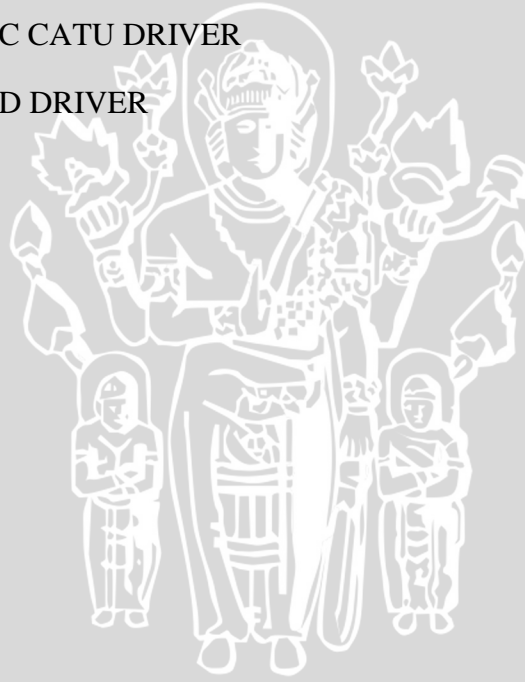
// SENSOR TEGANGAN
float nilaisensortegangan;
float tegangan;
float pwm;
float dutycycle;
float k=0.39;

// TENTUKAN LINK DAN PAREMETERS PENYETEL AWAL
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,Kp,Ki,Kd, DIRECT);

//TIMESTAMP
unsigned long serialTime; //this will help us know when to talk with processing
const int sampleRate = 1; // Variable that determines how fast our PID loop runs
const long serialPing = 900; //This determines how often we ping our loop
unsigned long now = 0; //This variable is used to keep track of time
unsigned long lastMessage = 0; //This keeps track of when our loop last spoke to serial

void setup()
```

```
{  
Serial.begin(9600);  
  
//PIN DRIVER MOSFET IR2110  
pinMode(13,OUTPUT); //VCC driver, driver pin 7  
pinMode(12,OUTPUT); //GRD driver, driver pin 8  
pinMode(6,OUTPUT); //MIN1 VCC Mosfet PWM, driver pin 1  
pinMode(5,OUTPUT); //MIN2 GRD Mosfet PWM, driver pin 2  
pinMode(10,OUTPUT); //MEN, driver pin 4  
pinMode(9,OUTPUT); //MSLP, driver pin 6  
pinMode(4,OUTPUT); //VCC CATU DRIVER  
pinMode(3,OUTPUT); //GRD DRIVER  
  
digitalWrite(13, HIGH);  
digitalWrite(12, LOW);  
digitalWrite(6, HIGH);  
digitalWrite(5, LOW);  
digitalWrite(10, HIGH);  
digitalWrite(9, HIGH);  
digitalWrite(4, HIGH);  
digitalWrite(3, LOW);  
  
//PIN SENSOR TEGANGAN  
pinMode(8,OUTPUT); //VCC  
pinMode(2,OUTPUT); //GRD  
digitalWrite(8, HIGH);  
digitalWrite(2, LOW);
```



## //INISIALISASI PID

```
myPID.SetMode(AUTOMATIC); // Turn on the PID loop as automatic control
```

```
myPID.SetOutputLimits(0, 999);
```

```
myPID.SetSampleTime(sampleRate); // Sets the sample rate
```

```
lastMessage = millis(); // timestamp
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
```

## //INISIALISASI SENSOR TEGANGAN

```
nilaisensortegangan=analogRead(A1);
```

```
tegangan=(nilaisensortegangan/1023)*25;;
```

## //SERIAL PRINT

```
Serial.print(tegangan);
```

```
Serial.print("\t\t");
```

## //KALIBRASI

```
Input = terukur;
```

```
myPID.Compute();
```

```
dutycycle = Output/k;
```

```
pwm=(dutycycle * 0.39);
```

```
if (pwm>255){pwm=255;}
```

```
analogWrite(6, pwm);
```

```
now = millis();
```

```
delay(2000);
```

```
}
```



## Lampiran 2. Data sheet

### 1. Karakteristik LM7805

#### Electrical Characteristics (LM7805)

Refer to the test circuit,  $-40^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$ ,  $I_O = 500\text{ mA}$ ,  $V_I = 10\text{ V}$ ,  $C_I = 0.1\ \mu\text{F}$ , unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_O$	Output Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	4.80	5.00	5.20	V
		$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ , $P_O \leq 15\text{ W}$ , $V_I = 7\text{ V to }20\text{ V}$	4.75	5.00	5.25	
Regline	Line Regulation <sup>(2)</sup>	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$V_I = 7\text{ V to }25\text{ V}$	4.0	100.0	mV
			$V_I = 8\text{ V to }12\text{ V}$	1.6	50.0	
Regload	Load Regulation <sup>(2)</sup>	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$	9.0	100.0	mV
			$I_O = 250\text{ mA to }750\text{ mA}$	4.0	50.0	
$I_Q$	Quiescent Current	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		5	8	mA
$\Delta I_Q$	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $V_I = 7\text{ V to }25\text{ V}$		0.03	0.50	mA
				0.30	1.30	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift <sup>(3)</sup>	$I_O = 5\text{ mA}$		-0.8		mV/°C
$V_N$	Output Noise Voltage	$f = 10\text{ Hz to }100\text{ kHz}$ , $T_A = +25^{\circ}\text{C}$		42		$\mu\text{V}$
RR	Ripple Rejection <sup>(3)</sup>	$f = 120\text{ Hz}$ , $V_I = 8\text{ V to }18\text{ V}$	62	73		dB
$V_{DROP}$	Dropout Voltage	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$ , $I_O = 1\text{ A}$		2		V
$R_O$	Output Resistance <sup>(3)</sup>	$f = 1\text{ kHz}$		15		m $\Omega$
$I_{SC}$	Short-Circuit Current	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$ , $V_I = 35\text{ V}$		230		mA
$I_{PK}$	Peak Current <sup>(3)</sup>	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$		2.2		A

#### Notes:

- Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.
- These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

LM78XX / LM78XXA — 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator

## 2. Karakteristik LM7812

### Electrical Characteristics (LM7812)

Refer to the test circuit,  $-40^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$ ,  $I_O \leq 500 \text{ mA}$ ,  $V_I \leq 19 \text{ V}$ ,  $C_I \leq 0.33 \mu\text{F}$ ,  $C_O \leq 0.1 \mu\text{F}$ , unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_O$	Output Voltage	$T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$	11.5	12.0	12.5	V
		$I_O \leq 5 \text{ mA to } 1 \text{ A}$ , $P_O \leq 15 \text{ W}$ , $V_I \leq 14.5 \text{ V to } 27 \text{ V}$	11.4	12.0	12.6	
Regline	Line Regulation <sup>(12)</sup>	$T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$	$V_I \leq 14.5 \text{ V to } 30 \text{ V}$	10	240	mV
			$V_I \leq 16 \text{ V to } 22 \text{ V}$	3	120	
Regload	Load Regulation <sup>(12)</sup>	$T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$	$I_O \leq 5 \text{ mA to } 1.5 \text{ A}$	11	240	mV
			$I_O \leq 250 \text{ mA to } 750 \text{ mA}$	5	120	
$I_Q$	Quiescent Current	$T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$		5.1	8.0	mA
$\Delta I_Q$	Quiescent Current Change	$I_O \leq 5 \text{ mA to } 1 \text{ A}$ $V_I \leq 14.5 \text{ V to } 30 \text{ V}$		0.1	0.5	mA
				0.5	1.0	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift <sup>(13)</sup>	$I_O \leq 5 \text{ mA}$		-1		mV/°C
$V_N$	Output Noise Voltage	$f \leq 10 \text{ Hz to } 100 \text{ kHz}$ , $T_A \leq +25^{\circ}\text{C}$		75		$\mu\text{V}$
RR	Ripple Rejection <sup>(13)</sup>	$f \leq 120 \text{ Hz}$ , $V_I \leq 15 \text{ V to } 25 \text{ V}$	55	71		dB
$V_{DRCP}$	Dropout Voltage	$I_O \leq 1 \text{ A}$ , $T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$		2		V
$R_O$	Output Resistance <sup>(13)</sup>	$f \leq 1 \text{ kHz}$		18		m $\Omega$
$I_{SC}$	Short-Circuit Current	$V_I \leq 35 \text{ V}$ , $T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$		230		mA
$I_{PK}$	Peak Current <sup>(13)</sup>	$T_J \leq +25^{\circ}\text{C}$		2.2		A

#### Notes:

12. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in  $V_O$  due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

13. These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

LM78XX / LM78XXA — 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator



### 3. Karakteristik IRF730

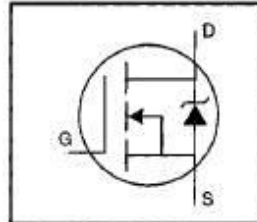
## International IR Rectifier

PD-9.308K

## IRF730

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements



$$V_{DSS} = 400V$$

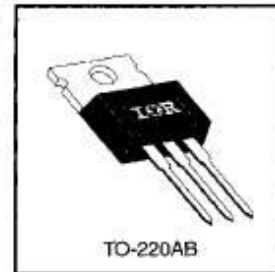
$$R_{DS(on)} = 1.0\Omega$$

$$I_D = 5.5A$$

### Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.

DATA  
SHEETS

### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{ V}$	5.5	A
$I_D$ @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{ V}$	3.5	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	22	
$P_D$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	74	W
	Linear Derating Factor	0.59	
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy ②	290	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current ①	5.5	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ①	7.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	4.0	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
$T_{STG}$			
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1 N·m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	1.7	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	62	

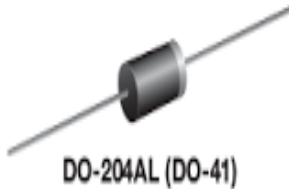
## 4. Karakteristik Dioda 1N4007



1N4001 thru 1N4007

Vishay General Semiconductor

## General Purpose Plastic Rectifier



## FEATURES

- Low forward voltage drop
- Low leakage current
- High forward surge capability
- Solder dip 275 °C max. 10 s, per JESD 22-B106
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC

RoHS  
COMPLIANT

## TYPICAL APPLICATIONS

For use in general purpose rectification of power supplies, inverters, converters and freewheeling diodes application.

## Note

- These devices are not AEC-Q101 qualified.

## MECHANICAL DATA

**Case:** DO-204AL, molded epoxy body

Molding compound meets UL 94 V-0 flammability rating

Base P/N-E3 - RoHS compliant, commercial grade

**Terminals:** Matte tin plated leads, solderable per J-STD-002 and JESD 22-B102

E3 suffix meets JESD 201 class 1A whisker test

**Polarity:** Color band denotes cathode end

## PRIMARY CHARACTERISTICS

$I_{F(AV)}$	1.0 A
$V_{RRM}$	50 V to 1000 V
$I_{FSM}$ (8.3 ms sine-wave)	30 A
$I_{FSM}$ (square wave $t_p = 1$ ms)	45 A
$V_F$	1.1 V
$I_R$	5.0 $\mu$ A
$T_J$ max.	150 °C

## 5. Aplikasi LM78XX

### Typical Applications

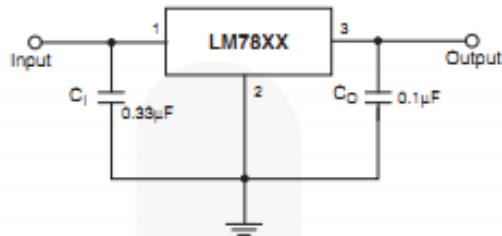


Figure 6. DC Parameters

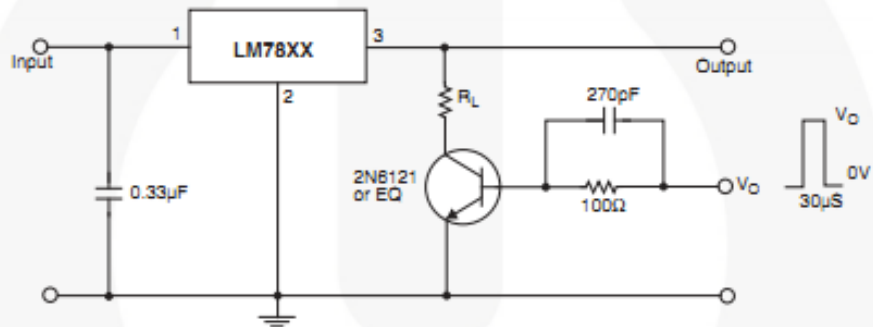


Figure 7. Load Regulation

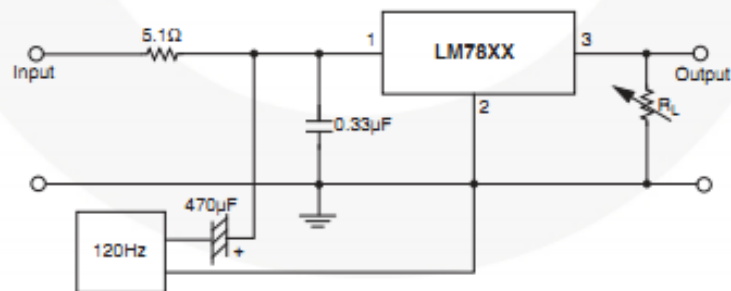
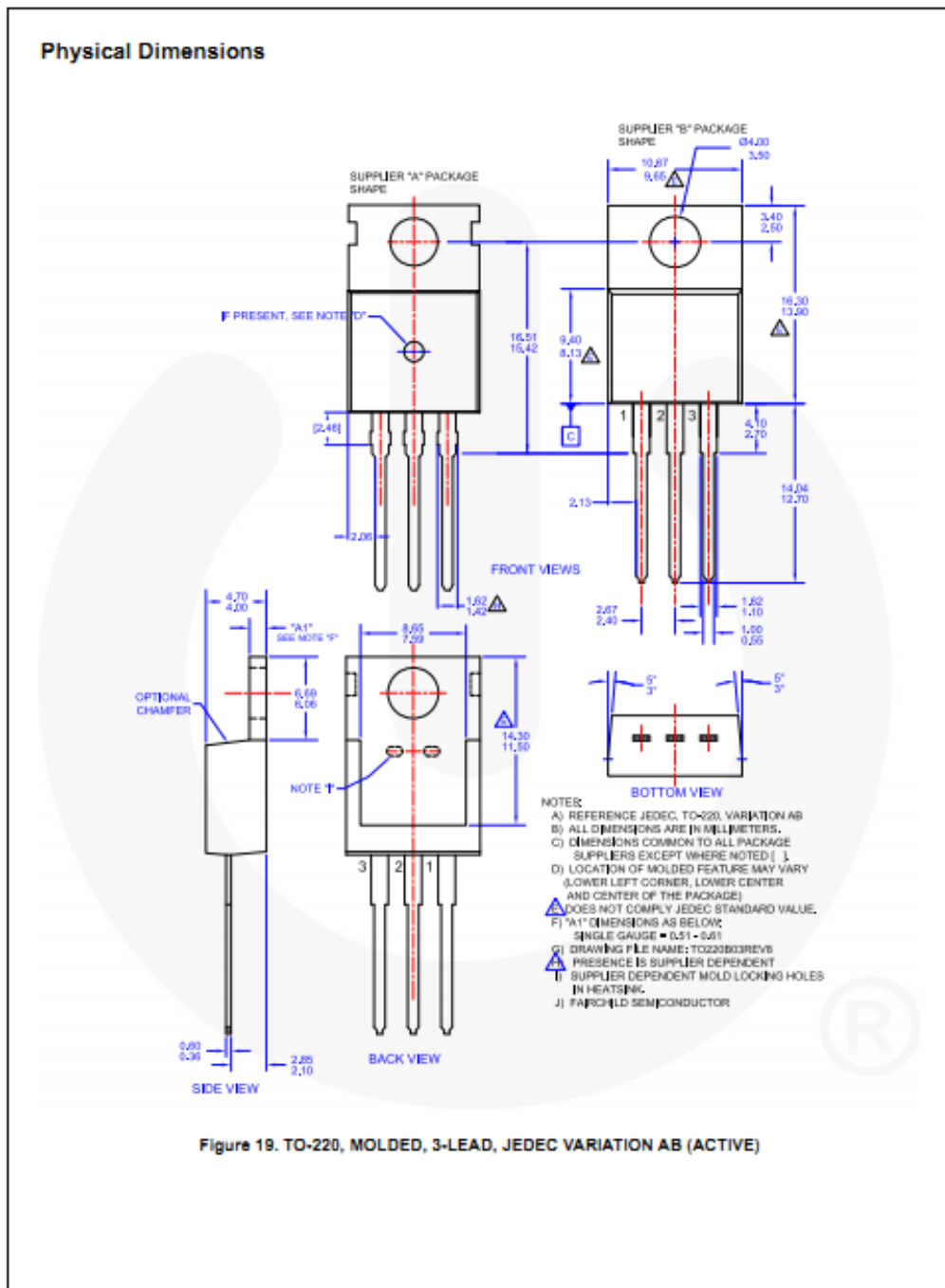
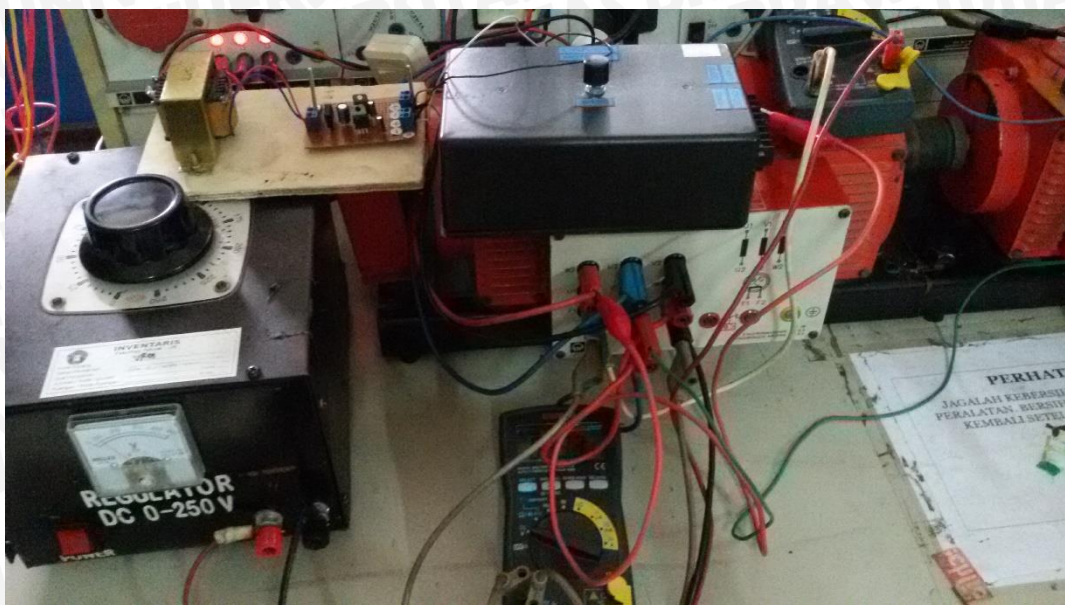


Figure 8. Ripple Rejection

## 6. Bentuk fisik LM78XX



### Lampiran 3. Dokumentasi



Gambar Pengujian sistem keseluruhan

