

**PERANCANGAN SOFT STARTER MOTOR INDUKSI SATU FASA
DENGAN METODE CLOSED LOOP MENGGUNAKAN
MIKROKONTROLER ARDUINO**

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

ARDHITO PRIMATAMA

NIM. 0810630006 - 63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2013

LEMBAR PERSETUJUAN

**PERANCANGAN SOFT STARTER MOTOR INDUKSI SATU FASA DENGAN
METODE CLOSED LOOP MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER
ARDUINO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
ARDHITO PRIMATAMA
NIM. 0610630006

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Soeprapto, M.T
NIP. 19561020 198903 1 001

Ir. Wijono, M.T., Ph.D
NIP. 19621111 198903 1 003

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN SOFT STARTER MOTOR INDUKSI SATU FASA DENGAN
METODE CLOSED LOOP MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER
ARDUINO**

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

ARDHITO PRIMATAMA

NIM. 0810630006 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada

Tanggal 23 April 2013

DOSEN PENGUJI

Ir. Hari Santoso, M.S
NIP. 19531205 198503 1 001

Dr. Ir. Harry Soekotjo Dachlan, M.Sc
NIP. 19490309 198602 1 001

Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 19730520 200801 1 013

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro

DR. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S
NIP. 19580728 198701 1 001

PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas izin dan rahmat-NYA lah penulis mampu menyelesaikan penelitian yang berjudul “Perancangan *Soft Starter* Motor Induksi Satu Fasa dengan Metode *Closed Loop* Menggunakan Mikrokontroler Arduino” ini. Penelitian ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Banyak kendala dan halangan dalam pengerjaan penelitian ini. Salah satunya adalah pergantian judul penelitian. Pada awalnya judul penelitian ini adalah “Perancangan *Soft Starter* Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode *Closed Loop* Menggunakan Mikrokontroler Arduino”, namun dalam proses pengerjaan penelitian ini baru penulis sadari bahwa terdapat kelemahan pada mikrokontroler Arduino yaitu dalam pengaturan *timer*. Dengan segala pertimbangan baik dari penulis sendiri maupun dosen pembimbing maka objek penelitian ini diganti dari motor induksi tiga fasa menjadi motor induksi satu fasa.

Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada orang-orang yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan skripsi ini.

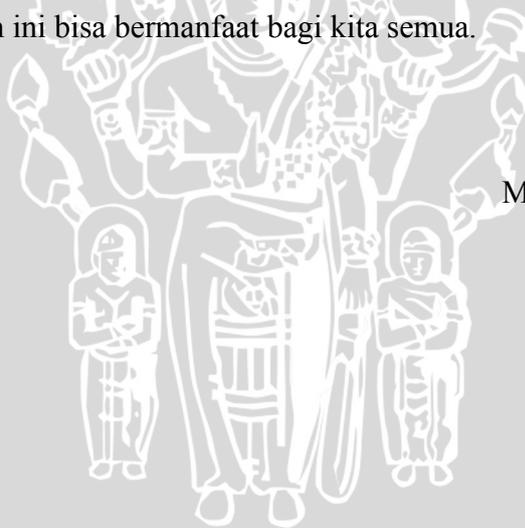
1. Ibu Sri Suwarningsih dan Bapak Sunaryo serta adik Shafira Noor Latifah yang tercinta atas segala kasih sayang, doa dan dukungannya kepada penulis dalam pengerjaan penelitian ini.
2. Bapak DR. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.Sc, Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
4. Bapak Mochammad Rif'an S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
5. Bapak Ir. Soeprpto, M.T dan Ir. Wijono, M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dengan penuh kesabaran dan memberi pengarahan penulis dalam penelitian ini.
6. Seluruh dosen Teknik Elektro Universitas Brawijaya atas segala bimbingan dan nasehatnya selama masa perkuliahan.

7. Pramoda Wardhany atas motivasi dan semangat yang diberikan kepada penulis dalam pengerjaan penelitian ini.
8. Seluruh teman-teman angkatan 2008 terutama teman-teman Paket A yang telah menjadi bagian keluarga penulis.
9. Theo Aji Caraka, Dzulhidwandarusadi, Izzat Harisi, Surya Adi, Lutfir Rahman, M. Rigadho, Bagus Ibnu Pratama, Wildan Hilmi, M. Firsada Putra, dan Raga Tinto atas dukungan dan semangat berkompetisi yang menjaga penulis tetap semangat dalam pengerjaan penelitian ini.
10. Eryc Tri Juni, Bima Aditia, dan Anas Setiawan yang menjadi teman diskusi selama pengerjaan penelitian ini.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini jauh dari kata sempurna, oleh karena itu kritik dan saran atas penulisan ini sangat diharapkan oleh penulis untuk memperbaiki penulisan ini kedepannya agar lebih baik dan bermanfaat bagi masyarakat. Akhir kata, semoga laporan penelitian ini bisa bermanfaat bagi kita semua.

Malang, 19 Maret 2013

Penulis



DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	ix
ABSTRAK	x
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
BAB II	4
2.1 Motor Induksi	4
2.1.1 Prinsip Kerja	4
2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Satu Fasa	7
2.1.3 Pengasutan Motor Induksi Satu Fasa	10
2.1.4 Klasifikasi Motor Induksi Satu Fasa	10
2.1.5 Rangkaian Ekuivalen Motor Kapasitor Tetap	13
2.2 Karakteristik Beban	16
2.2.1 Karakteristik Tipikal Beban	17
2.3 Pengasutan Metode <i>Soft-Starting</i>	19
2.4 TRIAC (<i>Bidirectional Thyristor</i>)	21
2.4.1 Pengaman Semikonduktor Daya	23
2.4.2 <i>Phase Control</i> Beban Induktif	24
2.5 Arduino	26
2.5.1 Arduino Uno	26
2.6 <i>Optocoupler</i>	27
2.7 <i>Zero Cross Detector</i>	29
2.8 Sensor Arus	31
2.9 Tachogenerator	32

BAB III	33
3.1 Studi Literatur	33
3.2 Perancangan Alat	33
3.3 Pengujian dan Analisis	33
BAB IV	35
4.1 Blok Diagram Sistem <i>Soft Starter</i>	35
4.2 Perancangan Perangkat Keras <i>Soft Starter</i>	36
4.2.1 Pemilihan Motor & Karakteristik Motor	36
4.2.2 Penentuan komponen TRIAC	36
4.2.3 Perancangan Perangkat Keras <i>Zero Cross Detector</i>	37
4.2.4 Perancangan Rangkaian Pemicuan Gate TRIAC	38
4.2.5 Perancangan Pengaman Terhadap Laju Pertambahan Arus di/dt	39
4.2.6 Perancangan Pengaman Terhadap Laju Pertambahan Tegangan dv/dt	40
4.2.7 Perancangan Rangkaian Penguat Tegangan Keluaran Tachogenerator	41
4.3 Perancangan Diagram Alir Keseluruhan Sistem	42
4.4 Gambar Rangkaian Keseluruhan Sistem	44
BAB V	45
5.1 Pengujian Rangkaian <i>Zero Crossing Detector</i>	45
5.1.1 Tujuan	45
5.1.2 Peralatan	45
5.1.3 Prosedur Pengujian	45
5.1.4 Hasil Pengujian	46
5.1.5 Analisis Hasil Pengujian	47
5.2 Pengujian Rangkaian <i>Optocoupler MOC3021</i>	47
5.2.1 Tujuan	47
5.2.2 Peralatan	47
5.2.3 Prosedur Pengujian	48
5.2.4 Analisis Hasil Pengujian	49
5.3 Pengujian Rangkaian Penyulutan TRIAC	50
5.3.1 Tujuan	50
5.3.2 Peralatan	50
5.3.3 Prosedur Pengujian	50
5.3.4 Hasil Pengujian	51

5.3.5	Analisis Hasil Pengujian	52
5.4	Pengujian Sensor Arus ACS712.....	54
5.4.1	Tujuan	54
5.4.2	Peralatan.....	54
5.4.3	Prosedur Pengujian.....	54
5.4.4	Data Hasil Pengujian.....	55
5.4.5	Analisis Hasil Pengujian	56
5.5	Pengujian Tachogenerator	57
5.5.1	Tujuan	57
5.5.2	Peralatan.....	57
5.5.3	Prosedur Pengujian.....	57
5.5.4	Hasil Pengujian	57
5.5.5	Analisis Hasil Pengujian	58
5.6	Pengujian Sistem Soft Starting secara Keseluruhan.....	58
5.6.1	Tujuan	58
5.6.2	Peralatan.....	58
5.6.3	Prosedur Pengujian.....	59
5.6.4	Hasil Pengujian	60
5.6.5	Analisis Hasil Pengujian	62
BAB VI	71
6.1	Kesimpulan.....	71
6.2	Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
Lampiran 1	Listing Program.....	74
Lampiran 2	Datasheet H11AA1	75
Lampiran 3	Datasheet MOC3021	76
Lampiran 4	Datasheet BTA16-600B	77
Lampiran 5	Datasheet sensor arus ACS712.....	78
Lampiran 6	Gambar <i>Soft Starter</i>	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konfigurasi motor induksi satu fasa	5
Gambar 2.2	Dua buah medan magnet yang bergerak dengan arah yang berlawanan ...	5
Gambar 2.3	Kurva torsi-kecepatan pada motor induksi tiga fasa.....	6
Gambar 2.4	Gelombang arus, tegangan, dan daya pada motor induksi satu fasa.....	6
Gambar 2.5	Kurva Torsi-Kecepatan motor induksi satu fasa.....	7
Gambar 2.6	Rangkaian ekuivalen motor	8
Gambar 2.7	Rangkaian skematik, diagram phasor, kurva torsi-kecepatan motor fasa belah	11
Gambar 2.8	Rangkaian skematik, diagram phasor, kurva torsi-kecepatan motor kapasitor <i>start</i>	11
Gambar 2.9	Rangkaian skematik, kurva torsi-kecepatan kapasitor <i>run</i>	12
Gambar 2.10	Rangkaian skematik, kurva torsi-kecepatan kapasitor <i>start-run</i>	12
Gambar 2.11	Konfigurasi motor, kurva torsi-kecepatan motor kutub bayangan	13
Gambar 2.12	Kumparan stator dan rotor pada motor dengan teori <i>double-revolving field</i>	14
Gambar 2.13	Rangkaian ekuivalen kumparan utama	14
Gambar 2.14	Kurva karakteristik beban dengan torsi konstan	16
Gambar 2.15	Kurva karakteristik beban dengan torsi berubah-ubah	17
Gambar 2.16	Konfigurasi standar soft starter motor induksi satu fasa.....	20
Gambar 2.17	Kurva tegangan fasa dan arus pada <i>Soft-starter</i>	21
Gambar 2.18	Simbol dan karakteristik $v - i$ dari TRIAC.....	23
Gambar 2.19	Rangkaian <i>snubber</i> sederhana.....	24
Gambar 2.20	Rangkaian <i>phase control</i> dengan rangkaian pemicuan TRIAC.....	25
Gambar 2.21	Kegagalan pemicuan menggunakan pulsa tunggal (a). Pemicuan menggunakan pulsa kontinyu (b). Pemicuan menggunakan pulsa <i>train</i> (c).....	25
Gambar 2.22	Arduino Uno	26

Gambar 2.23	Beberapa contoh detektor optik aplikasi elektronika daya.	28
Gambar 2.24	Contoh rangkaian aplikasi penggunaan <i>optocoupler</i>	29
Gambar 2.25	Pin description H11AA1	30
Gambar 2.26	Rangkaian Sensor Arus ACS712	31
Gambar 2.27	Prinsip kerja tachogenerator	32
Gambar 2.28	Tachogenerator Leybold-Didactic	32
Gambar 4.1	Diagram Blok Sistem Soft Starter dengan metode <i>closed loop</i>	35
Gambar 4.2	Konfigurasi rangkaian <i>Zero Crossing Detector</i>	38
Gambar 4.3	Rangkaian pemuncuan <i>gate</i> TRIAC	38
Gambar 4.4	Rangkaian penguat tegangan	41
Gambar 4.5	Diagram alir program utama	43
Gambar 4.6	Rangkaian keseluruhan sistem	44
Gambar 5.1	Rangkaian pengujian zero cross detector	46
Gambar 5.2	Diagram Alir rangkaian zero cross detector	46
Gambar 5.3	Gelombang tegangan AC dan gelombang tegangan keluaran optocoupler H11AA1	47
Gambar 5.4	Rangkaian pengujian optocoupler MOC3021	48
Gambar 5.5	Diagram Alir pengujian rangkaian optocoupler MOC3021	49
Gambar 5.6	Sinyal keluaran optocoupler MOC3021 dan gelombang sinusoida	49
Gambar 5.7	Rangkaian pengujian sudut penyalan TRIAC	51
Gambar 5.8	Diagram alir rangkaian pengujian penyulutan TRIAC	51
Gambar 5.9	Bentuk gelombang keluaran TRIAC dengan sudut penyalan 90^0	52
Gambar 5.10	Rangkaian pengujian sensor arus ACS712	55
Gambar 5.11	Diagram alir program pengujian rangkaian sensor arus ACS712	55
Gambar 5.12	Pengujian pengasutan motor tanpa beban	59
Gambar 5.13	Pengujian pengasutan motor induksi dengan beban generator sinkron ...	60
Gambar 5.14	Hasil pengujian pengasutan motor induksi tanpa beban	61
Gambar 5.15	Hasil pengujian pengasutan motor induksi dengan beban generator sinkron	61
Gambar 5.16	Grafik tegangan terhadap waktu pada pengasutan motor induksi satu fasa secara langsung tanpa beban	64
Gambar 5.17	Grafik tegangan terhadap waktu pada pengasutan motor induksi satu fasa menggunakan <i>soft satrter</i> tanpa beban	65

Gambar 5.18 Grafik tegangan terhadap waktu pada saat pengasutan motor induksi satu fasa secara langsung dengan beban generator sinkron..... 67

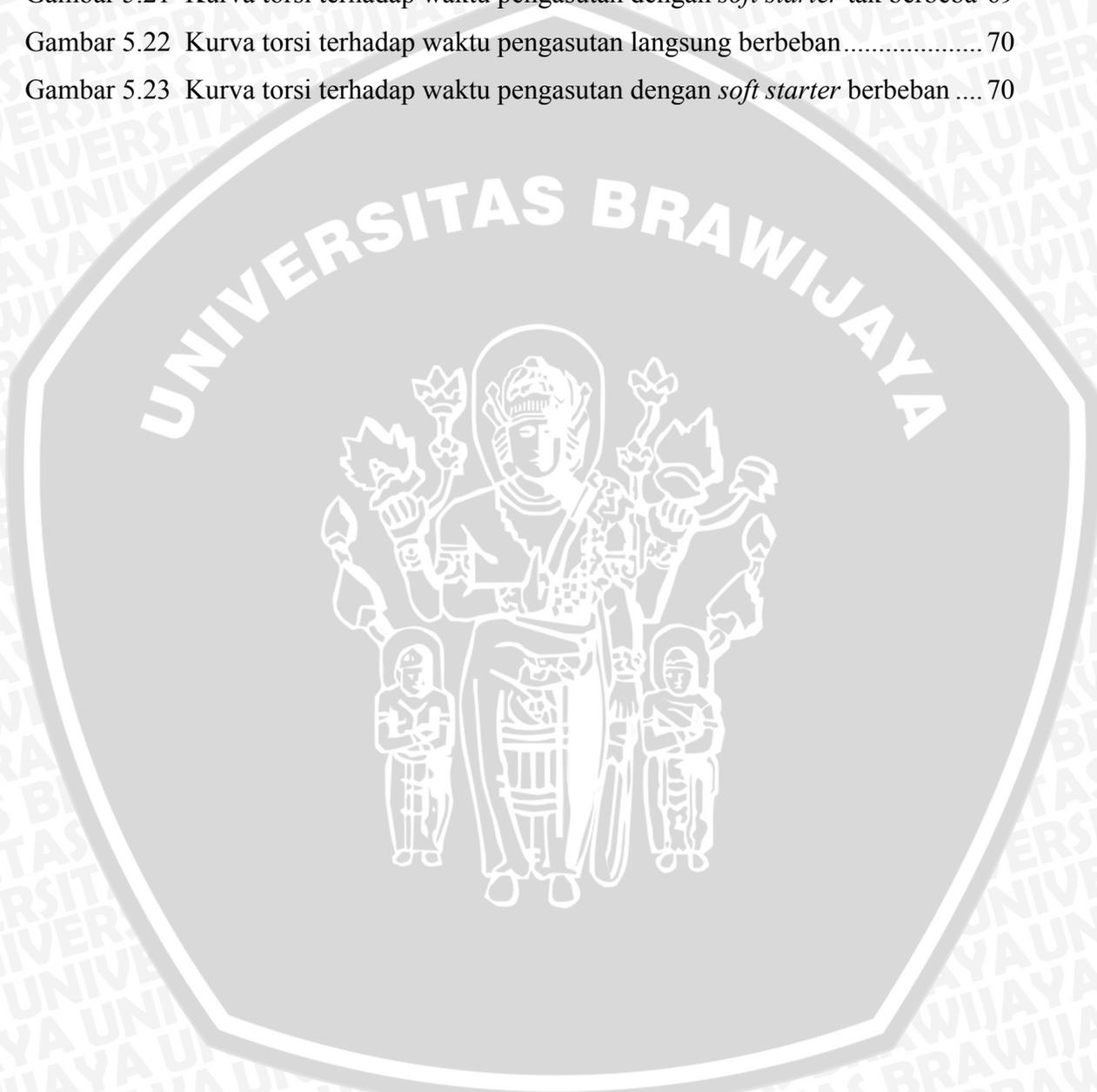
Gambar 5.19 Grafik tegangan terhadap waktu pada saat pengasutan motor induksi satu fasa menggunakan *soft starter* dengan beban generator sinkron 68

Gambar 5.20 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan langsung tak berbeban..... 69

Gambar 5.21 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan dengan *soft starter* tak berbeba 69

Gambar 5.22 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan langsung berbeban..... 70

Gambar 5.23 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan dengan *soft starter* berbeban 70



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Tabel perbandingan untuk tiap konfigurasi motor induksi satu fasa.....	13
Tabel 2.2	Data Tipikal Torsi Beban.....	18
Tabel 2.3	<i>Rating</i> Komponen yang Umum Disertakan.....	22
Tabel 2.4	Deskripsi Pin-Out Sensor Arus ACS712.....	31
Tabel 5.1	Tabel hasil pengujian rangkaian penyulutan TRIAC.....	52
Tabel 5.2	Rangkuman hasil pengujian.....	53
Tabel 5.3	Perbandingan Pembacaan Ampmeter dan ACS712.....	55
Tabel 5.4	Tabel perhitungan nilai error.....	56
Tabel 5.5	Data pengujian pengasutan motor induksi tak berbeban.....	62
Tabel 5.6	Data pengujian pengasutan motor induksi berbeban generator sinkron.....	62
Tabel 5.7	Hasil perhitungan slip dan torsi <i>starting</i> motor induksi tak berbeban.....	63
Tabel 5.8	Hasil perhitungan slip dan torsi <i>starting</i> motor induksi berbeban generator sinkron.....	66



ABSTRAK

Ardhito Primatama, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, April 2013, *Perancangan Soft Starter Motor Induksi Satu Fasa dengan Metode Closed Loop Menggunakan Mikrokontroler Arduino*, Dosen Pembimbing : Ir. Soeprpto, M.T. dan Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

Motor induksi merupakan mesin yang paling banyak digunakan dalam industri. Baik dalam industri skala besar, industri rumahan, aplikasi di rumahan, dan lain-lain. Motor induksi menjadi pilihan utama bagi industri dikarenakan konstruksinya yang sederhana, murah, dan handal. Namun dibalik kelebihan-kelebihan yang dimilikinya, motor induksi memiliki kekurangan yang sangat berpengaruh pada sistem. Kekurangan motor induksi adalah pada saat proses pengasutannya. Pada saat pengasutan, arus pengasutan motor induksi menghasilkan arus yang bisa mencapai 5 sampai 7 kali arus nominalnya. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah alat yang mampu mengurangi arus pengasutan motor induksi. Dengan berkembangnya teknologi elektronika daya, alat *soft starter* dapat dibuat dengan TRIAC sebagai komponen utamanya. Dengan prinsip kerja TRIAC yang mampu mengatur tegangan dengan sudut penyalan, TRIAC mampu mengurangi arus pengasutan motor induksi. Pengaturan *soft starter* secara otomatis dapat dilakukan oleh mikrokontroler sebagai unit pengendali.

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang *soft starter* yang mampu mengurangi arus pengasutan motor induksi satu fasa namun alat yang dirancang masih mampu untuk mencukupi torsi pengasutan.

Dari hasil perancangan dan pembuatan didapatkan bahwa *soft starter* yang telah dirancang mampu menurunkan arus pengasutan hingga ± 2 kali dari arus nominal. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state* pada pengasutan dengan *soft starter* pada kondisi tak berbeban selama 0,77 detik sedangkan untuk kondisi berbeban generator sinkron selama 7,92 detik. Namun torsi yang dihasilkan pada pengasutan motor induksi masih mampu memutar motor dengan nilai 0,028 Nm dengan *soft starter* untuk kondisi tak berbeban sedangkan pada kondisi berbeban memiliki nilai 0,307 Nm.

Kata kunci: Motor induksi satu fasa, *soft starter*, TRIAC, arus pengasutan, torsi pengasutan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejak penemuannya di akhir abad 19, motor induksi tiga fasa menjadi sebuah alat yang paling umum digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang sederhana, murah, handal, dan cenderung memiliki efisiensi yang tinggi. Namun, untuk industri kecil atau industri rumah tidak bisa menggunakan motor induksi tiga fasa dikarenakan tegangan PLN yang masuk ke rumah-rumah hanya satu fasa, sehingga diharuskan menggunakan motor induksi satu fasa untuk memenuhi kebutuhan industri.

Motor induksi memiliki beberapa kekurangan dibalik kelebihan yang dimilikinya. Masalah utama pada motor induksi terletak pada saat proses pengasutannya. Motor induksi membutuhkan gaya putar atau torsi untuk memutar rotornya. Arus yang besar dibutuhkan untuk menghasilkan gaya putar ini. Kejut mekanik juga akan terjadi pada saat proses pengasutan karena gaya putar yang dibutuhkan motor dalam waktu yang sangat singkat. Kejut mekanik ini memiliki potensi untuk merusak motor itu sendiri.

Seperti halnya motor induksi tiga fasa, motor satu fasa juga memiliki arus pengasutan yang bernilai 5-7 kali dari arus nominal. Kondisi ini menghasilkan rugi daya yang besar, terutama bagi industri kecil dan rumahan.

Beberapa upaya untuk mengatasi permasalahan diatas telah dilakukan. Cara yang paling sederhana adalah dengan mengubah nilai kapasitor yang terpasang pada motor. Namun ini hal ini cukup merepotkan karena kita harus membongkar motor itu sendiri dan mencoba-coba nilai kapasitor yang paling baik. Cara yang lebih baik untuk melakukan pengasutan telah ditemukan yaitu dengan menggunakan metode *soft starting*.

Seiring dengan perkembangan teknologi elektronika daya dewasa ini, *soft starting* berkembang terutama dengan digunakannya mikrokontroler. Prinsip *soft starting* adalah dengan melakukan proses pengasutan dengan memasukkan tegangan dan arus secara bertahap dari sumber tenaga ke dalam motor induksi, sehingga tidak memerlukan arus starting yang besar. Namun tantangannya adalah cara untuk menyelaraskan torsi motor dengan torsi beban.

Karena latar belakang tersebut diperlukan perancangan perangkat *soft starter* motor induksi yang mampu mengurangi arus pengasutan motor induksi dan juga mampu memenuhi kebutuhan torsi motor induksi untuk berputar.

1.2 Rumusan Masalah

Paparan mengenai latar belakang dapat dijadikan acuan untuk membuat beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang *soft starter* motor induksi menggunakan komponen elektronika daya berbasis mikrokontroler.
- b. Bagaimana mengevaluasi kinerja *soft starter* motor induksi dalam skala lab.
- c. Bagaimana pengaruh penggunaan *soft starter* terhadap respon arus pengasutan motor induksi dan torsi motor induksi

1.3 Batasan Masalah

- a. Motor induksi yang digunakan berupa motor induksi satu fasa merk Xian Micro & FHP Motor Works dengan rating daya 0,25 HP tegangan 220V, frekuensi 50 Hz, Putaran 1495 rpm, Arus 2,4 A.
- b. Motor induksi satu fasa yang digunakan dioperasikan tanpa beban dan berbeban.
- c. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino.
- d. Parameter yang diamati adalah arus pengasutan dan torsi motor.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah merancang *soft starter* motor induksi satu fasa dengan menggunakan mikrokontroler.

1.5 Sistematika Penulisan

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

BAB I : PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam skripsi ini, meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data.

BAB IV : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

Berisi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dari *soft-starter*.

BAB V : ANALISIS DAN PENGUJIAN

Berisi pengujian dan studi kelayakan dari *soft-starter* sehingga mampu disimpulkan apakah alat sesuai atau tidak.

BAB VI : PENUTUP

Berisi kesimpulan dari penelitian serta saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

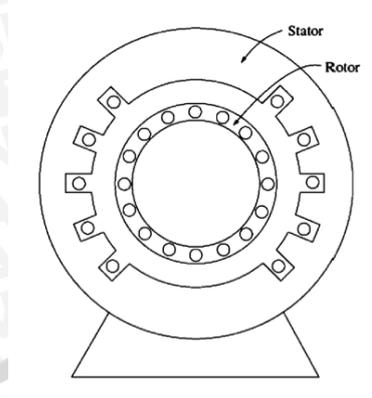
Pada bab ini dipaparkan tinjauan pustaka tentang pembuatan *soft starter* motor induksi satu fasa dengan metode *closed loop*. Referensi pustaka yang akan dijelaskan antara lain mengenai prinsip kerja motor induksi satu fasa, teori pengasutan motor induksi satu fasa metode *soft starting* menggunakan komponen elektronika daya, prinsip kerja komponen elektronika daya TRIAC, rangkaian pelindung TRIAC, pengetahuan dasar mengenai mikrokontroler Arduino, rangkaian isolasi optocoupler dan prinsip kerja sensor arus ACS712 sebagai *feedback* sistem *soft starting* motor induksi satu fasa serta prinsip kerja tachogenerator sebagai *feedback* kecepatan motor.

2.1 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor yang umum digunakan dalam dunia industri dan rumah tangga. Motor induksi sering digunakan karena motor induksi merupakan mesin yang ekonomis, handal, dan tersedia untuk berbagai aplikasi dan lingkungan kerja dengan jangkauan daya mulai dari beberapa watt sampai megawatt. Motor induksi multi fasa sering dijumpai dalam berbagai aplikasi berdaya besar sebagai penggerak utama seperti dijumpai di dunia industri sebagai pompa, kipas angin, kompresor dll. Motor induksi sering pula digunakan secara luas pada peralatan rumah tangga sebagai kipas angin, mesin cuci, peralatan pertukangan dll (Bose, 2002: 30).

2.1.1 Prinsip Kerja

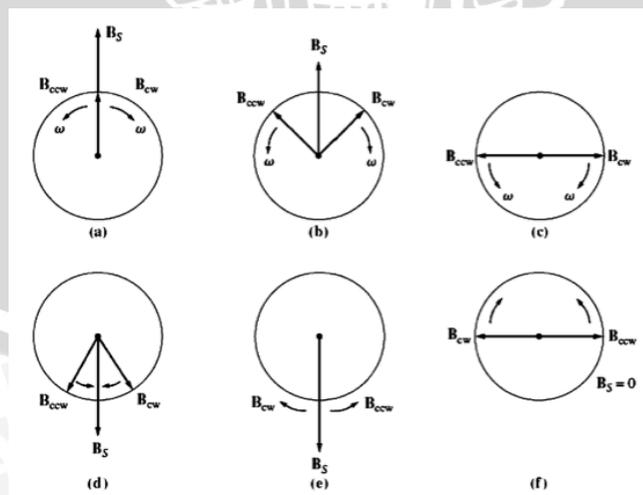
Motor induksi satu fasa hanya memiliki satu fasa di kumparan statornya, oleh karena itu medan magnet di motor induksi satu fasa tidak berputar, sehingga motor induksi satu fasa tidak memiliki torsi pengasutan. Torsi yang terjadi pada motor induksi satu fasa adalah torsi pulsasi. (Chapman, 2005:637).



Gambar 2.1 Konfigurasi motor induksi satu fasa (Chapman, 2005:637)

Dikarenakan medan magnet pada stator tidak berputar maka rotor pun tidak ikut berputar, sehingga tidak ada tegangan yang diinduksikan dan tidak ada arus yang mengalir pada motor, torsi pun tidak akan dihasilkan (Chapman, 2005:637). Terdapat teori yang menjelaskan proses timbulnya torsi ketika rotor telah berputar, yaitu adalah teori medan putar ganda (Chapman, 2005:638). Teori ini menjelaskan bahwa permasalahan pada motor induksi satu fasa bisa diselesaikan dengan cara menambahkan satu lagi medan magnet yang bergerak dalam arah yang berlawanan dengan medan yang satunya lagi. Torsi yang dihasilkan adalah hasil pertambahan dari torsi yang dihasilkan oleh masing-masing medan magnet. Kerapatan flux dari medan magnet didapatkan dengan rumus

$$B_s(t) = (B_{max} \cos \omega t)j \tag{2-1}$$



Gambar 2.2 Dua buah medan magnet yang bergerak dengan arah yang berlawanan (Chapman, 2005:639)

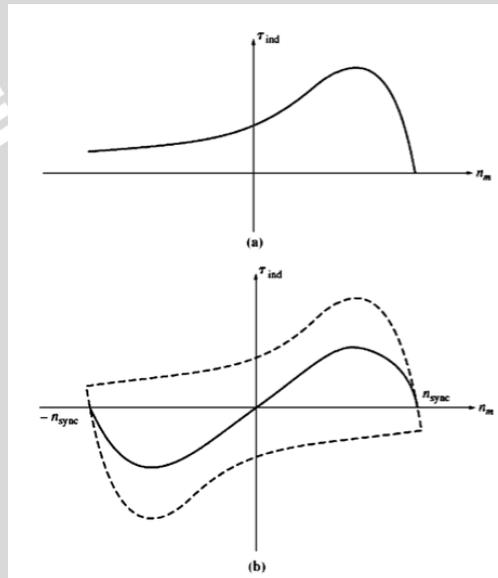
$$B_{CW}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{max} \cos \omega t\right) i - \left(\frac{1}{2} B_{max} \sin \omega t\right) j \quad (2-2)$$

$$B_{CCW}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{max} \cos \omega t\right) i + \left(\frac{1}{2} B_{max} \sin \omega t\right) j \quad (2-3)$$

Pertambahan dari medan magnet yang berputar searah jarum jam dan berlawanan arah dengan jarum jam adalah sama dengan medan pulsasi B_s .

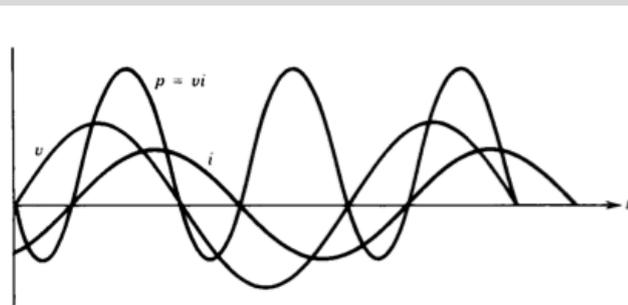
$$B_s(t) = B_{CW}(t) + B_{CCW}(t) \quad (2-4)$$

Kurva torsi-kecepatan dari motor induksi satu fasa adalah merupakan nilai superposisi dari kurva torsi-kecepatan motor induksi tiga fasa pada satu medan magnet yang berputar dan kurva kebalikannya.



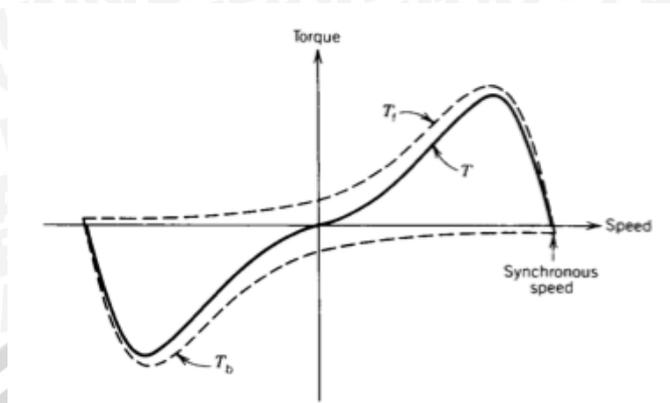
Gambar 2.3 (a) Kurva torsi-kecepatan pada motor induksi tiga fasa secara teori
(b) Kurva torsi-kecepatan dari dua medan magnet yang berlawanan
(Chapman, 2005:640)

Pada motor induksi satu fasa, daya yang dihasilkan oleh motor induksi berpulsasi pada frekuensi dua kali dari pada frekuensi sumber seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4, dalam 1 gelombang tegangan sumber terdapat 1 gunung dan 1 lembah, dimana pada gelombang daya sudah memiliki 2 gunung dan 2 lembah.



Gambar 2.4 Gelombang arus, tegangan, dan daya pada motor induksi satu fasa
Sumber Sen 1997:377

Konsekuensinya, akan dihasilkan karakteristik torsi-kecepatan yang berbentuk seperti pada gambar 2.5

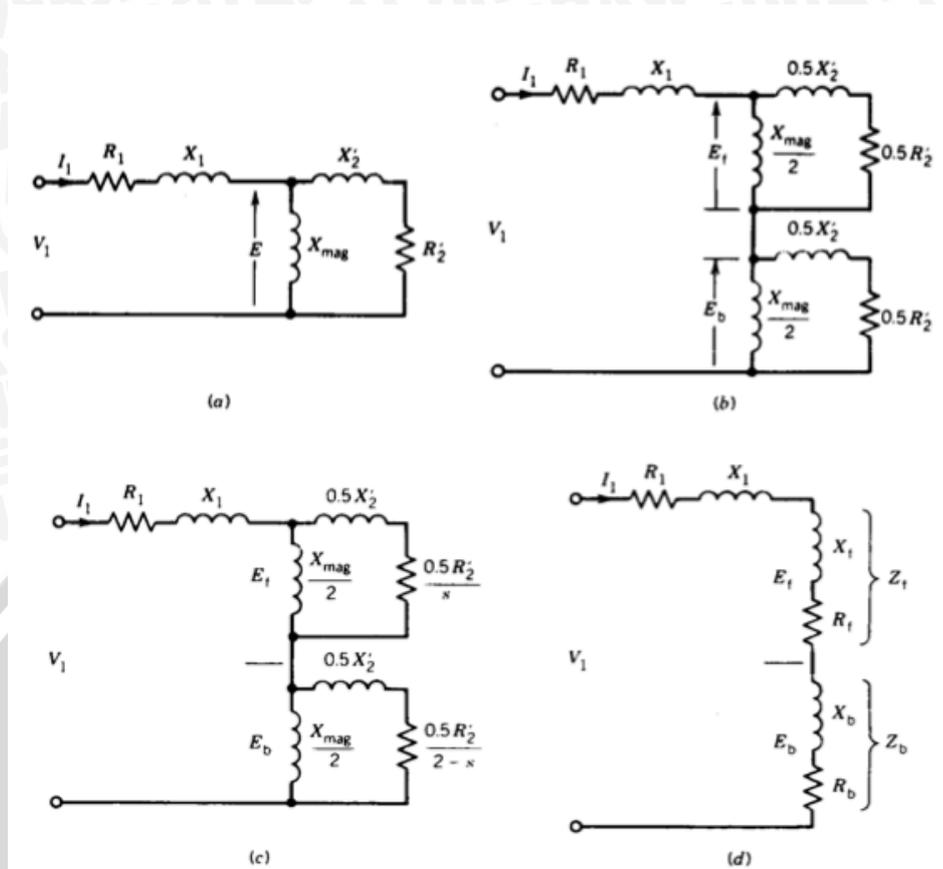


Gambar 2.5 Kurva Torsi-Kecepatan yang sebenarnya pada motor induksi satu fasa (Sen, 1997:378)

Torsi yang ditunjukkan pada gambar 2.5 merupakan kurva torsi pada kondisi nyata yang terjadi pada motor induksi satu fasa. Torsi pulsasi dihasilkan dari interaksi flux dan *magnetic-motive-force* (mmf) yang berlawanan, yang saling melewati satu sama lain pada dua kali kecepatan sinkron (Sen, 1997: 378), misalkan interaksi antara fluksi maju dengan mmf rotor mundur dan fluksi mundur dengan mmf rotor maju. Torsi pulsasi menghasilkan efek suara berdengung, sehingga motor induksi satu fasa memiliki suara yang berisik dibandingkan motor induksi fasa banyak.

2.1.2 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Satu Fasa

Rangkaian stator pada motor induksi satu fasa terhubung pada sumber tegangan. Arus stator menghasilkan mmf yang ekuivalen dengan dua amplitud konstan pada gelombang mmf yang bergerak berputar saling berlawanan pada kecepatan sinkron. Setiap gelombang yang berputar ini menginduksikan arus pada rotor kemudian menghasilkan putaran. Proses ini sama dengan proses terjadinya putaran pada motor induksi fasa banyak (Sen, 1997: 379).



Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen motor (a) dan (b) pada saat rotor diam
(c) dan (d) pada saat rotor berputar
(Sen, 1997:379)

Berdasarkan gambar di atas, notasinya adalah sebagai berikut:

- R_1 = Resistansi dari kumparan stator
- X_1 = Reaktansi bocor dari kumparan stator
- X_{mag} = Reaktansi magnetik
- X'_2 = Reaktansi bocor rotor dari referensi stator
- R'_2 = Resistansi rotor dari referensi stator
- V_1 = Sumber tegangan
- E = Tegangan yang diinduksikan pada kumparan stator oleh fluksi yang dihasilkan efek kombinasi arus stator dan rotor.

Pada saat berputar dan bekerja hanya pada kumparan utama. Pada arah medan maju akan ada slip (s^+) dengan arus rotor yang diakibatkan oleh medan maju mempunyai frekuensi s.f, dimana f adalah frekuensi stator. Arus rotor ini akan menghasilkan fluks yang bergerak maju pada kecepatan slip. Fluks ini akan membangkitkan ggl dengan arah maju pada kumparan utama stator. Pangaruh pada

rotor jika dilihat dari sisi stator dapat dinyatakan sebagai suatu impedansi sebesar $0,5 R_2/s^+ + j 0,5X_2$ paralel dengan $0,5X_m$. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.

Pada arah medan putar mundur, rotor tetap bergerak dengan slip s^+ berpatokan pada medan maju dan besarnya kecepatan putar medan maju adalah

$$n = 1 - s^+ \quad (2-5)$$

Kecepatan relatif motor dengan berpatokan pada medan mundur adalah $1 + n$, atau besarnya slip (s^-) terhadap medan mundur adalah

$$s^- = 1 + n \quad (2-6)$$

$$s^- = 2 - (1 - n) \quad (2-7)$$

$$s^- = 2 - s^+ \quad (2-8)$$

Selanjutnya medan mundur menghasilkan arus rotor dengan frekuensi $(2 - s)f$. Arus rotor ini akan menghasilkan fluks yang bergerak mundur. Fluks ini akan menimbulkan ggl pada medan mundur kumparan stator. Pengaruh tersebut dapat diperlihatkan pada Gambar 2.6.

Dari rangkaian diatas dapat dihitung besar dari arus rotor, arus stator, daya masukan, dan faktor daya dengan sembarang nilai slip, apabila tegangan serta impedansi motor diketahui. Dari rangkaian ekivalen tersebut didapatkan :

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{\left(\frac{R'_2 + jX'_2}{s}\right)jX_m}{\left(\frac{R'_2 + jX'_2}{s}\right) + jX_m} \Omega \quad (2-9)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{\left(\frac{R'_2 + jX'_2}{(2-s)}\right)jX_m}{\left(\frac{R'_2 + jX'_2}{(2-s)}\right) + jX_m} \Omega \quad (2-10)$$

Dimana :

R_1 = Resistansi kumparan stator (ohm)

R_2' = Resistansi kumparan rotor yang mengacu pada stator (ohm)

X_1 = Reaktansi bocor kumparan stator (ohm)

X_2' = Reaktansi bocor kumparan rotor yang mengacu pada stator (ohm)

X_m = Reaktansi pemagnetan (ohm)

Daya yang dihasilkan pada medan maju dan medan mundur adalah sebagai berikut

$$P_{gf} = I_1^2 R_f \quad (2-11)$$

$$P_{gb} = I_1^2 R_b \quad (2-12)$$

Torsi yang dihasilkan oleh tiap medan maju dan medan mundur adalah sebagai berikut

$$T_f = \frac{P_{gf}}{\omega_{syn}} \quad (2-13)$$

$$T_b = \frac{P_{gb}}{\omega_{syn}} \quad (2-14)$$

Torsi resultannya adalah sebagai berikut

$$T = T_f - T_b = \frac{I_1^2}{\omega_{syn}} (R_f - R_b) \quad (2-15)$$

Daya mekanik yang terbentuk adalah sebagai berikut

$$P_{mech} = T\omega_m \quad (2-16)$$

$$= T\omega_{syn}(1 - s) \quad (2-17)$$

$$= I_1^2 (R_f - R_b)(1 - s) \quad (2-18)$$

$$= (P_{gf} - P_{gb})(1 - s) \quad (2-19)$$

2.1.3 Pengasutan Motor Induksi Satu Fasa

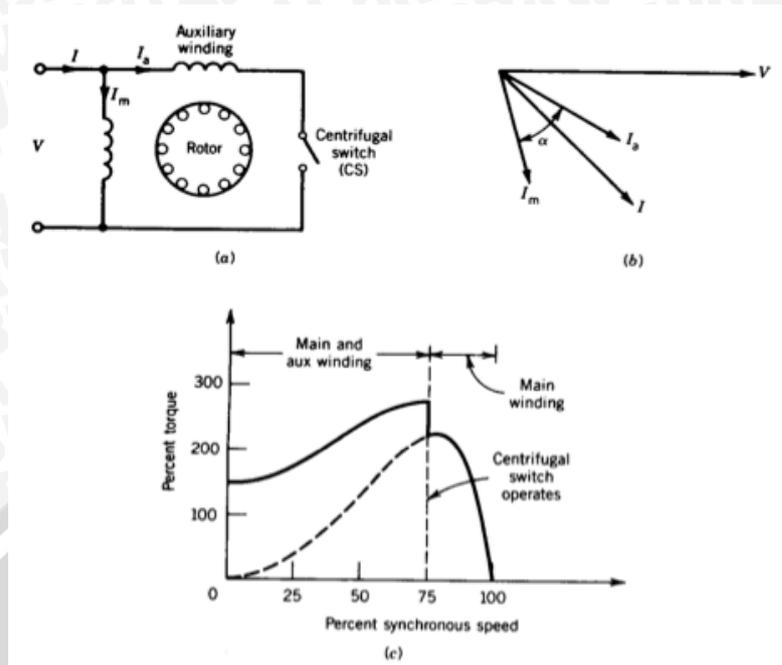
Seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa motor satu fasa tidak bisa melakukan pengasutan sendiri jika hanya terdapat satu kumparan saja. Untuk membuat motor berjalan dibutuhkan konfigurasi kumparan tambahan untuk membuat motor memiliki torsi pengasutan. Kumparan tambahan tersebut diletakkan pada stator dengan beda 90⁰ listrik. Sehingga arus yang terbentuk pada kumparan utama dan kumparan bantu memiliki perbedaan fasa, dan motor mampu memiliki torsi *starting*. Pada saat motor berjalan, kumparan utama motor mampu menghasilkan torsi, sehingga kumparan bantu mampu dilepas dari motor. Hal ini biasanya dilakukan dengan menambahkan saklar sentrifugal di dalam motor. Saklar akan terlepas pada saat motor mencapai 75% kecepatan sinkronnya (Sen, 1997:387).

2.1.4 Klasifikasi Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi satu fasa dibagi menjadi beberapa jenis. Pembagiannya berdasarkan metode dalam menghasilkan beda fasa pada arus di kumparan utama dan kumparan bantu.

2.1.4.1 Motor Fasa Belah (*Split-Phase Motor*)

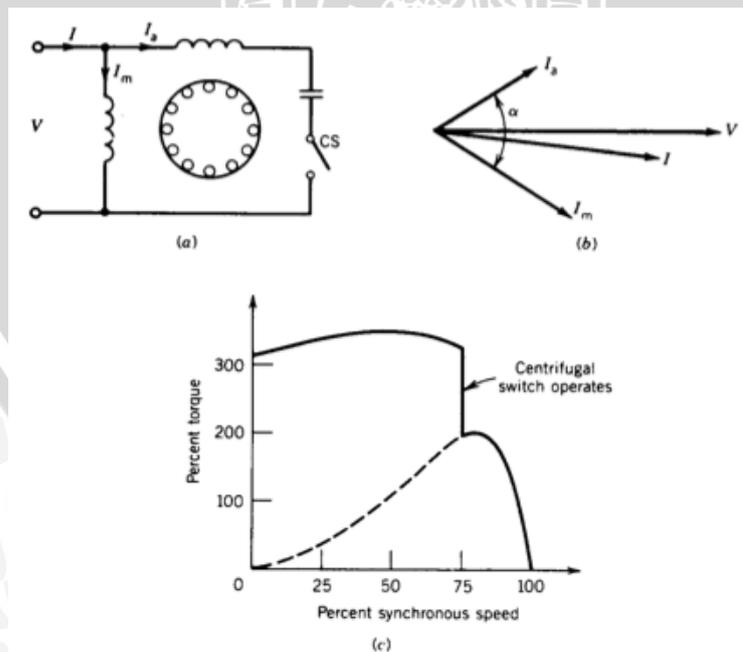
Gambar skematik motor fasa belah ditunjukkan pada gambar 2.7 (a), kumparan bantu memiliki rasio resistansi-reaktansi lebih tinggi dibandingkan dengan kumparan utama.



Gambar 2.7 (a) Rangkaian skematik (b) diagram phasor (c) kurva torsi-kecepatan (Sen, 1997:389)

2.1.4.2 Motor Kapasitor Start (*Capacitor-Start Motor*)

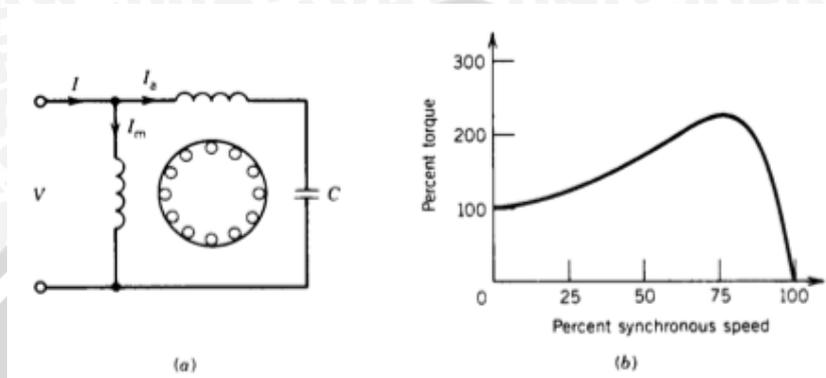
Torsi yang lebih tinggi bisa dihasilkan jika sebuah kapasitor dihubung seri dengan kumparan bantu. Ini menghasilkan sudut fasa yang lebih tinggi antara arus pada tiap kumparan. Pada gambar 2.8 dapat dilihat pada kurva torsi-kecepatan, torsi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan motor fasa belah.



Gambar 2.8 (a) rangkaian skematik (b) diagram phasor (c) kurva torsi-kecepatan (Sen, 1997:389)

2.1.4.3 Motor Kapasitor Tetap (*Capacitor-Run Motor*)

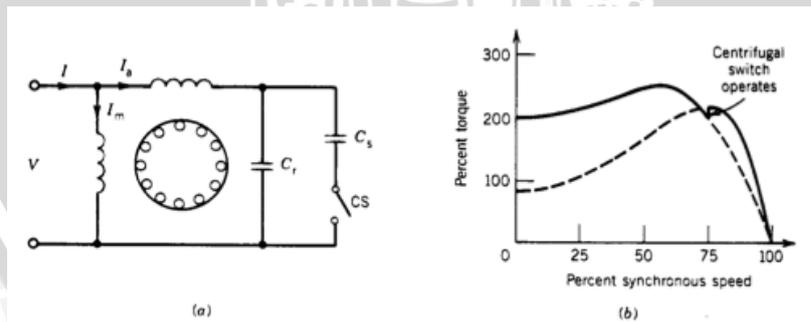
Pada konfigurasi ini kapasitor yang terpasang seri dengan kumparan bantu tidak dilengkapi dengan saklar sentrifugal. Hal ini menyebabkan faktor daya dan efisiensinya menjadi lebih baik, namun dengan mengorbankan torsi starting. Seperti terlihat pada kurva torsi-kecepatan di Gambar 2.9 (b).



Gambar 2.9 (a) rangkaian skematik (b) kurva torsi-kecepatan (Sen, 1997:390)

2.1.4.4 Motor Kapasitor Start dan Kapasitor Tetap (*Capacitor-Start Capacitor-Run Motor*)

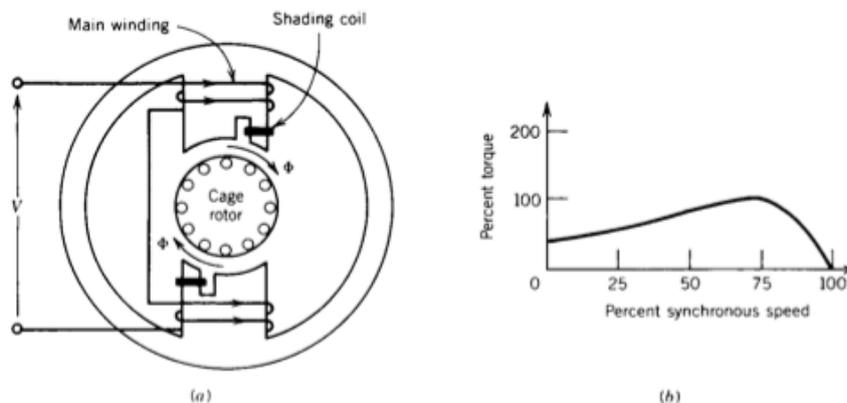
Merupakan gabungan antara konfigurasi kapasitor start dan kapasitor tetap. Konfigurasi ini menghasilkan pengasutan yang optimal serta kondisi berjalan yang baik. Ini merupakan konfigurasi dengan performa yang paling baik. Gambar skematik dan kurva torsi-kecepatan ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 (a) rangkaian skematik (b) kurva torsi-kecepatan Sumber Sen 1997:390

2.1.4.5 Motor Kutub Bayangan (*Shaded-Pole Motor*)

Konfigurasi ini merupakan konfigurasi yang paling berbeda dengan yang lain, karena mengubah bentuk dari kumparan motor. Motor ini memiliki konstruksi *salient-pole* seperti pada gambar berikut ini



Gambar 2.11 (a) konfigurasi motor (b) kurva torsi-kecepatan
Sumber Sen 1997:391

Tabel 2.1 adalah tabel perbandingan antara tiap konfigurasi motor induksi satu fasa untuk torsi, beban nominal, daya, harga dan aplikasinya dalam industri.

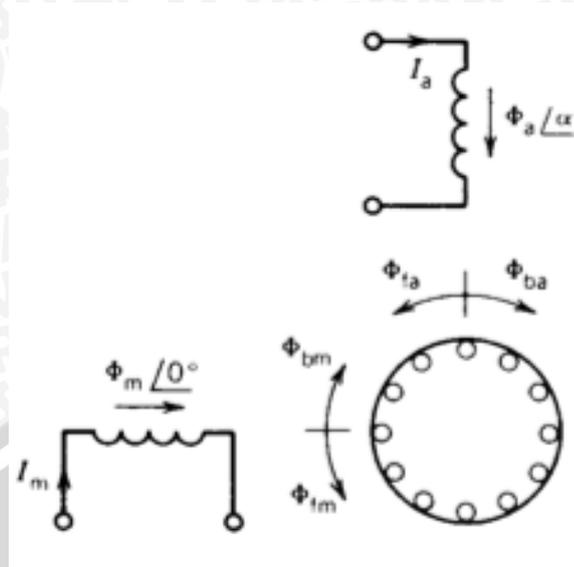
Tabel 2.1 Tabel perbandingan untuk tiap konfigurasi motor induksi satu fasa

Type of Motor	Torque as % of Rated Torque		Rated Load		Horsepower Range	Approx. Comparative Price (%)	Applications
	Starting	Breakdown	Power Factor	Efficiency			
Split-phase (resistance-start)	100-250	Up to 300	50-65	55-65	1/20-1	100	Fans, blowers, centrifugal pumps, washing machines, etc. Loads requiring low or medium starting torque
Capacitor-start	250-400	Up to 350	50-65	55-65	1/8-1	125	Compressors, pumps, conveyors, refrigerators, air-conditioning equipment, washing machines, and other hard-to-start loads
Capacitor-run	100-200	Up to 250	75-90	60-70	1/8-1	140	Fans, blowers, centrifugal pumps, etc. Low noise applications
Capacitor-start, capacitor-run	200-300	Up to 250	75-90	60-70	1/8-1	180	Compressors, pumps, conveyors, refrigerators etc. Low noise and high starting torque applications
Shaded-pole	40-60	140	25-40	25-40	1/200-1/20	60	Fans, hair driers, toys, etc. Loads requiring low starting torque

(Sen, 1997: 392)

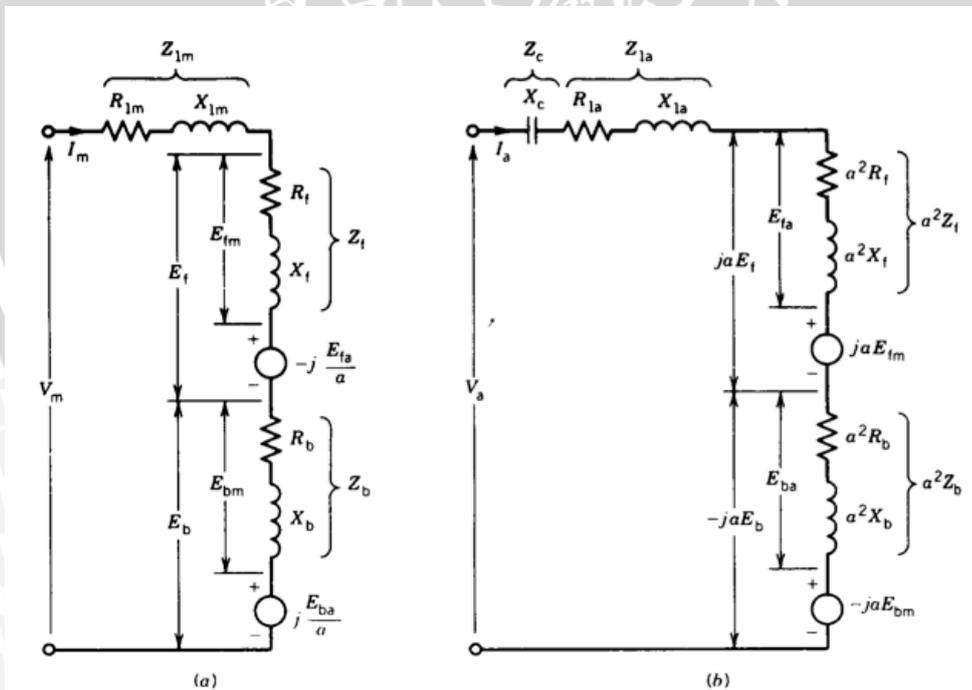
2.1.5 Rangkaian Ekuivalen Motor Kapasitor Tetap

Rangkaian ekuivalen motor kapasitor tetap bisa diturunkan dari teori medan putar ganda. Pada motor kapasitor tetap, kumparan bantu bekerja dari motor diam sampai motor berputar tanpa pelepasan dengan menggunakan saklar sentrifugal. Pada kumparan utama dan kumparan bantu mengalir arus seperti pada gambar 2.12, kemudian fluks pada kumparan utama terbagi menjadi dua, yaitu arah maju dan arah mundur. Begitu juga dengan fluks pada kumparan bantu. Keempat fluks yang berputar ini akan menginduksikan tegangan pada kedua kumparan.



Gambar 2.12 Kumparan stator dan rotor pada motor dengan teori *double-revolving field* (Sen, 1997:404)

Kumparan utama bisa direpresentasikan pada gambar 2.13 (a) dimana tegangan yang diinduksikan oleh fluks maju dan mundur yang terbentuk pada kumparan dilambangkan dengan E_{fm} dan E_{bm} . Tegangan terinduksi $-j E_{fa}/a$ dan $j E_{ba}/a$ pada kumparan utama direpresentasikan sebagai tegangan dalam.



Gambar 2.13 (a) rangkaian ekuivalen kumparan utama
(b) rangkaian ekuivalen kumparan bantu
(Sen, 1997:404)

a merepresentasikan rasio lilitan antara kumparan utama dan kumparan bantu. Sedangkan $-j$ merepresentasikan nilai *phase lag* sebesar $\pi/2$ radian. Gambar 2.13 (b) merepresentasikan rangkaian ekuivalen kumparan bantu dimana jaE_{fm} dan $-jaE_{bm}$ merupakan nilai tegangan dalam yang dihasilkan oleh fluks yang terjadi pada kumparan utama. Persamaan tegangan dan arus pada rangkaian ekuivalen di atas adalah sebagai berikut

$$V_m = I_m(Z_{1m} + Z_f + Z_b) - j\frac{E_{fa}}{a} + j\frac{E_{ba}}{a} \quad (2-20)$$

$$V_a = I_a(Z_c + Z_{1a} + a^2Z_f + a^2Z_b) + jaE_{fm} - jaE_{bm} \quad (2-21)$$

$$V_m = V_a \quad (2-22)$$

$$I_s = I_m + I_a \quad (2-23)$$

kemudian

$$E_{fa} = I_a a^2 Z_f \quad (2-24)$$

$$E_{ba} = I_a a^2 Z_b \quad (2-25)$$

$$E_{fm} = I_m Z_f \quad (2-26)$$

$$E_{bm} = I_m Z_b \quad (2-27)$$

dari persamaan diatas bisa disederhanakan menjadi

$$V_m = (Z_{1m} + Z_f + Z_b)I_m - ja(Z_f - Z_b)I_a \quad (2-28)$$

$$V_a = ja(Z_f - Z_b)I_m + (Z_c + Z_{1a} + a^2Z_f + a^2Z_b)I_a \quad (2-29)$$

dari persamaan di atas bisa didapatkan nilai I_m dan I_a .

Untuk torsi yang dihasilkan pada saat kondisi pengasutan bisa didapatkan dari nilai selisih dari torsi maju dan torsi mundur.

$$T = T_f - T_b = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_{syn}} \quad (2-30)$$

Dari gambar 2.13 didapatkan persamaan $P_{gf} - P_{gb}$ sebagai berikut :

$$P_{gf} - P_{gb} = (|I_m|^2 + |aI_a|^2)(R_f - R_b) + 2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)\sin(\theta_a - \theta_m) \quad (2-31)$$

Pada saat kondisi pengasutan, slip bernilai 1 dan $R_f = R_b$ sehingga persamaan torsi menjadi

$$T_{st} = \frac{2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)}{\omega_{syn}} \sin(\theta_a - \theta_m) \quad (2-32)$$

$$= KI_a I_m \sin \alpha$$

Nilai torsi sebanding dengan pertambahan arus kuadrat seperti yang dijelaskan Zuhail dalam bukunya *Dasar Tenaga Listrik* pada halaman 89.

$$\tau \propto I^2 \quad (2-33)$$

Untuk mendapatkan nilai torsi pengasutan dapat juga menggunakan persamaan 2-37. Nilai torsi didapatkan dari perbandingan antara arus pada saat pengasutan dengan arus pada saat *steady state*. Kemudian torsi pada pengasutan dan pada saat *steady state*.

$$\frac{\tau_{st}}{\tau_{fL}} = \left(\frac{I_{st}}{I_{fL}} \right)^2 \times S_{fL} \quad (2-34)$$

2.2 Karakteristik Beban

Persamaan torsi secara umum dapat dijelaskan pada persamaan 2-35

$$T_m = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2-35)$$

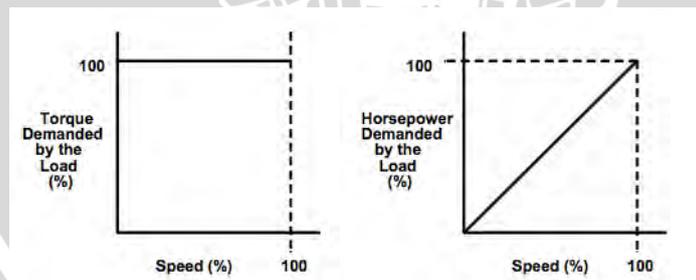
dimana,

- T_m = torsi motor sebagai fungsi dari kelajuan (Nm)
- T_L = torsi motor sebagai fungsi dari kelajuan (Nm)
- J = total momen inersia sistem termasuk rotor motor dan bagian-bagian beban ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- ω = kecepatan sudut (rad/s)
- t = waktu (s)

Beban yang diaplikasikan pada motor dikelompokkan menjadi dua karakter berdasarkan kebutuhan torsi dan hubungannya dengan kecepatan. Antara lain:

- Beban dengan torsi konstan

Beban dengan torsi yang konstan biasanya ditemukan pada beban friksi. Kurva beban terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Kurva karakteristik beban dengan torsi konstan (Allen-Bradley, 2011)

Daya kuda (hp) adalah hasil perkalian antara torsi dan kecepatan.

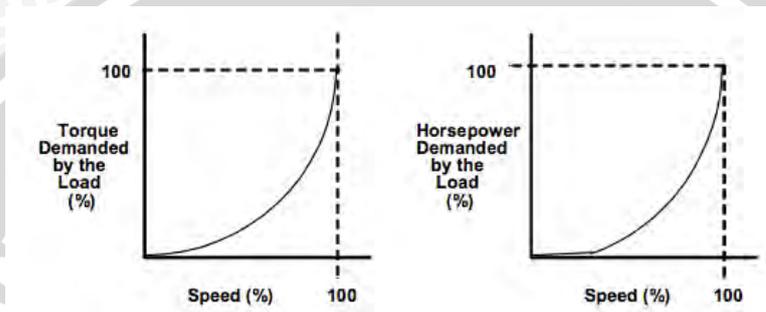
Torsi tetap konstan pada tipe beban ini, hp adalah fungsi dari kecepatan.

$$HP = \frac{\text{Torque} \times \text{Speed}}{5252} \quad (2-36)$$

dimana 5252 adalah nilai konstanta yang didapatkan dari pembagian 33000 dengan $3,14 \times 2,1$ HP sebanding dengan 33000 *foot-pounds per minute*.

- Beban dengan torsi berubah-ubah

Pada beban ini kebutuhan torsi meningkat dengan nilai kuadrat kecepatan. Kurva karakteristik beban dengan tipe ini terlihat pada gambar 2.15 dimana nilai HP proporsional dengan nilai kecepatan pangkat 3.



Gambar 2.15 Kurva karakteristik beban dengan torsi berubah-ubah
Sumber Allen-Bradley:2011

2.2.1 Karakteristik Tipikal Beban

Data tipikal untuk tiap torsi beban telah diatur oleh *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) dalam publikasinya MG1 pada tahun 2007. Data tipikal torsi beban ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Name of Application	Load Torque as Percent of Full-Load Drive Torque		
	Breakaway	Accelerating	Peak Running
Saws, band, metalworking	30	90	100
Saws, circular, metal, cutoff	25	90	150
Saws, circular, wood, production	50	30	150
Saws, edger (see edgers)			
Saws, gang	60	30	150
Screens, centrifugal (conrifuges)	40	60	125
Screens, vibrating	50	150	70
Separators, air (fan-type)	40	100	100
Shakers, laundry or car	50	150	70
Shapers, flywheel-type	50	50	120
Shovels, dragline, hoisting motion	50	150	100
Shovels, dragline, platform motion	50	100	100
Shovels, large, digging motion	50	200	200
Shovels, large, platform motion	50	100	100
Tension-maintaining drives	100	100	100
Textile machinery	150	100	90
Tools, machine	100	150	100
Tools, machine, broaching, automatic	50	150	150
Tools, machine, lathe, metal production	50	200	200
Tools, machine, mill, boring production metal	100	125	100
Tools, machine, milling, production	100	100	100
Tools, machine, planet, production, metal (see planers, metalworking)			
Tools, machine, shaper, metal, automatic	50	75	150
Vehicles, freight	200	200	200
Vehicles, passenger	100	400	200
Walkways, mechanized	50	50	100
Washers, laundry	25	75	100
Winches	125	150	100

Tabel 2.2 Data Tipikal Torsi Beban

Name of Application	Load Torque as Percent of Full-Load Drive Torque		
	Breakaway	Accelerating	Peak Running
Machines, coarsening	25	50	100
Machines, polishing	50	75	100
Mills, flour grinding	50	75	100
Mills, rolling metal: billet, axel and sheet, bar	50	30	200
Mills, rolling metal: brass and copper finishing	120	100	200
Mills, rolling metal: brass and copper roughing	40	30	200
Mills, rolling metal: merchant mill trains	50	30	200
Mills, rolling metal: plate	40	30	250
Mills, rolling metal: reels, wire or strip	100	100	100
Mills, rolling metal: rod	50	50	200
Mills, rolling metal: sheet and tin (cold rolling)	150	110	200
Mills, rolling metal: strip, hot	40	30	200
Mills, rolling metal: structural and rail finishing	40	30	200
Mills, rolling metal: structural and rail roughing	40	30	250
Mills, rolling metal: tube	50	30	200
Mills, rolling metal: tube piercing and expanding	50	30	250
Mills, rolling metal: tube reeling	50	30	200
Mills, rubber	100	100	200
Mills, saw, band	50	75	200
Mixers, chemical	175	75	100
Mills, concrete	40	50	100
Mixers, dough	175	125	100
Mixers, liquid	100	100	100
Mixers, sand, centrifugal	50	100	100
Mixers, sand, screw	175	100	100
Mixers, slurry	150	125	100
Mixers, solids	175	125	175
Planers, metalworking	50	150	150
Planers, woodworking	50	125	150
Plows, conveyor, belt (ore)	150	150	200
Positioners, indexing (machine tool)	50	200	100
Presses, pellet (flywheel)	150	75	150
Presses, printing, production type	100	150	150
Presses, press (flywheel)	150	75	100
Puller, car	150	110	100
Pumps, adjustable-blade, vertical	50	40	125
Pumps, centrifugal, discharge open	40	100	100
Pumps, oil-field, flywheel	150	200	200
Pumps, oil, lubricating	40	150	150
Pumps, oil fuel	40	150	150
Pumps, propeller	40	100	100
Pumps, reciprocating, positive displacement	175	30	175
Pumps, screw-type, started dry	75	30	100
Pumps, screw-type, primed, discharge open	150	100	100
Pumps, slurry-handling, discharge open	150	100	100
Pumps, turbine, centrifugal, deep-well	50	100	100
Pumps, vacuum (papermill service)	60	100	150
Pumps, vacuum (other applications)	40	60	100
Pumps, vacuum, reciprocating	150	60	150
Pumps, vane-type, positive displacement	150	150	175
Rolls, bending	150	150	100
Rolls, crushing (sugarcane)	50	110	125
Rolls, flaking	30	50	100
Sanders, woodworking, disk (r belt)	30	50	100

Name of Application	Load Torque as Percent of Full-Load Drive Torque		
	Breakaway	Accelerating	Peak Running
Actuators: screw down (rolling mills)	200	150	125
Positioning	150	110	100
Agitators: liquid	100	100	100
Agitators: slurry	150	100	100
Blowers, centrifugal: valve closed	30	30	40
Blowers, centrifugal: valve open	40	110	100
Blowers, positive-displacement, rotary, bypassed	40	40	100
Calendars: textile or paper	75	110	100
Card machines, textile	100	110	100
Centrifuges (extractors)	40	60	125
Chippers, wood, starting empty	50	40	200
Compressors, axial-flow, loaded	40	100	100
Compressors, reciprocating, start unloaded	100	50	100
Conveyors, belt (loaded)	150	130	100
Conveyors, drag (or apron)	175	150	100
Conveyors, screw (loaded)	200	100	100
Conveyors, shaker-type (vibrating)	150	150	75
Coolers, hot solids, rotary (loaded)	175	140	100
Cranes, travelings: bridge motion	100	300	100
Cranes, travelings: trolley motion	100	200	100
Cranes, travelings: hoist motion	50	200	100
Draw presses (flywheel)	50	50	200
Drill presses	25	50	150
Edgers (starting unloaded)	40	30	200
Elevators, bucket (starting loaded)	150	175	150
Elevators, freight (loaded)	200	125	100
Elevators, man lift	50	125	100
Elevators, personnel (loaded)	110	150	100
Escalators, stairways (starting unloaded)	50	75	100
Extruders (rubber or plastic)	150	150	100
Fans, centrifugal, ambient: valve closed	25	60	50
Fans, centrifugal, ambient: valve open	25	110	100
Fans, centrifugal, hot gases: valve closed	25	60	100
Fans, centrifugal, hot gases: valve open	25	200	175
Fans, propeller, axial flow	40	110	100
Feeders, belt (loaded)	100	120	100
Feeders, distributing, oscillating drive	150	150	100
Feeders, screw compacting rolls	150	100	100
Feeders, screw, filter-cake	150	100	100
Feeders, screw, dry	175	100	100
Feeders, vibration motor-driven	150	150	100
Frames, spinning, textile	50	125	100
Grinders, metal	25	50	100
Hoists, skip	100	150	100
Indewers	150	200	150
Ironer, laundry (mangles)	50	50	125
Jointers, woodworking	50	125	125
Kilns, rotary (loaded)	250	125	125
Looms, textile, without clutch	125	125	150
Machines, boring (loaded)	150	150	100
Machines, bottling	150	50	100
Machines, buffing, automatic	50	75	100
Machines, cinder-block, vibrating	150	150	70

(NEMA MG1, 2007)

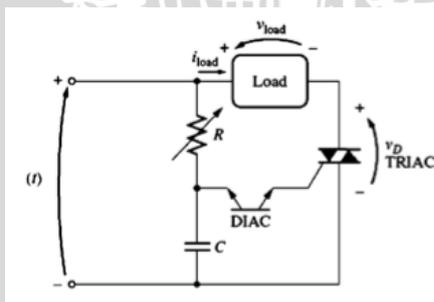
2.3 Pengasutan Metode *Soft-Starting*

Metode sederhana dalam pengontrolan pengasutan pada motor induksi dengan menurunkan tegangan AC melalui kontroler tegangan disebut metode *soft-starting*. Metode *soft-starting* merupakan metode yang sederhana dan digunakan secara luas pada saat ini. Metode *Soft-Starting* mengontrol tegangan fasa stator dengan tujuan membatasi arus stator pada saat pengasutan (Huges, 2006:204).

Konfigurasi dasar dari perancangan *Soft- Starter* ditunjukkan pada Gambar 2.16. Pada konfigurasi tersebut TRIAC dihubungkan dengan sumber tegangan AC dan beban. TRIAC berfungsi sebagai komponen elektronika daya yang mampu mengatur sudut penyalan untuk *soft-starter*. (Boldea, 2002:8).

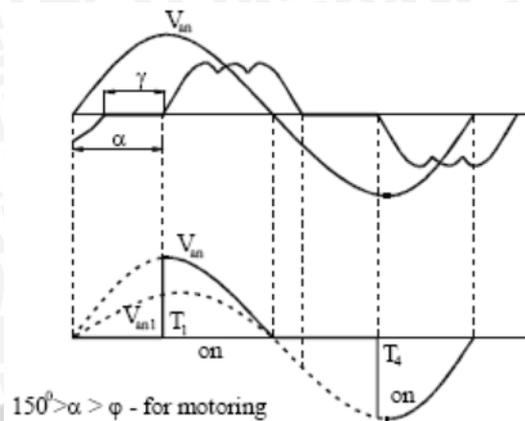
Berbagai metode pengontrolan sudut penyalan komponen elektronika daya telah ditemukan dengan berbagai kompleksitas dan biaya yang harus dikeluarkan. Metode *open loop* merupakan metode dengan biaya rendah dimana metode *open loop* membuat sudut penyalan berjalan linier dengan waktu. Sudut penyalan yang linier menyebabkan tegangan pada motor naik perlahan sejalan dengan akselerasi motor. Waktu lonjakan dapat ditentukan dengan metode coba-coba (*trial and error*) agar memberikan waktu pengasutan terbaik (Huges, 2006:204). TRIAC dipicu setiap setengah siklus dan disinkronkan dengan sumber tegangan AC. Dengan demikian sudut pemucuan merupakan nilai variabel sehingga TRIAC yang terpasang akan konduksi sesuai dengan proporsi sudut penyalannya. Namun metode ini memiliki kelemahan yaitu hanya bisa diaplikasikan pada satu jenis beban saja.

Untuk mengatasi ini digunakan metode *closed loop*. Metode *closed loop* adalah metode yang menghasilkan pengendalian yang lebih rapat terhadap akselerasi motor dengan menambahkan pembacaan arus sebagai feedback menggunakan *digital control* (mikrokontroler) (Huges, 2006:204). Setelah motor secara perlahan berputar, sudut penyalan TRIAC secara terus menerus disesuaikan terhadap perubahan beban yang terpasang di motor induksi.



Gambar 2.16 Konfigurasi standar soft starter motor induksi satu fasa (Chapman, 2005:181)

Sudut pemucuan dihitung terhadap titik persinggungan titik nol (*zero crossing*) jika motor memiliki sudut faktor daya dengan notasi φ_1 dan bentuk gelombang masukan dan luaran ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Kurva tegangan fasa dan arus pada *Soft-starter*.
(Boldea, 2002:9)

Bentuk gelombang arus tidak murni sinusoidal menunjukkan arus yang terdistorsi oleh harmonisa namun motor mampu menerima hal tersebut. Arus stator akan kontinyu jika sudut pemicuan lebih kecil dari sudut faktor daya motor ($\alpha < \varphi_1$) dan sebaliknya arus stator akan diskontinyu jika sudut pemicuan lebih besar dari sudut faktor daya motor ($\alpha > \varphi_1$). Untuk mengurangi tegangan pada proses pengasutan sudut penyalaan pada kondisi arus tidak kontinyu tetap dibutuhkan meskipun harmonisa yang ditimbulkan karena ketidak kontinyuan arus mengganggu peralatan lain yang satu sumber (Boldea, 2002:9).

2.4 TRIAC (*Bidirectional Thyristor*)

TRIAC merupakan gabungan dua *thyristor* yang terpasang antiparalel yang terintegrasi dalam satu komponen dengan terminal *gate* menjadi satu. Aplikasi praktis dari penggunaan TRIAC sebagai saklar elektronik pada umumnya sebagai pengaturan tegangan bolak-balik (AC), antara lain: VAR kompensator, saklar statis, *soft starter* dan *driver* motor (Rashid, 2001:44). Karakteristik dan simbol dari TRIAC ditunjukkan pada Gambar 2.18.

Pada umumnya TRIAC lebih ekonomis dan lebih mudah dalam pengontrolannya dibanding sepasang *thyristor* yang terpasang anti-paralel. Namun dikarenakan konstruksinya yang terintegrasi menimbulkan beberapa kekurangan. Kekurangan TRIAC jika dibandingkan *thyristor* antara lain sensitivitas arus *gate* TRIAC lebih buruk dan waktu pemadaman (*turn-off time*) lebih lama dan dengan alasan yang sama, nilai dv/dt lebih rendah sehingga sulit untuk diaplikasikan pada beban induktif sehingga dibutuhkan rangkaian *snubber* RC pada rangkaian TRIAC.

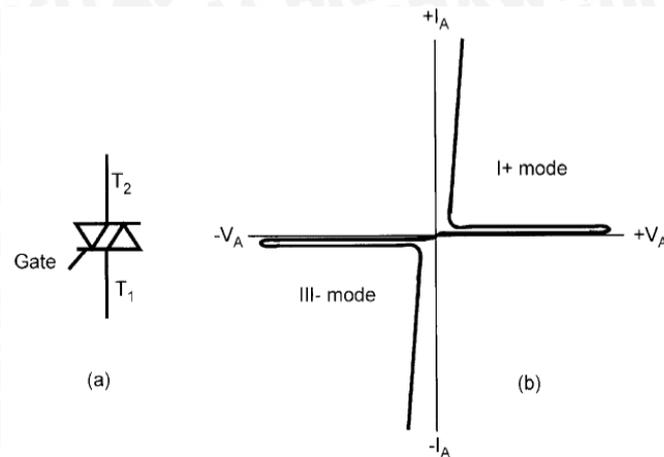
Tabel 2.3 *Rating* Komponen yang Umum Disertakan.

Symbol	Description
V_{TM}, V_{FM}	Maximum on-state voltage drop (at specified junction temperature and forward current)
I_{DRM}	Maximum forward off-state current (at specified junction temperature and forward voltage)
I_{RRM}	Maximum reverse off-state current (at specified junction temperature and reverse voltage)
dv/dt	Minimum critical rate of rise of off-state voltage at specified junction temperature and forward-blocking voltage level
V_{GT}	Maximum gate trigger voltage (at specified temperature and forward applied voltage)
V_{GD}, V_{GDM}	Maximum gate non-trigger voltage (at specified temperature and forward applied voltage)
I_{GT}	Maximum gate trigger current (at specified temperature and forward applied voltage)
T_{gr} (GTO)	Maximum turn-on time (under specified switching conditions)
T_q	Maximum turn-off time (under specified switching conditions)
t_D	Maximum turn-on delay time (for specified test)
$R_{\theta(J-C)}$	Maximum junction-to-case thermal resistance
$R_{\theta(C-S)}$	Maximum case-to-sink thermal resistance (interface lubricated)

Sumber: Rashid, 2001:38

Pada tabel 2.3 menjelaskan parameter-parameter yang terdapat pada datasheet TRIAC yang merupakan parameter-parameter pemilihan TRIAC untuk *soft starter*.

TRIAC pada dasarnya merupakan komponen dua arah, karena itulah terminalnya tidak dapat disebut sebagai anoda maupun katoda. Sebagai gantinya, terminalnya disebut MT_1 dan MT_2 . Jika terminal MT_2 lebih positif terhadap terminal MT_1 , TRIAC dipicu dengan memberikan sinyal *gate* positif atau negatif. Bila MT_2 lebih negatif terhadap terminal MT_1 maka pemicuan dilakukan dengan memberikan sinyal pulsa negatif antara *gate* dan terminal MT_1 . Tanpa memperdulikan kedua polaritas sinyal *gate*, TRIAC dapat dinyalakan baik sinyal positif ataupun negatif. Dalam prakteknya, kepekaan bervariasi antara suatu kuadran dengan kuadran lainnya, umumnya TRIAC dioperasikan pada kuadran I^+ (tegangan dan arus *gate* positif) dan III^- (tegangan dan arus *gate* negatif) (Rashid, 2001:38).



Gambar 2.18 Simbol dan karakteristik $v - i$ dari TRIAC.

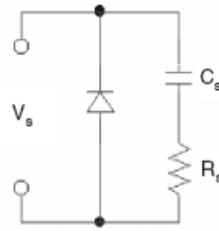
Sumber: Bose, 2002:10

2.4.1 Pengaman Semikonduktor Daya

Kegagalan operasional pada semikonduktor daya disebabkan baik mekanisme yang terjadi pada semikonduktor daya itu sendiri atau faktor eksternal dari rangkaian keseluruhan. Kegagalan akibat faktor komponen antara lain disebabkan rusaknya komponen (*component breakdown*) sehingga menyebabkan arus berlebih atau tegangan berlebih karena komponen berada pada *mode-on* terus-menerus. Kegagalan akibat faktor rangkaian berhubungan erat dengan beban, yaitu ketika terjadi perubahan arus dan tegangan yang diakibatkan perubahan arus seketika pada beban induktif.

Pada saat TRIAC mencatu beban induktif, komutasi dv/dt mungkin terjadi ketika TRIAC berganti kondisi dari nyala ke padam (*on state* ke *off state*). Beban induktif menyebabkan tegangan dan arus tidak sefasa sehingga ketika TRIAC beralih ke kondisi padam yaitu ketika arus menurun dibawah arus *holding* menyebabkan tegangan yang besar dengan polaritas terbalik pada terminal TRIAC. Pemadaman mengakibatkan tegangan pada TRIAC naik seketika dengan kecepatan yang perlu diperhatikan agar tidak memicu kembali komponen daya.

Rangkaian *snubber* merupakan rangkaian pengaman semikonduktor daya akibat tegangan berlebih yang umum digunakan. Rangkaian *snubber* merupakan rangkaian disipasi daya yang digunakan untuk mengeliminasi tegangan taji yang timbul oleh rangkaian bersifat induktif ketika terjadi proses pensaklaran. Rangkaian *snubber* sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Rangkaian *snubber* sederhana.
(Rashid, 2001:19)

Rating dv/dt dari yang diijinkan pada komponen daya yang digunakan ditunjukkan pada *datasheet* komponen tersebut. Nilai *dv/dt* yang digunakan harus sama atau dibawah dari nilai *dv/dt* yang tertera pada *datasheet*. Untuk menghitung nilai komponen *snubber*, *dv/dt* komponen berhubungan dengan frekuensi resonansi (f_0) (Fairchild, 2002:4). Jika bentuk gelombang tegangan fungsi sinus, nilai *dv/dt* pada komponen dihitung melalui persamaan:

$$V(t) = V_p \sin \omega t \tag{2-37}$$

$$dV/dt = V_p \omega \sin \omega t$$

$$dV/dt_{(max)} = V_p 2\pi f_0$$

$$f_0 = \frac{dV/dt}{2\pi V_{P(max)}} \tag{2-38}$$

$$C_s = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \tag{2-39}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{L}{C_s}} \tag{2-40}$$

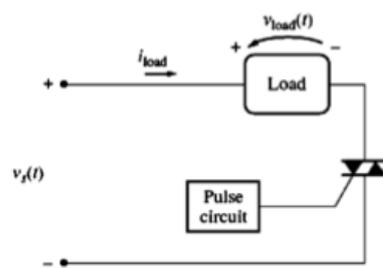
Jika nilai yang ditetapkan antara lain dv/dt_{max} diambil dari *datasheet* komponen sehingga nilai kapasitor *snubber* C_s dan resistor *snubber* R_s dapat diketahui.

2.4.2 Phase Control Beban Induktif

Phase control merupakan rangkaian TRIAC terkontrol dengan menunda sudut penyalan sehingga daya yang disalurkan ke rangkaian mampu dikontrol (Rashid, 2001:140). *Phase control* digunakan pada aplikasi kontrol lampu atau pengontrol kecepatan motor.

Rangkaian dasar *phase control* jika menggunakan TRIAC ditunjukkan pada gambar 2.16.

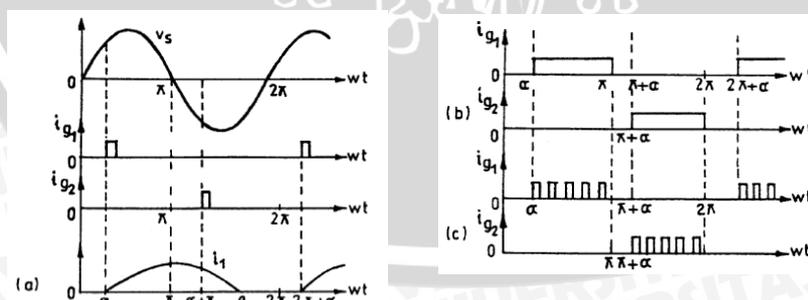




Gambar 2.20 Rangkaian *phase control* dengan rangkaian pemucuan TRIAC (Chapman, 2005:181)

Seperti terlihat pada gambar 2.16 bahwa rangkaian dasar *phase control* terdiri atas DIAC dan TRIAC sebagai komponen utama. Prinsip kerja DIAC sama dengan TRIAC namun tanpa terminal gate. DIAC digunakan untuk memicu terminal gate TRIAC. Untuk beban induktif maka diperlukan rangkaian snubber yang diparalel dengan TRIAC berupa resistor dan kapasitor yang dihubungkan seri. Pada gambar 2.20 komponen diac ini dapat diganti dengan rangkaian penghasil pulsa untuk memudahkan pemucuan *gate* TRIAC.

Pulsa tunggal dalam pemucuan thyristor cocok dalam aplikasi beban resistif namun pulsa tunggal tidak cocok ketika beban bersifat induktif seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21 (a). Ketika thyristor T_1 ditrigger pada $\omega t = \pi + \alpha$, T_1 masih konduksi karena beban induktif. Ketika T_1 berhenti konduksi pada titik β , pulsa pemucuan telah hilang sehingga TRIAC gagal konduksi saat siklus negatif. Kegagalan thyristor T_2 untuk konduksi menyebabkan rangkaian beroperasi sebagai penyearah (Rashid, 2001:311). Masalah ini dapat dipecahkan dengan menggunakan pulsa pemucuan thyristor yang kontinu atau menggunakan pulsa *train* untuk menurunkan disipasi daya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21 (b) dan (c).



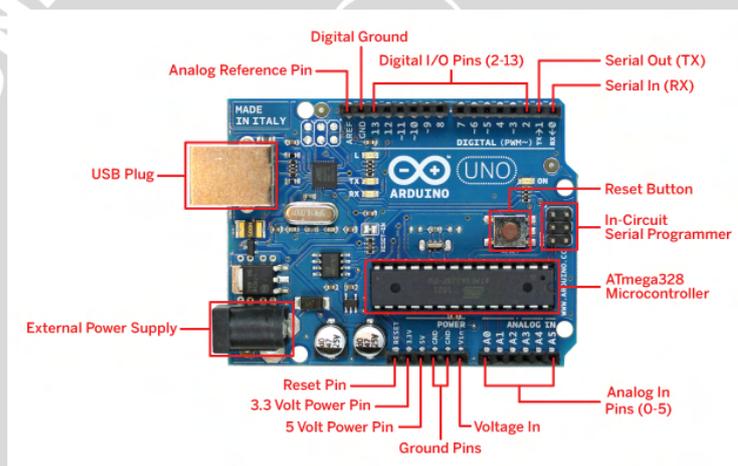
Gambar 2.21 (a) Kegagalan pemucuan menggunakan pulsa tunggal. (b) Pemucuan menggunakan pulsa kontinu. (c) Pemucuan menggunakan pulsa *train*.

(Rashid, 2001:311)

2.5 Arduino

Arduino adalah sebuah project *open-source developing tools* berupa mikrokontroler yang dirancang oleh sebuah tim yang dimotori oleh Massimo Banzi dari Italia. Arduino ini ditujukan untuk seniman, designer, *hobbyist*, dan orang awam yang ingin bereksperimen dengan komponen elektronika meskipun tanpa latar belakang teknik dan awam dengan bahasa pemrograman. Arduino memiliki bahasa pemrograman yang didasarkan atas *board* Wiring yang begitu mudah dipahami dan sederhana sehingga setiap orang bisa menggunakan Arduino. Kekuatan Arduino terletak pada basis komunitas karena sifat Arduino adalah *open-source*, sehingga begitu banyak orang yang *upload* project mereka dengan Arduino di forum-forum yang membahas tentang Arduino di *internet*.

2.5.1 Arduino Uno



Gambar 2.22 Arduino Uno
(Margolis, 2011:3)

Jenis Arduino yang tersedia begitu beragam, antara lain Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino Mini, Arduino Lilypad, Arduino Leonardo, dll. Jenis yang paling umum digunakan di kalangan praktisi adalah Arduino Uno seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22. Komponen utama dari Arduino ini adalah Mikrokontroler ATmega328 yang berfungsi sebagai “otak” dari Arduino. Kemudian tersedia pula *USB plug* yang berfungsi sebagai “jembatan” antara Arduino dengan program yang tersedia di PC/Notebook. Sebuah kabel USB dibutuhkan untuk bisa menghubungkan Arduino dengan PC/Notebook. Di program inilah nanti para pengguna bisa memprogram Arduinonya sesuai dengan keinginan dan kebutuhan.

Selain menggunakan USB plug, untuk memprogram Arduino dapat pula digunakan In-Circuit Serial Programmer yang juga telah disediakan di board Arduino. Pada Gambar 2.22 dapat dilihat juga terdapat External Power Supply port, ini adalah port yang digunakan untuk menyuplai daya ke board Arduino. Board Arduino Uno membutuhkan tegangan DC sebesar 5 volt. Terdapat total 28 pin pada Arduino, 12 pin difungsikan sebagai Digital I/O pin yaitu dari pin 2-13. 6 pin digunakan sebagai Analog Input pin yaitu pin A0-A5. Kemudian terdapat Analog Reference Pin, Digital Ground Pin, Serial Out (Tx) Pin, Serial In (Rx) Pin, Reset Pin, 3.3 Volt Power Pin, 5 Volt Power Pin, 2 Ground Pin, dan Voltage In Pin.

2.6 *Optocoupler*

Komponen yang digunakan untuk mengisolasi komponen elektronika daya dengan rangkaian berdaya rendah yang sebagai rangkaian pengontrol salah satunya adalah *optocoupler*. Sering kali ditemukan rangkaian elektronika daya orde megawatt dikontrol hanya dengan rangkaian beberapa watt. *Optocoupler* berfungsi sebagai pengisolasi sinyal listrik antara rangkaian sinyal masukan dan keluaran (Mazda, 1997: 82). *Optocoupler* merupakan alat yang digunakan untuk mengkopel suatu sumber dengan detektor menggunakan perantara cahaya. Oleh karena itu piranti ini disebut dengan *optoisolator/optocoupler*.

Optocoupler terbuat dari kombinasi dari sumber cahaya dan pendeteksi cahaya yang tergabung dalam satu kemasan. *Light emitting diode* atau LED seringkali digunakan sebagai sumber cahaya, dan berbagai komponen semikonduktor sebagai detektor cahaya. Kaca atau plastik digunakan sebagai pemisah antara sumber cahaya dan detektor, sehingga memungkinkan untuk ditempatkan pada tempat yang berdekatan.

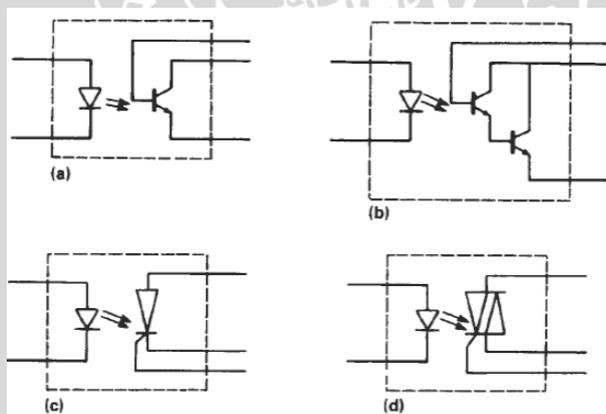
Pada prinsipnya, sinyal listrik dalam bentuk arus pada masukan diubah menjadi sinyal optik dengan menggunakan sumber cahaya LED. Sinyal optik tersebut akan diterima oleh detektor untuk diubah kembali menjadi sinyal listrik. Umumnya *optocoupler* dipakai untuk mengisolasi sinyal listrik yang ada pada rangkaian masukan dan luaran sehingga dapat digunakan transmisi sinyal antar rangkaian.

Optocoupler memiliki beberapa parameter antara lain: tingkat isolasi antara sumber cahaya dan detektor, rasio transfer arus masukan-luaran, dan kecepatan operasi *optocoupler*. Resistansi isolasi dalam order 10^{11} ohm, dan biasanya lebih tinggi dari resistansi bocor antar pin pada papan sirkuit rangkaian. Cara lain untuk mengetahui

tingkat isolasi dengan nilai tegangan maksimum antara masukan dan keluaran tanpa terjadi tembus. Jika tembus terjadi akan membentuk jalur resistif karena terbentuknya jalur karbon pada permukaan atau terbentuknya jalur hubung singkat antara sumber dan detektor.

Rasio transfer arus merupakan rasio antara arus luaran dan arus masukan dari sumber potensial, ketika *optocoupler* bekerja. Rasio transfer arus ditentukan dengan beberapa faktor, termasuk tingkat arus dari sumber potensial dan saturasi dari detektor. Pada umumnya ketika LED digunakan sebagai sumber cahaya, dan cahaya yang dikeluarkan oleh LED akan meredup seiring waktu pemakaian memberikan penurunan nilai rasio transfer arus. Sedang untuk kecepatan operasi pensaklaran merupakan kecepatan pensaklaran didasarkan pada frekuensi maksimum operasi.

Berbagai jenis dari detektor yang digunakan pada *optocoupler* ditunjukkan pada Gambar 2.23. *Fototransistor-coupler* dikenal dalam kategori harga rendah dengan kecepatan operasi kerja 100-500 kHz dan minimum rasio transfer arus antara 20% dan 300%. *Fotodarlington* memiliki rasio transfer arus antara 100% dan 1000% namun memiliki tingkat keakuratan yang rendah dikarenakan adanya tingkat penguatan pada hubungan *darlington* dengan kecepatan operasi termasuk rendah, dengan nilai antara 20 kHz dan 10 kHz.



Gambar 2.23 Beberapa contoh detektor optik aplikasi elektronika daya.

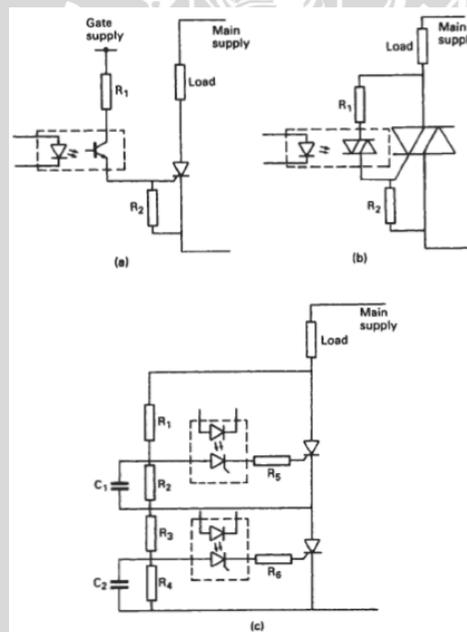
a) Transistor, b) Darlington, c) *Thyristor*, d) *Triac*

Sumber: Mazda, 1997:83

Fotothyristor dan fototriac digunakan sebagai detektor untuk aplikasi dengan arus yang besar. Namun parameter yang perlu diperhatikan lebih lanjut adalah arus yang mengalir melalui LED yang nantinya akan memicu *thyristor* atau *TRIAC*. Efisiensi hantaran antara LED dengan fototransistor yang rendah sehingga perlu untuk mendesain thyristor atau *TRIAC* yang memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi. Biasanya proses

desain memerlukan perhatian lebih agar tidak menurunkan parameter yang lain seperti kemampuan hantaran arus. Beberapa parameter umum dari fototransistor dan fototriac antara lain: arus pemicuan 10-130 mA, mampu menyalurkan 100 sampai 300 mA, dan Waktu kerja 1-10 ms.

Gambar 2.24 menunjukkan beberapa contoh penggunaan dari *optocoupler*. Catu daya terpisah ditunjukkan pada Gambar 2.24 (a) sehingga rating tegangan relatif rendah digunakan pada detektor optik pada rangkaian luaran. Rangkaian pada Gambar 2.24 (b) tidak memerlukan catu daya pada *gate* yang terpisah, karena diambil dari sumber yang sama dengan beban. Namun bagian detektor optik pada rangkaian luaran akan menerima tegangan penuh dari sumber utama ketika tidak konduksi, sehingga *rating* tegangan dari komponen perlu diperhatikan (Mazda, 1997:85). Kadang *optocoupler* dilengkapi dengan komponen *zero crossing detector* yang tergabung menjadi satu paket sehingga komponen elektronika daya TRIAC mampu disaklar pada titik *zero crossing* sumber tegangan AC guna meminimalisir interferensi gelombang radio.



Gambar 2.24 Contoh rangkaian aplikasi penggunaan *optocoupler*

- a) Tristor dengan catu daya terpisah, b) Triac dan beban dengan catu daya sama, c) Triac dengan konfigurasi seri.

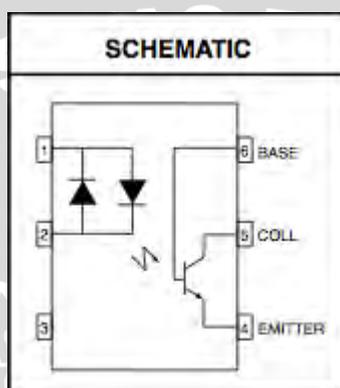
Sumber: Mazda, 1997:84

2.7 Zero Cross Detector

Rangkaian *zero cross detector* berfungsi untuk mendeteksi titik persimpangan gelombang tegangan bolak-balik dengan titik nol. *Soft starter* membutuhkan rangkaian *zero cross detector* karena pada dasarnya soft starter merupakan rangkaian kontrol fasa yang melakukan penundaan pemicuan TRIAC pada sudut antara 0° - 180° atau dengan

kata lain mengatur sudut penyalan TRIAC pada saat proses pengasutan motor induksi. Fungsi *zero cross detector* pada *soft starter* adalah memberikan referensi pada rangkaian kontrol agar titik mulai pemicuan TRIAC berada pada titik nol gelombang tegangan bolak-balik. Jika *soft starter* tidak menggunakan rangkaian *zero cross detector* maka yang terjadi adalah timbulnya spike pada tegangan bolak-balik.

Untuk menghasilkan sinyal *zero cross*, digunakan komponen elektronika berupa *optocoupler*. Salah satu yang dapat digunakan adalah *optocoupler* H11AA1. H11AA1 merupakan komponen elektronika yang berisi *diode*, LED, dan *transistor*. Deskripsi pin H11AA1 terlihat pada gambar 2.25.



Gambar 2.25 Pin description H11AA1
(Datasheet Optocoupler H11AA1)

Pada pin 1 adalah anoda yang nantinya dihubungkan pada sumber tegangan AC 220 V, dan pada pin 2 adalah katoda yang nantinya dihubungkan pada fasa netral dari sumber tegangan, sedangkan untuk pin tidak perlu dihubungkan pada apapun. Untuk pin 4 adalah emitor dari transistor yang nantinya dihubungkan dengan ground. Untuk pin 5 adalah kolektor dari transistor yang nantinya dihubungkan seperti pada gambar 2.25. Untuk pin 6 adalah basis dari transistor dan tidak perlu dihubungkan dengan apapun.

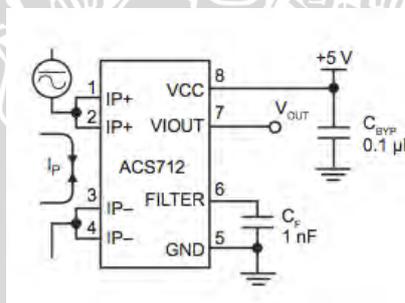
Prinsip kerja dari rangkaian ini adalah sumber AC dihubungkan dengan pin 1 dan netral nya dihubungkan dengan pin 2. Setelah dihubungkan arus akan melewati LED yang terdapat di dalam optocoupler dan akan membuat LED menyala dan kemudian memicu phototransistor untuk bekerja. Ketika lampu LED menyala maka arus collector (I_c) akan meningkat secara drastis dan begitu juga sebaliknya jika LED mati maka I_c akan bernilai kecil sekali. Dengan kata lain fungsi dari phototransistor yang terdapat di dalam H11AA1 adalah berfungsi seperti saklar dengan parameter LED *on & off*.

2.8 Sensor Arus

Pada penelitian ini dibutuhkan alat yang bisa berfungsi sebagai feedback dari sistem. Alat tersebut berfungsi membaca besarnya nilai arus starting dari motor induksi, kemudian dari pembacaan itu diumpankanbalikkan ke ADC dari mikrokontroler Arduino dan digunakan sebagai referensi untuk menentukan sudut penyalan yang terbaik dari TRIAC. Alat yang sesuai dengan fungsi di atas adalah sensor arus.

Pada penelitian kali ini digunakan sensor arus produksi Allegro dengan tipe ACS712 yang terlihat pada gambar 2.26. ACS712 ini mampu mendeteksi arus DC dan AC. Tersedia untuk 3 nilai arus maksimal, yaitu 5A, 20A, dan 30A.

Prinsip pembacaan arus di ACS712 ini menggunakan prinsip Hall Effect. Di dalam sensor ini terdapat rangkaian sensor Hall dengan alur tembaga yang terletak di dekat permukaan. Arus yang melewati jalur ini akan menghasilkan medan magnetic yang akan dideteksi oleh Hall IC dan kemudian akan diubah menjadi tegangan proporsional. Tegangan keluaran ACS712 bernilai 5 V untuk sensing arus maksimal. Sedangkan untuk nilai arus 0 A akan menghasilkan tegangan setengah dari VCC yaitu 2.5 V.



Gambar 2.26 Rangkaian Sensor Arus ACS712
(Datasheet ACS71)

Pada tabel 2.4 adalah *pin-out description* dari sensor arus ACS712

Tabel 2.4 Deskripsi Pin-Out Sensor Arus ACS712

No	Nama	Deskripsi
1 dan 2	IP+	Terminal untuk arus yang akan dideteksi
3 dan 4	IP-	Terminal untuk arus yang akan dideteksi
5	GND	Terminal ground
6	FILTER	Terminal untuk kapasitor eksternal
7	VOUT	Keluaran sinyal analog
8	VCC	Catu untuk sensor arus

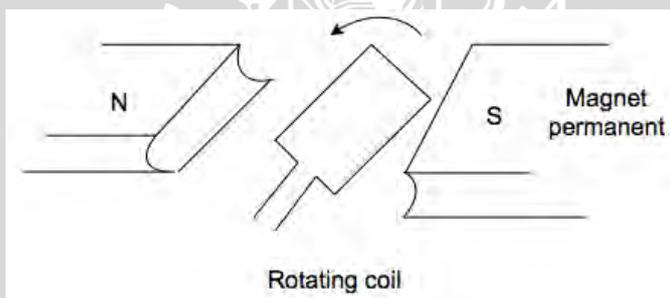
(datasheet ACS712)

2.9 Tachogenerator

Tachogenerator adalah alat yang berfungsi untuk mengubah putaran mekanik menjadi tegangan berupa sinyal *analog* sebagai indikator atau *feedback* kontrol yang proporsional terhadap putaran rotor (Bandyopadhyay, 2006:339).

Tachogenerator yang digunakan adalah merk Leybold-Didactic seperti pada gambar 2.28. Tachogenerator ini memiliki karakteristik setiap 1000 rpm akan menghasilkan 1 V DC dan berlaku kelipatannya. Agar mampu diolah oleh mikrokontroler, tachogenerator ini membutuhkan penguat tegangan. Hal ini dikarenakan port ADC mikrokontroler hanya bisa menerima tegangan minimal sebesar 2,5 V DC.

Konstruksi tachogenerator mirip dengan generator DC penguat terpisah dan menggunakan magnet permanen untuk menjaga kekuatan medan magnet agar tetap konstan. Prinsip kerja tachogenerator juga mirip dengan generator DC seperti pada gambar 2.27



Gambar 2.27 Prinsip kerja tachogenerator

Besar tegangan yang dihasilkan oleh tachogenerator proporsional terhadap putaran rotor, sesuai dengan rumus 2-27

$$E = c n \Phi \quad (2-27)$$

dimana E adalah tegangan yang dikeluarkan oleh tachogenerator dan c adalah konstanta, n adalah jumlah putaran rotor per menit dan Φ adalah fluks magnet.



Gambar 2.28 Tachogenerator Leybold-Didactic

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan berupa kajian pustaka dengan menggunakan sumber bacaan yang relevan dengan judul skripsi ini. Studi literatur yang dilakukan mencakup tentang prinsip kerja motor induksi satu fasa, teori pengasutan motor induksi menggunakan komponen elektronika daya berupa thyristor, prinsip komponen elektronika daya TRIAC, rangkaian pengaman TRIAC, pengetahuan dasar mikrokontroler Arduino, pengetahuan mengenai optocoupler, prinsip kerja sensor arus ACS712, serta konsep *zero crossing detection*.

3.2 Perancangan Alat

Perancangan *soft starter* motor induksi satu fasa terbagi dalam dua bagian yaitu perancangan perangkat keras berupa penentuan TRIAC, perancangan *zero cross detector*, perancangan rangkaian pemucuan *gate* TRIAC, perancangan rangkaian sensor arus dan sensor kecepatan dan perancangan perangkat lunak berupa diagram alir sistem *soft starting*.

3.3 Pengujian dan Analisis

Pengujian dilakukan pada setiap blok rangkaian untuk mengamati hasil pengujian pada masing-masing blok yang telah dirangkai. Setelah pengujian pada masing-masing blok selesai, pengujian dilakukan pada keseluruhan blok yang menjadi satu sistem *soft starter* motor induksi satu fasa dengan metode *closed loop*.

Data dari keseluruhan pengujian akan dijadikan bahan acuan dalam mengambil kesimpulan. Pengujian yang dilakukan dibagi menjadi beberapa tahap yaitu:

1. Pengujian rangkaian *zero crossing detector*
2. Pengujian rangkaian optocoupler
3. Pengujian sudut penyalaan TRIAC
4. Pengujian sensor arus ACS712
5. Pengujian rangkaian tachogenerator
6. Pengujian keseluruhan sistem *soft starter* motor induksi satu fasa dengan metode *closed loop*

Setelah melakukan pengujian terhadap *soft starter* motor induksi satu fasa yang telah dibuat tahap selanjutnya adalah pengambilan kesimpulan dari keseluruhan sistem yang telah dibuat. Tahap terakhir adalah penulisan saran dari penyusunan laporan penelitian ini, ran yang dimaksudkan untuk memperbaiki kesalahan-kesalahan yang terjadi untuk menyempurnakan penelitian ntuk pengembangan penelitian di masa mendatang.



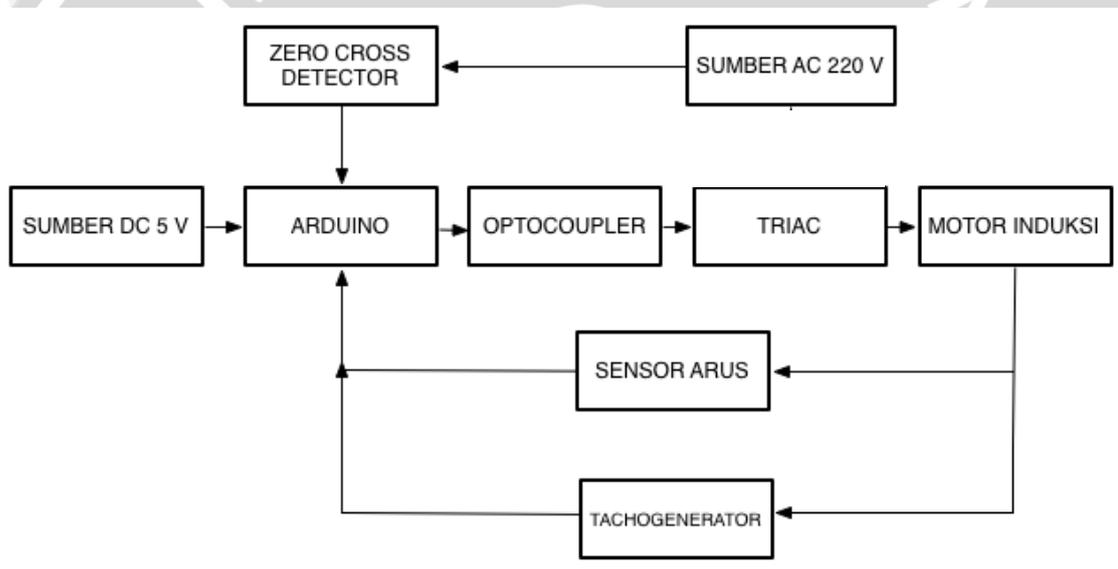
BAB IV

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perancangan dan pembuatan *soft starter* motor induksi satu fasa dengan metode *closed-loop*. Sistem kendali *soft starter* menggunakan mikrokontroler Arduino. Perancangan *soft starter* diwujudkan dalam tahapan perancangan blok diagram *soft starter*, perancangan dan pembuatan perangkat keras, perancangan perangkat lunak.

4.1 Blok Diagram Sistem *Soft Starter*

Berikut ini adalah rancangan blok diagram dari sistem *soft starter* motor induksi satu fasa dengan metode *closed-loop* menggunakan mikrokontroler Arduino.



Gambar 4.1 Diagram Blok Sistem *Soft Starter* dengan metode *closed loop*

Prinsip kerja dari blok diagram pada gambar 4.1 adalah sistem dimulai dengan deteksi fasa yang dilakukan oleh rangkaian *zero cross detector* untuk mendapatkan titik persimpangan antara gelombang tegangan bolak-balik dengan titik nol. Hal ini perlu dilakukan untuk menghindari kesalahan pemicuan TRIAC. Kemudian sinyal keluaran rangkaian *zero cross detector* akan diolah oleh mikrokontroler dalam hal ini Arduino sebagai referensi pemberian sinyal kepada rangkaian optocoupler. Rangkaian optocoupler berfungsi sebagai jembatan pemisah antara tegangan 220 V dan 5 V agar mikrokontroler tidak rusak. Sinyal yang diteruskan oleh optocoupler dari Arduino menjadi sinyal gate dari TRIAC. Proses pengaturan fasa dilakukan oleh TRIAC pada

saat pengasutan motor induksi. Di saat yang sama sensor arus dan tachogenerator akan mengirimkan sinyal feedback kepada Arduino. Sebagai pengatur sistem, Arduino akan menentukan sudut penyalaan untuk proses pengasutan motor induksi. Dengan adanya feedback dari sensor arus dan tachogenerator sistem akan mampu untuk menurunkan arus pengasutan yang tinggi dan menjaga kebutuhan torsi dalam proses pengasutan.

4.2 Perancangan Perangkat Keras Soft Starter

Perancangan perangkat keras soft starter terbagi menjadi beberapa bagian, antara lain:

1. Pemilihan Motor & Karakteristik Motor
2. Penentuan komponen semikonduktor daya TRIAC.
3. Perancangan rangkaian *zero crossing detector* tegangan bolak-balik.
4. Perancangan rangkaian pemucuan *gate* TRIAC.
5. Perancangan perangkat unit pelindung rangkaian.
6. Perancangan sistem kontrol *soft starter*.

4.2.1 Pemilihan Motor & Karakteristik Motor

Motor induksi satu fasa yang dipilih adalah motor induksi satu fasa yang tersedia di laboratorium Mesin Elektrik dengan merk Xian Micro & FHP Motor Works type JY09A-4 dengan daya keluaran 0,25 HP, rating tegangan 220V, frekuensi 50 Hz, Putaran 1495 rpm, Arus 2,4 A. Motor induksi satu fasa ini merupakan jenis motor *capacitor-run* dengan nilai kapasitor sebesar 15 μF . Motor ini merupakan salah satu motor yang biasa digunakan dalam dunia industri. Motor ini dipilih karena paling memungkinkan untuk diaplikasikan dan ketersediannya di pasaran sehingga industri kecil atau rumahan mudah mendapatkannya.

Karakteristik motor jenis ini dapat dilihat pada tabel 2.1 dimana motor *capacitor-run* memiliki torsi pengasutan sebesar 100-200% dari torsi nominal. Ketika dioperasikan pada beban nominal motor jenis ini memiliki faktor daya sebesar 75-90% dan efisiensi sebesar 60-70%.

4.2.2 Penentuan komponen TRIAC

Kegagalan dalam pengoperasian akibat kerusakan komponen merupakan hal yang perlu dihindari. Dalam perancangan komponen TRIAC, komponen yang dipilih pada rangkaian daya harus memiliki kemampuan di atas arus dan tegangan yang dibutuhkan. Komponen yang dipilih harus disesuaikan dengan *rating* tegangan sumber

satu fasa dan disesuaikan pula dengan komponen yang tersedia di pasaran. Penentuan komponen yang digunakan juga dipengaruhi dari *rating* tegangan dan arus dari beban yang nantinya diatur oleh komponen daya TRIAC.

Beban motor induksi yang digunakan memiliki *rating* sebagai berikut:

- arus beban nominal : 2,4 A
- tegangan beban nominal : 220 V

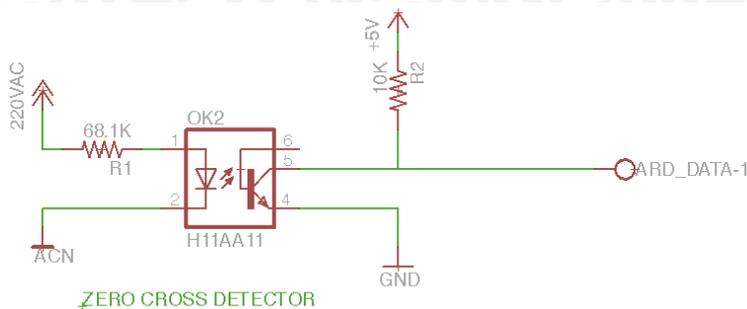
Sedangkan tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh TRIAC pada saat *off state* (kondisi padam) sebesar:

$$\begin{aligned} V_{maks} &= \sqrt{2} \times 220 \\ &= 311,126 \text{ volt} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan dan estimasi di atas, setelah disesuaikan dengan ketersediaan komponen di pasaran maka TRIAC yang digunakan adalah BTA16-600B. Angka 16 pada seri TRIAC menunjukkan $I_{T(RMS)}$ yang mampu ditahan oleh TRIAC yaitu sebesar 16 A. Nilai ini sudah memenuhi kebutuhan arus beban nominal sebesar 2,4 A. Angka 600 menunjukkan *rating* tegangan yang mampu ditahan oleh TRIAC yaitu sebesar 600V. Nilai ini sudah memenuhi kebutuhan tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh TRIAC pada saat kondisi padam yaitu sebesar 311,126 V. TRIAC BTA16-600B memiliki *rating* arus *gate* sebesar 50 mA dimana perancangan rangkaian untuk pemicuan *gate* TRIAC akan dijelaskan pada subbab 4.2.4. *Rating* arus *latching* adalah 60 mA pada *quadrant* I-III-IV dan 120 mA pada *quadrant* II. *Rating* arus holding TRIAC sebesar 50 mA. Untuk perhitungan proteksi laju pertambahan arus di/dt dan laju pertambahan tegangan dv/dt akan dijelaskan pada subbab 4.2.5 dan 4.2.6

4.2.3 Perancangan Perangkat Keras *Zero Cross Detector*

Dalam penentuan rangkaian *zero cross detector* dibutuhkan rangkaian yang mampu mendeteksi persimpangan antara gelombang stegangan bolak-balik dengan titik nol agar pengaturan fasa dapat dilakukan pada titik nol gelombang tegangan bolak-balik. Sinyal keluaran rangkaian *zero cross detector* ini akan dimasukkan ke mikrkontroller, oleh karena dibutuhkan komponen yang mampu memisahkan tegangan 220V dan 5V. Komponen yang sesuai dengan spesifikasi tersebut adalah *optocoupler*. Untuk rangkaian ini digunakan komponen optocoupler H11AA1 sebagai komponen utamanya. H11AA1 merupakan optocoupler yang terdapat *phototransistor* di dalamnya. Pada gambar 4.2 ditunjukkan rangkaian *zero cross detector*.



Gambar 4.2 Konfigurasi rangkaian Zero Crossing Detector

Sumber AC 220 V dihubungkan dengan pin 1 dengan ditambah resistor untuk membatasi arus yang masuk. Berdasarkan *datasheet* arus *forward* (I_f) yang diperbolehkan adalah $\pm 3,2$ mA. Pemilihan resistor berdasarkan rumus

$$V = Ri \tag{4-1}$$

$$220 = R \times 0.0032$$

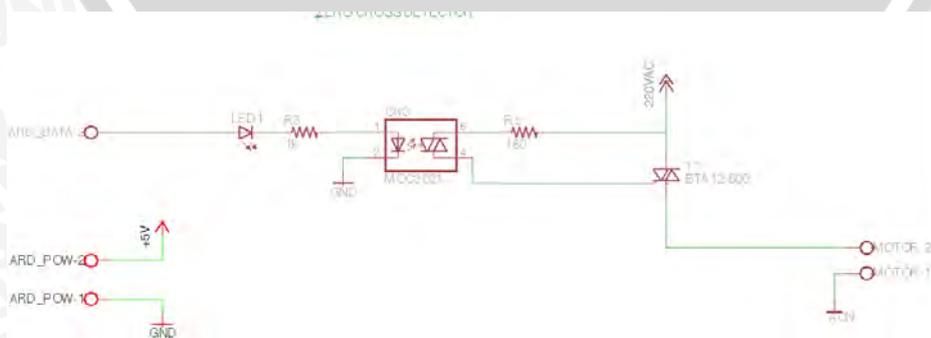
$$R = \frac{220}{0.0032} \tag{4-2}$$

$$R = 68 \text{ k}\Omega$$

Berdasarkan hasil perhitungan resistor yang dipilih untuk membatasi arus yang melewati H11AA1 adalah sebesar 68 k Ω . Pin 2 dihubungkan dengan fase netral dari sumber tegangan 220 V. Pin 4 dihubungkan dengan *ground* dari sistem, kemudian pin 5 dihubungkan dengan sumber tegangan DC 5V dan juga akan menjadi masukan untuk mikrokontroler sebagai referensi pemucuan TRIAC.

4.2.4 Perancangan Rangkaian Pemucuan Gate TRIAC

TRIAC merupakan komponen yang tersusun atas dua buah *thyristor* antiparalel dengan terminal *gate* yang sama. Konfigurasi tersebut membuat TRIAC merupakan komponen yang digunakan untuk mengatur tegangan AC sehingga pemucuan dari *gate* TRIAC juga dapat dilakukan dengan pulsa negatif atau pulsa positif (sesuai tegangan AC).



Gambar 4.3 Rangkaian pemucuan *gate* TRIAC.

Untuk dapat melakukan kontrol fasa, dibutuhkan rangkaian seperti pada gambar 2.20. Dibutuhkan komponen berupa DIAC sebagai *driver* dari TRIAC. Selain itu dibutuhkan juga komponen yang mampu berfungsi sebagai isolator antara tegangan 220V dan 5V untuk melindungi mikrokontroler dari tegangan balik. Sehingga komponen yang sesuai dengan spesifikasi di atas adalah *optocoupler*. Optocoupler yang komponen utamanya berupa DIAC adalah MOC3021.

Agar MOC3021 dapat melakukan pemicuan gate TRIAC perlu dihitung durasi minimum sinyal pemicuan gate TRIAC. Perhitungan durasi minimum sinyal *gate* TRIAC dipengaruhi oleh nilai arus *holding* I_H . Nilai arus *holding* untuk TRIAC BTA16-600B adalah 50 mA. Beban berupa motor induksi yang memiliki induktansi. Nilai induktansi motor induksi yang digunakan adalah sebesar 0,002565 H.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{0,02565} \quad (4-3)$$

$$= 0,001213 \text{ A}/\mu\text{s}$$

$$I_H = t_1 \times \frac{di}{dt} \quad (4-4)$$

$$t_1 = \frac{0,05}{0,001213}$$

$$t_1 = 4,122 \mu\text{s}$$

$$t_G = t_1 + t_d \quad (4-5)$$

$$= 4,122 + 20$$

$$= 24,122 \mu\text{s}$$

Nilai t_d sebesar 20 μs pada persamaan 4-5 didapatkan dari datasheet TRIAC BTA16-600B. Nilai ini merupakan waktu yang dibutuhkan TRIAC untuk mencapai arus *gate* maksimal.

4.2.5 Perancangan Pengaman Terhadap Laju Pertambahan Arus di/dt

Kerusakan TRIAC yang disebabkan oleh di/dt yang tinggi dapat dihindari dengan memasang induktor terpasang seri dengan beban. di/dt adalah tingkat perubahan arus yang mengalir melalui *thyristor* ketika terjadi perubahan kondisi dari padam (*off state*) ke nyala (*on state*). Dalam perancangan pengaman terhadap laju pertambahan arus di/dt harus di bawah spesifikasi di/dt maksimum komponen, hal ini dapat dilakukan dengan memasang induktor secara seri dengan komponen. Secara pendekatan, di/dt maksimum dapat dihitung melalui persamaan:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \text{ volt} \quad (4-6)$$

$$\frac{di}{dt}_{maks} = \frac{V}{L} \text{ Ampere/detik} \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt}_{maks} &= \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{0,02565} \\ &= 12129,7 \text{ A/detik} \\ &= 0,01213 \text{ A/}\mu\text{detik} \end{aligned}$$

Nilai Induktansi pada rumus (4-7) merupakan nilai induktansi pada motor induksi yang digunakan adalah 0,02565 H. Pada spesifikasi TRIAC yang telah dipilih yaitu BTA16-600B rating laju pertambahan arus maksimalnya adalah 50 A/μdetik. Rating ini sudah mencukupi kebutuhan untuk menjaga laju pertambahan arus, sehingga tidak diperlukan lagi perancangan pengaman laju pertambahan arus.

4.2.6 Perancangan Pengaman Terhadap Laju Pertambahan Tegangan dv/dt

Pengaman terhadap laju kenaikan tegangan dv/dt perlu dilakukan karena jika dv/dt dari TRIAC terlampaui maka TRIAC akan terkonduksi meskipun tidak ada arus *trigger* pada terminal *gate* TRIAC. Pengaruh dv/dt bisa dikurangi dengan menggunakan rangkaian *snubber* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Setiap TRIAC mempunyai spesifikasi dv/dt maksimumnya yang tertera pada setiap *datasheet* komponen. dv/dt pada *datasheet* TRIAC BTA16-600B tertera sebesar 10V/μdetik. Nilai induktansi motor induksi sebesar 0,02565 H. Perhitungan nilai dari kapasitor *snubber* C_s dan resistor *snubber* R_s dijelaskan pada Persamaan (2-12) – (2-15). Sesuai dengan persamaan tersebut maka hasil perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{dv/dt_{maks}}{v_p \times 2\pi} \\ &= \frac{10 \times 10^6}{220\sqrt{2} \times 2\pi} \\ &= 5,1 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (4-7)$$

nilai C_s ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \\
 &= \frac{1}{(2\pi \times 5,1 \times 10^3)^2 \times 0,02565} \\
 &= 37,96 \times 10^{-9} \text{ F}
 \end{aligned}
 \tag{4-9}$$

nilai dari R_s ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut:

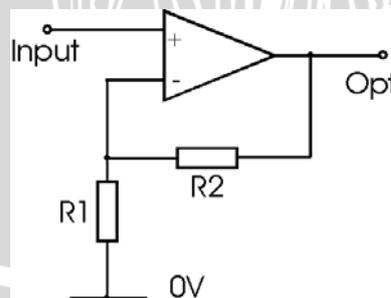
$$\begin{aligned}
 R_s &= \sqrt{\frac{L}{C_s}} \\
 &= \sqrt{\frac{0,02565}{37,96 \times 10^{-9}}} \\
 &= 822,01 \Omega
 \end{aligned}
 \tag{4-10}$$

Berdasarkan perhitungan di atas dan disesuaikan dengan komponen yang ada dipasaran maka nilai kapasitor dan resistor yang digunakan sebesar $C = 33\text{nF}$ dan $R=820\Omega$.

4.2.7 Perancangan Rangkaian Penguat Tegangan Keluaran Tachogenerator

Perancangan rangkaian penguat tegangan keluaran tachogenerator dibutuhkan untuk menguatkan sinyal keluaran tachogenerator agar mikrokontroler dapat membaca dan mengolah tegangan keluaran tachogenerator.

Rangkaian penguat tegangan terdiri atas komponen op-amp dan resistor yang disusun seperti pada gambar 4.5. Rangkaian ini merupakan rangkaian penguat tegangan *non-inverting*.



Gambar 4.4 Rangkaian penguat tegangan

Sumber (<http://www.radio-electronics.com/>)

Penguatan yang diinginkan adalah sebesar 3 kali untuk bisa diterima oleh mikrokontroler. Sehingga keluaran tachogenerator sebesar 1V DC akan menjadi 3V DC. Tegangan minimal yang mampu diterima oleh port ADC mikrokontroler adalah 2,5V DC.

Besar resistor yang digunakan pada rangkaian penguat sinyal ini ditentukan menggunakan rumus:

$$V_o = \frac{R_2 + R_1}{R_1} V_i$$

Dengan V_o yang diinginkan sebesar 3V DC dan $V_i = 1V$ DC maka gain yang dibutuhkan adalah 3. Sehingga,

$$\text{Gain} = \frac{R_2 + R_1}{R_1}$$

$$\text{Gain} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} + 1$$

$$\text{Gain} = 3$$

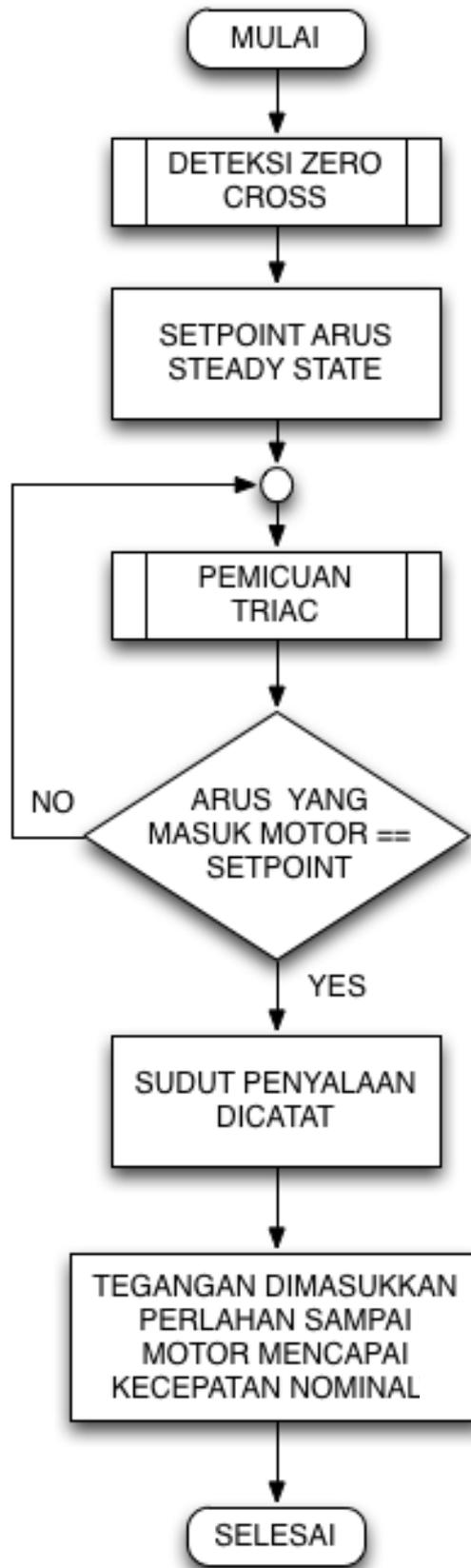
Dengan mempertimbangkan ketersediaan komponen yang ada di lapangan maka op-amp yang dipilih adalah LM358 dan resistor yang dipilih menggunakan *variable resistor* agar pengaturan penguatan lebih mudah dilakukan. Nilai yang dipilih adalah $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ dan $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$.

4.3 Perancangan Diagram Alir Keseluruhan Sistem

Perancangan diagram alir untuk soft starter motor induksi satu fasa dilaksanakan untuk mendukung perangkat keras yang telah dirancang sebelumnya dapat bekerja sesuai dengan tujuan dari ditulisnya penelitian ini yaitu mampu merancang soft starter motor induksi satu fasa dengan metode *closed loop*.

Program akan berjalan setelah rangkaian zero cross detector mendeteksi titik persimpangan antara gelombang tegangan bolak-balik dengan titik nol. Sinyal yang dikeluarkan oleh rangkaian zero cross detector berfungsi sebagai acuan program untuk melaksanakan pemecuan TRIAC. Pada mikrokontroler telah diatur nilai setpoint arus starting. Program akan mengecek apakah arus yang masuk ke motor sudah mencapai nilai setpoint yang telah ditentukan. Apabila nilai arus yang masuk ke motor belum mencapai nilai setpoint maka pemecuan TRIAC akan dilakukan lagi sampai arus yang masuk ke motor mencapai nilai setpoint. Setelah kondisi tersebut terpenuhi maka program akan menampilkan nilai sudut penyalaan dan TRIAC akan memberikan tegangan sampai gelombang tegangan bolak-balik sempurna pada sudut penyalaan 0° .

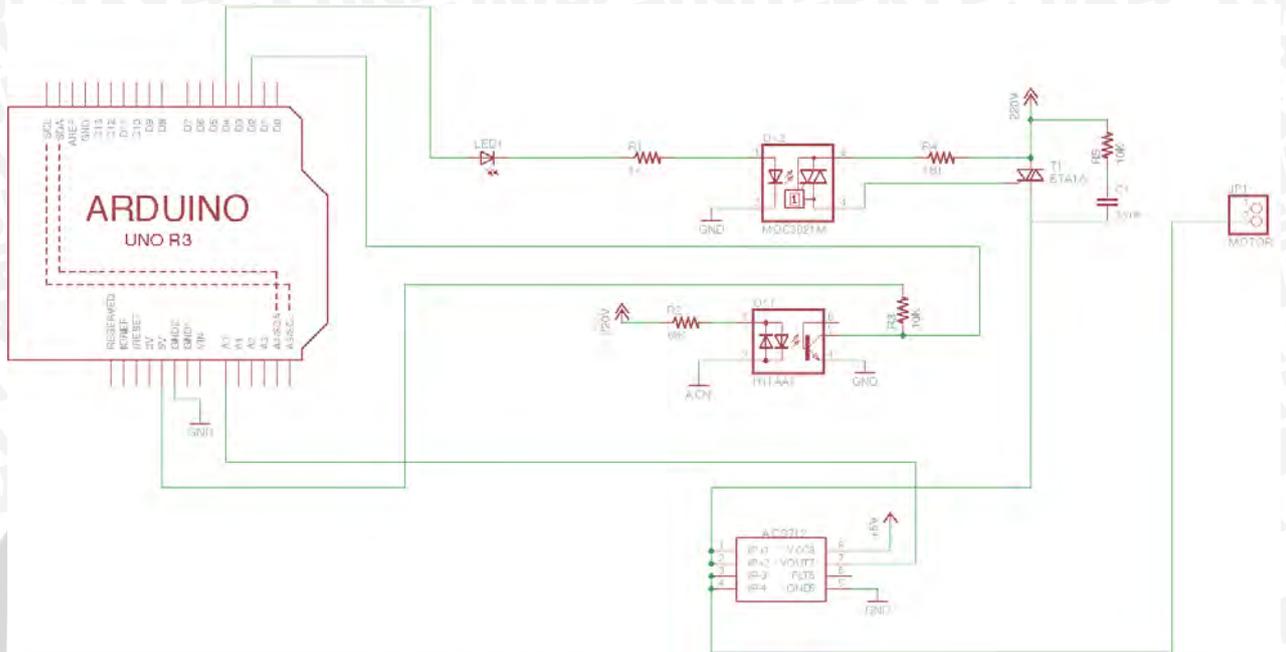
Perancangan perangkat lunak soft starter dibuat di program Arduino 1.0.1 yang merupakan bawaan dari mikrokontroler Arduino. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa C.



Gambar 4.5 Diagram alir program utama

4.4 Gambar Rangkaian Keseluruhan Sistem

Gambar keseluruhan sistem ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.6 Rangkaian keseluruhan sistem



BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

5.1 Pengujian Rangkaian Zero Crossing Detector

5.1.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah rangkaian zero crossing detector sudah berfungsi dengan baik sebagai penanda titik nol gelombang AC yang digunakan mikrokontroler sebagai acuan pemicuan TRIAC.

5.1.2 Peralatan

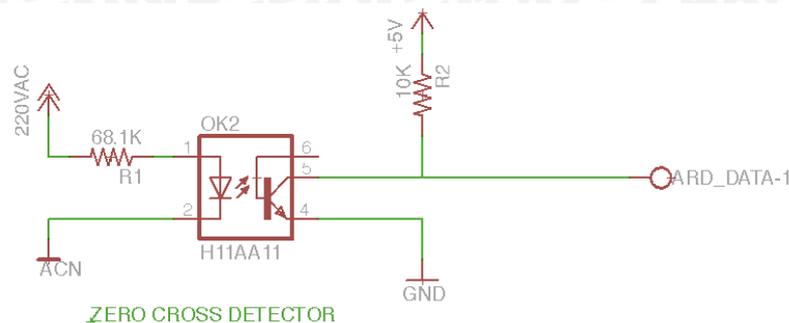
Peralatan yang digunakan pada pengujian ini adalah:

- 1) Sumber tegangan AC 1 fasa
- 2) Sumber tegangan DC 5 Volt
- 3) Optocoupler H11AA1
- 4) Variable Resistor 100K Ω
- 5) Resistor 10K Ω
- 6) Mikrokontroler Arduino
- 7) Oscilloscope Siglent SDS1000

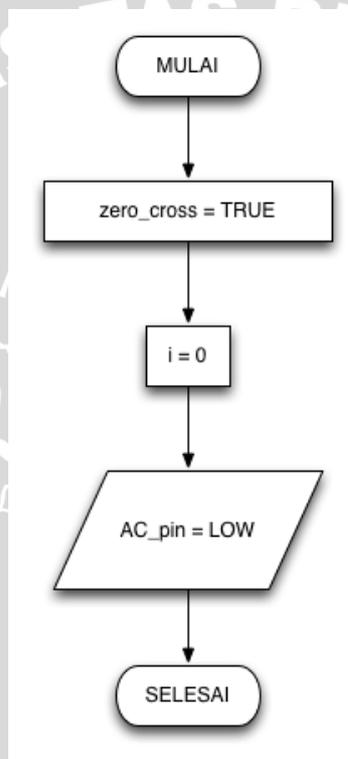
5.1.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian rangkaian zero crossing detector adalah sebagai berikut:

- 1) Merangkai gambar rangkaian seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.1
- 2) Membuat program seperti yang ditunjukkan pada diagram alir di gambar 5.2
- 3) Menghubungkan sumber tegangan AC 1 fasa ke rangkaian dan menghubungkan sumber tegangan DC 5 volt ke mikrokontroler dan optocoupler H11AA1.
- 4) Menghubungkan probe 1 oscilloscope ke sumber tegangan AC 1 fasa dan probe 2 oscilloscope ke keluaran optocoupler H11AA1.



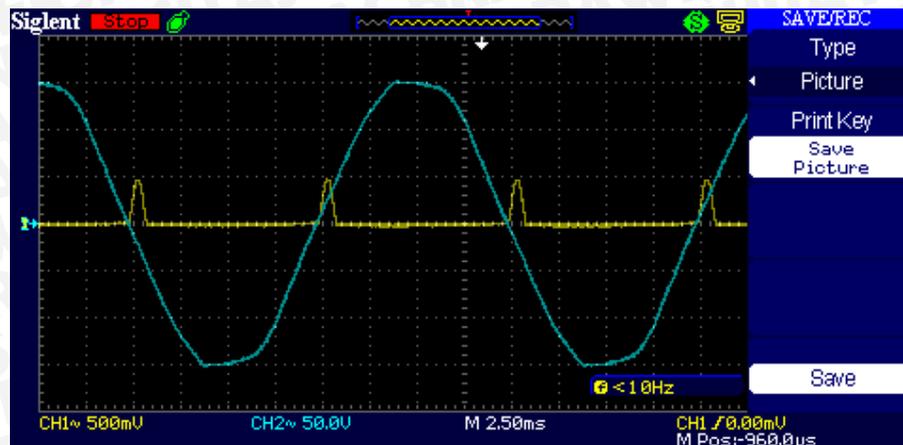
Gambar 5.1 Rangkaian pengujian zero cross detector



Gambar 5.2 Diagram Alir rangkaian zero cross detector

5.1.4 Hasil Pengujian

Bentuk gelombang tegangan AC 1 fasa dan gelombang tegangan keluaran optocoupler H11AA1 ditunjukkan pada gambar 5.3. Keluaran dari optocoupler H11AA1 mengeluarkan sinyal berbentuk *spike* yang tegangan puncaknya bernilai ± 400 mV sesuai dengan *datasheet* dari *optocoupler*. Titik nol gelombang keluaran *optocoupler* H11AA1 bersinggungan dengan titik nol gelombang tegangan AC 1 fasa.



Gambar 5.3 Gelombang tegangan AC dan gelombang tegangan keluaran optocoupler H11AA1

5.1.5 Analisis Hasil Pengujian

Gambar 5.3 menunjukkan gelombang tegangan bolak-balik bersinggungan dengan gelombang tegangan keluaran optocoupler H11AA1. H11AA1 terdiri atas 2 buah LED dan phototransistor. Salah satu LED akan menyala ketika gelombang sinusoida AC tidak pada titik nol tegangan. Ini mengakibatkan keluaran H11AA1 tetap nol. Apabila tegangan bolak-balik berada pada titik nol tegangan maka LED akan padam begitu juga dengan *phototransistor*, sehingga *pull-up resistor* akan memberikan tegangan dari VCC dan akan menghasilkan output pada saat tegangan bolak-balik berada pada titik nol. Ini menunjukkan bahwa rangkaian *zero cross detector* mampu digunakan sebagai acuan bagi mikrokontroler untuk melakukan proses pemicuan TRIAC.

5.2 Pengujian Rangkaian *Optocoupler* MOC3021

5.2.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah rangkaian mampu berfungsi sebagai pemicu gate TRIAC dengan sinyal keluaran dari mikrokontroler yang berasal dari sinyal acuan *zero cross detector*.

5.2.2 Peralatan

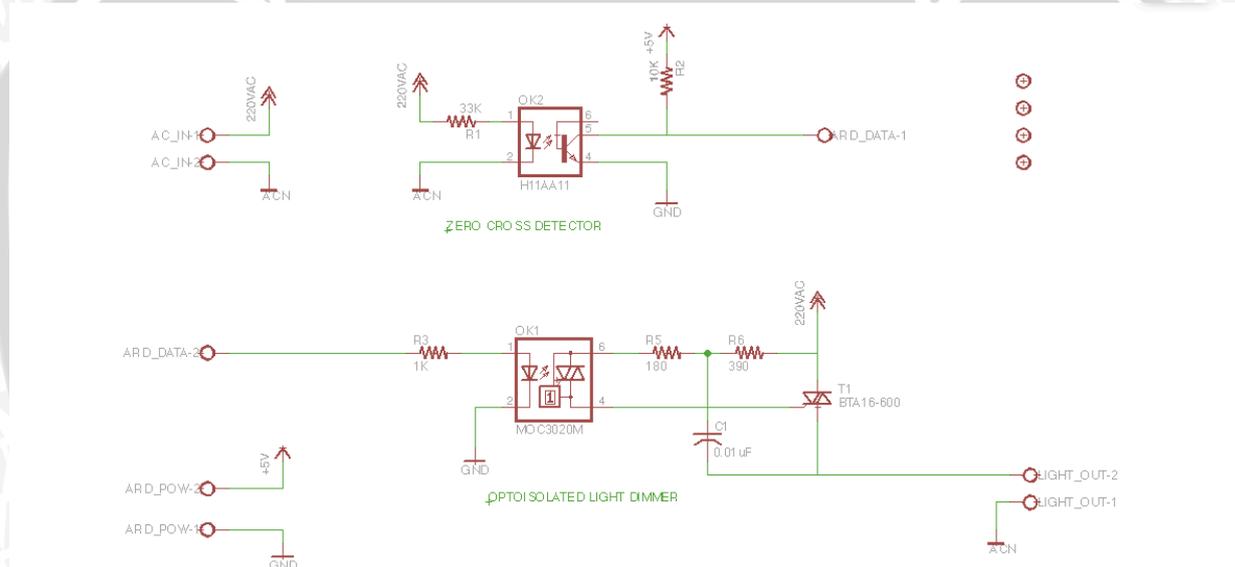
- 1) Mikrokontroler Arduino dan sumber tegangan DC 5 volt
- 2) Optocoupler MOC3021
- 3) Oscilloscope Siglent SDS1000
- 4) Rangkaian zero cross detector
- 5) Resistor 180 k Ω

- 6) Resistor 1 k Ω
- 7) TRIAC BTA-16A

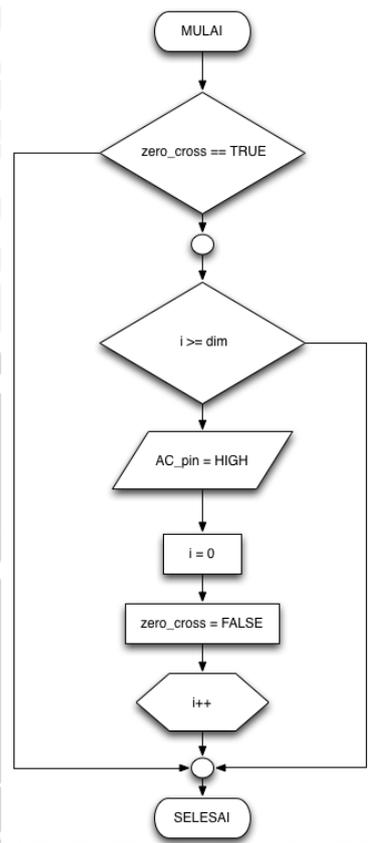
5.2.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian rangkaian *optocoupler* MOC3021 adalah sebagai berikut:

- 1) Merangkai rangkaian pengujian seperti pada gambar 5.4
- 2) Membuat program sesuai dengan diagram alir pada gambar 5.5
- 3) Menghubungkan sumber tegangan AC ke rangkaian *zero cross detector* dan sumber tegangan DC 5 volt ke mikrokontroler serta ke *optocoupler* H11AA1
- 4) Menghubungkan *probe 1 oscilloscope* ke keluaran mikrokontroler di pin 10 dan *probe 2 oscilloscope* ke tegangan keluaran TRIAC



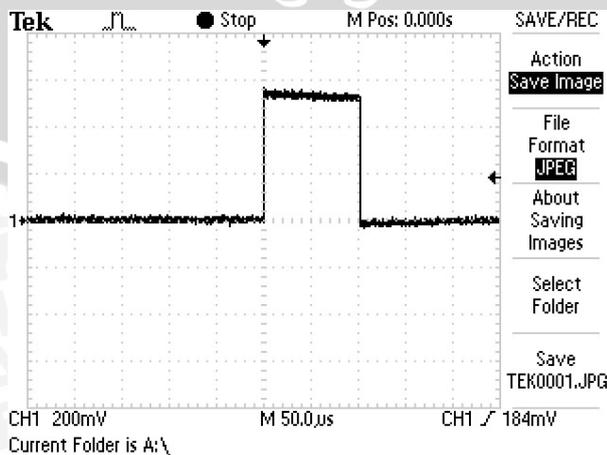
Gambar 5.4 Rangkaian pengujian optocoupler MOC3021



Gambar 5.5 Diagram Alir pengujian rangkaian optocoupler MOC3021

5.2.4 Analisis Hasil Pengujian

Pada gambar 5.6 terlihat sinyal keluaran *optocoupler* MOC3021 yang berbentuk logika HIGH pada interval setiap 10 ms. Sinyal keluaran MOC3021 ini memiliki interval yang sama dengan gelombang tegangan bolak-balik. Interval 10 ms merupakan waktu dari tepi naik ke tepi turun setengah gelombang tegangan bolak-balik. Sinyal keluaran MOC3021 sudah mampu digunakan sebagai pemicu TRIAC dari referensi sinyal keluaran rangkaian *zero cross detector*.



Gambar 5.6 Sinyal keluaran optocoupler MOC3021 dan gelombang sinusoida

5.3 Pengujian Rangkaian Penyulutan TRIAC

5.3.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk apakah rangkaian yang telah dirancang mampu mengatur gelombang sinusoida tegangan AC sebagai komponen utama *soft starter*.

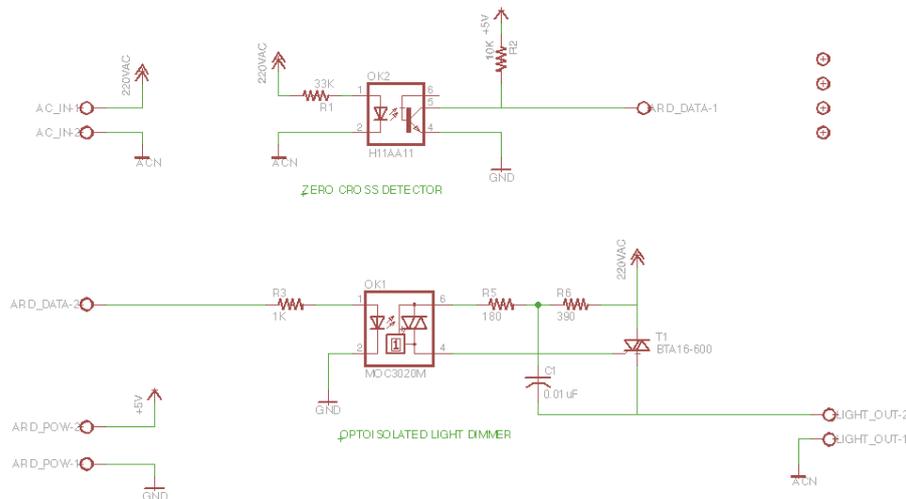
5.3.2 Peralatan

- 1) Mikrokontroler Arduino dan sumber tegangan DC 5 volt
- 2) Optocoupler MOC3021
- 3) Oscilloscope Siglent SDS1000
- 4) Rangkaian zero cross detector
- 5) Potensiometer 100 k Ω
- 6) Resistor 1 k Ω
- 7) Resistor 180 k Ω
- 8) TRIAC BTA-16A
- 9) Lampu Pijar 25 W

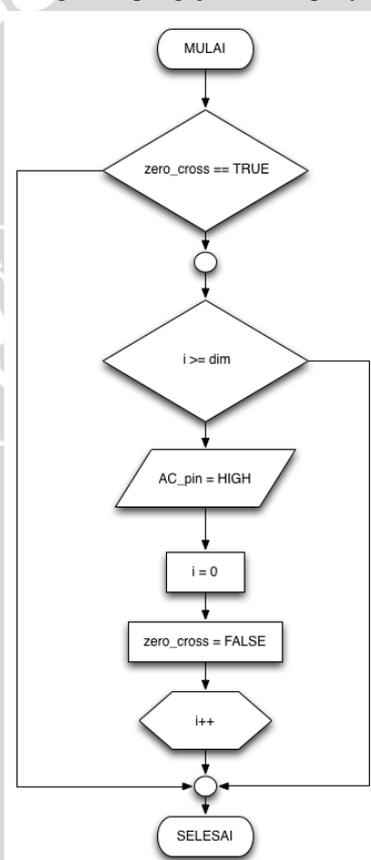
5.3.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian rangkaian sudut penyalaan TRIAC adalah sebagai berikut:

- 1) Merangkai rangkaian pengujian seperti pada gambar 5.7
- 2) Membuat program sesuai dengan diagram alir pada gambar 5.8
- 3) Menghubungkan sumber tegangan AC ke rangkaian zero cross detector dan sumber tegangan DC 5 volt ke mikrokontroler serta ke optocoupler H11AA1
- 4) Menghubungkan keluaran optocoupler H11AA1 ke pin interrupt mikrokontroler
- 5) Menghubungkan keluaran salah satu pin Digital I/O mikrokontroler ke optocoupler MOC3021
- 6) Menghubungkan potensiometer ke sumber tegangan DC 5 volt dan GND serta ke salah satu pin ADC mikrokontroler.
- 7) Menghubungkan *probe 1* oscilloscope ke keluaran mikrokontroler di pin 10 dan *probe 2* oscilloscope ke tegangan keluaran TRIAC



Gambar 5.7 Rangkaian pengujian sudut penyalan TRIAC

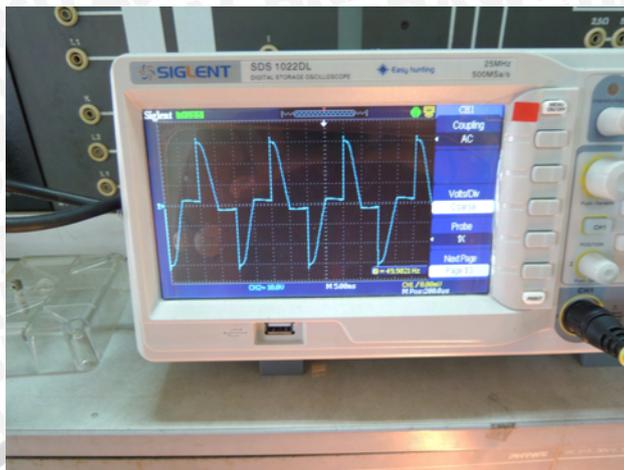


Gambar 5.8 Diagram alir rangkaian pengujian penyulutan TRIAC

5.3.4 Hasil Pengujian

Dari pengujian sudut penyalan TRIAC didapatkan hasil pengujian berupa bentuk gelombang pemicuan TRIAC dan bentuk gelombang tegangan pada beban sesuai dengan sudut penyalan ($90^\circ - 135^\circ$). Contoh bentuk keluaran gelombang hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.9 untuk sudut penyalan (α) 90° . Hasil pengujian secara keseluruhan diberikan ditunjukkan pada Tabel 5.1.





Gambar 5.9 Bentuk gelombang keluaran TRIAC dengan sudut penyalaaan 90⁰

Tabel 5.1 Tabel hasil pengujian rangkaian penyulutan TRIAC

Pengujian ke-n	Sudut penyalaaan (α)	Perhitungan fungsi tunda(ms)
1	135°	7,5
2	130°	7,2
3	125°	6,9
4	120°	6,6
5	115°	6,3
6	110°	6,1
7	105°	5,8
8	100°	5,6
9	95°	5,2
10	90°	5

5.3.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian sudut penyalaaan TRIAC yang didapatkan pada Tabel 5.1 terdapat penyimpangan nilai dari waktu fungsi tunda dari yang seharusnya. Sebagai contoh diambil pada data pengujian ke-2 dimana waktu fungsi tunda menurut teori seharusnya:

$$\begin{aligned}
 \text{Waktu tunda (ms)} &= \frac{\text{Sudut penyalaaan } (\alpha)}{180^\circ} \times 10 \\
 &= \frac{130^\circ}{180^\circ} \times 10 = 7,22 \text{ ms}
 \end{aligned}
 \tag{5-1}$$

Nilai error yang diperoleh dari selisih absolute nilai perhitungan dengan hasil pengujian sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Error (ms)} &= \text{Pengujian} - \text{Perhitungan} \\ &= 7,22 - 7,20 \\ &= 0,02 \text{ ms} \end{aligned} \quad (5-2)$$

$$\begin{aligned} \text{Error (\%)} &= \frac{\text{error}}{\text{Perhitungan}} \times 100\% \\ &= \frac{0,02}{7,22} \times 100\% \\ &= 0,31\% \end{aligned} \quad (5-3)$$

Hasil rangkuman perhitungan error hasil pengujian terangkum pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Rangkuman hasil pengujian

Pengujian ke-n	Sudut penyalaaan (α)	Perhitungan fungsi tunda (ms)	Pengujian fungsi tunda(ms)	error(ms)	error(%)
1	135°	7,50	7,50	0,00	0,00%
2	130°	7,22	7,20	0,02	0,31%
3	125°	6,94	6,90	0,04	0,64%
4	120°	6,67	6,60	0,07	1,00%
5	115°	6,39	6,30	0,09	1,39%
6	110°	6,11	6,10	0,01	0,18%
7	105°	5,83	5,80	0,03	0,57%
8	100°	5,56	5,60	0,04	0,80%
9	95°	5,28	5,20	0,08	1,47%
10	90°	5,00	5,00	0,00	0,00%
Error rata-rata					0,64%

Dari Tabel 5.2 didapatkan nilai error selisih keseluruhan hasil perhitungan sudut penyalaaan internal mikrokontroler cukup kecil, ditunjukkan dengan nilai error sebesar 0,64%. Error disebabkan proses perhitungan dan pembulatan angka oleh mikrokontroler dan sumber AC yang tidak ideal baik dari frekuensi dan bentuk gelombang tegangan menyebabkan selisih antara perhitungan dan pengukuran. Berdasarkan analisis dan data pengujian di atas disimpulkan bahwa hasil kalkulasi dan perhitungan internal mikrokontroler mampu menghasilkan sudut penyalaaan yang sesuai dengan yang diberikan.

5.4 Pengujian Sensor Arus ACS712

5.4.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah sensor arus ACS712 mampu digunakan sebagai feedback dari sistem dengan cara membaca nilai arus yang mengalir ke motor.

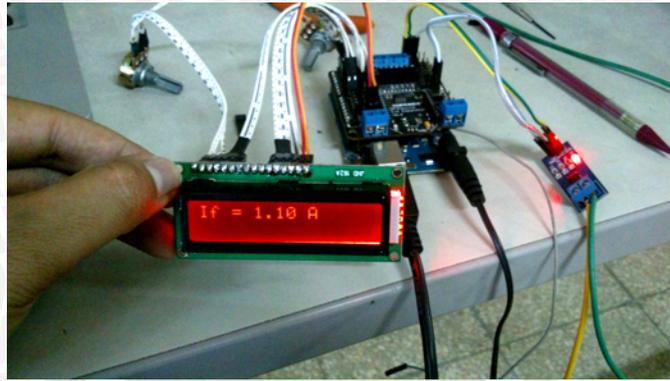
5.4.2 Peralatan

- 1) Mikrokontroler Arduino dan sumber tegangan DC 5 volt
- 2) DFRobot Arduino *Expansion Shield*
- 3) LCD 16x2
- 4) Sensor arus ACS712 20A
- 5) Resistor geser
- 6) Ammeter analog AEG

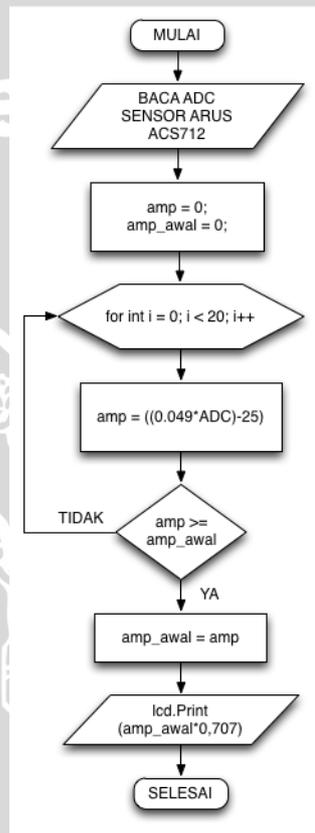
5.4.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian sensor arus ACS712 adalah sebagai berikut:

- 1) Hubungkan Mikrokontroler Arduino dengan *Expansion Shield* untuk menambah jumlah port VCC dan GND.
- 2) Hubungkan pin-pin LCD 16x2 dengan pin pada *Expansion Shield* Arduino.
- 3) Menghubungkan VCC dan GND yang terdapat di sensor arus ACS712 pada pin VCC dan GND *Expansion Shield* Arduino dan Vout yang terdapat di sensor arus pada pin Analog 0 di *Expansion Shield* Arduino.
- 4) Menghubungkan terminal pada sensor arus ACS712 pada sumber tegangan AC dan ke beban berupa resistor geser.
- 5) Menghubungkan ammeter ke netral tegangan sumber dan ke beban resistor geser.
- 6) Menggeser resistor geser setiap kenaikan 1 A hingga mencapai nilai arus 10 A.
- 7) Mengamati nilai arus yang terekam di LCD dan membandingkan dengan nilai arus yang terbaca pada ammeter.



Gambar 5.10 Rangkaian pengujian sensor arus ACS712



Gambar 5.11 Diagram alir program pengujian rangkaian sensor arus ACS712

5.4.4 Data Hasil Pengujian

Berikut adalah data pengujian sensor arus ACS712

Tabel 5.3 Perbandingan Pembacaan Ammeter dan ACS712

Pengujian ke - n	Pembacaan Ammeter (A)	Pembacaan ACS712 (A)
1	1	1
2	2	2

3	3	3,01
4	4	4,01
5	5	5
6	6	6,01
7	7	7
8	8	7,97
9	9	9,01
10	10	9,97

5.4.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan dari pengujian didapatkan bahwa pembacaan sensor arus ACS712 bila dibandingkan dengan ampmeter analog terdapat nilai error pembacaan.

Tabel 5.4 Tabel perhitungan nilai error

Pengujian ke - n	Pembacaan Ampmeter (A)	Pembacaan ACS712 (A)	Error ($\pm A$)	Error ($\pm \%$)
1	1	1	0,00	0
2	2	2	0,00	0
3	3	3,01	0,01	1
4	4	4,01	0,01	1
5	5	5	0,00	0
6	6	6,01	0,01	1
7	7	7	0	0
8	8	7,97	0,03	3
9	9	9,01	0,01	1
10	10	9,97	0,03	3

Dari hasil perhitungan nilai error didapatkan rata-rata kesalahan nilai pembacaan sebesar $\pm 1\%$. Nilai error ini muncul dikarenakan pembulatan yang terjadi di dalam mikrokontroler dan sumber AC yang kurang ideal sehingga menyebabkan terjadi perbedaan antara pembacaan nilai arus yang dilakukan ampmeter dan sensor arus. Meskipun pembacaan pada sensor arus masih terdapat kesalahan pembacaan, ACS712 dapat digunakan sebagai perekam nilai arus yang mengalir ke motor untuk nantinya

diumpankan ke mikrokontroler sebagai referensi pengaturan fasa untuk proses pengasutan motor induksi.

5.5 Pengujian Tachogenerator

5.5.1 Tujuan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah rangkaian tachogenerator mampu mendeteksi kecepatan putar rotor motor induksi dan mampu diumpankan ke mikrokontroler.

5.5.2 Peralatan

- 1) Sumber tegangan AC 220V
- 2) Motor induksi 1 fasa merk Xian Micro & FHP Motor Works dengan rating tegangan 220V, frekuensi 50 Hz, Putaran 1500 rpm, Arus 2,4 A
- 3) Tachogenerator merk Leybold-Didactic
- 4) Rangkaian penguat sinyal
- 5) Multimeter

5.5.3 Prosedur Pengujian

- 1) Motor induksi dihubungkan dengan sumber tegangan AC 220 V dan rotornya dikopel dengan tachogenerator.
- 2) Terminal keluaran tegangan tachogenerator dihubungkan dengan multimeter.

5.5.4 Hasil Pengujian

- 1) Tachogenerator berfungsi sebagai pendeteksi kecepatan putar rotor motor induksi dengan mengkonversi 1000 rpm untuk 1 VDC.

Kecepatan Motor (rpm)	Pembacaan Multimeter (V)	Keluaran rangkaian penguat sinyal (V)
500	0,5	1,5
1000	1	3
1500	1,5	4,5

5.5.5 Analisis Hasil Pengujian

Tegangan keluaran tachogenerator terlalu kecil untuk diumpanbalikkan ke mikrokontroler, karena mikrokontroler membutuhkan tegangan masukan ADC minimal 2,5 VDC. Sehingga dibutuhkan rangkaian penguat tegangan.

Dalam pengujian ini digunakan IC LM358 sebagai op-amp dan *variable resistor* sebagai resistornya untuk mempermudah pengaturan penguatan. Dalam rangkaian ini digunakan penguatan sebanyak 3 kali tegangan masukan, sehingga jika keluaran tachogenerator 1 VDC maka keluaran rangkaian op-amp adalah 3 VDC. Dengan besar 3 VDC sudah mampu diterima oleh ADC mikrokontroler dan bisa diolah di program mikrokontroler. Penguatan sebesar 3 kali dipilih karena port ADC mikrokontroler hanya mampu membaca tegangan dengan rentang 2,5-5 V DC.

5.6 Pengujian Sistem Soft Starting secara Keseluruhan

5.6.1 Tujuan

Pengujian rangkaian secara keseluruhan ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui kinerja keseluruhan sistem yang telah dirancang sebelumnya dengan mengasut motor induksi tanpa beban dan berbeban.
2. Membandingkan metode pengasutan langsung dan metode soft starting untuk tiap data pengujian.

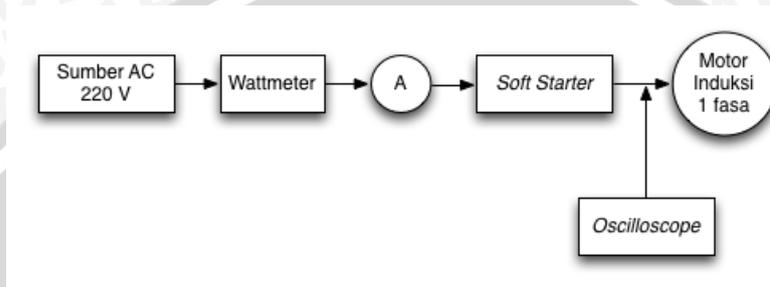
5.6.2 Peralatan

1. Peralatan soft starting dengan beberapa komponen utama:
 - a. Mikrokontroler Arduino Uno
 - b. Optocoupler MOC3021
 - c. TRIAC BTA16-600B
 - d. Sensor Arus ACS712
 - e. Tachogenerator merk Leybold
2. Sumber tegangan AC 220 V
3. Motor induksi satu fasa merk Xian Micro & FHP Motor Works dengan rating tegangan 220V, frekuensi 50 Hz, Putaran 1500 rpm, Arus 2,4 A
4. Oscilloscope Tektronik TD-100
5. Multimeter AC merk Sanwa
6. Wattmeter satu fasa merk YEW
7. Generator sinkron 0,3 Watt merk Leybold

5.6.3 Prosedur Pengujian

Dalam pengujian keseluruhan sistem soft starting motor induksi prosedur pengujiannya adalah sebagai berikut:

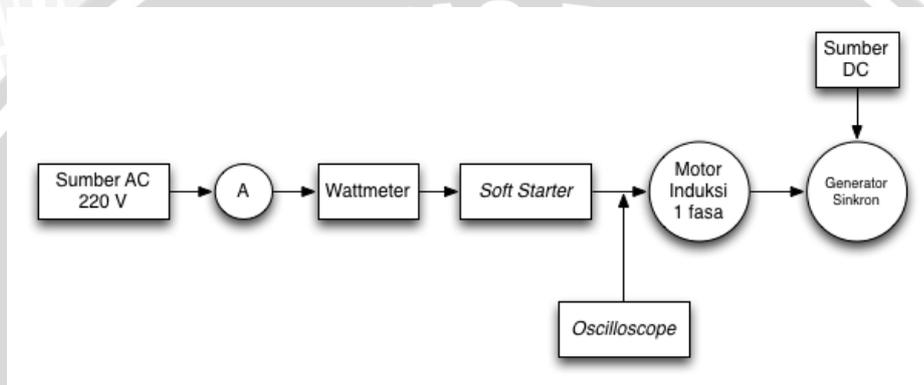
1. Menyusun rangkaian pengujian seperti blok diagram yang ditunjukkan pada gambar 5.12 untuk pengujian motor induksi tanpa beban, gambar 5.13 untuk motor induksi beban generator sinkron.



Gambar 5.12 Pengujian pengasutan motor tanpa beban

2. Menghubungkan probe 1 oscilloscope yang difungsikan mengamati gelombang arus pengasutan motor induksi.
3. Pengujian pengasutan motor tanpa beban terlebih dahulu, dengan langkah pengujian sebagai berikut:
 - a. Motor diasut secara langsung.
 - b. Catat data arus dan daya masukan saat kondisi mantapnya.
 - c. Matikan motor induksi, untuk memulai pengujian pengasutan motor induksi.
 - d. Motor diasut secara langsung kemudian diamati bentuk gelombang arusnya pada oscilloscope.
 - e. Motor diasut dengan soft starter dengan metode closed loop kemudian diamati bentuk gelombang arusnya pada oscilloscope.
4. Pengujian selanjutnya pengasutan motor berbeban generator sinkron, dengan langkah pengujian:
 - a. Atur tegangan keluaran generator sinkron hingga tegangan nominal, dengan cara memutar motor induksi kecepatan nominal selanjutnya arus penguatan generator sinkron diatur hingga mencapai tegangan nominal dari generator sinkron.

- b. Catat data arus, kecepatan putaran, dan daya masukan saat kondisi mantap.
- c. Matikan motor induksi untuk memulai pengujian pengasutan motor induksi.
- d. Motor diasut secara langsung, dan diamati bentuk gelombang arus pengasutannya menggunakan *oscilloscope*.
- e. Motor diasut dengan *soft starter* dan diamati bentuk gelombang arus pengasutannya menggunakan *oscilloscope*.



Gambar 5.13 Pengujian pengasutan motor induksi dengan beban generator sinkron

5.6.4 Hasil Pengujian

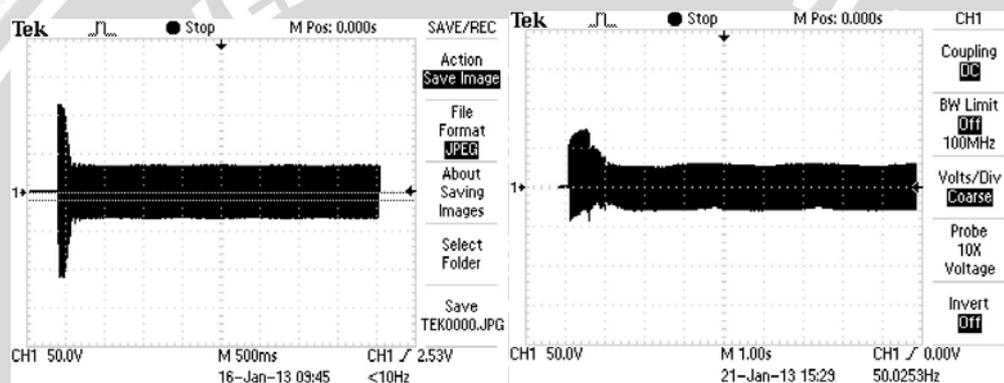
Dari hasil pengujian didapatkan data pada saat kondisi mantap berupa arus, daya masukan, dan kecepatan putar motor motor induksi untuk kondisi motor tak berbeban, kondisi motor berbeban generator sinkron.

1. Pengujian tanpa beban
 - $I_L = 2,04 \text{ A}$
 - $P_{IN} = 132 \text{ Watt}$
2. Pengujian dengan beban generator sinkron
 - $I_L = 2,32 \text{ A}$
 - $P_{IN} = 230 \text{ Watt}$
 - $n = 1425 \text{ rpm}$

Hasil pengujian ketika kondisi peralihan pengasutan motor induksi satu fasa berupa bentuk lonjakan gelombang arus pengasutan yang berbeda antara pengasutan langsung dan dengan *soft starter* baik dalam kondisi tak berbeban dan kondisi berbeban generator sinkron.

Ketika motor diasut, motor berakselearasi dari kondisi diam ke kondisi berjalan sesuai dengan bentuk gelombang arus. Proses peralihan ditandai dengan adanya puncak arus pengasutan dan selanjutnya motor telah mantap ditandai dengan arus yang mencapai kondisi mantap (*steady-state*). Ketika menggunakan *soft-starter* untuk pengasutan motor dibutuhkan waktu peralihan yang lebih lama dibandingkan dengan pengasutan langsung untuk mencapai kondisi mantap. Motor dijalankan dengan *soft-starter* untuk pertama kali untuk mendapatkan nilai sudut penyalaan yang kemudian nilai sudut penyalaan dijadikan untuk proses pengasutan selanjutnya.

Bentuk gelombang arus untuk pengasutan langsung tanpa beban ditunjukkan pada gambar 5.15 (a), sedangkan pengasutan dengan *soft starter* tanpa beban ditunjukkan pada gambar 5.15 (b).

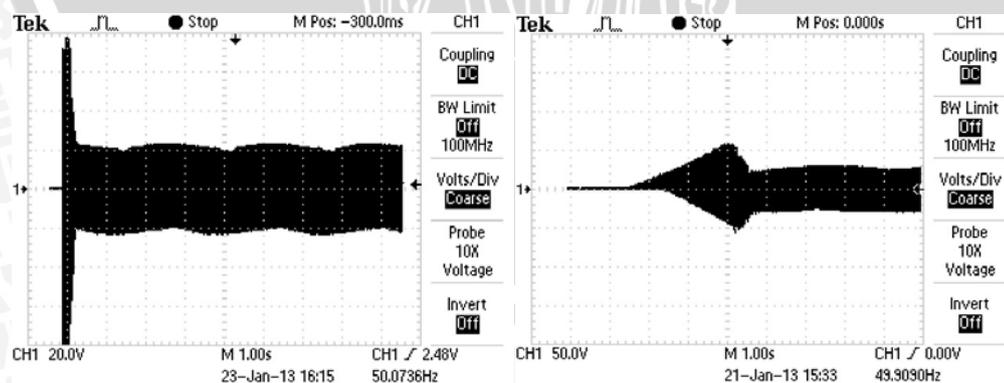


(a) Pengasutan Langsung

(b) Pengasutan dengan soft-starter

Gambar 5.14 Hasil pengujian pengasutan motor induksi tanpa beban

Untuk pengasutan motor induksi beban generator sinkron dengan pengasutan langsung ditunjukkan pada gambar 5.16 (a) dan untuk pengasutan dengan *soft-starter* ditunjukkan pada gambar 5.16 (b).



(a) pengasutan langsung

(b) Pengasutan dengan soft starter

Gambar 5.15 Hasil pengujian pengasutan motor induksi dengan beban generator sinkron

Tabel 5.5 Data pengujian pengasutan motor induksi tak berbeban

Parameter	Langsung	<i>Soft Starter</i>
Arus <i>Starting</i> (A)	6,62	5,79
Arus <i>Steady</i> (A)	2,09	2,09
Tegangan Puncak (V)	114	72
Waktu Transien (detik)	0,9	2,32

Tabel 5.6 Data pengujian pengasutan motor induksi berbeban generator sinkron

Parameter	Langsung	<i>Soft Starter</i>
Arus <i>Starting</i> (A)	8,28	5,33
Arus <i>Steady</i> (A)	2,39	2,39
Tegangan Puncak (V)	79	59
Waktu Transien (detik)	0,77	7,92

5.6.5 Analisis Hasil Pengujian

Grafik pengasutan motor induksi secara langsung tak berbeban ditunjukkan pada gambar 5.16 dimana grafik ditunjukkan pada kondisi transien. Pada kondisi transien gelombang memiliki waktu transien selama 0,9 detik. Ini didapatkan dari pengurangan nilai waktu dari motor mulai berjalan yang ditunjukkan dengan gelombang yang tinggi sampai dengan motor steady yang ditunjukkan dengan gelombang yang mulai stabil. Frekuensi gelombang memiliki nilai yang sama pada saat *transien* dan *steady* yaitu 50 Hz. Sedangkan pada gambar 5.17 menunjukkan grafik pengasutan motor dengan *soft starter* tak berbeban. Pada gambar ini terlihat bahwa gelombang memiliki waktu transien yang lebih lama dibanding gambar 5.16. Waktu transien pada gambar ini sebesar 2,32 detik. Hal ini dikarenakan proses pemasukan tegangan dengan mengatur sudut penyalan dari sudut penyalan yang paling besar sampai tegangan penuh. Pada gambar 5.17 terlihat bahwa bentuk gelombang tidak sempurna. Hal ini disebabkan oleh proses pengaturan sudut penyalan yang memotong bentuk gelombang tegangan bolak-balik. Komponen semikonduktor daya yang digunakan juga mempengaruhi bentuk dari gelombang yang dihasilkan. Tegangan puncak yang ditunjukkan pada gambar 5.17 adalah sebesar 72 V. Pembacaan ini merepresentasikan nilai arus starting sebesar 5,79 A.

Soft starter mampu menurunkan arus starting motor induksi dari nilai 6,62 A pada pengasutan secara langsung. Untuk mendapatkan nilai torsi pengasutan digunakan persamaan 2-36.

Nilai torsi beban penuh didapatkan dari perhitungan,

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{0,25 \times 5252}{1425} & (5-4) \\ &= 0,9214 \text{ lb-ft} \\ &= 1,24 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Nilai slip beban penuh pada kondisi tidak berbeban didapatkan dari perhitungan,

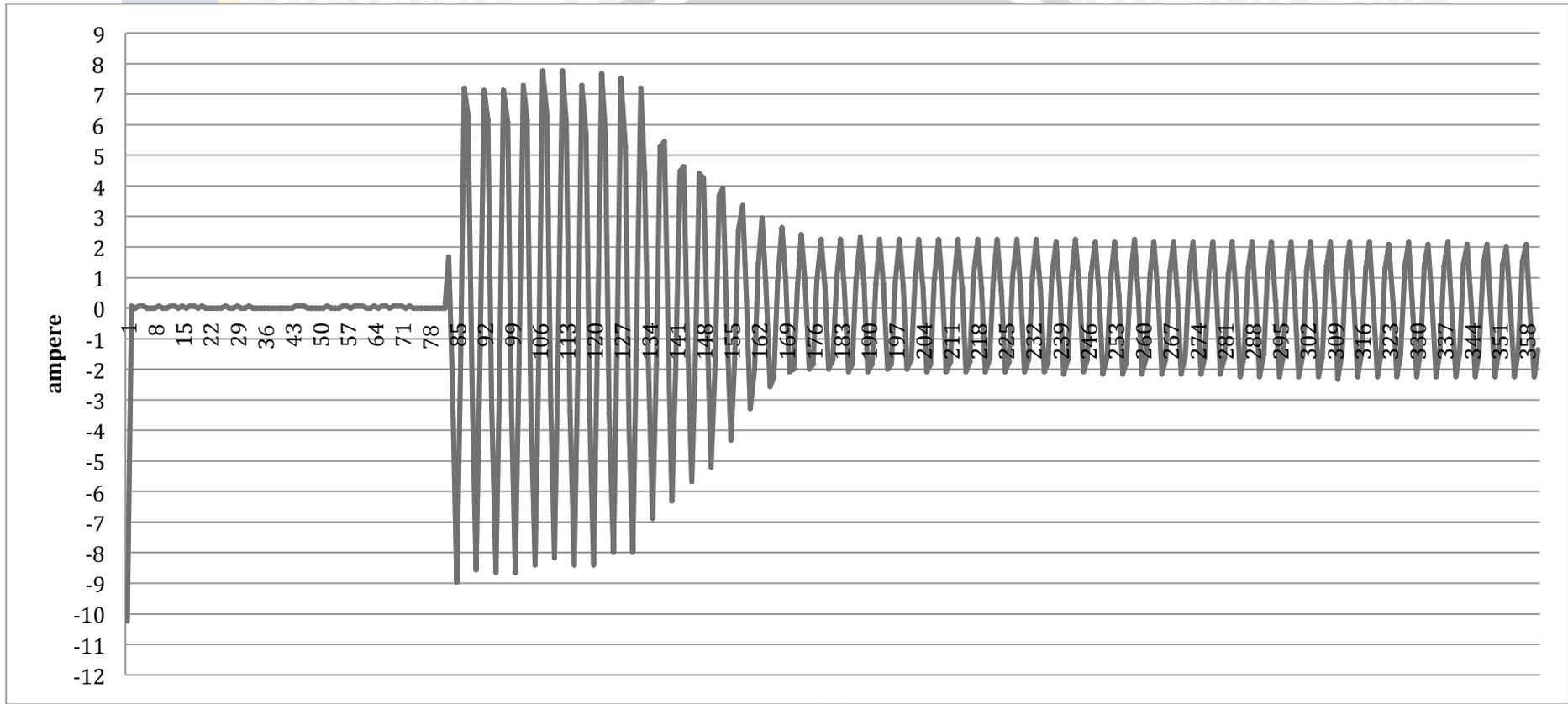
$$\begin{aligned}s &= \frac{1500-1495}{1500} \times 100\% \\ &= 0,3 \%\end{aligned}$$

Dengan persamaan 2-36 maka didapatkan nilai torsi,

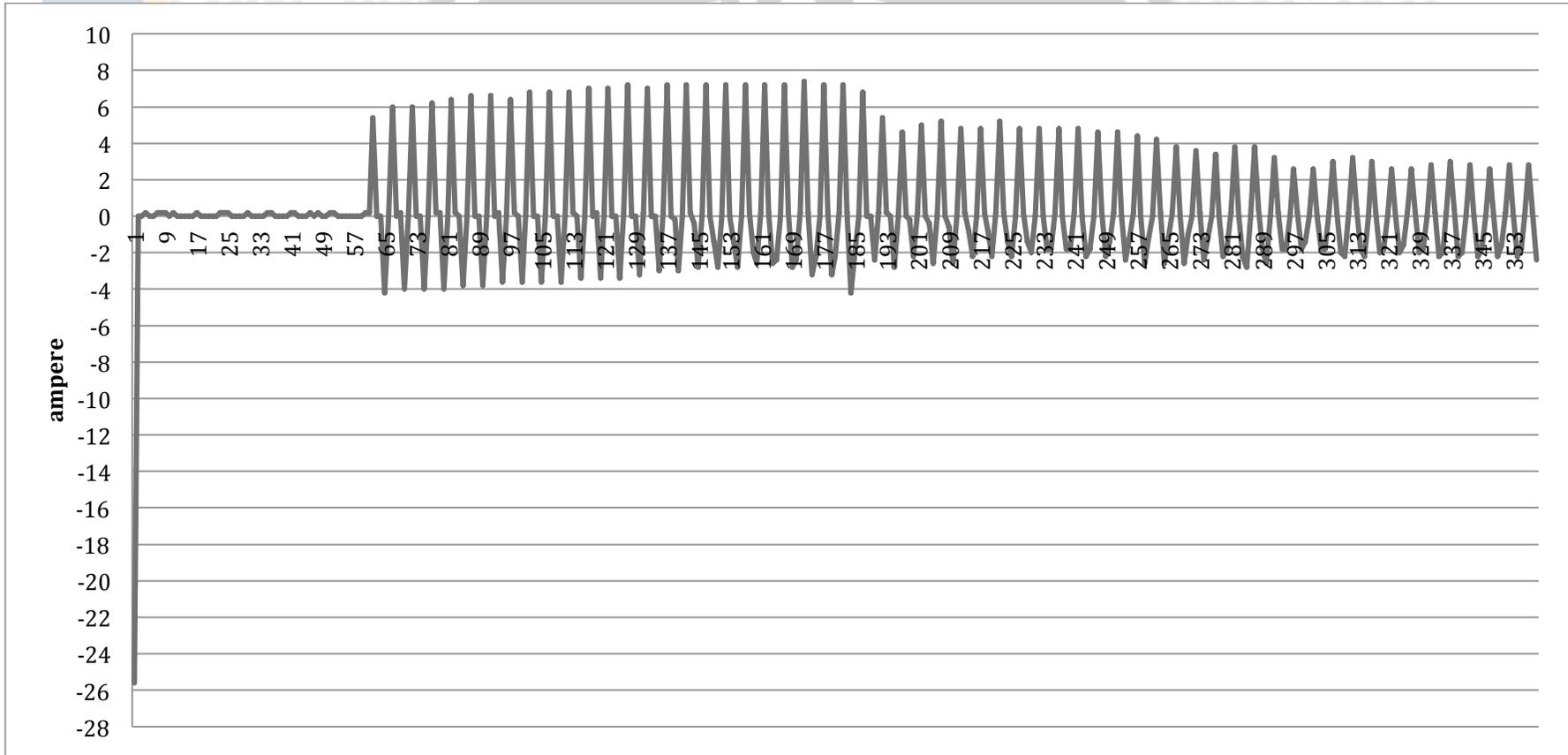
Tabel 5.7 Hasil perhitungan slip dan torsi *starting* motor induksi tak berbeban

Parameter	Langsung	<i>Soft Starter</i>
Slip (%)	0,3	0,3
Torsi <i>Starting</i> (Nm)	0,037	0,028

Nilai torsi starting pada pengasutan motor induksi dengan menggunakan *soft starter* memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan pengasutan langsung seperti pada tabel 5.7. Ini menunjukkan bahwa *soft starter* mampu menurunkan arus starting motor induksi dan torsi starting yang dihasilkan *soft starter* tidak terpaut jauh dengan torsi starting dengan menggunakan pengasutan langsung.



Gambar 5.16 Grafik arus terhadap waktu pada pengasutan motor induksi satu fasa secara langsung tanpa beban



Gambar 5.17 Grafik arus terhadap waktu pada pengasutan motor induksi satu fasa menggunakan *soft starter* tanpa beban

Grafik pengasutan motor induksi dengan berbeban generator sinkron secara langsung ditunjukkan pada gambar 5.18. Pada grafik pengasutan ditunjukkan bahwa waktu transien pada pengasutan secara langsung selama 0,77 detik. Pada gambar 5.19 menunjukkan grafik pengasutan motor induksi dengan soft starter. Waktu transien pada pengasutan dengan soft starter selama 7,92 detik. Nilai arus *starting* pada pengasutan langsung bernilai 8,28 A, sedangkan pada pengasutan dengan menggunakan *soft starter* bernilai 5,33 A.

Nilai slip motor induksi pada pengasutan dengan beban generator sinkron didapatkan dengan persamaan,

$$s = \frac{1500-1425}{1500} \times 100\% \\ = 5\%$$

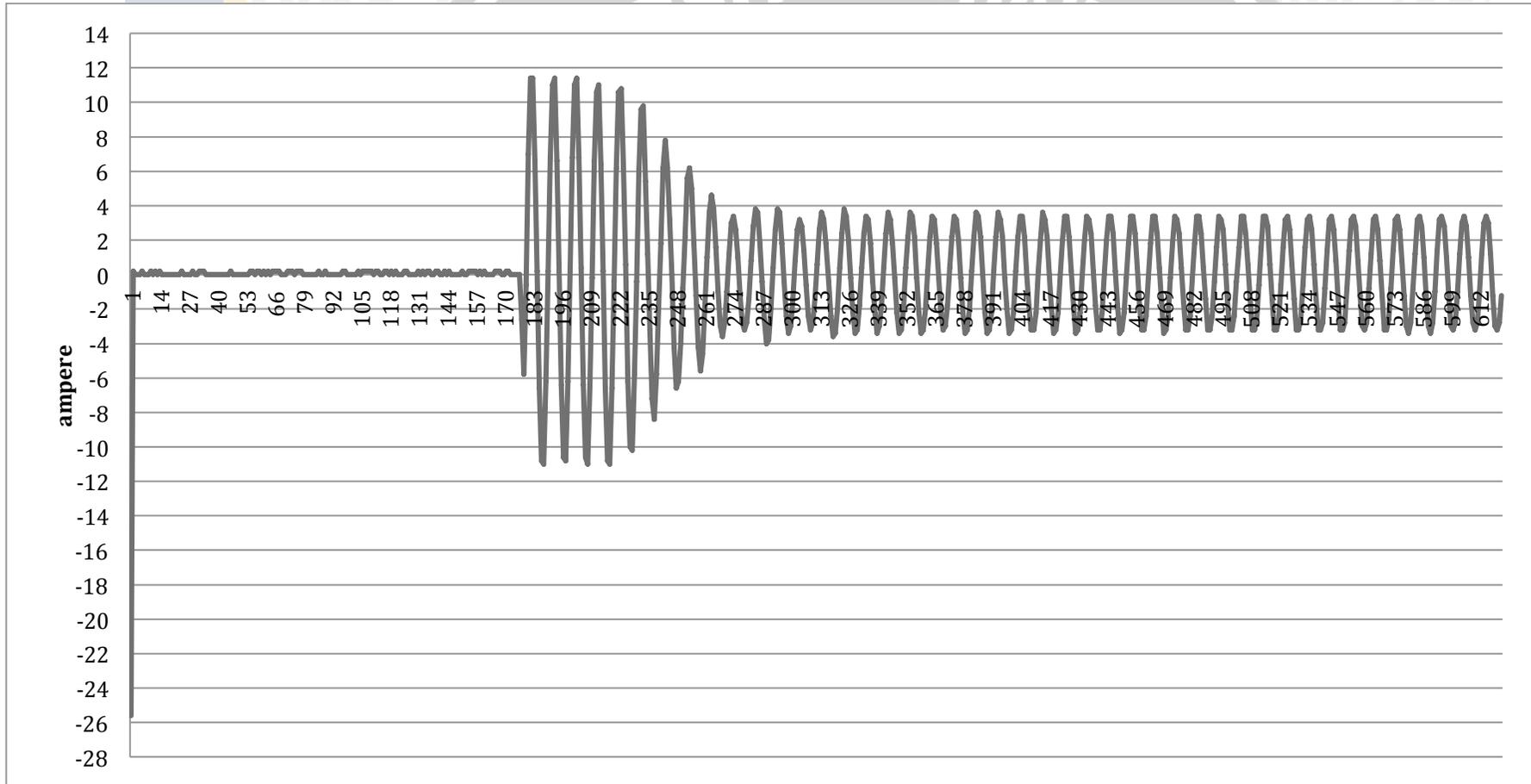
Dengan persamaan 2-37 maka didapatkan nilai torsi starting pada pengasutan langsung dan dengan soft starter.

Tabel 5.8 Hasil perhitungan slip dan torsi *starting* motor induksi berbeban generator sinkron

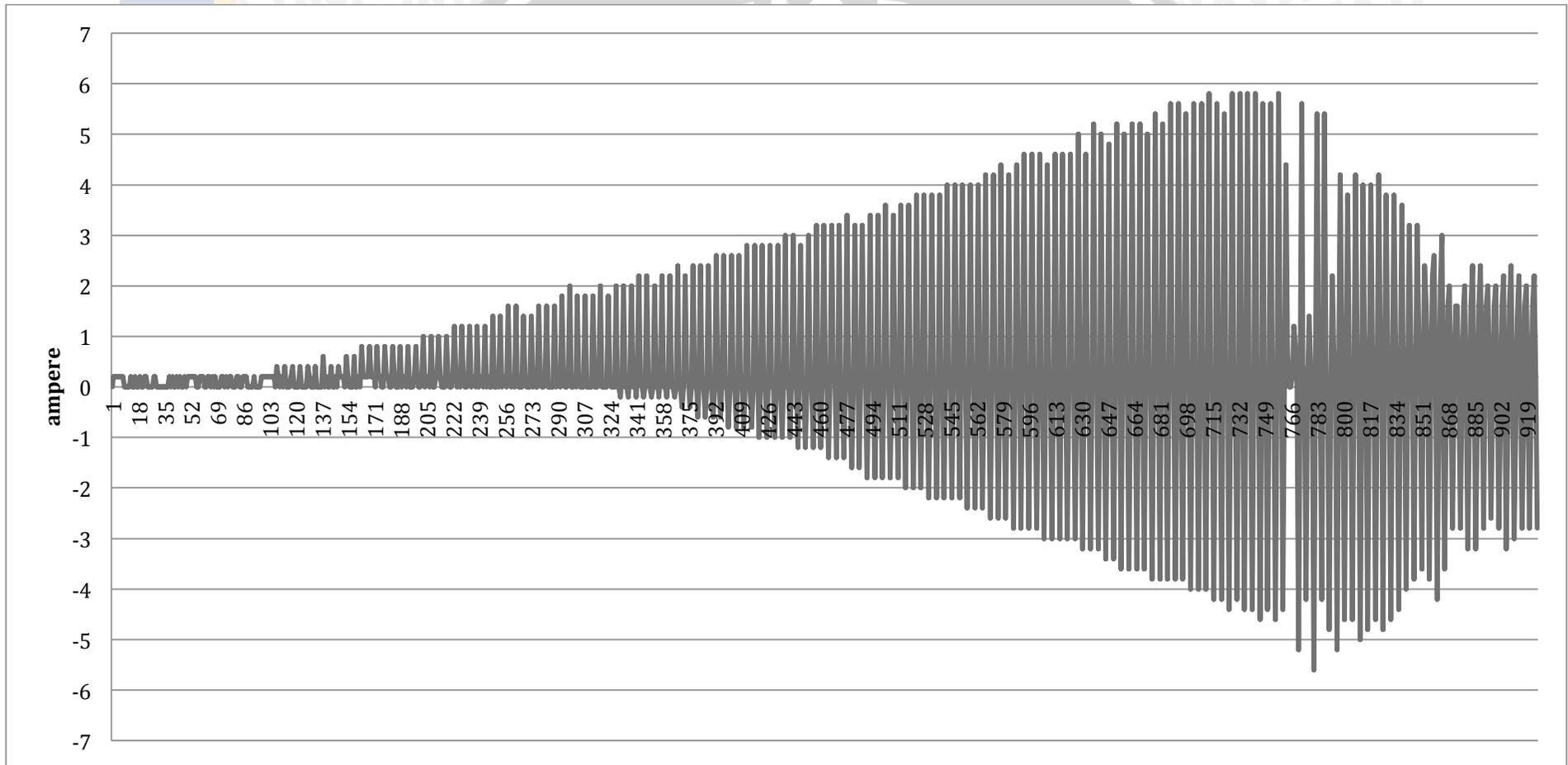
Parameter	Langsung	Soft Starter
Slip (%)	5	5
Torsi <i>Starting</i> (Nm)	0,744	0,307

Nilai torsi pengasutan dengan menggunakan *soft starter* memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan pengasutan langsung pada tabel 5.8. Torsi yang lebih rendah ini tetap mampu memutar motor induksi. Ini menunjukkan bahwa *soft starter* mampu menurunkan nilai arus starting motor induksi dan torsi pengasutan yang dihasilkan tidak terpaut jauh dengan pengasutan langsung.

Berdasarkan perancangan *soft starter* dan analisis yang dilakukan mampu menurunkan arus pengasutan motor induksi sesuai dengan tujuan awal penelitian ini. Torsi yang dihasilkan oleh *soft starter* juga mampu untuk memutar motor induksi. Waktu peralihan yang dibutuhkan untuk melakukan starting motor juga cukup singkat untuk memutar motor induksi.

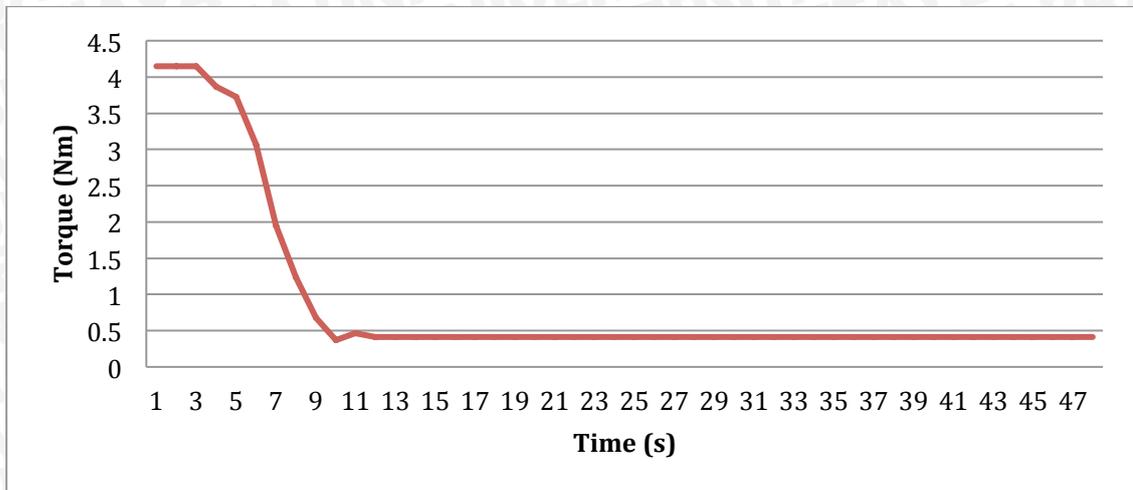


Gambar 5.18 Grafik arus terhadap waktu pada saat pengasutan motor induksi satu fasa secara langsung dengan beban generator sinkron



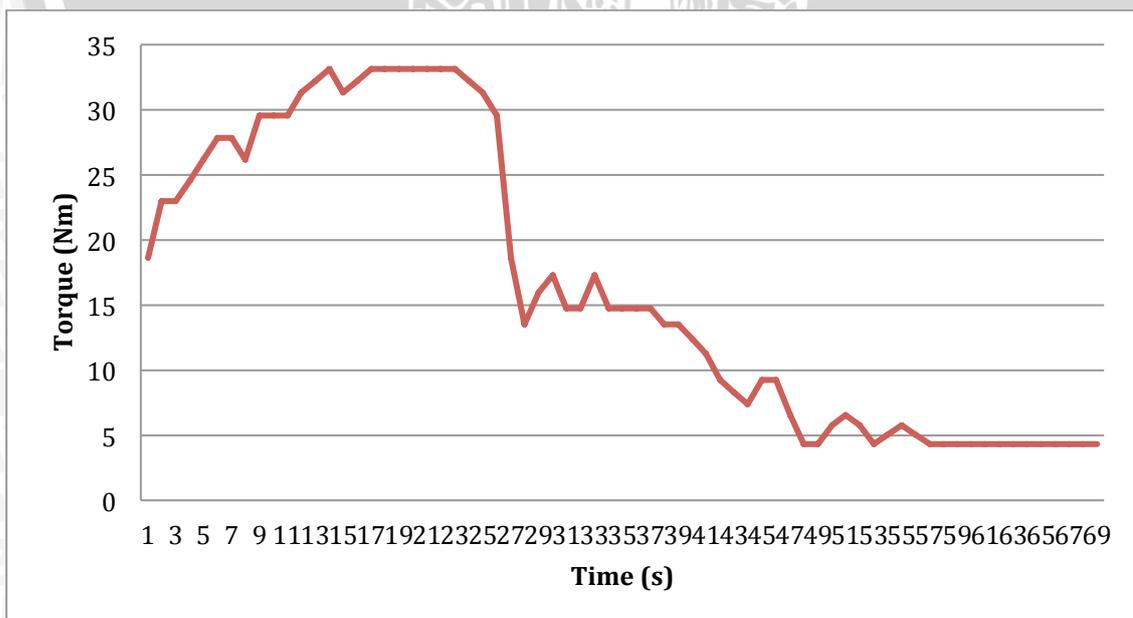
Gambar 5.19 Grafik arus terhadap waktu pada saat pengasutan motor induksi satu fasa menggunakan *soft starter* dengan beban generator sinkron

Untuk mengetahui grafik perubahan torsi terhadap waktu pada pengasutan langsung dan menggunakan soft starter dalam kondisi tak berbeban dapat dilihat pada gambar 5.20 dan 5.21.



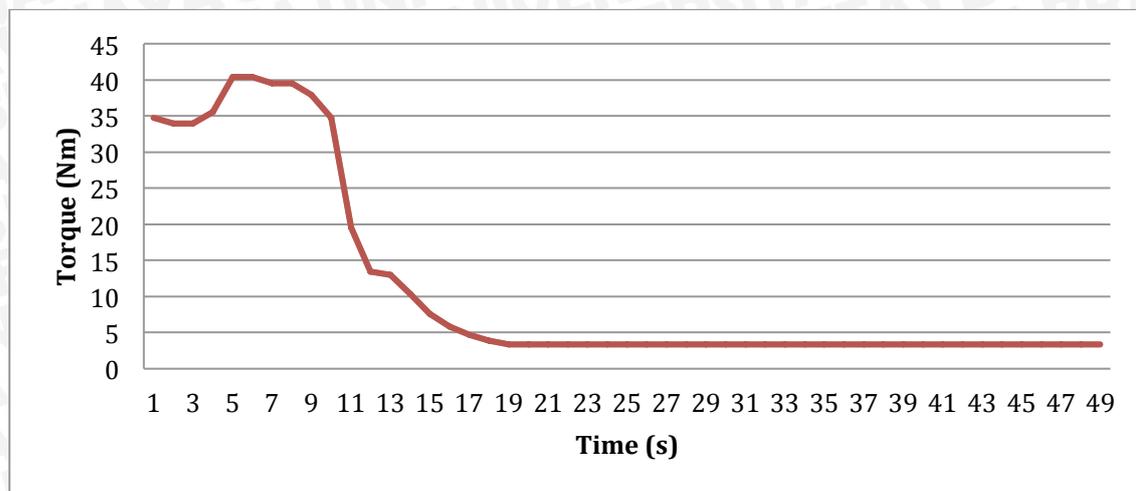
Gambar 5.20 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan langsung tak berbeban

Pada gambar 5.20 dan gambar 5.21 dapat terlihat perbedaan dimana pada gambar 5.21 nilai torsi awal memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan gambar 5.20. Hal ini disebabkan prinsip kerja soft starter yang memasukkan tegangan secara bertahap dari sudut penyalaan terbesar hingga sudut 0° . Hal ini juga menyebabkan waktu yang dibutuhkan sampai dengan *steady state* lebih lama dibandingkan pengasutan langsung.



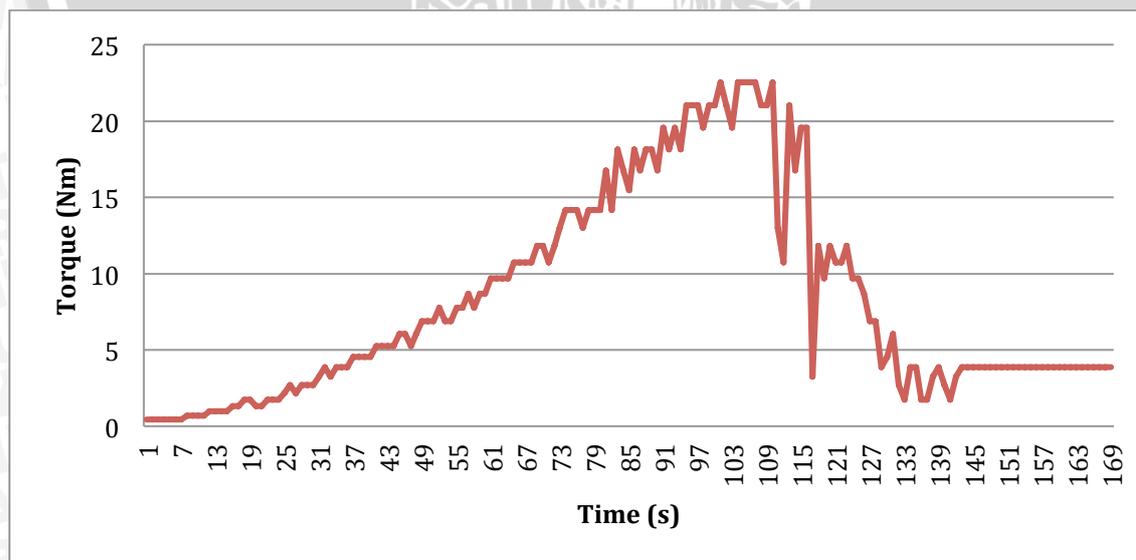
Gambar 5.21 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan dengan *soft starter* tak berbeban

Sedangkan untuk grafik perubahan torsi terhadap waktu pada pengasutan langsung dan menggunakan soft starter dalam kondisi berbeban dapat dilihat pada gambar 5.22 dan 5.23



Gambar 5.22 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan langsung berbeban

Pada kondisi berbeban, pengasutan dengan soft starter menghasilkan kenaikan torsi yang seiring dengan pertambahan waktu sampai mencapai nilai *breakdown torque* kemudian turun hingga mencapai nilai steady state. Pada gambar 5.23 terlihat nilai torsi yang tidak beraturan setelah mencapai nilai *breakdown torque*, hal ini disebabkan adanya torsi lawan dan mengakibatkan komponen elektronika soft starter terganggu kerjanya. Sehingga keluaran yang dihasilkan tidak sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 5.23 Kurva torsi terhadap waktu pengasutan dengan *soft starter* berbeban

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. *Soft starter* motor induksi terdiri atas 1 buah mikrokontroler yang digunakan sebagai pemacu gate TRIAC dan pengolah sudut penyalan, 1 buah optocoupler H11AA1 sebagai unit pendeteksi titik nol tegangan bolak-balik, 1 buah optocoupler MOC3021 sebagai rangkaian isolator antara TRIAC dan mikrokontroler, 1 buah TRIAC sebagai pengatur fasa tegangan bolak-balik, 1 buah sensor arus sebagai pendeteksi arus yang masuk ke motor induksi dan 1 buah tachogenerator sebagai pendeteksi besar putaran motor induksi yang akan diumpanbalikkan ke mikrokontroler sebagai referensi untuk mengatur fasa tegangan bolak-balik pada saat proses pengasutan motor induksi.
2. Arus pengasutan motor induksi satu fasa dapat diturunkan menjadi sampai ± 2 kali arus nominal untuk pengasutan motor induksi dengan *soft starter* tak berbeban dan ± 3 kali arus nominal untuk pengasutan motor induksi dengan *soft starter* berbeban generator sinkron.
3. Untuk mendapatkan arus pengasutan yang rendah ini ada yang harus dikorbankan yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state* menjadi lebih lama dibandingkan dengan pengasutan langsung.
4. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state* pada pengasutan dengan *soft starter* pada kondisi tak berbeban selama 0,77 detik sedangkan untuk kondisi berbeban generator sinkron selama 7,92 detik.
5. Begitu pula dengan torsi pengasutan yang dihasilkan pada saat menggunakan *soft starter* memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan pengasutan langsung untuk kondisi tak berbeban maupun berbeban generator sinkron.
6. Namun torsi yang dihasilkan pada pengasutan motor induksi masih mampu memutar motor dengan nilai 0,028 Nm dengan *soft starter* untuk

kondisi tak berbeban sedangkan pada kondisi berbeban memiliki nilai 0,307 Nm.

6.2 Saran

1. Untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal pengujian bisa dilakukan pada beban di kondisi nyata, seperti pompa air.
2. Untuk menghasilkan keluaran yang lebih baik bisa digunakan komponen semikonduktor daya IGBT yang memiliki kelebihan dibandingkan TRIAC pada penyulutannya.



DAFTAR PUSTAKA

- Allen-Bradley. 2008. *Ac Drives and Soft Starter Application Guide*. Allen-Bradley Company.
- Bandyopadhyay, M.N. 2006. *Control Engineering: Theory & Practice*. New Delhi: Prentice-Hall India.
- Boldea, Ion dan Syed A. Nasar. 2002. *The Induction Machine Handbook*. Florida: CRC Press.
- Bose, Bimal K. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Chapman, Stephen J. 2005. *Electric Machinery Fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
- Dubey, Gopal K. 1993. *Power Semiconductor Controlled Drives*. Simon & Schuster (Asia) Pte.Ltd.
- Huges, Austin. 2006. *Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications Third Edition*. Oxford: Elsevier Ltd.
- Margolis, Michael. 2012. *Arduino Cookbook*. Sebastopol: O'Reilly.
- Mazda, Fraidoon. 1997. *Power Electronics Handbook 3rd Edition*. Oxford: Newnes.
- Rashid, Muhammad H. 2001. *Power Electronics Handbook*. London: Academic Press.
- Sen, P.C. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Ontario: John Wiley & Sons, Inc.
- Zuhal. 1989. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: Penerbit ITB