



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH  
UNTUK SIMULATOR TURBIN ANGIN**

**SKRIPSI**

**NOVAN YAHYA RENATAL  
06 06 07 4211**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH  
UNTUK SIMULATOR TURBIN ANGIN**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**NOVAN YAHYA RENATAL  
06 06 07 4211**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Novan Yahya Renatal**

**NPM : 0606074211**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 12 Juli 2010**

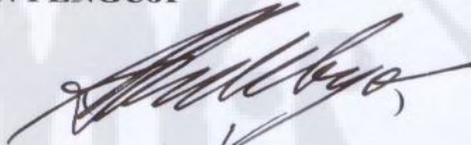
## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Novan Yahya Renatal  
NPM : 0606074211  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Pengendali Motor Arus Searah Untuk Simulator Turbin Angin

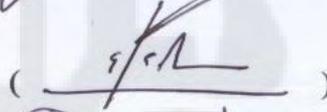
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

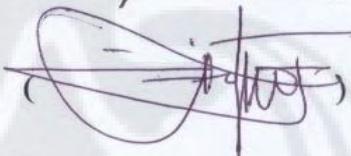
Pembimbing : Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo



Penguji : Dr.-Ing. Eko Adhi Setiawan



Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT



Ditetapkan di : Depok .

Tanggal : 12 Juli 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo dan Dr. Eko Adhi Setiawan selaku pembimbing yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Ismujiyanto dan Syukron Ma'mun atas segala bantuan dalam pembuatan dan pengujian yang diperlukan untuk penyusunan skripsi ini;
3. Orang tua dan keluarga yang telah member dukungan material dan moral; dan
4. Sahabat dan rekan mahasiswa yang telah ikut membantu memberi segala dukungan.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 12 Juli 2010

Penulis

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

---

---

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

Nama : Novan Yahya Renatal  
NPM : 0606074211  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**RANCANG BANGUN PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH UNTUK  
SIMULATOR TURBIN ANGIN**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 12 Juli 2010

Yang Menyatakan

(Novan Yahya Renatal)

## ABSTRAK

Nama : Novan Yahya Renatal  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : RANCANG BANGUN PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH UNTUK SIMULATOR TURBIN ANGIN

Skripsi ini membahas mengenai implementasi sebuah pengendali motor arus searah untuk suatu simulator turbin angin. Pengendali motor arus searah pada umumnya terdiri dari sebuah pengendali proporsional-integral (PI) sebagai pengendali tegangan dan arus, rangkaian penyulut, dan penyearah gelombang penuh satu fasa semi terkendali. Ada tiga pengujian yang telah dilakukan. Pengujian pengendali PI, pengujian pengendali PI bersama dengan sirkuit penyulut, dan pengujian seluruh sistem. Hasil pengujian yang diamati adalah perubahan bentuk dan nilai pada gelombang tegangan keluaran yang diukur menggunakan osiloskop.

Kata Kunci:

Pengendali PI, pengendali motor arus searah, simulator turbin angin

## ABSTRACT

Name : Novan Yahya Renatal  
Study Program : Teknik Elektro  
Title : DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A DC MOTOR  
CONTROLLER FOR A WIND TURBINE SIMULATOR

This final assignment discusses about the implementation of a DC motor controller for a wind turbine simulator. The DC motor controller is, a common one, consisting of a proportional-integral (PI) controller to control the voltage and current, firing circuit, and a one phase full wave semi controlled rectifier. There are three steps of tests that has been conducted. Those tests are PI controller test, PI controller together with firing circuit test, and the whole system test. Test results being observed are the chagement of the output wave shape and the output voltages measured by a oscilloscope.

Keywords:  
PI controller, DC drive, wind turbine simulator

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Skripsi.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan Skripsi.....	3
<b>2. DC DRIVE.....</b>	<b>4</b>
2.1 Prinsip Kerja Motor Arus Searah.....	5
2.2 Moda Operasi.....	8
2.3 Pengereman.....	9
2.3.1 Plugging.....	9
2.3.2 Pengereman Dinamik.....	10
2.3.3 Pengereman Regeneratif.....	10
2.4 Moda Operasi 4 Kuadran.....	11
<b>3. PEMODELAN PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH UNTUK SIMULATOR TURBIN ANGIN.....</b>	<b>13</b>
3.1 Pemodelan dan Konsep Simulator Turbin Angin Menggunakan Mesin Arus Searah.....	13
3.2 Sistem Pengendali Motor Arus Searah.....	14

3.2.1 Pengendali PI .....	14
3.2.2 Modul Penyulut Dengan Menggunakan UJT.....	18
3.2.3 Rangkaian Penyearah Setengah Terkendali .....	22
3.3 Pemodelan Pengendali Motor Arus Searah.....	24
3.4 Rencana Uji Coba.....	29
3.4.1 Pengujian Pengendali PI .....	29
3.4.2 Pengujian Pengendali PI dan Rangkaian Penyulut .....	29
3.4.3 Pengujian Seluruh Sistem Pengendali Motor Arus Searah.....	30
<b>4. UJI COBA PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH .....</b>	<b>31</b>
4.1 Uji Coba Pengendali Proporsional-Integral .....	31
4.1.1 Hasil Uji Coba Pengendali PI .....	32
4.1.2 Analisa Uji Coba Pengendali PI.....	37
4.2 Uji Coba Pengendali PI dan Rangkaian Penyulut .....	38
4.2.1 Hasil dan Analisa Uji Coba Pengendali PI dan Rangkaian Penyulut .....	39
4.3 Uji Coba Pengendali Motor Arus Searah dengan Beban .....	42
4.3.1 Hasil Uji Coba Pengendali Motor Arus Searah dengan Beban .....	43
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>48</b>
<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>49</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>50</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram skematik pengendali kecepatan motor arus searah .....	4
Gambar 2.2	Konstruksi motor arus searah .....	5
Gambar 2.3	Rangkaian ekivalen motor arus searah .....	6
Gambar 2.4	Rotor pada motor arus searah .....	7
Gambar 2.5	Aturan tangan kanan untuk menentukan gaya Lorentz .....	7
Gambar 2.6	Motor arus searah .....	9
Gambar 2.7	Generator arus searah .....	9
Gambar 2.8	Pengereman metode plugging .....	10
Gambar 2.9	Pengereman regeneratif .....	11
Gambar 2.10	Kondisi untuk mode 4 kuadran .....	12
Gambar 3.1	Tabel kelas angin .....	14
Gambar 3.2	Rangkaian pengendali PI .....	16
Gambar 3.3	Blok diagram pengendali PI .....	16
Gambar 3.4	Pengaruh pengendali proporsional pada kestabilan sistem .....	17
Gambar 3.5	Pengaruh pengendali proporsional pada waktu respon .....	17
Gambar 3.6	Pengaruh pengendali PI pada sistem .....	18
Gambar 3.7	Uni Junction Transistor .....	19
Gambar 3.8	Karakteristik UJT .....	21
Gambar 3.9	Rangkaian penyulut SCR .....	22
Gambar 3.10	Konfigurasi penyearah setengah terkendali .....	23
Gambar 3.11	Gelombang tegangan keluaran .....	24
Gambar 3.12	Model turbin angin .....	25
Gambar 3.13	Blok diagram simulator turbin angin .....	25
Gambar 3.14	Op-Amp LM741 .....	26
Gambar 3.15	Konfigurasi pengendali PI .....	26
Gambar 3.16	Blok diagram pengendali PI .....	27
Gambar 3.17	Rangkaian penyulut dengan UJT .....	28
Gambar 4.1	Pengujian pengendali PI .....	32
Gambar 4.2	Hasil pengujian tegangan keluaran dengan perubahan feedback .....	34
Gambar 4.3	Hasil pengujian tegangan keluaran dengan perubahan set point .....	37

Gambar 4.4	Pengujian pengendali PI dengan rangkaian penyulut .....	39
Gambar 4.5	Pulsa keluaran rangkaian penyulut.....	41
Gambar 4.6	Cara kerja pulsa keluaran dari rangkaian penyulut .....	41
Gambar 4.7	Rangkaian pengujian dengan beban.....	43
Gambar 4.8	Lampu menyala redup .....	43
Gambar 4.9	Hasil penyearahan dengan sudut penyalaan $\alpha = 45^\circ$ .....	44
Gambar 4.10	Kecepatan motor arus searah pada sudut penyalaan $\alpha = 45^\circ$ .....	44
Gambar 4.11	Hasil penyearahan dengan sudut penyalaan $\alpha = 90^\circ$ .....	45
Gambar 4.12	Hasil penyearahan dengan sudut penyalaan $\pi/2 < \alpha < \pi$ .....	46
Gambar 4.13	Hasil penyearahan saat terpasang dengan beban resistif.....	47

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Skripsi

Sejak dahulu angin sudah sangat berperan bagi kehidupan manusia. Dari pelayaran, pompa irigasi dengan menggunakan *windmill*, maupun ventilasi natural dalam pembangunan sebuah rumah atau gedung. Tidak seperti sinar matahari yang hanya bertahan dari pagi hingga sore hari, angin terus menerus ada sepanjang hari. Sejak akhir abad 19, penggunaan angin sebagai penggerak generator listrik terus berkembang hingga saat ini, tak dapat dipungkiri bahwa penggunaan angin sama populernya dengan penggunaan sinar atau panas matahari dalam hal untuk memproduksi tenaga listrik, selain karena sumbernya yang tidak akan habis, penggunaan angin sebagai sumber tenaga listrik tidak memberi dampak pada kerusakan lingkungan. Di Eropa, dimana pusat listrik tenaga angin sangat berkembang, sudah banyak rumah yang menggunakan tenaga angin untuk memproduksi listriknya sendiri. Di Indonesia sendiri, sudah banyak penelitian mengenai PLTB (Pusat Listrik Tenaga Bayu) ini sendiri, namun perkembangannya tidak seperti di Eropa, karena laju angin di Indonesia berada dibawah 5,9m/s yang sebenarnya kurang layak untuk dibuat pembangkit listrik tenaga bayu (skala besar), sedangkan dengan teknologi di Amerika atau Eropa, khususnya Jerman, dibutuhkan minimal 6m/s untuk menggerakkan baling-baling turbin angin, apalagi pembangunan sebuah pembangkit tenaga angin memakan biaya yang tidak sedikit juga lahan yang cukup luas. Untuk mengatasi kendala tersebut (biaya dan lokasi), perlu dibuat suatu simulasi pembangkit tenaga angin yang dapat digunakan oleh hampir berbagai kalangan.

Simulasi pembangkit tenaga angin sangatlah penting bagi perkembangan sistem konversi energi angin. Simulator ini mensimulasikan keadaan dinamik dari suatu pembangkit tenaga angin dalam suatu keadaan yang terkontrol tanpa harus menggunakan sumber angin dan pembangkitnya secara nyata. Simulator ini dapat digunakan sebagai aplikasi atau program penelitian untuk menggerakkan generator listrik seperti keadaan sebenarnya, dengan mereproduksi besar torsi yang dihasilkan oleh suatu laju angin tertentu. Simulator ini juga dapat dijadikan alat

pembelajaran untuk mengajarkan keadaan, pengoperasian, dan pengontrolan suatu turbin angin. Penggunaan simulator turbin angin bukan merupakan hal baru, dalam perkembangannya, simulator ini menggunakan motor arus searah yang dikontrol sebagai pengganti turbin angin yang akan menggerakkan roda-roda gigi yang selanjutnya menggerakkan rotor generator listrik.

### 1.2 Perumusan Masalah

Simulator turbin angin yang dideskripsikan dalam skripsi ini bertujuan untuk mereproduksi keadaan mekanik dari rotor turbin angin dan gear box pada kondisi dinamik. Simulator ini sendiri memiliki beberapa komponen penting berupa kecepatan angin yang variabel/berubah-ubah dan karakteristik steady state. Tujuan terpenting dari pembuatan simulator ini adalah untuk mencari cara yang sangat mudah untuk mendeskripsikan keadaan dinamik dari sebuah turbin angin agar dapat dipakai oleh para peneliti maupun *engineer* di bidang elektro. Untuk melakukan ini, digunakanlah penggerak mesin arus searah untuk mensimulasikan turbin angin pada pembangkit listrik tenaga bayu. Dengan adanya alat secara real, maka memungkinkan untuk melakukan pengambilan data secara real time.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan kurikulum pendidikan sarjana (Strata-1) Departemen Teknik Elektro jalur peminatan Tenaga Listrik Fakultas Teknik Universitas Indonesia, seminar dimaksudkan agar setiap mahasiswa dapat mengenali permasalahan teknik elektro dan dapat mencari penyelesaiannya dengan mempraktekkan pengetahuan yang telah didapat.

Tujuan dari Skripsi ini adalah :

1. Membuat suatu rancangan simulator turbin angin yang dapat digunakan sebagai alat uji untuk menunjang kegiatan belajar mengajar.
2. Mengoptimalkan penggunaan DC drive sebagai pengganti putaran turbin angin dalam simulator turbin angin.

#### 1.4 Batasan Masalah

Laporan skripsi yang dibuat penulis terbatas pada :

1. Sistem penggerak mesin arus searah yang diimplementasikan adalah suatu sistem berdaya rendah karena hanya digunakan sebagai sarana studi
2. Dalam implementasinya, penulis membandingkan antara hasil implementasi dengan teori yang telah ada untuk kemudian dianalisa keakuratannya
3. Semua hasil implementasi diukur dengan oscilloscope

#### 1.5 Sistematika Penulisan Skripsi

Bab satu adalah pendahuluan, yang menjelaskan mengenai latar belakang dibuatnya skripsi ini, perumusan masalah yang akan dihadapi dalam pembuatan skripsi dengan tema yang diambil, tujuan dibuatnya skripsi ini, batasan masalah yang akan dibahas pada skripsi ini, dan sistematika penulisan laporan Skripsi. Bab dua berupa landasan teori yang menjelaskan tentang *dc drive*, prinsip kerja motor arus searah, definisi dari *dc drive*, dan mode-mode operasi serta pengereman yang ada pada *dc drive*. Bab tiga berisi penjelasan tentang skema dan permodelan *dc drive* yang digunakan. Pada bab ini juga dibahas rencana implementasi dan rencana uji coba. Bab empat adalah penjelasan mengenai rangkaian implementasi dan uji coba. Pada bab ini juga terdapat analisa dan pembahasan atas data – data yang telah diperoleh. Bab lima adalah penutup dan kesimpulan dari skripsi ini.

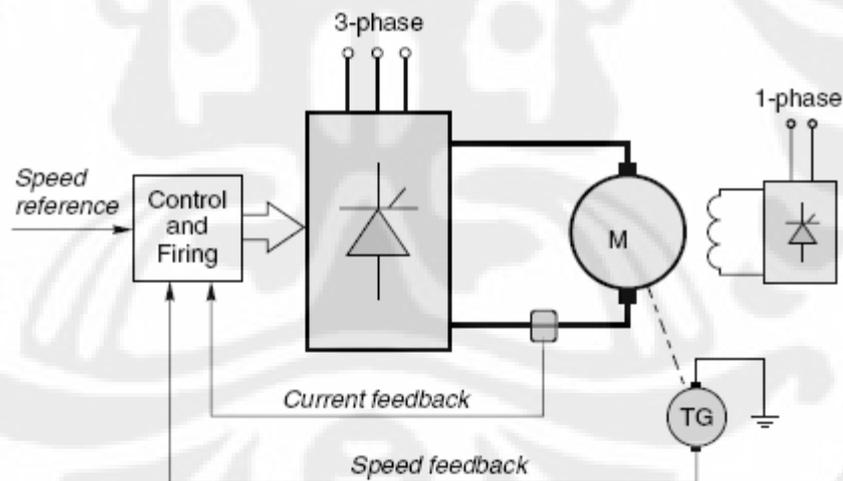
## BAB II

### DC DRIVE

Motor arus searah adalah sebuah mesin arus searah yang mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Meskipun penggunaan generator arus searah tidak banyak, namun motor arus searah memiliki peran penting dalam industri modern, terutama dalam bidang pengendalian. Motor arus searah dapat memberikan torsi awal yang cukup besar dan juga memungkinkan untuk pengendalian kecepatan dalam area yang luas.

Penggunaan motor arus searah sendiri sangat luas, motor-motor kecil untuk aplikasi elektronik seperti: pemutar kaset, pemutar piringan magnetik di harddisk komputer, dan kipas pendingin komputer. Untuk penggunaan yang lebih besar, motor arus searah juga digunakan untuk menggerakkan Kereta Listrik.

Umumnya, rangkaian pengendali mesin arus searah ditunjukkan pada gambar berikut [4]



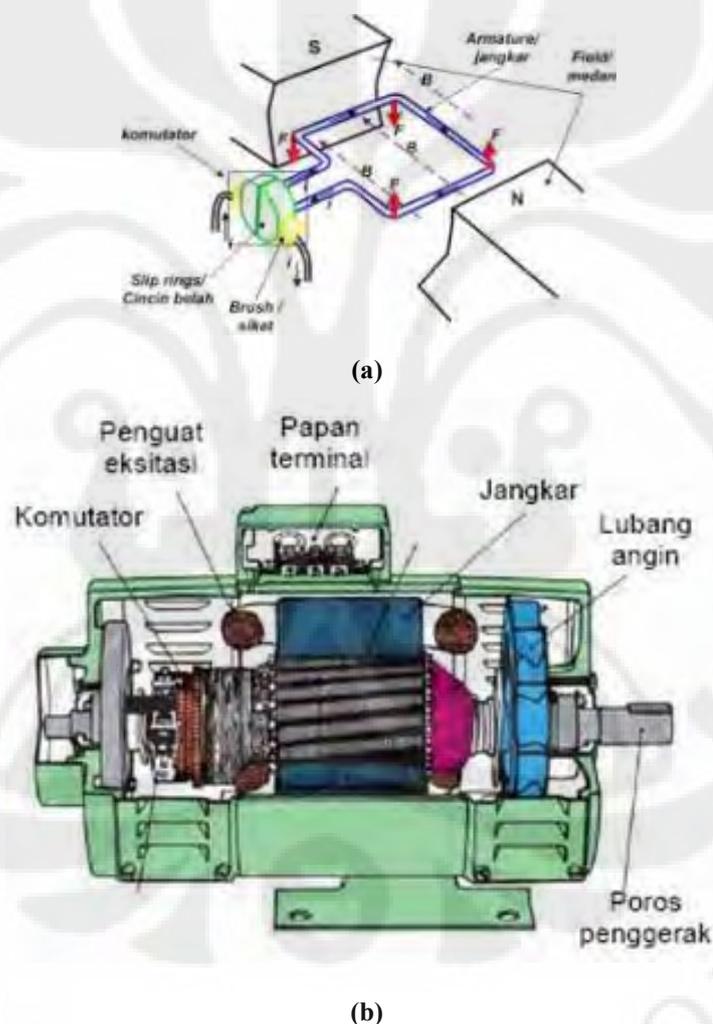
**Gambar 2. 1 - Diagram skematik pengendali kecepatan motor arus searah**

Rangkaian daya utama terdiri dari rangkaian jembatan 6 thyristor yang menyearahkan tegangan arus bolak-balik yang disuplai untuk memproduksi tegangan arus searah untuk disuplai ke rangkaian armatur. Sedangkan pengendali pada tegangan rendah digunakan untuk memonitor variabel (biasanya arus dan kecepatan rotor), dan untuk menghasilkan pulsa penyalaan (*firing pulse*) yang

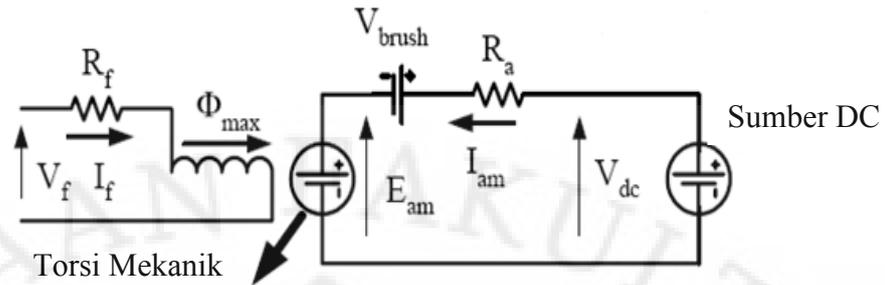
memungkinkan motor untuk menjaga kecepatan biarpun beban berubah-ubah. Referensi kecepatan (*speed reference*) pada gambar (2.1) biasanya adalah tegangan analog yang berkisar dari 0 (nol) Volt sampai 10 Volt dan didapatkan dari potensiometer yang kecepatan settingnya diatur secara manual atau dari sumber lain [1].

## 2.1 Prinsip Kerja Motor Arus Searah

Berikut adalah konstruksi dari motor arus searah beserta rangkaian ekivalennya,



Gambar 2. 2 - Konstruksi motor arus searah.

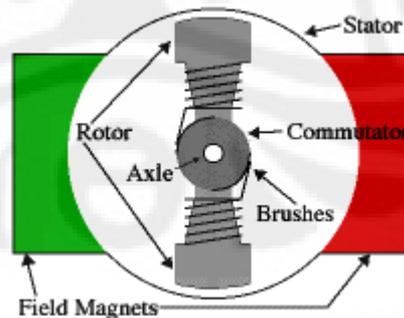


Gambar 2. 3 - Rangkaian ekivalen motor arus searah.

Gerak atau putaran yang dihasilkan oleh motor arus searah diperoleh dari interaksi dua buah medan yang dihasilkan oleh bagian ‘**jangkar**‘ (*armature*) dan bagian ‘**medan**‘ (*field*) dari motor arus searah. Dapat dilihat, pada bagian jangkar ditunjukkan sebagai magnet permanen (Gambar 2.1 (a)), sebenarnya dalam konstruksi motor arus searah, tidak harus selalu menggunakan magnet permanen, dapat juga digunakan belitan yang kemudian diberi arus searah dan menggunakan prinsip elektromagnetik. Motor adalah mesin yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, untuk itu bagian stator dari motor arus searah dicatu oleh sumber listrik arus searah, sehingga pada stator mengalir arus medan ( $I_f$ ), arus ini kemudian akan menghasilkan medan magnet arus searah yang besarnya [2]:

$$B = \frac{\mu N I_f}{2L} \tag{2.1}$$

Tidak hanya pada bagian stator, bagian rotor motor arus searah juga dicatu dengan listrik arus searah. Arus searah yang dicatu ke rotor diberikan melalui bagian yang disebut komutator, sikat, dan belitan yang terdapat pada rotor.

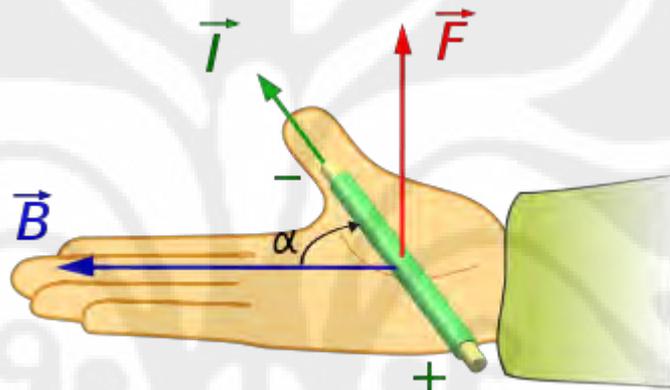


Gambar 2. 4 - Rotor pada motor arus searah

Komutator terbuat dari batang tembaga yang dikeraskan, yang diisolasi dengan bahan sejenis mika. Fungsi dari komutator ini adalah mengumpulkan arus listrik induksi dari konduktor jangkar dan mengkonversikannya menjadi arus

searah melalui sikat. Sedangkan sikat terbuat dari karbon, grafit, logam grafit atau campuran karbon grafit yang dilengkapi dengan pegas penekan dan kotak sikatnya. Pada intinya, komutator, sikat, dan cincin belah bekerja untuk memastikan bahwa listrik arus searah yang dicatu akan mengalir pada arah yang tetap meskipun belitan terus berputar. Karena rotor dicatu oleh sumber listrik arus searah, maka pada rotor akan menghasilkan aliran arus jangkar ( $I_a$ ).

Perlu disetujui kalau arah medan magnet dari kutub utara (N) ke kutub selatan (S). Arus jangkar kemudian akan berinteraksi dengan medan magnet stator. Interaksi ini akan menimbulkan suatu gaya yang dikenal dengan gaya Lorentz yang tegak lurus dengan arus jangkar maupun medan magnet.



Gambar 2. 5 - Aturan tangan kanan untuk menentukan gaya Lorentz.

Besar gaya Lorentz yang dihasilkan dapat dihitung sesuai rumus

$$F = B.I.l.\sin \alpha \quad (2.2)$$

Gaya Lorentz yang terbentuk pada sisi kumparan kemudian akan menghasilkan torsi yang akan memutar rotor. Torsi yang dihasilkan tersebut besarnya :

$$\tau = k.\phi.I_a \quad (2.3)$$

Perputaran rotor terhadap medan magnet yang ditimbulkan stator akan menyebabkan timbulnya GGL induksi yang besarnya :

$$E_a = k.n.\phi \quad (2.4)$$

Kemudian mengacu pada rangkaian ekuivalen motor arus searah, didapatkan persamaan :

$$E_a = V_{dc} - I_{am}.R_a \quad (2.5)$$

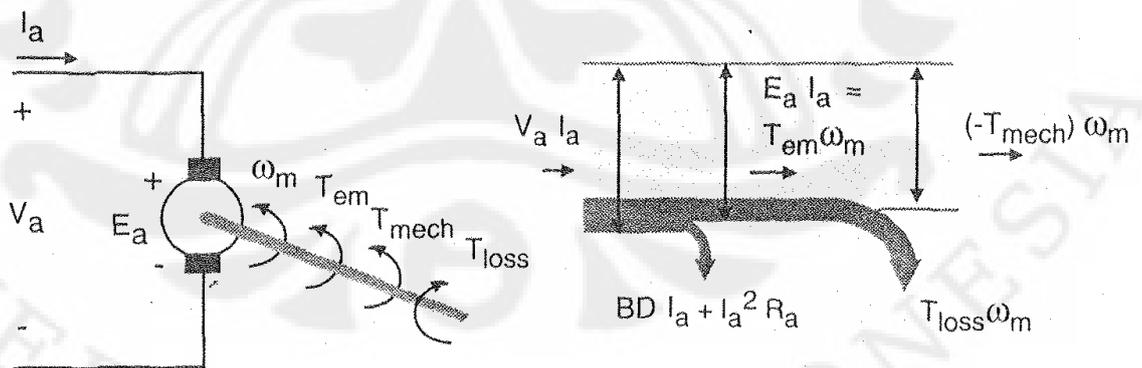
Sehingga dari persamaan (2.4) dan (2.5) akan didapatkan persamaan kecepatan putar rotor [2] :

$$n = \frac{V_{dc} - I_{am} \cdot R_a}{k \cdot \phi} \tag{2.6}$$

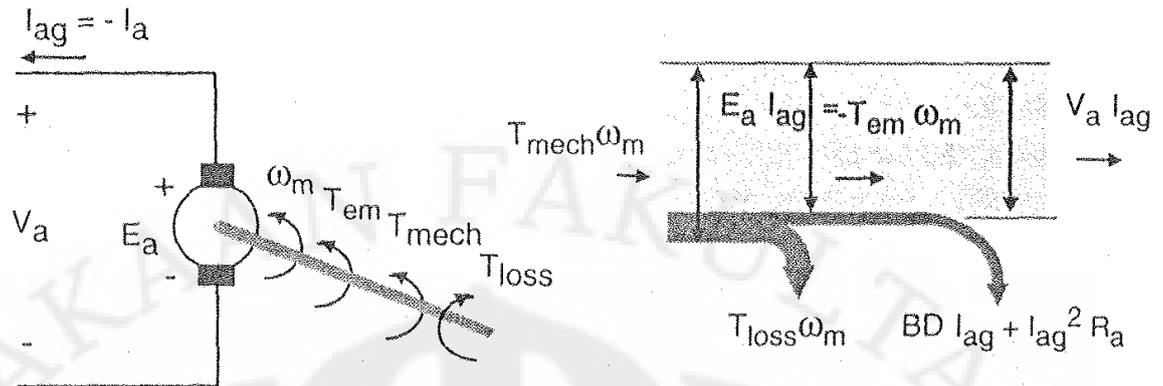
Dari persamaan diatas dapat diketahui, untuk mengendalikan kecepatan motor arus searah, dapat dilakukan dengan mengatur arus yang dicatu pada rotor atau fluks magnet pada stator.

**2.2 Moda Operasi**

Berdasarkan aliran daya, mesin listrik dapat beroperasi sebagai motor ataupun sebagai generator. Suatu mesin disebut sebagai motor apabila energi yang diambil dari suatu sumber listrik luar dikoneksikan dengan rangkaian armatur atau jangkar, kemudian diubah menjadi suatu energi mekanik yang memutar rotor. Disebut sebagai generator apabila energi dari putaran rotor akan menghasilkan energi listrik yang kemudian dialirkan ke rangkaian eksternal. Mesin arus searah sendiri adalah mesin bidirectional, artinya dapat menjadi motor maupun generator. Untuk berlaku sebagai motor, yang perlu dilakukan adalah memastikan bahwa besar tegangan **V** lebih besar daripada **E**. Jika ingin dijadikan sebuah generator nilai **V** harus lebih kecil dari nilai **E**. Dan jika diinginkan putaran mesin sebaliknya, hanya perlu diubah polaritas suplai armaturnya [3] .



Gambar 2. 6 - Motor arus searah



Gambar 2. 7 - Generator arus searah

Pada Gambar 2.6 dan 2.7,  $T_{\text{loss}}\omega_m$  adalah rugi-rugi mekanik, sedangkan  $BD I_{\text{ag}} + I_{\text{ag}}^2 R_a$  adalah rugi-rugi daya listrik.

Dari kedua operasi dasar mesin arus searah tersebut, dikembangkan moda operasi lebih banyak dalam aplikasi kecepatan variabel. Moda operasi tersebut adalah :

1. Motoring, telah dijelaskan pada subbab sebelumnya
2. Pengereman regeneratif dan dinamik
3. Plugging
4. 4 kuadran

### 2.3 Pengereman

Disini, pengereman dimaksudkan sebagai kondisi operasi dimana rotor dengan sengaja dikurangi kecepatannya dengan suatu peralatan elektrik. Pengereman elektrik biasanya dipakai agar didapat pengurangan kecepatan yang teratur.

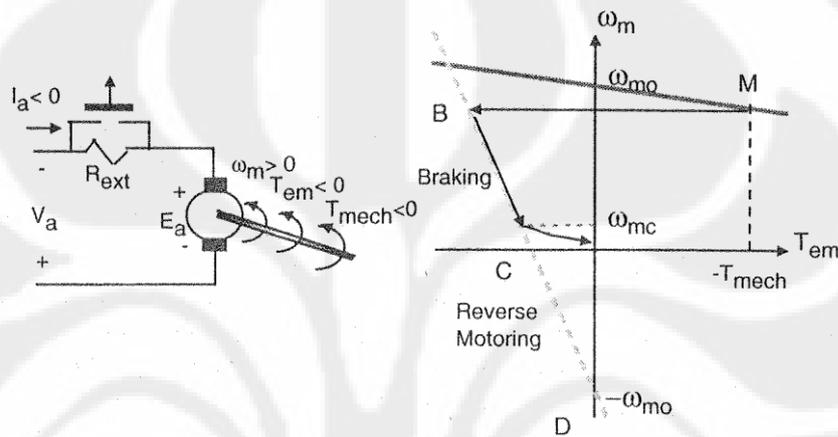
Perubahan mode operasi dari motoring ke pengereman dapat dilakukan dengan beberapa cara. Salah satunya adalah dengan pengereman teratur (*rapid braking*). Pengereman teratur dapat disebut juga dengan *plugging*, pengereman dinamik, dan pengereman regeneratif.

#### 2.3.1 Plugging

Pengereman teratur dapat dilakukan dengan membalik polaritas tegangan yang dipakai dan secara bersamaan diberikan resistansi pengereman eksternal ke

dalam rangkaian jangkar untuk membatasi arus jangkar. Karena arah putaran dan fluks akan searah dengan saat operasi motoring, polaritas tegangan induksi armatur akan sama seperti saat operasi motoring. Namun, arus armatur atau jangkar arahnya akan berkebalikan dari saat operasi motoring karena polaritas tegangan jangkar dibalik. Persamaan tegangan dari lilitan jangkar pada mode pengereman dengan metode ini adalah [3] :

$$-V_a = E_a - (R_{ext} + R_a)I_a \quad (2.7)$$



Gambar 2. 8 - Pengereman metode plugging

### 2.3.2 Pengereman Dinamik

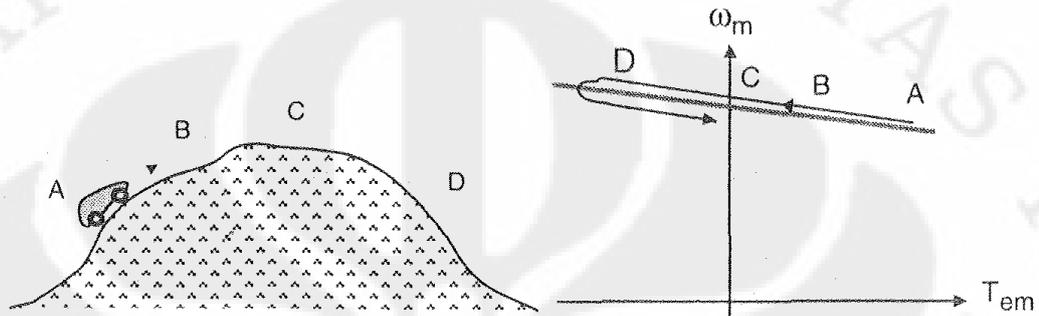
Pengereman dinamik merujuk pada pengereman pada keadaan generating dimana nilai tegangan armatur ( $V_a$ ) adalah nol.

Pada metode pengereman ini, perubahan dari keadaan motoring ke pengereman dinamik disebabkan karena tegangan suplai yang diputus dan diganti dengan suatu resistor pengereman disebatang terminal armatur. Dengan kecepatan rotor pada arah yang sama, tegangan induksi armatur akan tetap, namun karena tegangan suplai diputus, maka nilai arus armatur akan diberikan oleh tegangan induksi armatur atau mesin akan beroperasi sebagai generator. Energi kinetik yang dipulihkan dari rangkaian rotor akan didisipasikan dalam hambatan armatur dan hambatan pengereman.

### 2.3.3 Pengereman Regeneratif

Pengereman regeneratif mengacu pada pengereman dengan energi yang dipulihkan diatas kecepatan tanpa beban,  $n_{no}$ . Untuk menggambarannya,

diberikan sebuah kendaraan elektrik bergerak pada sebuah medan berbukit seperti pada Gambar (2.9) [3]. Pada titik A, mesin harus memberikan torsi untuk menahan gesekan dan gravitasi. Pada poin B, komponen gaya gravitasi berkurang karena lerengnya lebih landai. Dengan tegangan terminal tetap,  $I_a$  akan menurun namun kecepatan akan bertambah, perubahan operasi dari titik A ke titik B ditunjukkan pada garis torsi-kecepatan pada Gambar (2.8).

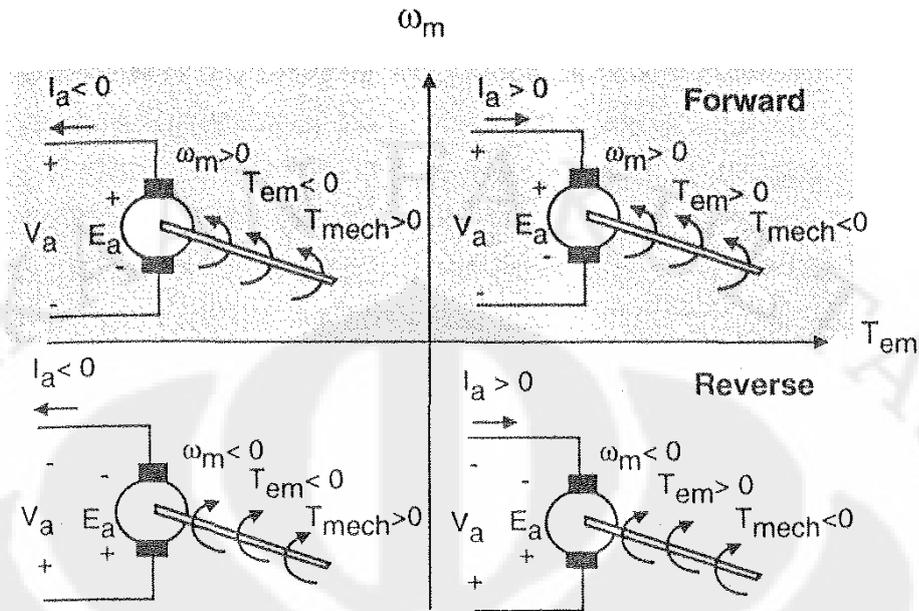


Gambar 2.9 - Pengereman regeneratif

Pada saat menuruni bukit, komponen gaya gravitasi membantu mengatasi gaya gesekan. Ketika gaya gravitasi = gaya gesekan,  $I_a$  akan bernilai nol (keadaan tanpa beban). Ketika turunan makin curam, komponen gaya gravitasi dapat lebih besar daripada gaya gesekan, memaksa kendaraan untuk bergerak maju. Nilai dari GGL induksi,  $E_a$ , naik melebihi nilai tegangan terminal,  $V_a$ , membalikkan aliran  $I_a$ , dan menyebabkan pembalikan aliran daya dari rangkaian armatur ke rangkaian eksternal. Arah torsi akan berkebalikan dari arah  $I_a$ , memperlambat akselerasi. Kemudian, energi listrik yang dipakai untuk menaikkan energi potensial untuk mendaki bukit dapat dikembalikan saat menuruni bukit dengan pengereman regeneratif ini.

#### 2.4 MODA OPERASI 4 KUADRAN

Kuadran pertama disebut forward motoring, pada kuadran kedua terdapat forward braking, reverse motoring pada kuadran ketiga, dan reverse braking pada kuadran keempat. Hubungan antara persamaan (2.3) dan (2.4) akan benar dalam hubungan yang bersifat aljabar, artinya perubahan tanda pada  $n$  akan dicerminkan oleh perubahan nilai  $E_a$  yang sesuai. Pada kuadran pertama nilai  $V_a$ ,  $E_a$ , dan  $I_a$  positif. Kecepatan dan torsi juga positif pada kuadran ini.



Gambar 2. 90 - Kondisi untuk mode 4 kuadran

Pada kuadran kedua torsi bernilai negatif karena arah torsi akan berlawanan dengan arah putaran rotor, karena nilai  $\theta$  dijaga tetap maka sesuai persamaan (2.3) nilai  $I_a$  akan berubah menjadi negatif selanjutnya aliran daya akan berlawanan-arah. Energi dari momentum rotor atau dari torsi luar akan diubah menjadi energi listrik, karena itu pada kuadran kedua, disebut juga dengan pengereman regeneratif [3]. Apabila keadaan pada kuadran kedua dipertahankan, maka mesin arus searah akan beroperasi sebagai generator.

Pada kuadran ketiga, reverse motoring,  $V_a$ ,  $E_a$ , dan  $I_a$  semuanya bernilai negatif. Torsi dan kecepatan juga bernilai negatif pada kuadran ini. Untuk menahan torsi tetap negatif dan daya mengalir dari sumber ke motor, GGL  $E_a$  harus memenuhi syarat  $|V_a| > |E_a|$ . Polaritas  $E_a$  dapat dibalik dengan mengubah arah aliran arus medan atau dengan membalik terminal jangkarnya. Pada reverse braking (kuadran 4) motor bergerak pada arah mundur/berkebalikan.  $V_a$  dan  $E_g$  akan terus bernilai negatif. Agar torsi bernilai positif dan energi mengalir dari motor ke sumber, arus armatur  $I_a$  harus positif. GGL induksi  $E_a$  harus memenuhi syarat  $|V_a| < |E_a|$  [4].

### BAB III

#### PEMODELAN PENGENDALI MOTOR ARUS SEARAH UNTUK SIMULATOR TURBIN ANGIN

#### 3.1 Pemodelan dan Konsep Simulator Turbin Angin Menggunakan Mesin Arus Searah

Pembangkit listrik tenaga bayu merupakan teknologi yang tidak asing dan penelitiannya sudah bisa dikatakan sangat maju, terutama di Benua Eropa dan Amerika. Di Indonesia, baru tujuh unit turbin angin yang terpasang pada tahun 2007 dan semuanya berada pada daerah pesisir. masing-masing di Pulau Selayar tiga unit, Sulawesi Utara dua unit, dan Nusa Penida, Bali, serta Bangka Belitung, masing-masing satu unit. Syarat – syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.1 - Kelas Angin

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas Angin	Kecepatan Angin m/d	Kondisi Alam di Daratan
1	0.00 – 0.02	
2	0.3 – 1.5	angin tenang, Asap lurus ke atas.
3	1.6 – 3.3	asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4 – 5.4	wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5 – 7.9	debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang.
6	8.0 – 10.7	ranting pohon bergoyang, bendera berkibar.
7	10.8 – 13.8	ranting pohon besar bergoyang, air plumpang berombak kecil
8	13.9 – 17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17.2 – 20.7	dpt mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20.8 – 24.4	dpt mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24.5 – 28.4	dpt merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28.5 – 32.6	menimbulkan kerusakan parah
13	32.7 – 36.9	tornado

Angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 meter per detik (m/detik). Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/detik, masing-masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi

Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Adapun kecepatan angin 4 m/detik hingga 5 m/detik tergolong berskala menengah dengan potensi kapasitas 10-100 kW [5]. Kecepatan angin dibawah 5,9 m/detik sebenarnya kurang layak untuk dijadikan pembangkit listrik, namun tidak berarti hal tersebut tidak bermanfaat.

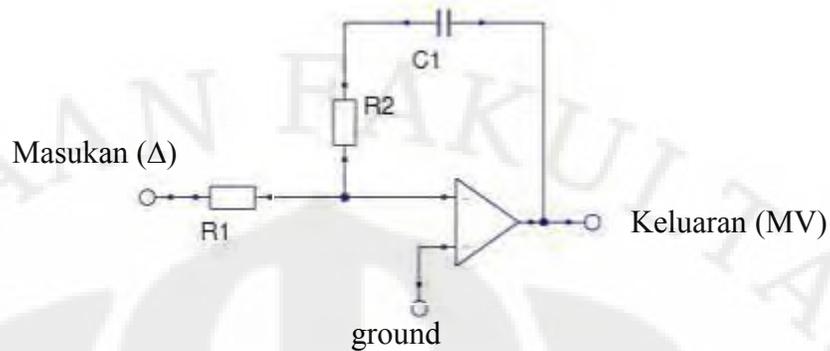
Simulator turbin angin ini dirancang dengan harapan dapat membantu dalam penelitian mengenai potensi energi angin di Indonesia. Dimana digunakan mesin arus searah sebagai pengganti baling-baling turbin angin, sehingga penelitian dapat dilakukan di dalam ruangan. Secara sederhana, sebuah generator akan dikopel dengan mesin arus searah, putaran mesin arus searah tersebut akan mensimulasikan putaran baling-baling turbin, yang kemudian akan memutar rotor generator tersebut. Pengaturan kecepatan putaran mesin arus searah akan menggambarkan putaran turbin yang fluktuatif karena perbedaan kecepatan angin. Kecepatan mesin arus searah tersebut akan diatur oleh suatu pengendali motor arus searah.

### **3.2 Sistem Pengendali Motor Arus Searah**

Perancangan Pengendali Motor arus searah ini dibagi dalam tiga system. Sistem yang pertama adalah pengendali PI (proporsional-integral), kemudian sistem kedua adalah modul penyulut rangkaian penyearah, dan terakhir adalah rangkaian penyearah itu sendiri.

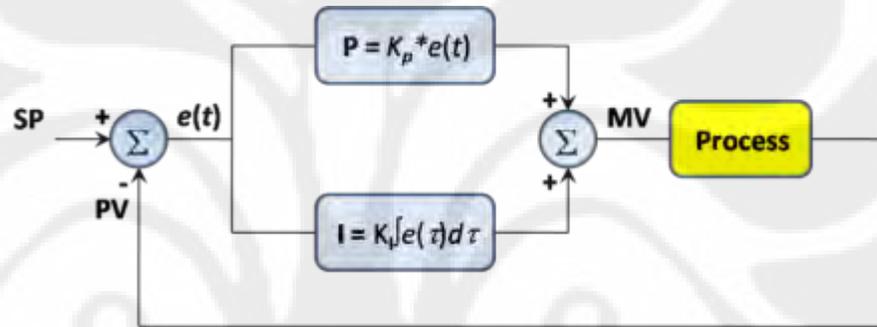
#### **3.2.1 Pengendali PI**

Pengendali proposional-integral (selanjutnya disebut pengendali PI) merupakan pengendali yang sering digunakan dalam industri proses karena modelnya yang sederhana. Pengendali PI merupakan gabungan dari pengendali proporsional dan integral, keduanya memiliki kelebihan yang menutupi kekurangan masing-masing pengendali.



Gambar 3.2 – Rangkaian Pengendali PI

Dan pengendali PI memiliki blok diagram seperti gambar dibawah ini



Gambar 3.3 – Blok Diagram Pengendali PI

Resistor R2 dari op-amp inverting menghasilkan aksi proporsional dan kapasitor C1 memberikan aksi integral. Keluaran dari pengendali PI diberikan dengan rumus :

$$MV = K_p \Delta + K_i \int \Delta dt \tag{3.1}$$

dimana :

MV = keluaran

Kp = penguatan proporsional

Ki = penguatan integral

SP = set point

PV = feedback

Δ = masukan (selisih antara set point, SP dengan feedback, PV)

Nilai penguatan pengendali PI sendiri dapat dihitung dengan rumus

$$G_c(s) = -\frac{MV}{\Delta} = -\frac{R_2 + \frac{1}{C_1 \cdot s}}{R_1} \quad (3.2)$$

$$G_c(s) = -\frac{R_2}{R_1} \left( \frac{1 + \frac{1}{R_2 C_1 s}}{1} \right) \quad (3.3)$$

$$G_c(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{\left( s + \frac{1}{R_2 C_1} \right)}{s} \quad (3.4)$$

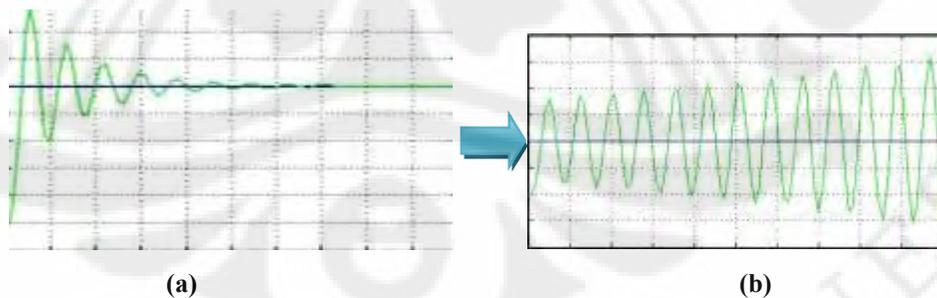
dimana :

$G_c(s)$  = nilai gain/penguatan

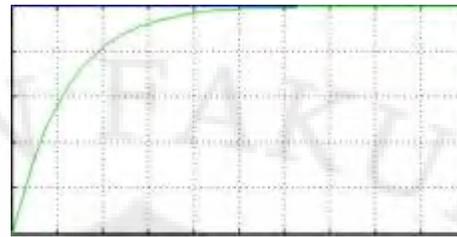
Pengaruh pengendali proporsional pada sistem adalah sebagai berikut :

1. Menambah atau mengurangi kestabilan sistem
2. Mereduksi (bukan menghilangkan) *steady state error*
3. Dapat memperbaiki respon transien

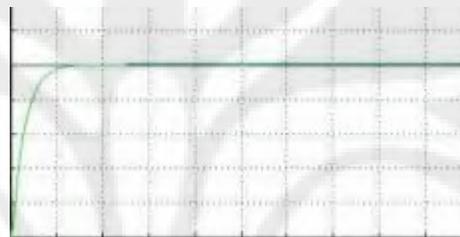
Gambar dibawah ini menunjukkan bagaimana pengendali proporsional mempengaruhi sebuah sistem



Gambar 3.4 – (a)  $K=1,2$  (stabil); (b)  $K=1,6$  (tidak stabil)



(a)



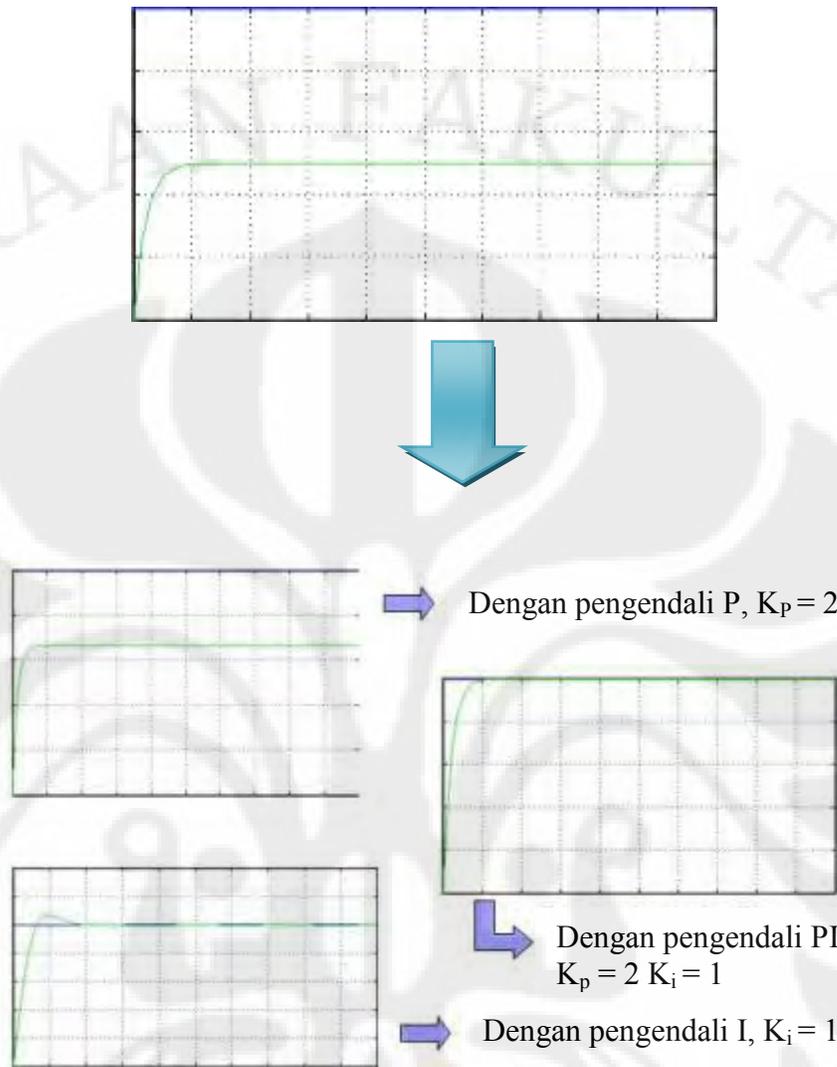
(b)

**Gambar 3.5 – (a) tidak diberikan pengendali P; (b) diberikan pengendali P (respon lebih cepat)**

Sedangkan pengaruh pengendali integral dalam suatu sistem adalah sebagai berikut :

1. Menghilangkan *error steady state*
2. Respon lebih lambat dibanding pengendali proporsional
3. Sistem dapat menjadi tidak stabil

Oleh karena itu, pengendali PI menggabungkan kelebihan dari kontroler proporsional dan integral, dimana pengendali PI dapat mereduksi error steady state hingga nol dan dengan respon yang cukup cepat. Gambar dibawah ini merupakan contoh pengaruh pengendali PI pada suatu sistem

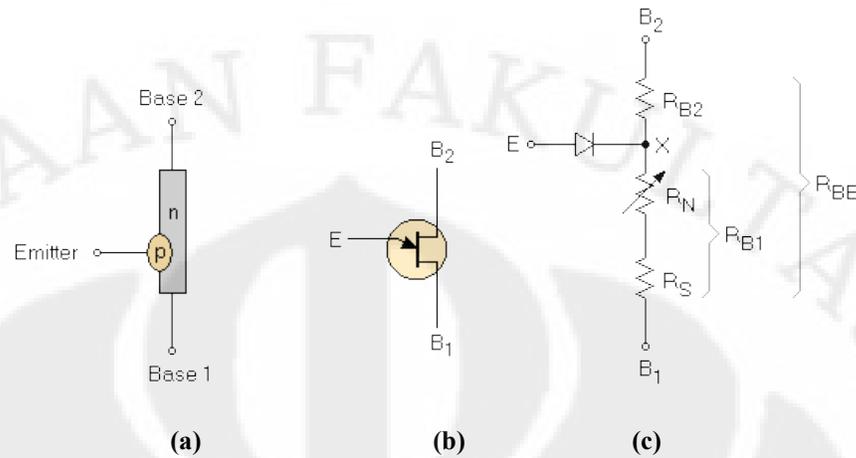


Gambar 3.6 – Pengaruh pengendali PI pada sistem

### 3.2.2 Modul Penyulut Dengan Menggunakan UJT

Uni Junction Transistor (selanjutnya disebut UJT) adalah piranti elektronik yang hanya mempunyai elektroda emitor dan basis tanpa adanya elektroda kolektor seperti yang terdapat pada transistor bipolar, sebagai pengganti elektroda kolektor diberikan tambahan sebuah elektroda basis sehingga piranti ini mempunyai dua basis dan satu emitor. UJT merupakan komponen aktif yang banyak digunakan sebagai pembangkit pulsa yang digunakan untuk pengontrolan.

Berikut adalah gambar susunan pada UJT :



Gambar 3.7 – (a) struktur UJT; (b) simbol UJT; (c) rangkaian ekuivalen

keterangan :

- $R_{B1}$  = tahanan dalam basis 1
- $R_{B2}$  = tahanan dalam basis 2
- $B_1$  = basis 1
- $B_2$  = basis 2
- $E$  = Emitter

Pada gambar 3.7(b) diatas, hambatan  $R_{B1}$  dan  $R_{B2}$  adalah setara dalam sebuah UJT. Terlihat pada hambatan  $R_{B1}$  terdapat symbol hambatan variabel, hal ini dikarenakan nilainya berubah sesuai dengan arus  $I_E$ . Jika dioda dalam keadaan *reverse bias* maka nilai  $I_E = 0$  sehingga nilai  $R_{B1}$  akan maksimum. Hambatan basis ( $R_{BB}$ ) adalah nilai dari  $R_{B1} + R_{B2}$ .

Jika suatu tegangan  $V$  diberikan pada terminal  $B_1$  dan  $B_2$ , maka pada UJT akan terjadi tegangan yang seakan membentuk pembagi tegangan antara  $B_1$ -X dan  $B_2$ -X. Nilai pembagi tegangan ini dipengaruhi oleh pembandingan yang disebut *stand-off ratio* ( $\eta$ ) dari UJT tersebut. Nilai dari *stand-off ratio* ini diberikan dengan rumus :

$$\eta = \frac{R_{Bx}}{R_{BB}} \tag{3.5}$$

dimana:

$\eta$  = stand-off ratio

$R_{Bx}$  = nilai hambatan  $R_{B1}$  atau  $R_{B2}$

Jika arus emitter  $I_E = 0$ , maka:

$$V_B' = \frac{R_{B2}}{R_{BB}} \cdot V_{BB} = \eta \cdot V_{BB} \quad (3.6)$$

dimana:

$V_{BB}$  = tegangan pada kedua terminal basis

Sehingga tegangan emitter dapat dihitung dengan rumus:

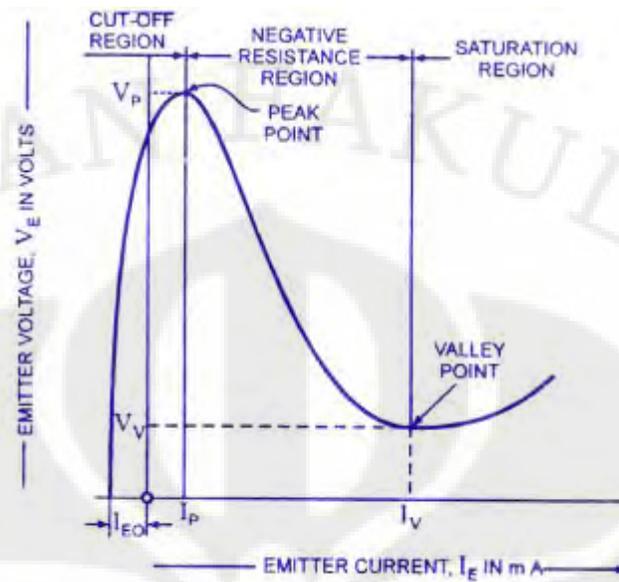
$$V_{EX} = V_B' + 0,6V = \eta \cdot V_{BB} + 0,6V \quad (3.7)$$

dimana:

$V_{EX}$  = tegangan emitter

0.6V = tegangan minimum untuk mengaktifkan dioda

Jika pada emitter diberikan tegangan sebesar  $V_{EB1}$  dimana besar  $V_{EB1} < \eta \cdot V_{BB}$  maka diode akan *reverse bias*, namung bila tegangan pada emitter  $V_{EB1} > \eta \cdot V_{BB}$  maka diode akan *forward bias*, sehingga akan terjadi aliran arus dari emitter ke  $B_1$ . Dengan mengalirnya arus tersebut, tegangan pada emitter akan menurun hingga ke suatu harga tertentu yang disebut *valley point*.

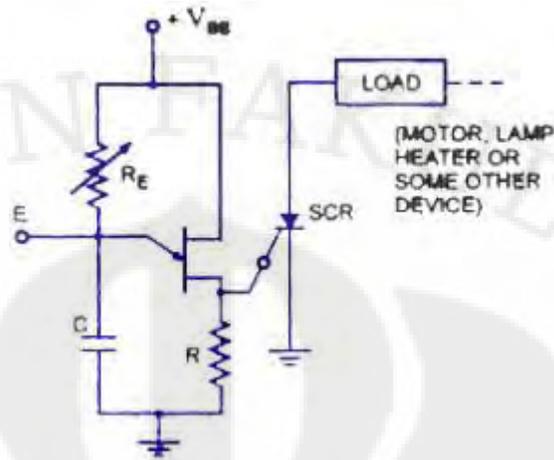


Static Emitter-Characteristic For a UJT

Gambar 3.8 – Karakteristik UJT

Daerah hambatan negatif (*Negative Resistance Region*) terjadi saat dioda mendapat tegangan maju yang mengakibatkan emitter memancarkan hole ke basis. Karena  $B_2$  bermuatan positif, maka hole akan menuju  $B_1$ . Karena jumlah muatan bebas pada  $B_1$  bertambah, maka konduktivitas akan naik sehingga nilai  $R_{B1}$  akan turun, akibatnya nilai  $I_E$  akan naik sedangkan nilai  $V_E$  akan turun. Selanjutnya nilai  $I_E$  yang terus bertambah akan diikuti dengan kenaikan  $V_E$  sedikit demi sedikit, daerah ini disebut daerah penjenuhan (*Saturation Region*).

UJT sering diimplementasikan sebagai bagian penting dari suatu rangkaian penyalan untuk men-*trigger* thyristor (SCR, Triac, dsb). Dibawah ini adalah contoh ketika UJT dipakai untuk men-*trigger* SCR, diberikan SCR karena disesuaikan dengan topik tulisan ini yang akan dibahas kemudian



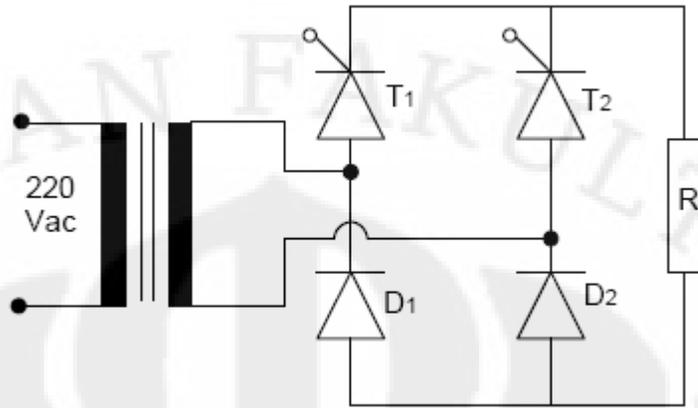
Gambar 3.9 – Rangkaian penyulut SCR

Potensio  $R_E$  digunakan untuk menentukan apakah divais dapat men-*trigger* atau tidak. Dengan menggunakan potensio tersebut, kita menjaga agar karakteristik UJT akan berada pada daerah diantara *Peak Point* dan *Valley Point*, atau dengan kata lain pada daerah resistansi negative (lihat Gambar 3.8). Jika tidak dapat melewati *Peak Point*, maka rangkaian penyulut ini tidak dapat bekerja. Dengan memvariasikan nilai  $R_E$ , maka kita dapat memvariasikan waktu konstan dari  $R_EC$  yang berarti kita dapat mengubah sudut penyalan ( $\alpha$ ), yang kemudian akan digunakan untuk mengendalikan SCR.

### 3.2.3 Rangkaian Penyearah Setengah Terkendali

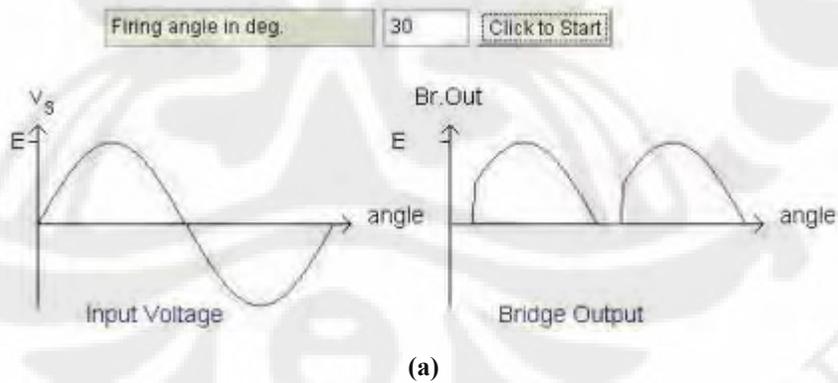
Penyearah yang terkendali penuh merupakan rangkaian yang hanya terdapat komponen penyearah yang terkendali, namun penyearah setengah terkendali terdapat komponen penyearah terkendali maupun yang tidak terkendali seperti dioda. Karena adanya dioda, memungkinkan untuk tegangan output tidak bernilai negatif. Pada penyearah setengah terkendali, hanya output positif yang terkena efek dari pengendalian, output negatif tidak karena akan dipotong menjadi nol.

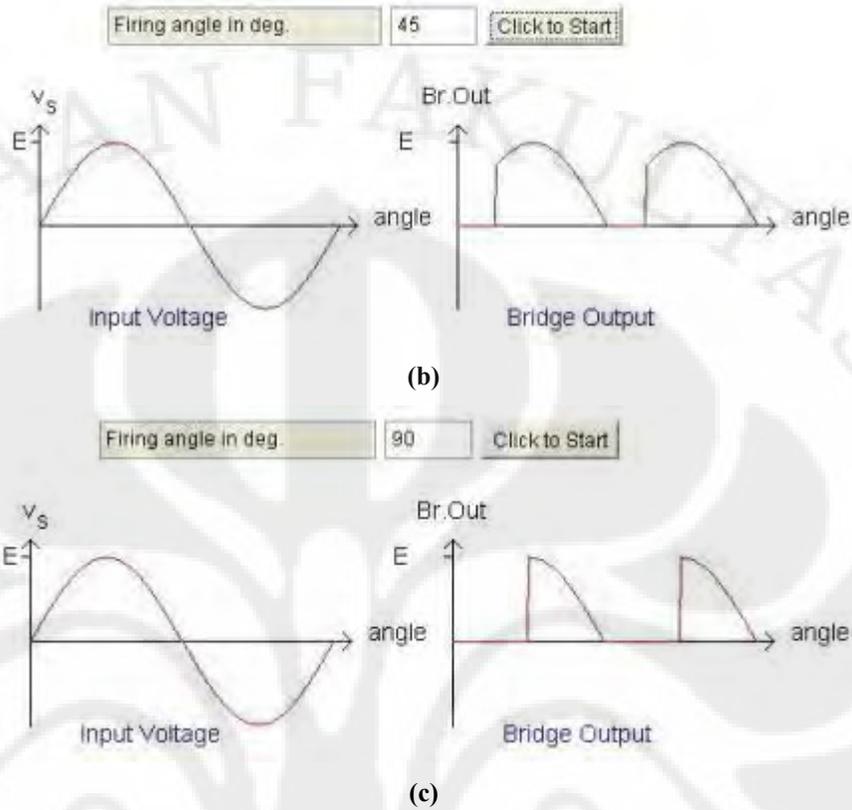
Penyearah gelombang penuh setengah terkendali dapat dirangkai dengan konfigurasi seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 3.10 – Konfigurasi penyearah setengah terkendali

Selama setengah siklus positif, thyristor T1 terbias maju. Ketika thyristor T1 dinyalakan pada  $\omega t = \alpha$ , beban dihubungkan dengan suplai masukan melalui T1 dan D2 selama periode  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ . Selama setengah siklus negatif tegangan masukan, thyristor T2 terbias maju dan bila thyristor T2 dinyalakan pada  $\omega t = \pi + \alpha$  maka arus akan mengalir ke beban melalui thyristor T2 dan diode D1. Besarnya nilai sudut penyalan ( $\alpha$ ) akan mempengaruhi bentuk gelombang keluaran, dibawah ini adalah contoh bentuk gelombang keluaran pada sudut penyalan =  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$

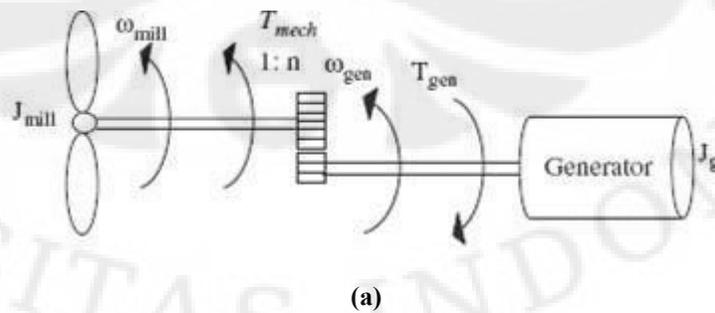


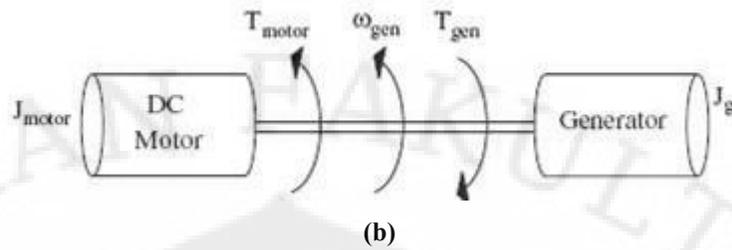


3.11 – Gelombang tegangan keluaran saat (a)  $\alpha = 30^\circ$ ; (b)  $\alpha = 45^\circ$ ; (c)  $\alpha = 90^\circ$

### 3.3 Pemodelan Pengendali Motor Arus Searah

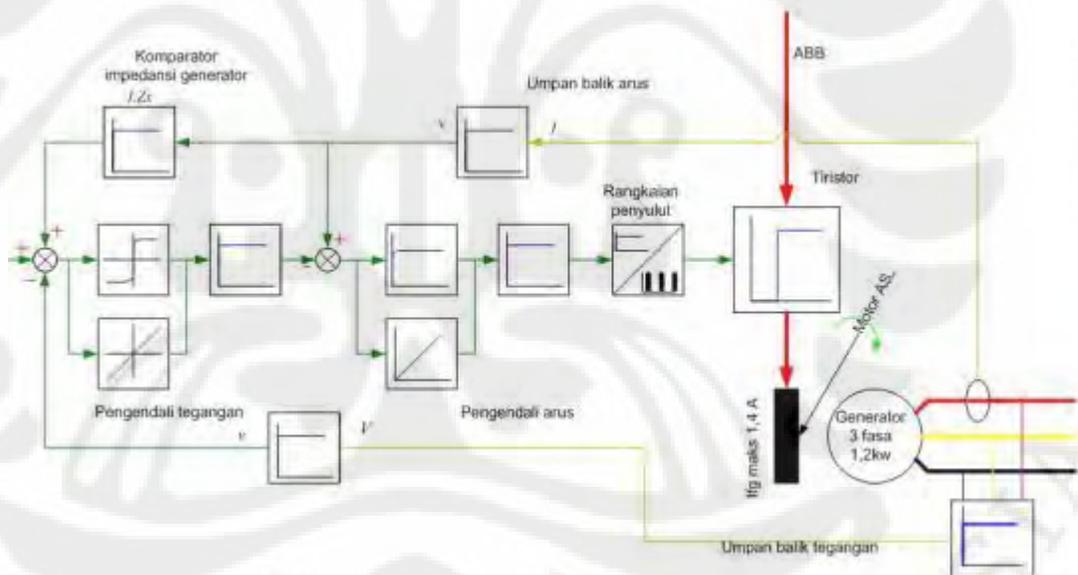
Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 3.1, tujuan tulisan ini adalah membahas mengenai turbin angin yang disimulasikan, dimana turbin akan diganti dengan motor arus searah dimana putarannya akan dikendalikan seakan-akan turbin angin yang putarannya berfluktuasi sesuai massa dan kecepatan angin yang bervariasi. Sehingga model simulator tersebut akan seperti pada gambar dibawah





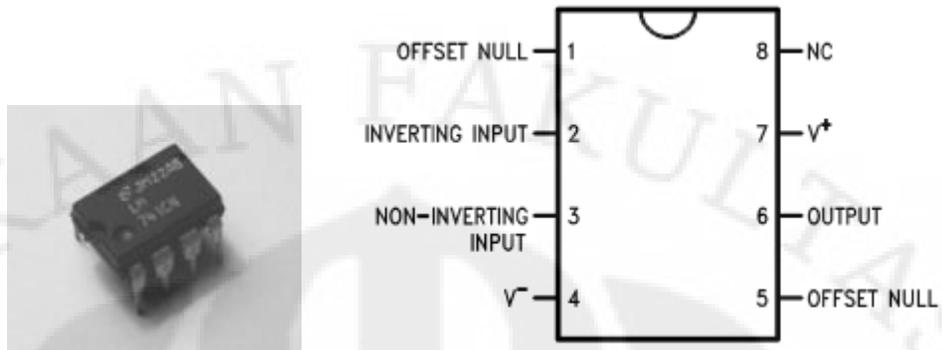
Gambar 3.12 – (a) Turbin angin sebenarnya; (b) Model simulator turbin angin

Untuk dapat mengendalikan kecepatan motor arus searah tersebut, digunakan sebuah pengendali motor arus searah. Seperti telah dijelaskan pada bab dan subbab sebelumnya, suatu pengendali motor arus searah memiliki tiga sistem utama, yaitu pengendali PI sebagai pengendali tegangan dan arus, rangkaian penyulut, dan rangkaian penyearah. Maka dari itu dibuatlah blok diagram dari model yang dibuat dan akan diujikan kemudian



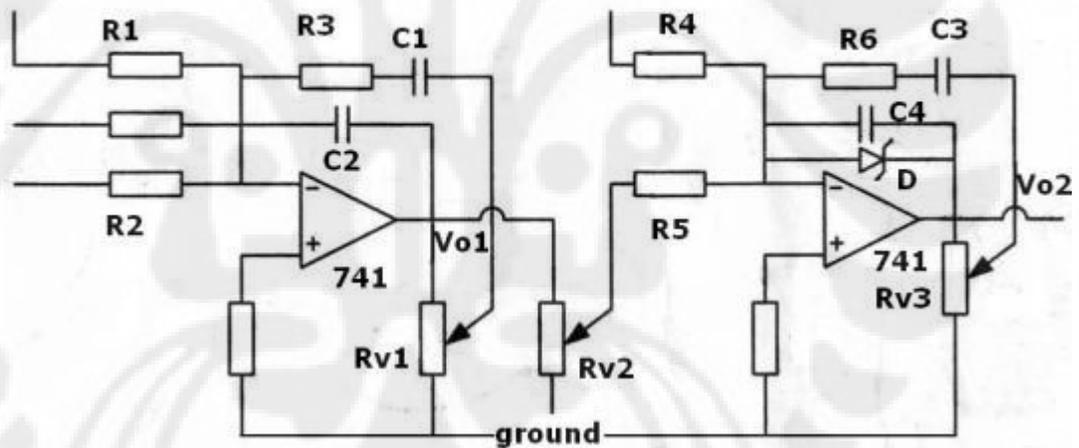
Gambar 3.13 – Blok diagram simulator turbin angin

*Set Point* untuk masukan pada pengendali PI divariasikan hanya pada angka 0-10 Volt, sehingga pada pengendali PI, digunakan op amp LM741



Gambar 3.14 – Op-amp LM741

Sehingga konfigurasi pengendali PI yang dibuat akan tampak seperti gambar dibawah ini.



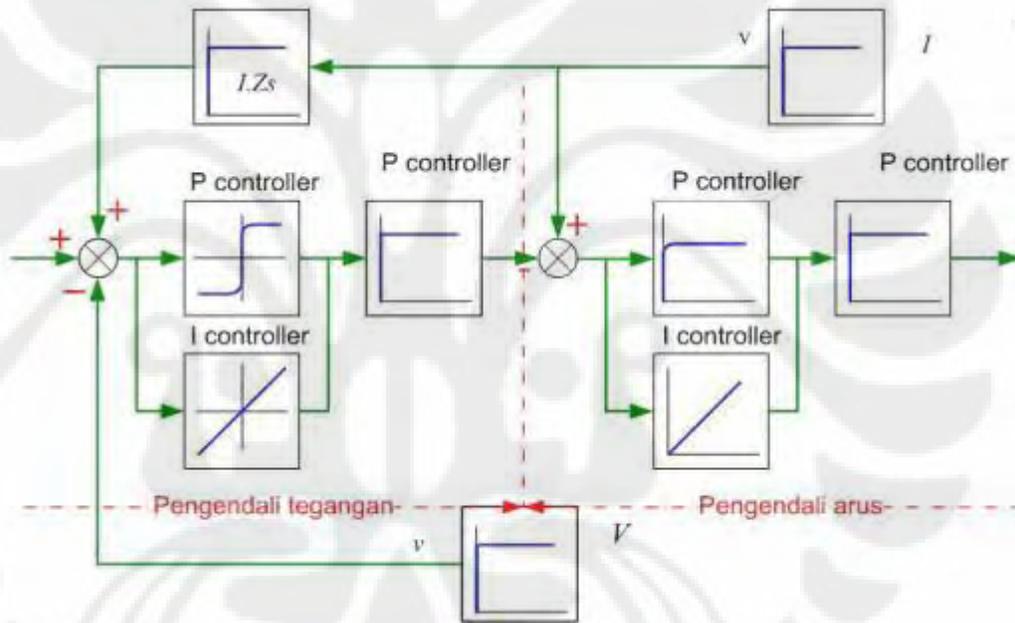
Gambar 3.15 – Konfigurasi Pengendali PI

Pada Gambar 3.15, potensio Rv1, Rv2, dan Rv3 digunakan untuk memvariasikan penguatan proporsional. Karena hanya sinyal positif yang akan digunakan sebagai sinyal masukan untuk rangkaian penyulut, maka harus dibuat sedemikian rupa sehingga keluaran Vo2 adalah positif tanpa adanya keluaran negative (keluaran negative dipotong menjadi nol), maka ditambahkan dioda zener D pada rangkaian pengendali PI kedua. Karena variasi tegangan hanya 0-10 volt, maka digunakan zener dengan karakteristik tegangan tidak lebih dari 10volt. Kapasitor C2

dan C4 berfungsi sebagai elemen penghalus. Karena diinginkan nilai penguatan op-amp adalah satu ( $Gain = 1$ ) maka nilai  $K_p$  (penguatan proporsional) haruslah 1, sehingga nilai  $R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = R$ , sehingga

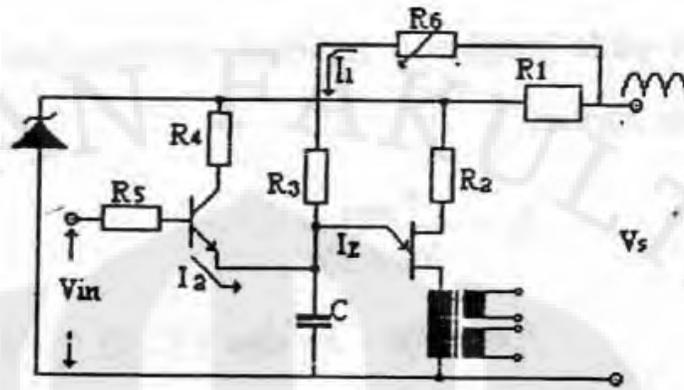
$$G = -\frac{R_2}{R_3} = -\frac{R_5}{R_6} = -\frac{R}{R} = -1 \tag{3.8}$$

Nilai penguatan dibuat -1 karena diinginkan tegangan inverteng keluaran yang nilainya tidak berubah dari tegangan masukannya. Dari penjelasan tersebut, maka akan sesuai dengan blok diagram pengendali PI yang telah didesain seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.16 – Blok diagram pengendali PI

Selanjutnya, nilai dari tegangan keluaran  $V_{o2}$  akan menjadi tegangan input ( $V_{in}$ ) untuk rangkaian penyulut. Rangkaian penyulut akan menggunakan UJT sebagai komponen utama dengan resistor yang seri dengan transistor, sehingga rangkaianannya akan menjadi seperti gambar dibawah.



Gambar 3.17 – Rangkaian penyulut dengan UJT

Tegangan masukan ( $V_{in}$ ) berasal dari tegangan keluaran kedua ( $V_{o2}$ ) pada pengendali PI, yang akan divariasikan dari 0-10 volt, sedangkan  $V_s$  adalah tegangan setengah gelombang. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, rangkaian penyulut akan menghasilkan sudut penyalan ( $\alpha$ ) untuk men-*trigger* gate dari SCR, dimana sudut penyalan tersebut ditentukan dari waktu konstan kapasitor C, sehingga selang waktu pembangkitan sudut penyalan akan sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya tegangan maupun arus yang diberikan pada kapasitor C ( $V_c$  dan  $I_c$ ).

Pengisian kapasitor dilakukan dari dua bagian, melalui  $I_1$  yang melewati hambatan seri R6 dan R3, serta melalui  $I_2$  yaitu arus yang dikendalikan transistor. Diinginkan tegangan kapasitor ( $V_c$ ) bernilai lebih atau sama dengan tegangan puncak ( $V_p$ ) UJT agar nilai hambatan basis pertama ( $R_{B1}$ ) akan turun (*lihat hal. 20-21*), sehingga UJT dapat bekerja karena berada pada daerah resistansi negatif. Nilai dari sudut penyalan yang dihasilkan dapat dihitung dari rumus

$$\alpha = \frac{1}{K_1 + K_2 \left( \frac{V_{in} \beta}{V_s} \right)} \quad (3.9)$$

Dimana  $\beta$  adalah penguatan transistor

Sudut penyalan yang telah dibangkitkan oleh rangkaian penyulut akan digunakan untuk men-*trigger* gate dari SCR pada rangkaian penyearah gelombang

penuh satu fasa setengah terkendali. Rangkaian penyearah yang digunakan seperti pada gambar 3.10, dimana dioda yang digunakan adalah dioda daya yang mampu menahan arus hingga 5 Ampere. Karena tegangan yang disearahkan adalah tegangan PLN 220 Vac, maka diberikan SCR 300 Volt. Cara kerja rangkaian penyearah gelombang penuh setengah terkendali ini telah dijelaskan pada subbab sebelumnya (*lihat subbab 3.2.3*).

### **3.4 Rencana Uji Coba**

Karena terdiri dari tiga sistem yaitu pengendali PI, rangkaian penyulut, dan rangkaian penyearah, maka pengujian akan dibagi dalam tiga tahapan, yaitu pengujian pengendali PI, pengujian rangkaian penyulut, dan pengujian ketika tiga sistem tersebut digabungkan.

#### **3.4.1 Pengujian Pengendali PI**

Pengujian pengendali PI ditujukan untuk mengetahui gelombang keluaran pada kedua terminal keluaran op-amp di masing-masing pengendali PI. Percobaan ini bertujuan untuk melihat sejauh mana pengaruh pengendali PI dalam sistem pengendali motor arus searah sebagai pengendali tegangan dan arus, juga untuk membandingkan antara teori mengenai pengendali PI dan dalam implementasinya pada praktek sebenarnya. Pada pengujian ini, juga akan diperlihatkan pengaruh dari perubahan *set point* pada gelombang di terminal keluaran dari tiap op-amp pada pengendali PI yang ada.

#### **3.4.2 Pengujian Pengendali PI dan Rangkaian Penyulut**

Pengujian ini meliputi pengujian rangkaian penyulut yang tegangan masukannya bersumber dari keluaran pengendali PI. Kegunaan dari rangkaian penyulut adalah menghasilkan pulsa dan sudut penyalaan untuk men-*trigger* thyristor, dalam hal ini adalah SCR. Oleh karena itu, pengujian ini bertujuan untuk melihat bagaimana gelombang pulsa yang dihasilkan oleh rangkaian penyulut ini. Dengan dipasangkan bersama pengendali PI, maka kita bisa melihat bagaimana

variasi keluaran dari pengendali PI akan mempengaruhi gelombang pulsa dan sudut penyalaan yang dihasilkan oleh rangkaian penyulut ini.

### 3.4.3 Pengujian Seluruh Sistem Pengendali Motor Arus Searah

Pengujian ini bertujuan untuk melihat bagaimana jika sistem pengendali motor arus searah yang telah dibuat dipasangkan pada suatu beban. Pada pengujian kedua, akan didapat sudut penyalaan yang akan digunakan untuk men-*trigger* gate dari SCR, dan pada pengujian tahap ketiga ini, kita akan melihat bagaimana pengaruh sudut penyalaan pada kinerja rangkaian penyearah gelombang penuh setengah terkendali ini. Rangkaian penyearah tersebut akan diberi tegangan 220 Vac (PLN) dan dilihat bagaimana tegangan bolak-balik tersebut disearahkan.

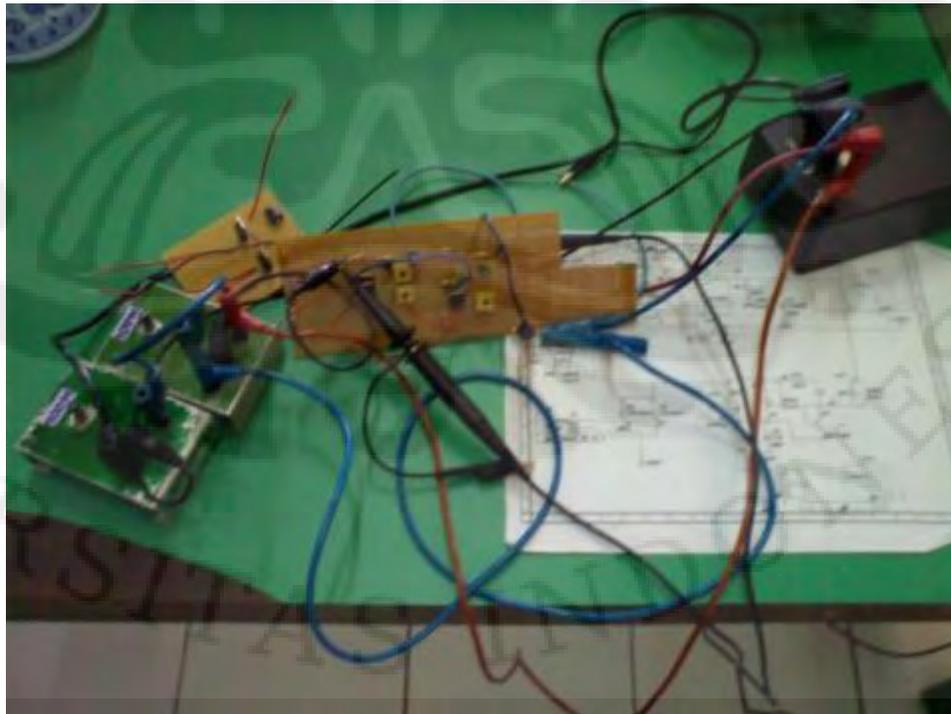
## BAB IV

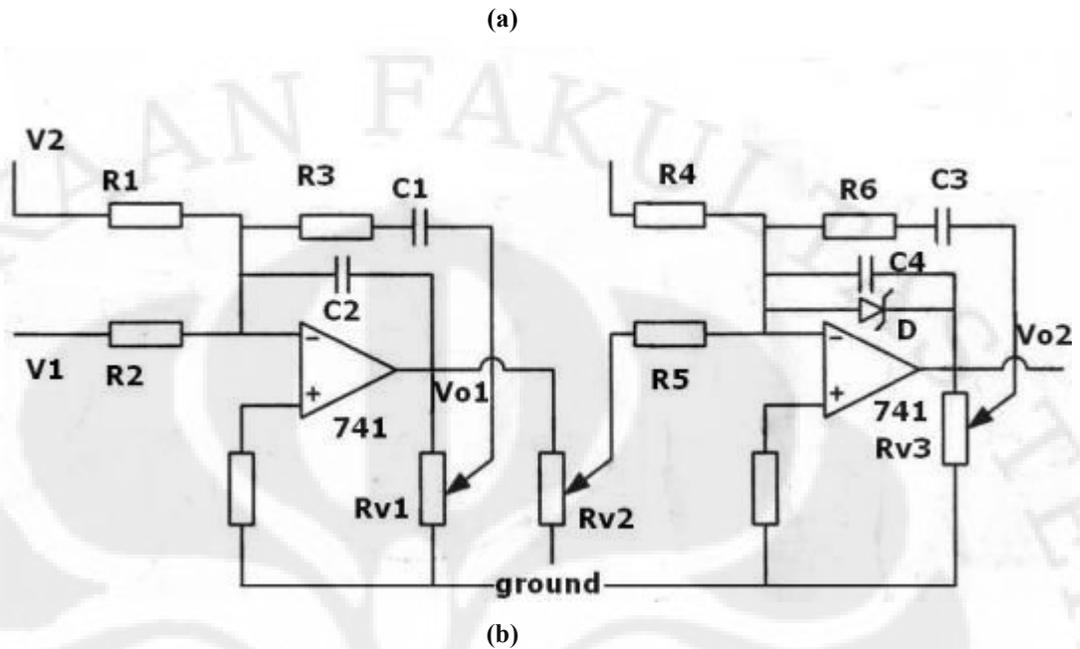
### UJI COBA PENGGERAK MESIN ARUS SEARAH

#### 4.1 Uji Coba Pengendali Proporsional-Integral

Pengujian pengendali proporsional-integral (PI) dilakukan menggunakan input tegangan arus searah 15 volt dengan catu op-amp 15 Vdc. Pengambilan data menggunakan oscilloscope dua channel, channel satu diatur pada 2 volt/cm dan channel kedua diatur pada 5 volt/cm. Pengujian ini bertujuan untuk melihat pengaruh tegangan pada set point dan tegangan feedback pada keluaran baik di op-amp pertama maupun op-amp kedua. Pada percobaan pertama, nilai tegangan set point dibuat tetap pada 5 volt dan tegangan feedback divariasikan pada -1 sampai -10 volt, percobaan kedua, tegangan feedback dibuat tetap pada harga -6 volt, dan tegangan set point divariasikan pada 1 sampai 10 volt.

Rangkaian akan dipasang seperti gambar dibawah, V1 adalah tegangan *set point* dan V2 adalah tegangan feedback, namun karena pengendali PI belum terpasang dengan rangkaian penyulut dan penyearah, maka variasi tegangan feedback dilakukan dengan menggunakan potensio 100k $\Omega$





Gambar 4.1 – (a) Pengujian pengendali PI; (b) Rangkaian ekivalen pengujian

4.1.1 Hasil Uji Coba Pengendali PI

Pengukuran yang dilakukan meliputi pengukuran pada V1, V2, Vo1, dan Vo2.

Berikut adalah hasilnya

Tabel 4.1 – hasil pengujian keluaran pengendali PI

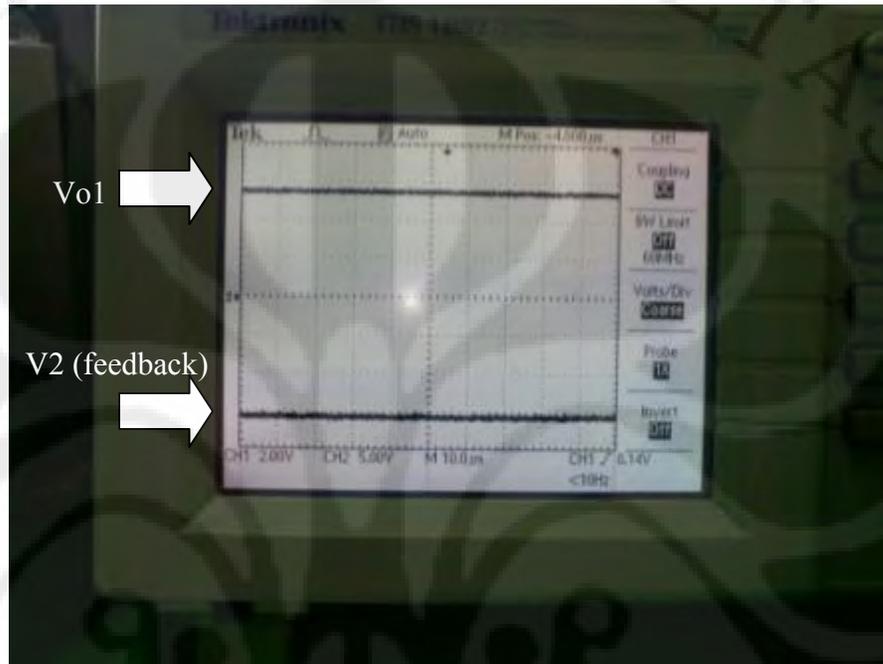
Percobaan 1

V1 (volt)	V2 (volt)	Vo1 (volt)	Vo2 (volt)
5	-1	-13	10
	-2	-13	10
	-3	-13	10
	-4	-13	10
	-5	-13	10
	-6	14	0
	-7	14	0
	-8	14	0
	-9	14	0
	-10	14	0

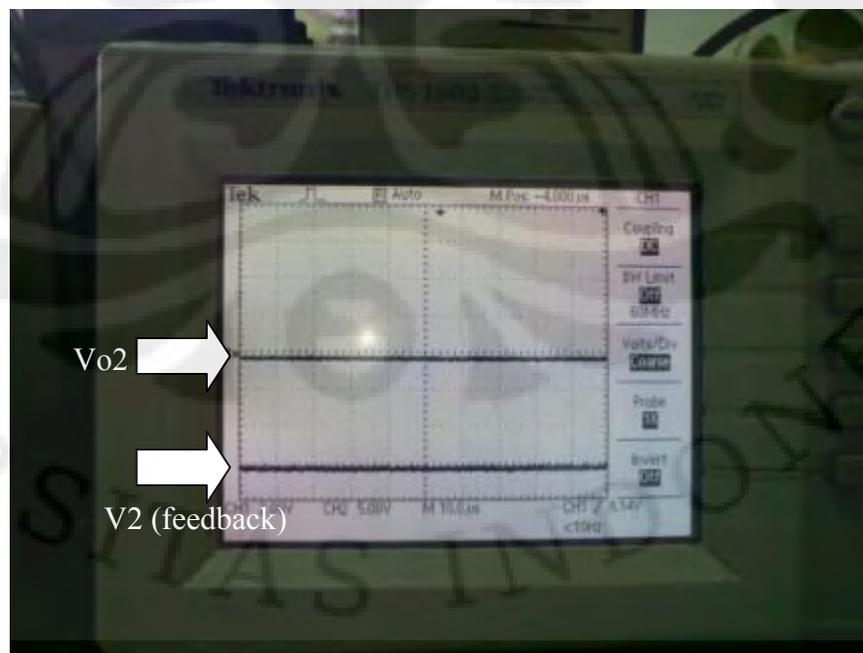
Percobaan 2

V1 (volt)	V2 (volt)	Vo1 (volt)	Vo2 (volt)
1	-6	14	0
2		14	0
3		14	0
4		14	0
5		14	0
6		-13	10
7		-13	10
8		-13	10
9		-13	10
10		-13	10

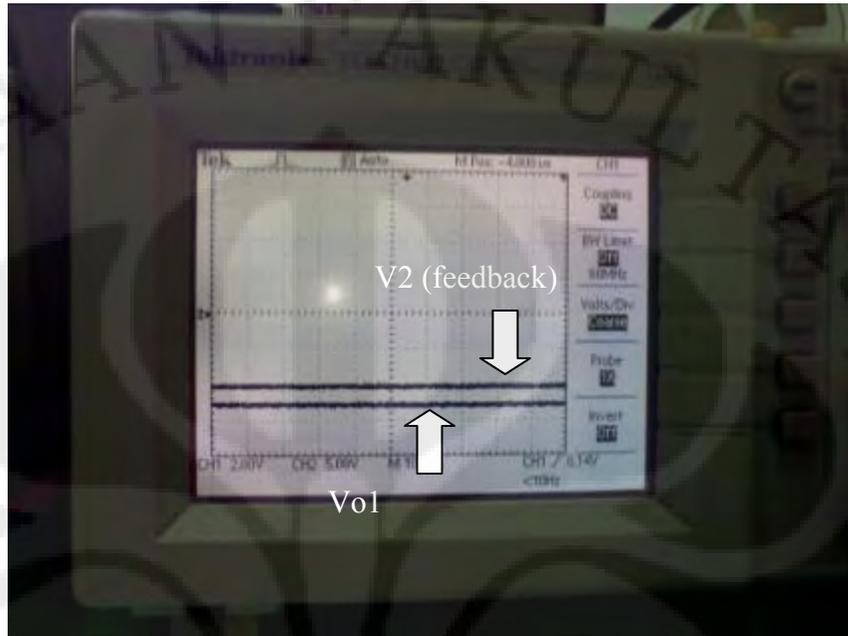
Dan untuk hasil pembacaan oscilloscope pada Percobaan 1, didapatkan hasil sebagai berikut



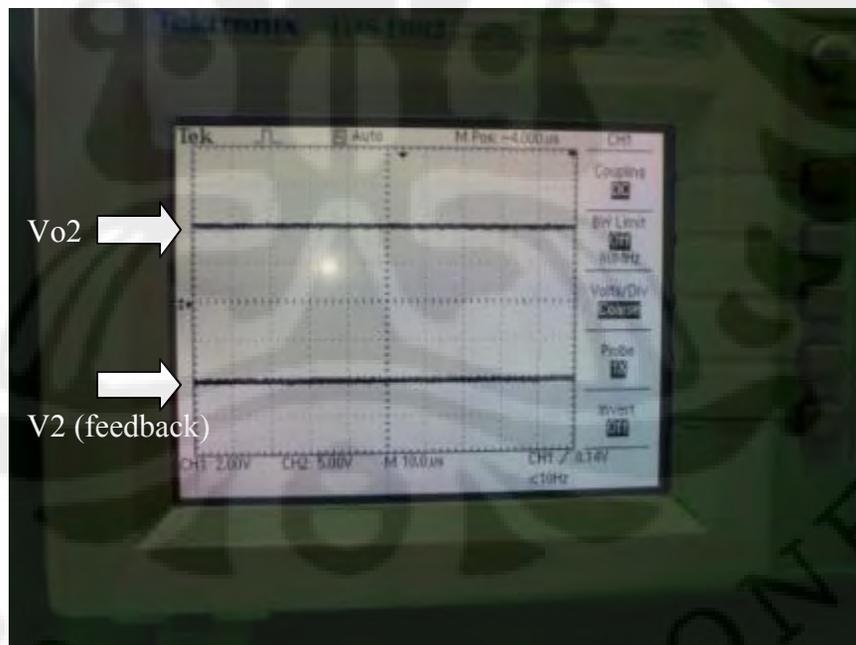
(a)



(b)



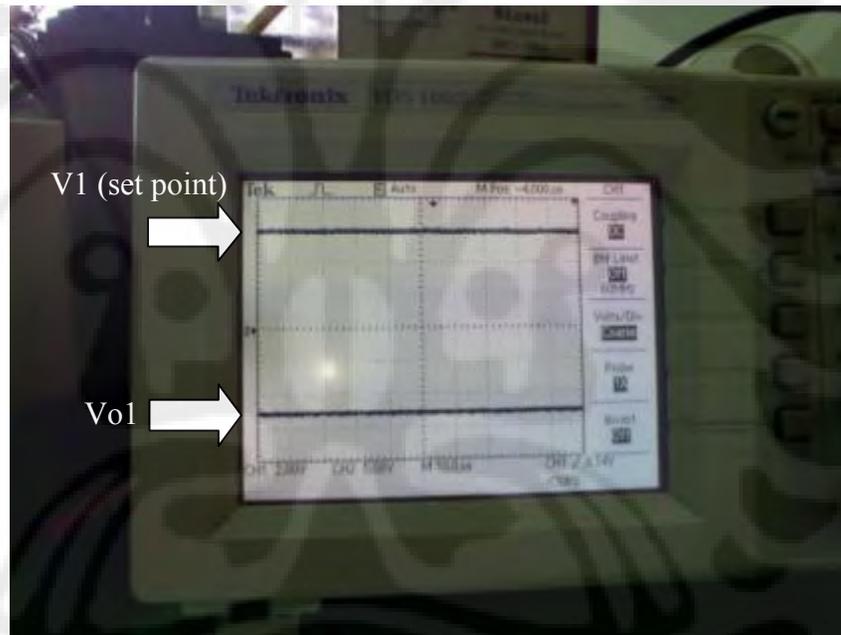
(c)



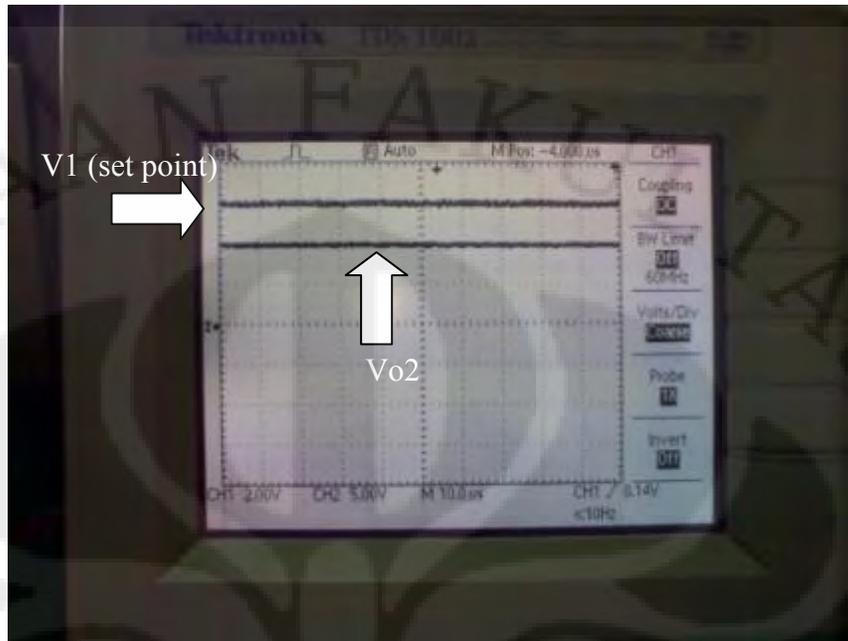
(d)

Gambar 4.2 – (a) – (d) Hasil pengujian tegangan keluaran dengan perubahan feedback

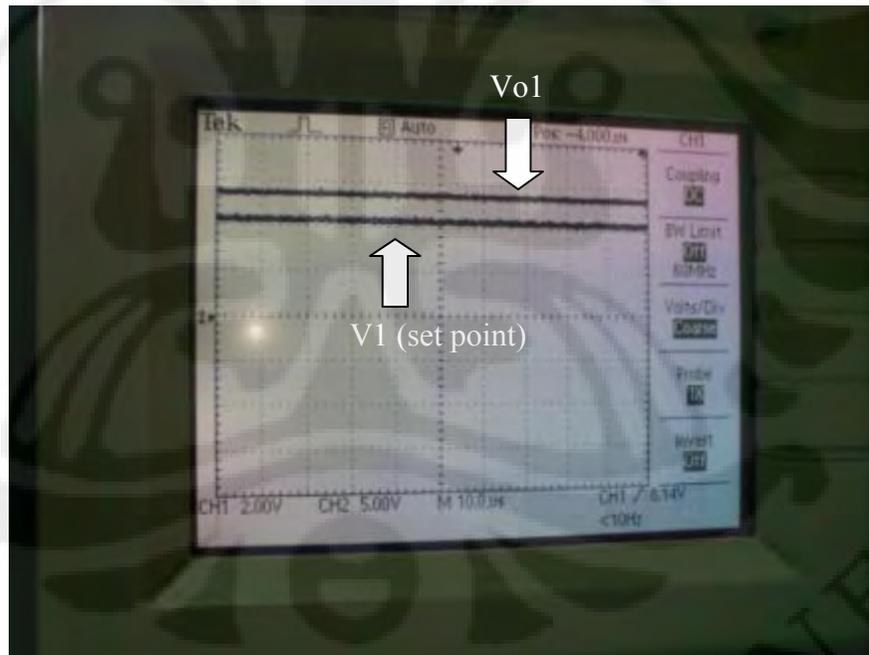
Seperti yang telah dijelaskan pada prosedur pengujian, pada gambar 4.2 (a), (b), (c), dan (d) yang divariasikan adalah tegangan feedback ( $V_2$ ), tegangan set point ( $V_1$ ) dibuat tetap pada 5 Vdc. Probe pada channel 1 terhubung ke terminal  $V_2$ , pada Gambar 4.2 (a) dan (b) nilai  $V_2$  adalah -6 Vdc, sedangkan pada gambar 4.2 (c) dan (d), nilai  $V_2$  adalah -4 Vdc. Pada gambar (a), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $Vo_1$ , dan menghasilkan keluaran 14 Vdc, pada gambar (b), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $Vo_2$  dan menghasilkan keluaran 0 Vdc. Pada gambar (c), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $Vo_1$ , dan menghasilkan keluaran -13 Vdc, pada gambar (b), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $Vo_2$  dan menghasilkan keluaran 10 Vdc.



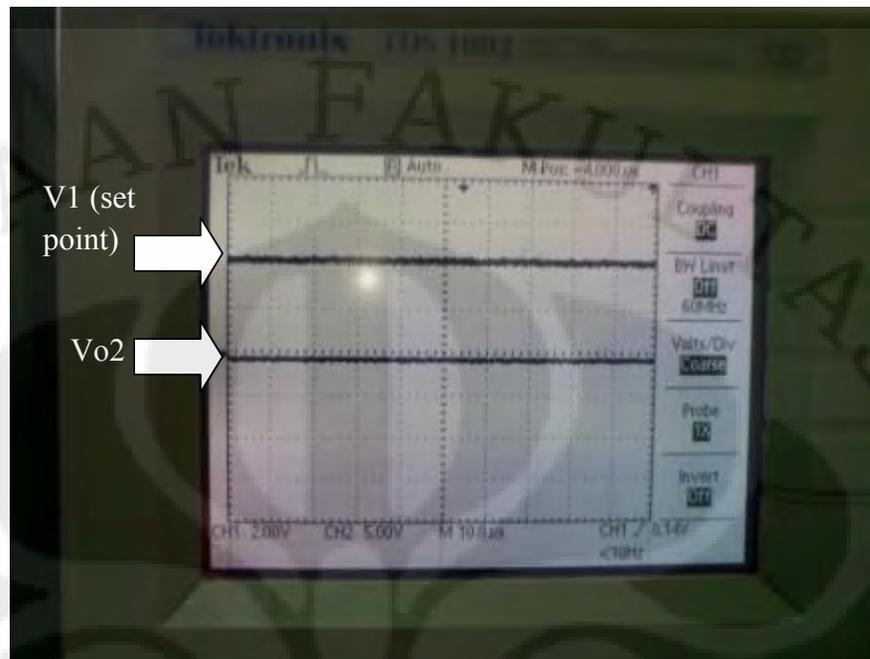
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.3 – (a) – (d) Hasil pengujian tegangan keluaran dengan perubahan set point**

Seperti yang telah dijelaskan pada prosedur pengujian, pada gambar 4.3 (a), (b), (c), dan (d) yang divariasikan adalah tegangan set point ( $V_1$ ), tegangan feedback ( $V_2$ ) dibuat tetap pada  $-6$  Vdc. Probe pada channel 1 terhubung ke terminal  $V_1$ , pada Gambar 4.2 (a) dan (b) nilai  $V_1$  adalah  $6$  Vdc, sedangkan pada gambar 4.2 (c) dan (d), nilai  $V_1$  adalah  $4$  Vdc. Pada gambar (a), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $V_{o1}$ , dan menghasilkan keluaran  $-13$  Vdc, pada gambar (b), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $V_{o2}$  dan menghasilkan keluaran  $10$  Vdc. Pada gambar (c), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $V_{o1}$ , dan menghasilkan keluaran  $14$  Vdc, pada gambar (d), probe channel 2 dihubungkan ke terminal  $V_{o2}$  dan menghasilkan keluaran  $0$  Vdc.

#### 4.1.2 Analisa Uji Coba Pengendali PI

Jika kita membandingkan teori dengan hasil pengujian diatas, dapat disimpulkan bahwa keakuratannya tepat. Keluaran pengendali PI kedua ( $V_{o2}$ ) maksimal memberikan angka  $10$  Vdc sedangkan nilai minimumnya adalah  $0$  Vdc, hal

ini disebabkan adanya dioda yang memotong tegangan keluaran dari op-amp kedua menjadi 10 Vdc saja. Dari hasil kita juga melihat jika nilai  $V_1 < V_2$ , maka  $V_{o2}$  akan selalu memberikan harga 0 Vdc, namun saat  $V_1 \geq V_2$ , maka  $V_{o2}$  akan memberikan harga 10 Vdc.  $V_2$  adalah tegangan feedback yang berguna sebagai pemberi informasi mengenai error pada sistem pengendali. Jika nilai error lebih besar daripada nilai set point, maka pengendali tidak akan bekerja sebagaimana mestinya dan yang menjadi set point adalah tegangan feedback  $V_2$ . Nilai  $V_{o2}$  bernilai nol karena dipotong oleh dioda, sebab kita tidak menginginkan nilai negatif pada keluaran  $V_{o2}$ , nilai  $V_{o2}$  hanya diharapkan positif karena  $V_{o2}$  akan menjadi tegangan inputan untuk rangkaian penyulut.

#### 4.2 Uji Coba Pengendali PI dan Rangkaian Penyulut

Pengujian tahap kedua ini bertujuan untuk melihat pengaruh perubahan tegangan keluaran pengendali PI, seperti yang telah dijelaskan pada percobaan pertama, terhadap gelombang pulsa yang dihasilkan oleh rangkaian penyulut. Sama seperti pengujian sebelumnya, pengendali PI diberikan input 15 Vdc dan op-amp dicatu dengan tegangan 15 Vdc.  $V_{o2}$  dari pengendali PI dihubungkan dengan terminal input positif dioda bridge pada rangkaian penyulut. Untuk tegangan setengah gelombang, inputan diberikan dari current transformer 220V/9V yang dihubungkan ke terminal dioda bridge.

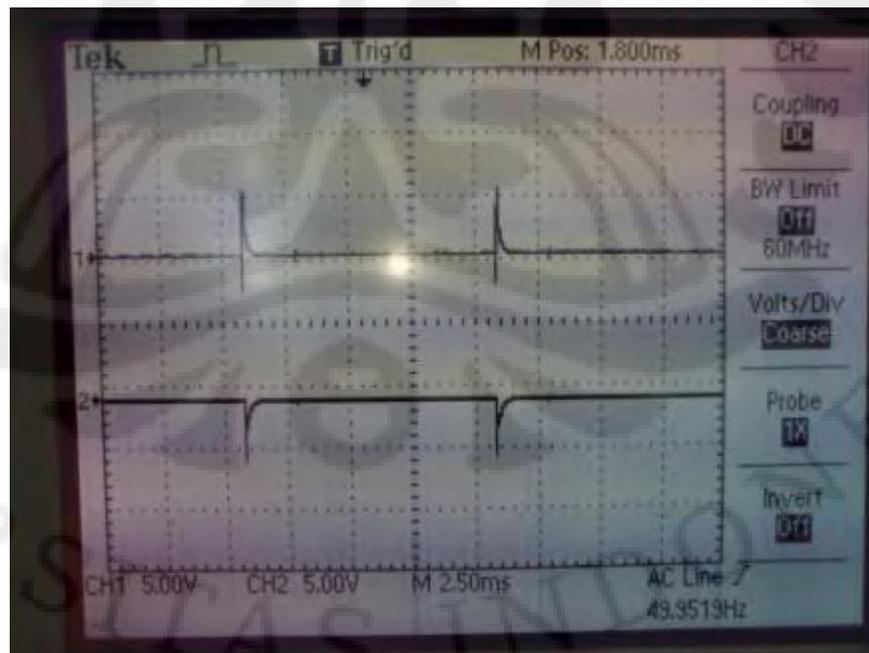
Untuk pengambilan data, digunakan oscilloscope dua channel, kedua channel tersebut digunakan untuk melihat gelombang pulsa yang dihasilkan oleh rangkaian penyulut. Berikut adalah gambar dari pemasangan rangkaian untuk pengujian.



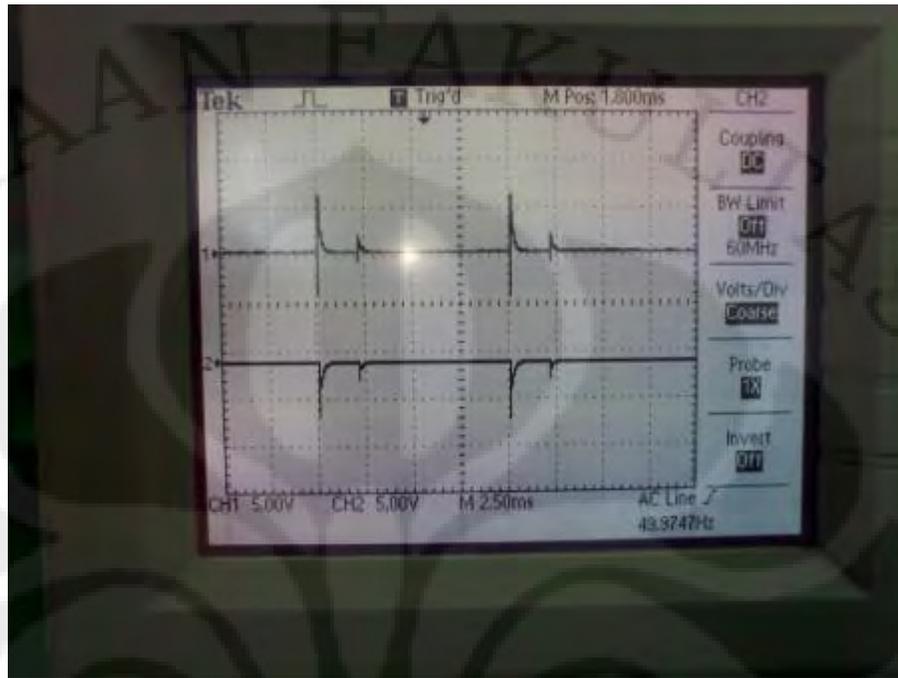
Gambar 4.4 – Pengujian Pengendali PI dan Rangkaian penyulut

#### 4.2.1 Hasil dan Analisa Uji Coba Pengendali PI dan Rangkaian Penyulut

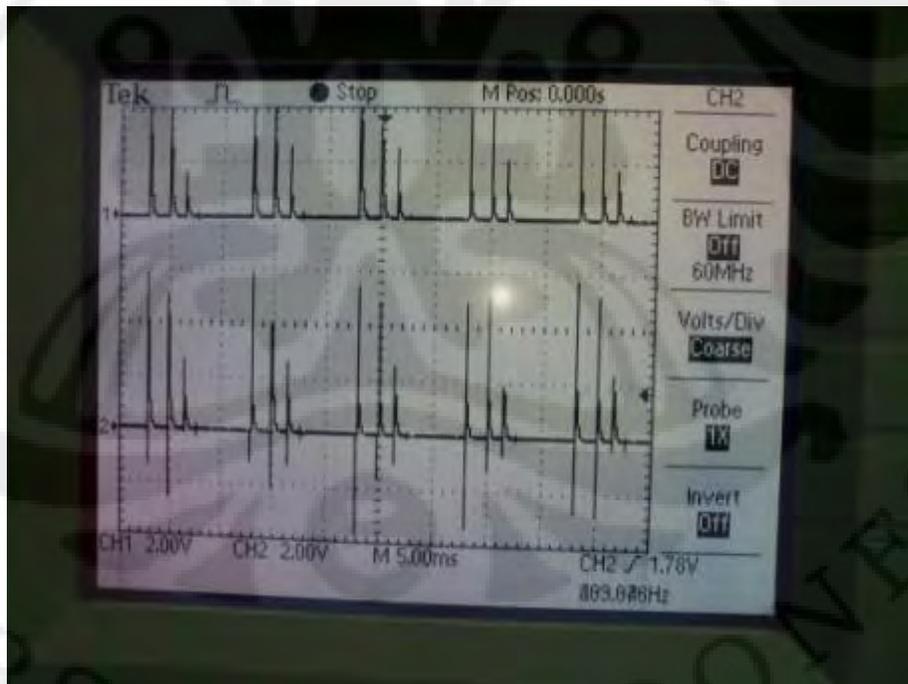
Berikut adalah pulsa keluaran dari rangkaian penyulut



(a)



(b)



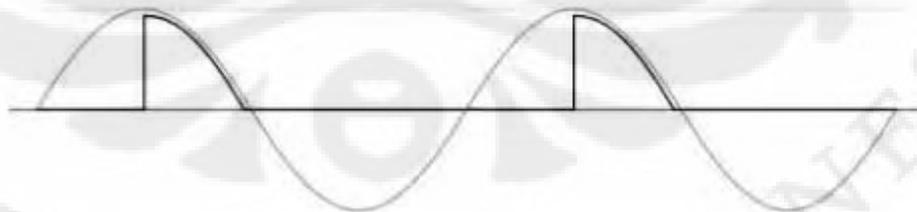
(c)



(d)

**Gambar 4.5 – (a) – (d) Pulsa keluaran rangkaian penyalut dengan perubahan tegangan masuk**

Meskipun gambar 4.5 (a) sampai (d) menunjukkan bentuk gelombang yang berbeda, namun semuanya berasal dari keluaran rangkaian penyalut yang serupa. Gelombang pulsa yang terlihat pada layar oscilloscope adalah gelombang yang akan menyearahkan tegangan arus bolak balik menjadi tegangan arus searah. Cara kerja pulsa tersebut bisa dilihat pada gambar dibawah



**Gambar 4.6 – Cara kerja pulsa keluaran rangkaian penyalut**

Perubahan bentuk pulsa penyearah tersebut dikarenakan perubahan variable potensio pada set point dan potensio pada tegangan masukan  $V_s$  (lihat gambar 3.17). Hal ini sudah sesuai dengan penjelasan pada bab sebelumnya bahwa perubahan pulsa

dipengaruhi oleh tegangan input  $V_{in}$  yang merupakan keluaran  $V_{o2}$  dari pengendali PI ( $V_{in} = V_{o2}$ ). Nilai sudut penyalaaan  $\alpha$  dihitung dengan rumus

$$\alpha = \omega t = 2\pi f.t \quad (4.1)$$

Dimana:

f : frekuensi tegangan

t : waktu

Sebagai contoh, melihat gambar 4.5 (a), harga frekuensi adalah  $\pm 50$  Hz dan harga  $t = 2,5\text{ms} = 2,5 \times 10^{-3}$  s, sehingga nilai  $\alpha$  adalah

$$\alpha = 2\pi f.t = 2\pi.50.2,5.10^{-3} = 0,25\pi = 45^\circ$$

### 4.3 Uji Coba Penggerak Mesin Arus Searah dengan Beban

Pada pengujian tahap akhir ini, semua rangkaian (pengendali PI, rangkaian penyulut, penyearah gelombang penuh setengah terkendali) dihubungkan menjadi kesatuan sistem penggerak mesin arus searah (*dc drive*). Tegangan arus bolak balik yang akan disearahkan di-*stepdown* menggunakan trafo isolasi dengan spesifikasi 220v/48v. Beban yang dipasangkan adalah lampu 10 watt diseri dengan resistor  $1\Omega/10\text{watt}$  yang kemudian diubah dengan motor arus searah 120 watt.

Hasil penyearahan berupa tegangan positif dan negatif arus searah diberikan kepada beban dan dikembalikan sebagai feedback. Tegangan positif akan dikembalikan sebagai feedback arus sedangkan tegangan negatif akan dikembalikan sebagai feedback tegangan pada pengendali PI. Tegangan keluaran pada current transformer yang digunakan sebagai tegangan masuk  $V_s$  pada rangkaian penyulut dipakai pada nilai 9 volt pada awalnya, namun karena nyala lampu sangat redup, akhirnya dipakai pada 12 volt. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan nilai  $V_s$  dan  $V_{in}$  pada rangkaian penyulut, sehingga akan mengakibatkan perubahan pulsa yang mempengaruhi tegangan arus searah yang dihasilkan pada rangkaian penyearah setengah terkendali.

Penyusunan rangkaian pada pengujian ini adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.7 – Rangkaian pengujian dengan beban**

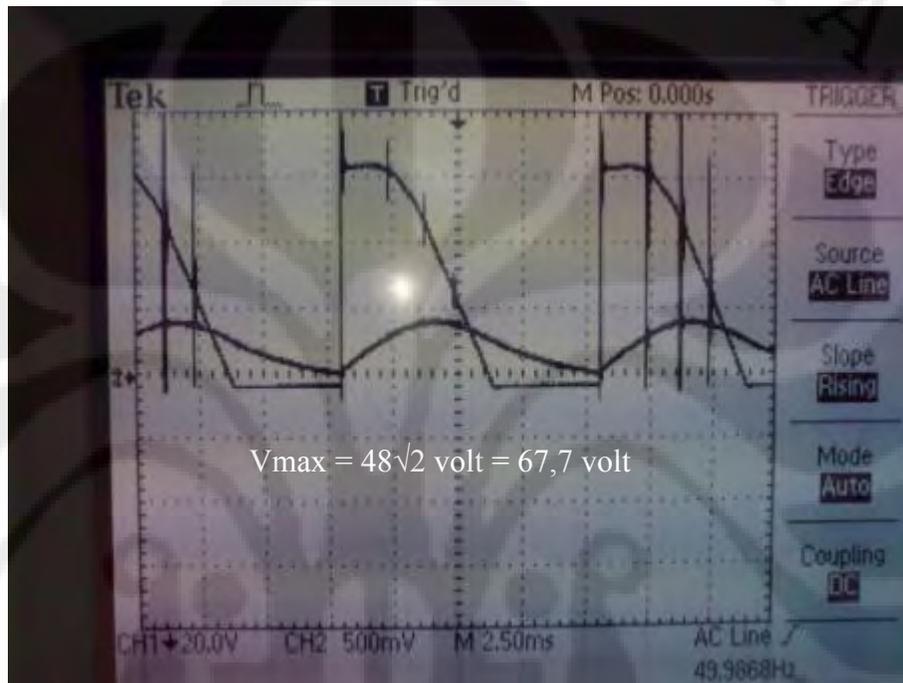
#### **4.3.1 Hasil Uji Coba Penggerak Mesin Arus Searah dengan Beban**

Pada prosedur percobaan diatas, dijelaskan bahwa tegangan current transformer diubah dari 9 volt menjadi 12 volt karena nyala lampu sangat redup, lagipula, saat beban lampu diganti dengan motor arus searah, putarannya sangat lambat dan sulit diukur oleh tachometer.



**Gambar 4.8 – Lampu menyala redup**

Setelah diganti dengan 12 volt, kecepatan putaran motor arus searah dapat mencapai 2000 rpm sehingga lebih mudah untuk diukur. Dengan melihat gambar 4.5 (a) kita bisa mendapatkan nilai sudut penyalaan yaitu sebesar  $45^\circ$  (telah dihitung sebelumnya), dengan besar sudut ini, maka hasil dari penyearahan tegangan arus bolak balik akan didapat seperti pada gambar 4.8



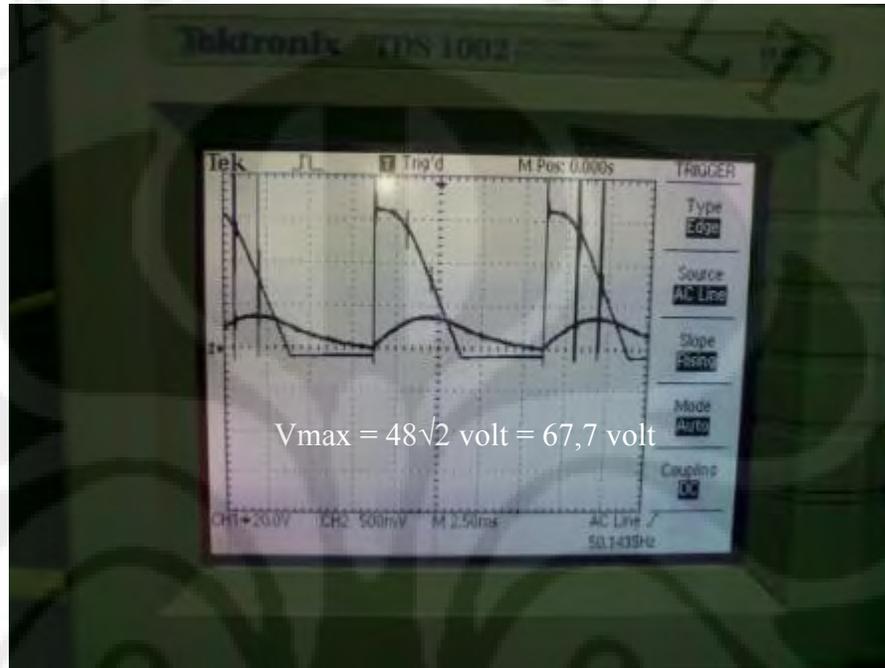
Gambar 4.9 – Hasil penyearahan dengan sudut penyalaan  $\alpha = 45^\circ$

Dengan tegangan keluaran tersebut, putaran rotor motor arus searah yang didapat adalah



Gambar 4.10 – Kecepatan motor arus searah pada sudut penyalaan  $\alpha = 45^\circ$

Kemudian pengukuran dilakukan kembali dengan nilai sudut penyalan pada  $90^\circ$  sehingga akan menghasilkan tegangan keluaran seperti pada Gambar 4.10 (a) dan kecepatan motor seperti pada gambar 4.10 (b)



(a)

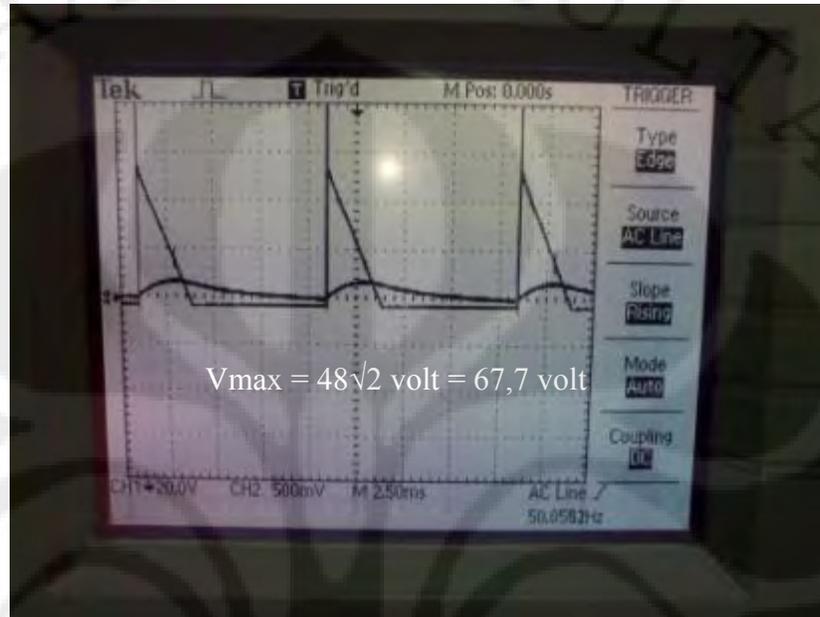


(b)

Gambar 4.11 – (a) Hasil penyearahan pada  $\alpha = 90^\circ$ ;

(b) Kecepatan motor arus searah pada  $\alpha = 90^\circ$

Pada pengujian selanjutnya nilai sudut penyalan berada pada  $\pi/2 < \alpha < \pi$  sehingga menghasilkan tegangan keluaran dan kecepatan motor arus searah seperti pada gambar 4.11 (a) dan (b)



(a)

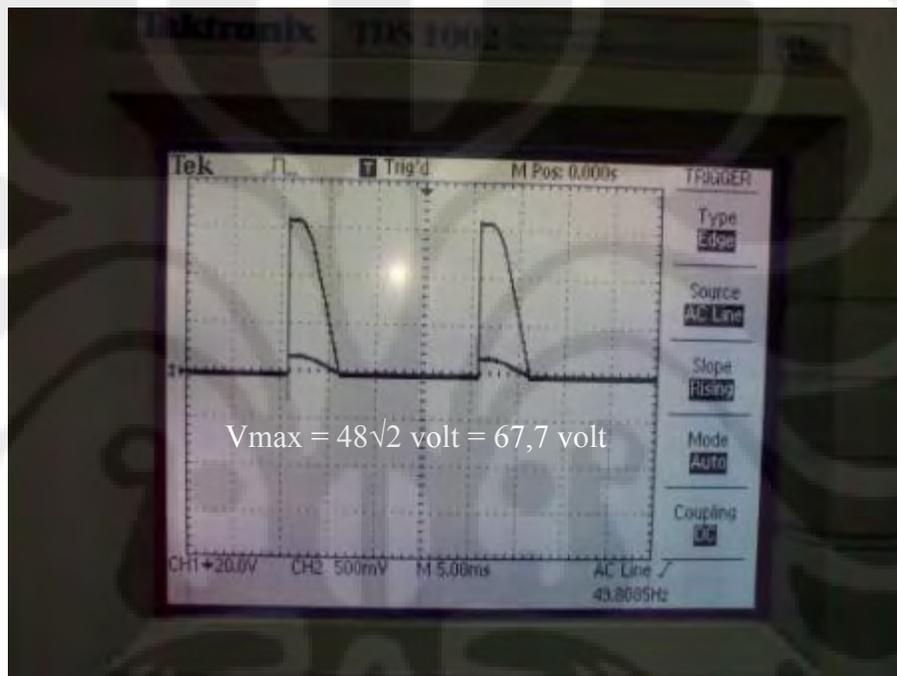


(b)

Gambar 4.12- (a) Hasil penyearahan pada  $\pi/2 < \alpha < \pi$ ;

(b) Kecepatan motor arus searah pada  $\pi/2 < \alpha < \pi$

Motor arus searah tidak berputar dikarenakan tegangan arus searah minimum yang diperlukan untuk memutar rotor tidak mencukupi, juga pada pembacaan oscilloscope, gelombang tegangan arus searah tidak halus dan terdapat garis-garis, hal tersebut dikarenakan beban bersifat induktif (pada motor arus searah terdapat lilitan yang menghasilkan tahanan bersifat induktif), saat beban yang diberikan adalah lampu, yang bersifat resistif, tegangan arus searah yang dihasilkan lebih baik bentuknya seperti pada gambar dibawah



Gambar 4.13 – Hasil penyearahan saat terpasang dengan beban resistif (lampu)

## BAB V

### KESIMPULAN

Hal-hal yang dapat disimpulkan dari pengujian dalam tulisan ini adalah :

1. Pengendali tegangan dan arus dalam sistem penggerak mesin arus searah dapat berupa pengendali PI sederhana.
2. Agar pengendali PI dapat bekerja, maka harus berlaku  $V1 \geq V2$ , dimana  $V1$  adalah tegangan *set point* dan  $V2$  adalah tegangan *feedback*.
3. Sudut penyalan untuk mengaktifkan tiristor dipengaruhi seluruhnya oleh variasi tegangan masukan pada rangkaian penyulut.
4. Untuk menghitung sudut penyalan, dapat dihitung dengan menggunakan waktu dan frekuensi yang terbaca pada oscilloscope, namun karena nilai frekuensi selalu tetap pada kisaran 50 Hz, maka dapat dilihat dari waktu yang terbaca pada oscilloscope.
5. Tegangan arus searah pada keluaran rangkaian penyearah dapat dipengaruhi oleh jenis beban yang terpasang. Jika bebannya resistif, maka bentuk gelombang tegangan arus searah akan lebih halus daripada jika menggunakan beban induktif, karena beban induktif akan menyisakan arus.
6. Dengan menggunakan motor universal 120 Watt, dengan sudut penyalan  $45^\circ$  putaran motor akan mencapai nilai maksimal pada kisaran 2300 rpm, dan pada  $90^\circ$  putaran akan menurun hingga kisaran 1300 rpm. Ketika sudut penyalan berada pada nilai  $\pi/2 < \alpha < \pi$ , motor tidak berputar sama sekali.
7. Pemodelan penggerak mesin arus searah yang telah dibuat ini siap digunakan dan dapat dikembangkan kemudian.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*", McGraw-Hill, New York, 2002.
- [2] Fitzgerald, Arthur E., Charles Kingsley, Stephen Umans, "*Electric Machinery*", McGraw-Hill, New York, 2003.
- [3] Ong, Chee-Mun, "*Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab®/Simulink*", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1998.
- [4] Hughes, Austin, "*Electric Motors and Drives*", Elsevier Ltd., Burlington, 2006.
- [5] "Pengembangan Energi Angin Memungkinkan"  
<http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?artikel&1177294977&1/> (200704.23)

## DAFTAR REFERENSI

- Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*", McGraw-Hill, New York, 2002.
- Fitzgerald, Arthur E., Charles Kingsley, Stephen Umans, "*Electric Machinery*", McGraw-Hill, New York, 2003.
- Ong, Chee-Mun, "*Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab®/Simulink*", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1998.
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage>
- Neammance, Bunlung, Somporn Sirisumrannukul, Somsai Chatratana, "*Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Generator Testing*"
- Vihrial, H., 2002, "*Control of Variable Speed Wind Turbine*", Ph.D Thesis, Tampere University of Technology.