

**PERANCANGAN *ELECTRONIC LOAD CONTROLLER* UNTUK
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI DUSUN
SUMBERKAPUNG DESA ANDUNGBIRU KECAMATAN TIRIS
KABUPATEN PROBOLINGGO**

SKRIPSI

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

THEO AJI CARAKA

NIM. 0810630098 - 63

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2012

LEMBAR PERSETUJUAN

**PERANCANGAN *ELECTRONIC LOAD CONTROLLER* UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI DUSUN SUMBERKAPUNG DESA
ANDUNGBIRU KECAMATAN TIRIS KABUPATEN PROBOLINGGO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:
THEO AJI CARAKA
NIM. 0810630098 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Teguh Utomo, MT.
NIP. 19650913 199103 1 003

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

LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN *ELECTRONIC LOAD CONTROLLER* UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI DUSUN SUMBERKAPUNG DESA
ANDUNGBIRU KECAMATAN TIRIS KABUPATEN PROBOLINGGO

SKRIPSI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

THEO AJI CARAKA
NIM. 0810630098 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 31 Juli 2012

DOSEN PENGUJI

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

Ir. Hery Purnomo, M.T
NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc
NIP. 19630106 198802 1 001

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

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

PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena hanya dengan berkat rahmat, barokah dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik yang berjudul ” Perancangan *Electronic Load Controller* untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo”. Skripsi tersebut disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Penulis memilih judul tersebut berdasarkan kondisi PLTMH yang memiliki kualitas listrik yang rendah akibat kondisi beban generator yang selalu berubah. Tujuan penelitian ini secara khusus memiliki tujuan menjaga kualitas listrik dengan menjaga kondisi beban generator PLTMH dengan merancang dan membuat modul *electric load controller* generator sinkron 3 fasa pada PLTMH Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo.

Banyak kendala yang dihadapi penulis dalam penyelesaian skripsi ini, baik kendala yang berasal dari diri pribadi penulis maupun dari lingkungan sekitar. Kendala utama yang sering dihadapi adalah proses menjaga kemandirian dan ketekunan dalam pengerjaan dan penyusunan penelitian ini. Permasalahan tersebut dapat diatasi berkat bantuan dari pihak-pihak yang telah meluangkan waktu untuk membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut diantaranya:

1. Bapak DR. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.Sc, Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Mochammad Rif’an S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Ir. Teguh Utomo, 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.
5. Ibunda Sri Wahyuningsih dan Ayahanda Suliyono tercinta yang tidak pernah lelah mendidik, memberi kasih sayang, perhatian, dukungan, doa,

dan segala jerih payah selama ini, serta adikku Seto dan Whisnu tercinta yang telah menemaniku selama ini.

6. Noventia Ayu Prista yang selalu memberi perhatian, semangat, doa, dukungan dan dengan setia mendampingi.
7. Bapak Rasid selaku pemilik PLTMH dan keluarga di Dusun Sumberkapung yang telah memberi ijin sehingga penelitian ini dapat dilakukan.
8. Dzulhidwandarusadi sebagai rekan seperjuangan skripsi di PLTMH Andungbiru yang tak kenal lelah melakukan survey dan pengambilan data.
9. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Elektro angkatan *Concordes* 2008, khususnya rekan-rekan mahasiswa konsentrasi (A) Teknik Energi Elektrik dan teman-teman pengurus inti Workshop-HME 11/12.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penelitian ini dirasa masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan oleh penulis. Saran dan kritik ditujukan agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan lebih berguna. Akhir kata, semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, 18 Juli 2012

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
SUMMARY	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika Penulisan Skripsi.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Generator Sinkron.....	4
2.1.1 Prinsip Kerja	5
2.1.2 Generator Berbeban	6
2.2 Prinsip Pengaturan Putaran Generator PLTMH Dengan Pengalihan Beban	6
2.3 Beban Komplemen	8
2.4 Sensor Arus ACS 712	9
2.5 Thyristor.....	10
2.5.1 Prinsip Kerja	11
2.5.2 Parameter Thyristor	14
2.5.3 TRIAC (<i>Bidirectional Thyristor</i>).....	16
2.6 Mikrokontroler.....	17



2.6.1	<i>Port</i> pada Mikrokontroler	17
2.6.2	<i>Timer</i> pada Mikrokontroler.....	19
2.7	<i>Optocoupler</i>	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		26
3.1	Studi Literatur	26
3.2	Survey Kondisi Sistem PLTMH dan Pengambilan Data.....	27
3.3	Perancangan Beban Komplemen	27
3.4	Perancangan Alat	27
3.5	Pengujian dan analisis.....	27
BAB IV PERANCANGAN		30
4.1	Pengukuran Arus Dan Tegangan	30
4.2	Perancangan Beban Komplemen	31
4.2.1	Menghitung Besarnya Nilai Tahanan Beban Komplemen	32
4.2.2	Konstruksi Beban Komplemen.....	34
4.3	Blok Diagram Sistem.....	34
4.4	Perancangan Perangkat Keras <i>Electronic Load Controller</i>	35
4.4.1	Pemilihan Komponen TRIAC	35
4.4.2	Perancangan Rangkaian Pendeteksi Arus Beban Utama.....	36
4.4.3	Perancangan Rangkaian Pemicuan <i>Gate</i> TRIAC	36
4.4.4	Perancangan Kontrol Sistem.....	37
4.5	Perancangan Perangkat Lunak	38
4.5.1	Perancangan Diagram Alir Fungsi ELC	38
4.5.2	Perancangan Diagram Alir Pendeteksi Arus Beban Utama.....	40
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS		42
5.1	Pengujian Rangkaian Pendeteksi Arus Beban Utama	42
5.1.1	Tujuan	42
5.1.2	Peralatan.....	42

5.1.3	Prosedur Pengujian	42
5.1.4	Data Hasil Pengujian	43
5.1.5	Analisis Hasil Pengujian	44
5.2	Pengujian Rangkaian Pemicuan.....	44
5.2.1	Tujuan	44
5.2.2	Peralatan.....	44
5.2.3	Prosedur Pengujian	44
5.2.5	Analisis Hasil Pengujian	46
5.3	Pengujian Pembebanan Generator Sinkron	46
5.3.1	Tujuan	47
5.3.2	Peralatan.....	47
5.3.3	Prosedur Pengujian	48
5.3.4	Hasil Pengujian	50
5.3.5	Analisis Hasil Pengujian	52
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		60
6.1	Kesimpulan	60
6.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		62
LAMPIRAN		63



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	<i>Rating</i> Maksimum Thyristor.....	15
Tabel 2.2	<i>Rating</i> Komponen yang Umum Disertakan.....	16
Tabel 2.3	Mode <i>Timer/Counter</i> 0.....	19
Tabel 2.4	Mode <i>Timer/Counter</i> 1.....	22
Tabel 4.1	Data Pengukuran Kondisi PLTMH.....	30
Tabel 4.2	Hasil perhitungan daya beban.....	31
Tabel 4.3	Hasil perhitungan daya beban dengan tegangan 220 V.....	32
Tabel 4.4	Tabulasi pemakaian beban dan beban komplemen.....	33
Tabel 5.1	Data tegangan keluaran sensor arus.....	43
Tabel 5.2	Hasil pengujian rangkaian pemecuan.....	46
Tabel 5.3	Tabulasi pemakaian beban dan beban komplemen untuk pengujian....	46
Tabel 5.4	Nilai fluktuasi arus beban utama pengujian.....	47
Tabel 5.5	Hasil pengujian pembebanan generator sinkron metode tanpa ELC	50
Tabel 5.6	Hasil pengujian pembebanan generator sinkron metode ELC.....	51
Tabel 5.7	Nilai daya beban total generator sinkron metode tanpa ELC	52
Tabel 5.8	Nilai daya beban total Metode ELC	53
Tabel 5.9	Tabulasi daya beban.....	54
Tabel 5.10	Tabulasi respon putaran generator.....	55
Tabel 5.11	Tabulasi respon frekuensi	56
Tabel 5.12	Tabulasi respon tegangan antar fasa	57
Tabel 5.13	Tabulasi respon tegangan fasa netral.....	58

DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Konstruksi generator sinkron.....	5
Gambar 2.2	Karakteristik generator berbeban.....	6
Gambar 2.3	Diagram blok pembagian daya beban.....	7
Gambar 2.4	Diagram blok satu garis sistem kontrol ELC pada mikrohidro.....	8
Gambar 2.5	(a) Tipe beban komplemen pemanas udara	8
	(b) Tipe beban komplemen pemanas air.....	8
Gambar 2.6	Bentuk fisik sensor arus ACS712	9
Gambar 2.7	Aplikasi sensor arus ACS 712	10
Gambar 2.8	Blok diagram sensor arus ACS 712.....	10
Gambar 2.9	Susunan semikonduktor pada thyristor dan simbol thyristor.....	11
Gambar 2.10	Karakteristik $v-i$ thyristor.....	12
Gambar 2.11	Simbol dan karakteristik $v-i$ dari TRIAC.....	17
Gambar 2.12	Konfigurasi pin ATmega16.....	18
Gambar 2.13	Mode phase correct PWM.....	20
Gambar 2.14	Mode clear time on compare match (CTC).....	20
Gambar 2.15	Mode <i>fast</i> PWM.....	21
Gambar 2.16	Beberapa contoh detektor optik aplikasi elektronika daya.....	24
Gambar 2.17	Contoh rangkaian aplikasi penggunaan <i>optocoupler</i>	25
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 4.1	Beban komplemen	34
Gambar 4.2	Blok diagram keseluruhan sistem.....	34
Gambar 4.3	Konfigurasi generator dengan komponen TRIAC.....	36
Gambar 4.4	Rangkaian sensor arus untuk sistem 3 fasa.....	36
Gambar 4.5	Rangkaian pemecuan <i>gate</i> TRIAC 3 fasa	37
Gambar 4.6	Rangkaian mikrokontroler.....	38

Gambar 4.7	Diagram alir fungsi ELC.....	39
Gambar 4.8	Deteksi arus beban melalui proses pengambilan sampel.....	40
Gambar 4.9	Diagram alir pengambilan sampel	41
Gambar 5.1	Rangkaian pengujian sensor arus.....	42
Gambar 5.2	Bentuk keluaran sensor untuk arus 0,5A	43
Gambar 5.3	Bentuk keluaran sensor untuk arus 5,5A	43
Gambar 5.4	Tegangan keluaran sensor terhadap kenaikan arus.....	43
Gambar 5.5	Rangkaian pengujian pemecuan	45
Gambar 5.6	Diagram alir pengujian rangkaian pemecuan	45
Gambar 5.7	Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron metode tanpa ELC	49
Gambar 5.8	Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron metode ELC	50
Gambar 5.9	Fluktuasi daya beban total metode tanpa ELC	52
Gambar 5.10	Fluktuasi daya beban metode ELC	53
Gambar 5.11	Fluktuasi putaran generator metode tanpa ELC.....	54
Gambar 5.12	Fluktuasi putaran generator metode ELC	54
Gambar 5.13	Fluktuasi frekuensi metode tanpa ELC.....	55
Gambar 5.14	Fluktuasi frekuensi metode ELC	55
Gambar 5.15	Fluktuasi tegangan antar fasa metode tanpa ELC.....	56
Gambar 5.16	Fluktuasi tegangan antar fasa metode ELC	56
Gambar 5.17	Fluktuasi tegangan fasa netral metode tanpa ELC.....	57
Gambar 5.18	Fluktuasi tegangan fasa netral metode ELC	58



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1	Perhitungan nilai pengujian	63
Lampiran 2	Dokumentasi	64
Lampiran 3	Skematik Rangkaian	69
Lampiran 4	Hasil Perancangan Perangkat Lunak Menggunakan Bahasa Pemrograman C pada <i>Software CodeVisionAVR</i>	74
Lampiran 5	<i>Datasheet</i> Sensor Arus ACS712	75
Lampiran 6	<i>Datasheet</i> Komponen TRIAC BTA16-600B	76
Lampiran 7	<i>Datasheet</i> Komponen <i>Optocoupler</i> 3021	77



RINGKASAN

Theo Aji Caraka, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2012, *Perancangan Electronic Load Controller Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo*, Dosen Pembimbing: Ir. Teguh Utomo, MT., Ir. Wijono, MT., Ph.D.

Pada pembangkitan skala kecil putaran generator menjadi salah satu parameter yang berperan penting dalam menjaga kualitas sistem, karena sangat berpengaruh pada frekuensi dan tegangan yang dihasilkan. Salah satu faktor yang mempengaruhi putaran generator adalah fluktuasi beban konsumen. Sistem pengaturan beban dengan menggunakan *Electronic Load Controller* (ELC) dirancang untuk PLTMH Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo. Sehingga ketika terjadi fluktuasi beban konsumen putaran generator tetap stabil karena selisih daya pembangkitan dan beban terpakai oleh konsumen akan dialihkan oleh ELC menuju beban komplemen.

Penelitian ini berisi perancangan dan pembuatan ELC dengan mengacu pada generator PLTMH yang memiliki spesifikasi generator sinkron tiga fasa terhubung bintang (Y) merek KAVEA; 380/220 V; I 10/57 A; 50 Hz; n = 1500 rpm, daya 30kW. ELC dirancang menggunakan sensor arus ACS 712 sebagai pendeteksi arus menuju beban utama, mikrokontroler ATmega16 sebagai kontrol utama pemacu *gate* TRIAC BTA16-600B dengan *optocoupler* MOC3021 sebagai isolasi antar rangkaian. Pengujian ELC di laboratorium menggunakan skala perbandingan arus nominal 1:6 dari arus nominal pada perancangan dengan menggunakan spesifikasi generator di laboratorium yaitu generator sinkron tiga fasa terhubung bintang (Y); 400/230 V; 3,6/9 A; 50 Hz; n=1500 rpm, daya 6,3 kVA. Pengujian dilakukan pada masing-masing blok rangkaian antara lain rangkaian pendeteksi arus beban utama, rangkaian pemucuan dan pengujian pembebanan generator sinkron dengan membandingkan metode tanpa ELC dan metode ELC dengan fluktuasi arus beban utama sesuai fluktuasi beban yang ada di PLTMH.

Hasil pengujian ELC menggunakan sensor arus ACS712 menghasilkan tegangan yang linear sebesar $16^{mV/A}$ yang kemudian menjadi nilai acuan pengalihan daya menuju beban komplemen menggunakan pengontrolan *gate* TRIAC. Daya beban komplemen setiap fasa hasil perancangan sebesar 6600 Watt dengan arus maksimum 30A dengan membaginya dalam 8 tap beban komplemen, maka daya setiap tap beban komplemen sebesar 825 Watt dengan arus $3.75^{A/tap}$ dan tahanan $58.64^{ohm/tap}$. Hasil pengujian skala laboratorium ELC mampu menjaga daya beban rata-rata sebesar 1.05% dengan fluktuasi putaran rata-rata sebesar 1.05%, frekuensi rata-rata sebesar 0.59%, tegangan antar fasa rata-rata sebesar 0.1%, dan tegangan fasa netral rata-rata sebesar 0.05% dari nilai nominalnya.

Kata Kunci—PLTMH, sensor arus ACS712, TRIAC, arus beban, ELC, beban komplemen.

SUMMARY

Theo Aji Caraka is a college student from University of Brawijaya, in Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, July 2012, *Design of Electronic Load Controller for Mycro-Hydro Power Plant in Sumberkapung village of Andungbiru Country Sub-District Tiris Probolinggo Regency*. Advisor lecture : Ir. Teguh Utomo, MT., Ir. Wijono, MT., Ph.D.

Generator rotation on Mycro Power-Plant become an important parameter to keep quality of system, because it affects of frequency and voltage. Load fluctuation is a one factor that can influence the rotation of generator. Design of load control system with Electronic Load Controller (ELC) for Mycro-Hydro Power Plant in Sumberkapung village of Andungbiru Country Sub-District Tiris Probolinggo Regency. So the rotation remained stable when load fluctuation is happen because ELC switch the deviation of power generation and consument load to complement load.

This research refer to Mycro-Hydro Power Plant generator with specs 3 phase generator sinkron star connected (Y) merk KAVEA; 380/220 V; I 10/57 A; 50 Hz; n = 1500 rpm, 30kW and contain of design and manufacture of ELC. Design of ELC that use ACS712 current sencor to detect a mainload current, ATMega16 microcontroller is a main control trigger gate of TRIAC BTA16-600B with optocoupler MOC3021 to dividing the circuit. The laboratory test of ELC that use downscale method 1:6 of nominal current design of ELC and use laboratory generator with specs 3 phase generator sinkron star connected (Y); 380/220 V; I 3,6/9 A; 50 Hz; n = 1500 rpm, 6,3kVA. Testing was conducted on severally circuit section among other main load current detection, trigger circuit, and synchronous generator loading test to compare ELC and without ELC method with main load current be adapted fluctuation on Mycro-Hydro Power Plant.

The result of ELC test using ACS712 current cencor produces a linear voltage of $16^{mV}/A$ that use of power switch process to complement load reference with TRIAC trigger gate. The result of design complement load power is 6600watt for each phase with 30A of maximum current and be devided on 8 tap complement load that 825 watt of power, $3,75^{A}/_{tap}$ of current and $58,64^{ohm}/_{tap}$ of resistance each. The result of laboratory scale test ELC is able to maintain the average power load of 1,05% with rotation fluctuation average of 1,05%, the average frequency of 0,59%, the line to line voltage average of 0,1% and line to neutral voltage average amounting 0,05% of their nominal value.

Keyword—Mycro-Hydro Power Plant, ACS712 current cencor, TRIAC, load current, ELC, complement load.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan kebutuhan sekunder di dalam kehidupan manusia. Kebutuhan tersebut bergeser menjadi kebutuhan primer akibat meningkatnya taraf hidup, yang ditandai dengan naiknya kebutuhan listrik masyarakat. Kebutuhan ini berkaitan dengan letak tempat tinggal masyarakat yang tersebar, sehingga juga harus memperhatikan kualitas listrik yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan yang tersebar.

Hampir semua wilayah di pulau Jawa dapat dijangkau oleh listrik dari Perusahaan Listrik Negara, namun kualitas listrik pada beban yang terletak di ujung terjauh dari jaringan distribusi PLN memiliki kualitas yang rendah. Kualitas ini juga menjadi masalah yang krusial dalam pembangkitan energi listrik berskala kecil, yang seringkali memiliki masalah pada fluktuasi tegangan yang sangat tinggi akibat daya beban konsumen yang tidak konstan. Kualitas ini dapat dijaga dengan menambahkan alat pengaturan beban.

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo membangkitkan listrik 3 fasa. Energi listrik ini dimanfaatkan masyarakat untuk terutama penerangan, menyalakan televisi, setrika, dan radio. Kondisi PLTMH ini belum mempunyai peralatan pengatur beban sehingga flutuasi beban konsumen yang sangat tinggi berakibat tegangan dan frekuensi naik saat beban konsumen rendah dan turun saat beban menuju konsumen tinggi. PLTMH mampu membangkitkan daya mencapai 22 kW dan tergolong dalam pembangkit skala kecil.

Pada pembangkitan skala kecil keseimbangan penggunaan daya oleh beban dengan daya yang dibangkitkan oleh generator menjadi sangat penting, karena fluktuasi beban harian sangat tinggi. Jika fluktuasi ini tidak diatur maka akan terjadi kerusakan di sisi pembangkitan maupun sisi konsumen akibat naiknya tegangan dan frekuensi yang dibangkitkan, ditandai dengan rusaknya peralatan-peralatan listrik. Kondisi ini membuat pengaturan beban generator untuk menjaga keseimbangan beban mempunyai posisi yang sangat penting, untuk menjaga agar tegangan dan frekuensi keluaran tidak melebihi nilai nominal yang dapat ditoleransi peralatan listrik.

Pengaturan beban generator dapat dilakukan secara otomatis menggunakan alat *Electronic Load Controller*, yang mampu menjaga keseimbangan daya yang dibangkitkan dengan daya yang digunakan oleh beban. Pengaturan beban yang dilakukan oleh ELC mampu mengatasi naiknya tegangan dan frekuensi karena penggunaan daya yang dirasakan oleh generator tetap. Pemindahan penggunaan daya yang tidak digunakan oleh beban konsumen menuju beban komplemen dilakukan oleh ELC secara otomatis. Sehingga ELC menjadi solusi untuk mencegah kerusakan peralatan listrik akibat naiknya tegangan dan frekuensi saat beban konsumen nilainya turun.

Karena latar belakang tersebut diperlukan suatu perancangan rangkaian ELC untuk mengontrol beban komplemen sehingga beban pada fasa R, fasa S dan fasa T selalu seimbang, yang bertujuan agar beban konsumen ditambah beban komplemen selalu sama dengan daya yang dibangkitkan generator.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana kondisi pembebanan PLTMH Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo.
2. Bagaimana menghitung kondisi daya beban PLTMH untuk menjadi acuan perancangan modul ELC.
3. Bagaimana merancang modul ELC menggunakan komponen elektronika daya berbasis mikrokontroler.
4. Bagaimana membuat dan menguji modul *Electronic Load Controller* yang dilakukan di dalam laboratorium.

1.3 Batasan Masalah

Penyusunan penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Generator yang digunakan di PLTMH berupa generator sinkron tiga fasa terhubung bintang (Y); 380/220 V; I 10/57 A; 50 Hz; n = 1500 rpm, daya 30kW.
2. Generator yang akan digunakan untuk pengujian adalah yang ada di Laboratorium Mesin Elektrik, dengan spesifikasi generator sinkron tiga fasa terhubung bintang (Y); 400/230 V; 3,6/9 A; 50 Hz; n=1500 rpm, daya 6,3 kVA.
3. Pengujian dilakukan dengan metode menurunkan skala nominal arus beban pada PLTMH menjadi skala Laboratorium.

4. Parameter yang diamati saat pengujian adalah nilai putaran generator, frekuensi, tegangan, arus total beban, arus beban utama, dan arus beban komplemen.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat modul *electric load controller* generator sinkron 3 fasa pada PLTMH Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo.

1.5 Sistematika Penulisan Skripsi

Sistematika penulisan skripsi disusun dengan urutan sebagai berikut:

- BAB I PENDAHULUAN : Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan skripsi.
- BAB II DASAR TEORI : Berisi tentang tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung perancangan dan pembuatan *electronic load control* generator sinkron 3 fasa meliputi: teori mengenai generator sinkron, teori mengenai beban komplemen, teori mengenai sensor arus ACS 712, teori mengenai semikonduktor TRIAC, pengetahuan dasar mikrokontroler, dan *optocoupler* sebagai pemisah rangkaian.
- BAB III METODOLOGI : Berisi metodologi dan perancangan penelitian. tahapan penyelesaian skripsi ini yang meliputi studi literatur, survey kondisi sistem dan pengambilan data, perancangan beban komplemen, perancangan alat, serta pengujian dan analisis.
- BAB IV PERANCANGAN ALAT : Berisi tentang pembahasan, analisis dan perancangan alat yang diajukan dalam penelitian dengan memperhatikan kondisi sistem di PLTMH.
- BAB V PENGUJIAN dan ANALISIS : Berisi pengujian dan analisis performansi dari hasil perancangan alat dengan kemampuan alat sehingga mampu untuk disimpulkan apakah alat sesuai atau tidak.
- BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN : Berisi kesimpulan dari perancangan dan pembuatan alat dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pengontrolan beban dengan metode pengaturan secara elektronik memberikan respon berupa frekuensi generator yang masih tidak stabil ketika terjadi perubahan pada beban konsumen. Hal ini disebabkan karena parameter yang dideteksi adalah perubahan tegangan, bukan perubahan frekuensi. (Ambarsini.2000)

Penelitian kontrol beban elektronik yang dilakukan Murtiwanto (2007) menggunakan generator sinkron dengan daya kecil sehingga daya pada beban konsumen dan beban komplemen juga kecil. Penelitian ini perlu penelitian lanjutan yang menggunakan generator sinkron yang lebih besar, agar daya pada beban konsumen dan beban komplemen juga lebih besar, sehingga unjuk kerja alat dalam menstabilkan frekuensi generator lebih terlihat.

Dalam tenaga mikrohidro, generator diatur untuk memiliki kecepatan yang stabil. Salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan generator pembangkit adalah perubahan beban konsumen. *Electronic Load Controller (ELC)* dan beban komplemen dibutuhkan dalam PLTMH, agar generator tetap stabil saat terjadi perubahan beban. ELC akan memindahkan beban konsumen menuju beban komplemen saat terjadi perubahan beban konsumen. Untuk mengetahui perubahan beban ini ELC menggunakan sensor frekuensi. (Paisey.2009).

Perancangan ELC dalam skripsi ini akan menggunakan parameter arus beban yang digunakan untuk pendeteksi perubahan beban. Referensi pustaka yang digunakan untuk perancangan ini yaitu prinsip kerja generator sinkron 3 fasa, prinsip pengaturan putaran generator pltmh dengan pengalihan beban dengan *electronic load control*, teori mengenai beban komplemen, teori mengenai sensor arus ACS 712, prinsip kerja komponen elektronika daya TRIAC, pengetahuan dasar mikrokontroler, dan rangkaian isolasi optocoupler.

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya. Generator sinkron adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi

listrik. Generator sinkron dapat berupa generator sinkron satu fasa dan generator sinkron tiga fasa. Generator sinkron mempunyai kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor.

Generator sinkron mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang diputar dengan penggerak mula (*prime mover*) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut. Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator ditunjukkan pada Persamaan 2.1.

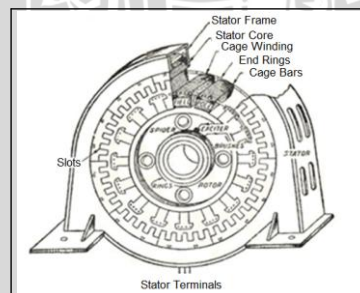
$$f = \frac{ns.p}{120} \quad (2-1)$$

dimana : f = Frekuensi listrik (Hz)

n_s = Kecepatan putar medan magnet atau kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub

Generator sinkron digunakan pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD, dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, terdapat juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut *Generator-Set* atau generator cadangan. Konstruksi generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Konstruksi generator sinkron
Sumber: Fitzgerald, A.E.1992

2.1.1 Prinsip Kerja

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut:

- 1) Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan

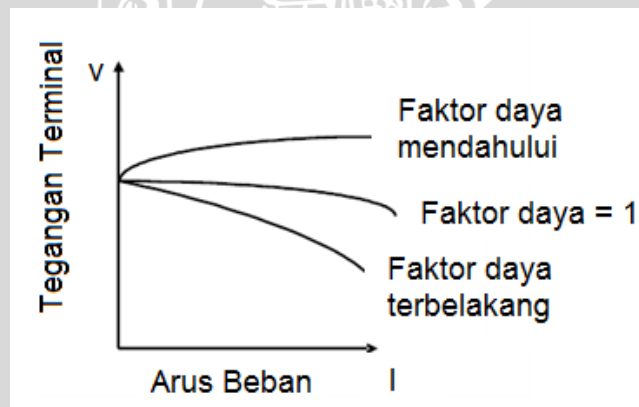
adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.

- 2) Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.

Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.

2.1.2 Generator Berbeban

Tiga macam sifat beban jika dihubungkan dengan generator, yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembeban ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Gambar 2.2 menunjukkan jika beban generator bersifat resistif mengakibatkan penurunan tegangan relatif kecil dengan faktor daya sama dengan satu. Jika beban generator bersifat induktif terjadi penurunan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya terbelakang (*lagging*). Sebaliknya, Jika beban generator bersifat kapasitif akan terjadi kenaikan tegangan yang cukup besar dengan faktor daya mendahului (*leading*).



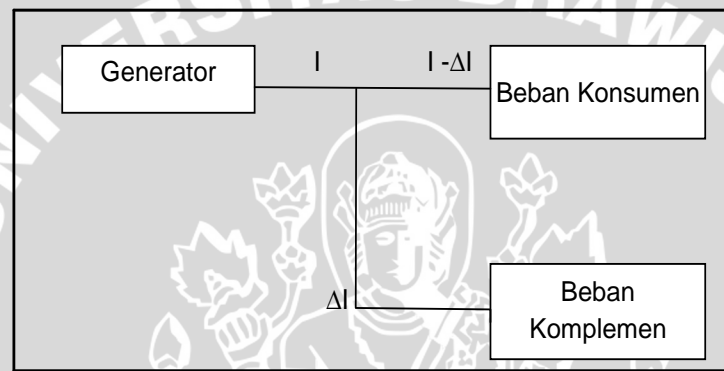
Gambar 2.2 Karakteristik generator berbeban
Sumber: Fitzgerald, A.E.1992

2.2 Prinsip Pengaturan Putaran Generator PLTMH Dengan Pengalihan Beban

Pada umumnya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) mempunyai tiga komponen utama yang masing-masing fungsinya sangat menentukan (Hasan;2006), yaitu: turbin air, generator, dan governor atau ELC. Pada pembangkit, pengendalian

putaran dimaksudkan untuk mengendalikan putaran generator sehingga pengendalian putaran dalam PLTMH diutamakan berfungsi sebagai pengendali frekuensi generator.

Perubahan putaran generator dapat disebabkan adanya perubahan daya penggerak. Jika daya air yang masuk ke turbin dibuat selalu konstan sehingga daya penggerak turbin selalu konstan, maka frekuensi dan respon generator akan menjadi fungsi beban. Agar frekuensi yang dihasilkan oleh generator selalu konstan, maka besar beban dari generator harus selalu konstan. Untuk itu diperlukan beban tiruan / beban komplemen yang besar bebannya dapat diatur sesuai dengan pengurangan beban dari PLTMH. Blok diagram pembagian daya beban komplemen ditunjukkan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram blok pembagian daya beban
Sumber: Hasan.2006

Daya air yang masuk ke turbin dibuat konstan sehingga beban yang dirasakan oleh generator juga selalu konstan, maka putaran generator senantiasa juga konstan. Jika debit air konstan maka generator harus dibebani dengan daya yang konstan agar putaran generator selalu konstan. Beban konsumen tidak selalu konstan, maka untuk menjaga kestabilan putaran generator, diperlukan beban komplemen yang besarnya diatur oleh *Electronic Load Controller*. Prinsip pengaturan beban oleh ELC dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Beban Konsumen} + \text{Beban Komplemen} = \text{Daya Nominal Generator}$$

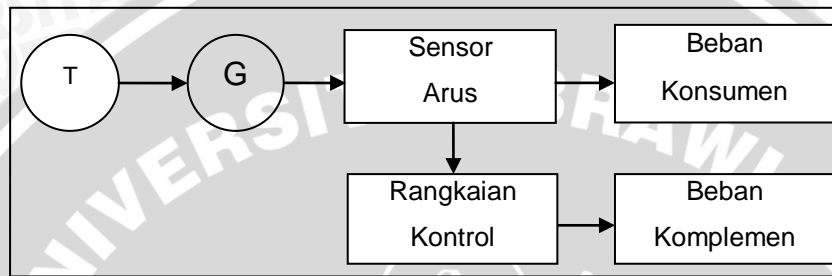
Pengaturan beban oleh ELC berlaku untuk setiap kondisi beban konsumen. Daya yang tersedia pada terminal generator dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Arismunandar, 1997) :

$$P_{\text{output}} \text{ (kW)} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (2-2)$$

dengan Q = debit air, (m³/detik)
 H = tinggi air Jatuh, (m)

- η_h = efisiensi hidrolis turbin air, (%)
- η_m = efisiensi mekanis, (%)
- η_g = efisiensi generator, (%)
- ρ = massa jenis air, (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi, (m/s^2).

Diagram blok pengaturan beban komplemen pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro dengan menggunakan sensor arus dan rangkaian kontrol, ditunjukkan dalam Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Diagram blok satu garis sistem kontrol ELC pada mikrohidro
 Sumber: Hasan.2006

Sensor arus berfungsi untuk mendeteksi perubahan arus beban yang dihasilkan oleh generator sebagai akibat adanya perubahan arus pada beban konsumen yang kemudian akan dibandingkan dengan harga referensi yang telah ditentukan. Selanjutnya rangkaian kontrol akan memberikan respon atas perubahan tersebut.

2.3 Beban Komplemen

Beban komplemen / ballast load digunakan sebagai tempat pengalihan daya dari perubahan yang terjadi pada beban sebenarnya dengan tujuan untuk menjaga agar putaran generator konstan meskipun terjadi perubahan arus pada beban sebenarnya. Beban komplemen dapat dirancang dari bahan kawat nikelin dan besar dayanya disesuaikan dengan daya yang dihasilkan generator. Ada dua tipe / jenis beban komplemen yakni pemanas udara (*air heater*) dan pemanas air (*water heater*). Tipe beban komplemen pemanas udara dan pemanas air ditunjukkan dalam Gambar 2.5 (a) dan Gambar 2.5 (b).

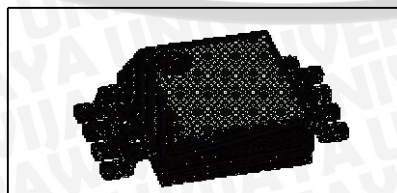


Gambar 2.5 (a) Tipe beban komplemen pemanas udara
 (b) Tipe beban komplemen pemanas air

2.4 Sensor Arus ACS 712

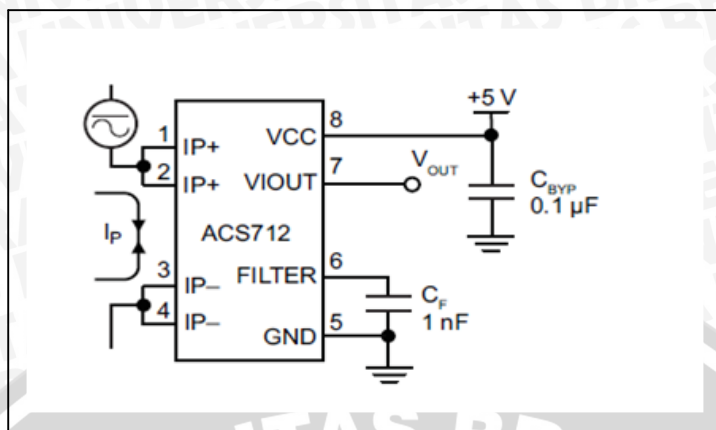
Pemanfaatan sensor arus ACS712 pada rangkaian *electronic load controller* (ELC) untuk mengontrol beban komplemen pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah sebagai sensor arus beban pada fasa R, fasa S dan fasa T. Sensor arus ini berfungsi untuk mendeteksi perubahan arus beban apabila terjadi peningkatan atau penurunan arus beban sesuai dengan perubahan beban konsumen. Sensor arus ACS712 sangat ekonomis dan memberikan solusi yang teliti untuk sensing arus AC dan DC di industri, komersial, dan sistem komunikasi. Paket peralatan ini memungkinkan untuk diimplementasikan dengan mudah oleh pelanggan. Jenis aplikasinya sudah termasuk kontrol motor, deteksi beban dan manajemen, model tombol suplai daya, dan proteksi gangguan arus lebih. Peralatan ini tidak untuk aplikasi otomotif. Peralatan ini terdiri dari sebuah rangkaian yang presisi, offset rendah, rangkaian Hall linier dengan suatu alur hubungan tembaga terletak di dekat permukaan yang tidak bergerak. Arus yang mengalir melalui alur konduksi tembaga menghasilkan medan magnetik pada Hall IC yang dikonversikan menjadi tegangan proporsional. Peralatan akurasi dioptimalkan melalui jalur dekat dari sinyal magnetik pada transduser Hall. Tegangan proporsional disediakan oleh offset rendah, chopper stabilized BiCMOS Hall IC, yang diprogram dengan teliti pada sebuah kemasan.

Output dari peralatan ini memiliki slope positif ($>V_{I_{OUT}}(Q)$) ketika arus yang mengalir meningkat melalui konduksi alur primer (dari pin 1 dan 2, ke pin 3 dan 4), yang mana alur digunakan untuk sampling arus. Resistansi internal pada alur konduksi konduktif adalah tipikal 1,2 M Ω , memberikan rugi daya rendah. Ketebalan konduktor tembaga memungkinkan kelangsungan pengoperasian peralatan ini sampai dengan 5 kali kondisi arus lebih. Terminal dari alur konduktif secara elektrik terisolasi dari sadapan sinyal (pin 5 sampai 8). Hal ini memungkinkan ACS712 untuk digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan isolasi listrik tanpa menggunakan opto-isolator atau teknik isolasi lain yang mahal. Bentuk fisik sensor arus ACS712 ditunjukkan dalam Gambar 2.6.



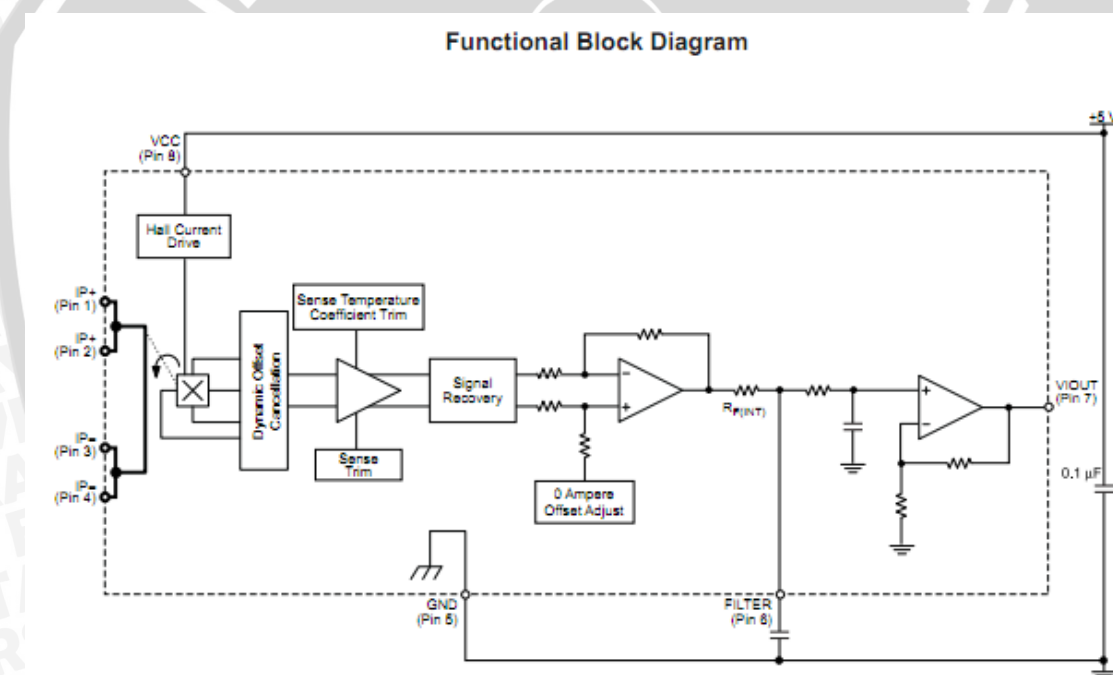
Gambar 2.6 Bentuk fisik sensor arus ACS712
Sumber: Allegromicro, 2006

Aplikasi sensor arus ACS712 dan fungsi dari masing-masing pin seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Aplikasi sensor arus ACS 712
Sumber: Allegromicro, 2006

Blok diagram sensor arus ACS712 dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Blok diagram sensor arus ACS 712
Sumber: Allegromicro, 2006

2.5 Thyristor

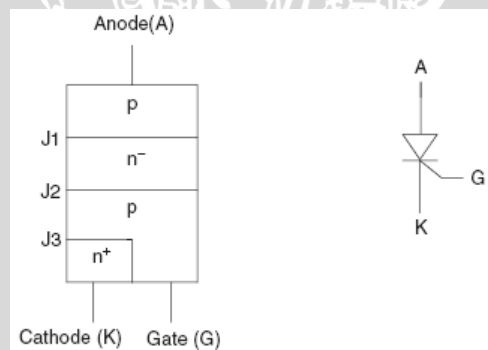
Thyristor, atau *silicon-controlled rectifiers* (SCR) sejak lama telah menjadi tulang punggung peralatan konversi dan kontrol daya di dunia industri. *Thyristor* biasanya memiliki tiga terminal (*gate*, anoda dan katoda) tersusun atas empat lapis semikonduktor tipe-p dan tipe-n. *Thyristor* merupakan sebuah saklar elektronik terkontrol dan dioperasikan pada dua titik yaitu titik kerja mendekati idealnya (tidak ada tegangan jatuh antara katoda dan anoda) dan titik *blocking* (tidak ada arus yang

mengalir melalui anoda) untuk mengatur aliran daya pada suatu rangkaian. Berbeda dengan komponen elektronika digital yang didesain untuk menyalurkan dua level tegangan rendah dengan arus yang rendah pula, *thyristor* harus mampu menyalurkan arus yang besar dan mampu menahan tegangan yang besar pula (Rashid, 2001:27).

Thyristor sering diaplikasikan pada peralatan berdaya besar karena *thyristor* didesain untuk menangani rangkaian berdaya besar (tegangan lebih dari 1 kV dan arus diatas 100 A). *Thyristor* juga digunakan pada beberapa rangkaian tegangan bolak balik (50 Hz dan 60 Hz pada peralatan komersial atau 400 Hz pada peralatan pesawat terbang) untuk mengontrol aliran daya bolak balik. *Thyristor* juga dinamakan *phase-control device* karena pada umumnya dinyala-matikan pada sudut penyalan tertentu pada tegangan bolak balik. Beberapa aplikasi dari penggunaan *thyristor* dapat dijumpai pada rangkaian kontrol motor dan *dimmer* pada lampu penerangan.

2.5.1 Prinsip Kerja

Thyristor memiliki tiga persambungan (*junction*) dan tersusun atas empat lapisan silikon p-n-p-n, simbolnya sama dengan dioda penyearah namun dengan terminal tambahan yang disebut *gate*. *Gate* inilah yang menjadi pengendali operasi penyearahan. Simbol dan susunan SCR dapat dilihat pada Gambar 2.9.

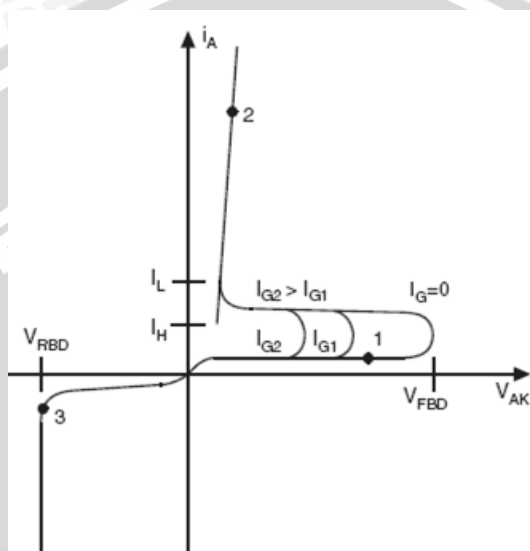


Gambar 2.9 Susunan semikonduktor pada thyristor dan simbol thyristor.
Sumber : Rashid, 2001

Saat tegangan terminal anoda dibuat lebih positif terhadap terminal katoda dan arus *gate* nol (rangkaiannya terbuka), *thyristor* berada pada kondisi *forward-blocking state*. Pada kondisi tersebut *junction* J_1 dan J_3 terbias maju dan *junction* J_2 terbias mundur sehingga hanya mengalir arus bocor antara anoda dan katoda. Arus bocor tersebut menyebabkan kenaikan suhu pada peralatan dan biasanya diabaikan karena terlalu kecil. Bila tegangan anoda-katoda yang diberikan melebihi nilai maksimum *forward-blocking voltage* dari *thyristor* maka *thyristor* berubah kondisi menjadi *on-state* namun

penyalan yang disebabkan ketidakseimbangan aliran arus biasanya bersifat merusak dan harus dihindari (Rashid, 2001:29).

Junction J_2 terbias maju ketika arus *gate* positif mengalir sehingga akan terbentuk lintasan pembawa muatan bebas melewati ketiga *junction thyristor* yang akan menyalurkan arus yang besar. *Thyristor* pada keadaan tersebut dalam keadaan konduksi atau *forward conduction*. Karakteristik $v-i$ suatu *thyristor* pada umumnya ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Karakteristik $v-i$ thyristor.
Sumber: Rashid, 2001

Arus anoda (i_a) sebagai fungsi tegangan anoda-katoda (v_{AK}) ditunjukkan pada Gambar 2.10. *Forward blocking* ditunjukkan pada posisi arus anoda rendah pada grafik (kurva menikung pada area operasi-1). Ketika arus *gate* nol dan tegangan anoda katoda positif v_{AK} , *thyristor* berada pada kondisi *forward blocking* akibat *junction* J_2 yang dibias mundur. Pada titik operasi-1 arus sangat kecil mengalir (i_{CO} saja) melalui komponen. Akan tetapi ketika tegangan pada komponen melebihi nilai *forward-blocking voltage*, *thyristor* akan terkonduksi (*on-state*) yang ditunjukkan pada area operasi-2. Ketika arus *gate* tidak nol, maka *blocking voltage* akan menurun akibat efek multiplikasi carier. Pada Gambar 2.10 juga ditunjukkan pada saat *thyristor* terkonduksi (arus anoda i_a yang besar dengan v_{AK} yang kecil) *thyristor* bertindak seperti dioda daya pada umumnya.

Pada saat *thyristor* konduksi arus anoda dibatasi oleh resistansi atau impedansi luar sehingga arus anoda harus lebih besar dari suatu nilai yang disebut *latching current* I_L . *Latching current* I_L adalah arus anoda minimum yang diperlukan sehingga membuat *thyristor* tetap terkonduksi walaupun sinyal *gate* telah dihilangkan. Ketika *thyristor*

telah terkonduksi dan arus anoda menurun nilainya maka komponen bisa berubah kondisi menjadi *forward-blocking* jika arus maju anoda berada dibawah suatu tingkatan arus yang disebut dengan *holding current* I_H . Nilai *holding current* lebih kecil dari pada *latching current* I_L ($I_H < I_L$) sehingga *holding current* merupakan arus anoda minimum untuk mempertahankan thyristor pada kondisi nyala (Rashid, 2001:30).

Karakteristik balik thyristor terletak pada kuadran III pada Gambar 2.10, dimana dua *junction* J_1 dan J_3 dibias mundur (tegangan v_{AK} negatif) sehingga thyristor berada pada kondisi *reverse blocking* dan arus bocor yang mengalir disebut *reverse current* I_R akan mengalir melalui komponen.

Thyristor dapat berubah dari kondisi belum menghantar menjadi menghantar yang disebut *forward conduction* karena sebab-sebab berikut: (Rashid, 2001:77)

- **Tegangan bias maju melebihi tegangan *breakover***

Pada kondisi ini, bila tegangan bias maju terus bertambah tetapi tanpa adanya sinyal *gate* maka pada suatu nilai tertentu akan menyebabkan tegangan *breakdown*. Tegangan bias yang diperlukan untuk mencapai kondisi ini disebut *forward break over voltage* (V_{bo}). Pada tegangan ini, *Thyristor* akan berubah sifatnya dari keadaan padam dengan arus yang kecil dan tegangan antar terminal besar menjadi kondisi menghantar dengan tegangan kecil dan arus yang tergantung pada beban.

- **Efek dv/dt**

Thyristor dapat terkonduksi walaupun tidak diberi sinyal *gate* apabila terjadi kenaikan tegangan maju yang sangat cepat. Gejala kenaikan tegangan maju yang sangat cepat yang menyebabkan *thyristor* terkonduksi dinamakan efek dv/dt . Peningkatan yang sangat cepat dari tegangan anoda akan mengakibatkan arus transien pada *gate* yang cukup untuk membuat *thyristor* menghantar. Efek ini tidak dipergunakan dalam pengendalian *thyristor*, oleh sebab itu dalam suatu rangkaian yang menggunakan *thyristor* perlu dipasang pengaman terhadap efek dv/dt .

- **Trigger pada *gate***

Thyristor akan berubah kondisi apabila diberikan bias maju di antara *gate* dan katoda sedangkan anode lebih positif terhadap katoda, akan tetapi dengan tegangan bias maju kurang dari V_{bo} . *Thyristor* tidak akan menghantar bila tidak ada tegangan antara katoda dan *gate* yang menghasilkan arus *gate* yang cukup untuk membuat *thyristor* dalam kondisi menghantar. Dalam kondisi menghantar, *thyristor* akan bersifat seperti dioda yang sedang menghantar.

2.5.2 Parameter Thyristor

Sebelum merancang aplikasi berbasis komponen elektronika, suatu keharusan untuk mengerti akan spesifikasi dan karakteristik elektrik komponen-komponen yang akan digunakan. Demi mempermudah proses pemahaman akan suatu komponen, manufaktur komponen tersebut telah membuat suatu daftar yang berisi baik tabel-tabel maupun grafik-grafik yang menjelaskan spesifikasi suatu komponen yang biasa disebut *datasheet*. Kemampuan dalam memahami dan menggunakan *datasheet* merupakan suatu keharusan demi perancangan peralatan yang lebih praktis dan efisien (Rashid, 2001:37).

Sebuah *datasheet* berhubungan erat dengan *rating* dan karakteristik (*device characteristic*) komponen tersebut. *Rating* merupakan suatu nilai baik maksimum atau minimum yang menjadi batasan dari kemampuan komponen tersebut. Sedangkan nilai karakteristik komponen (*thyristor characteristic*) merupakan hasil pengukuran dari performansi komponen dalam kondisi dan percobaan tertentu pada komponen tersebut (Rashid, 2001:37). Rangkuman dari beberapa nilai maksimum (*maximum rating*) yang perlu untuk diperhatikan dalam pemilihan thyristor untuk pemakaian tertentu ditunjukkan pada Tabel 2.1. Deskripsi komponen yang berada dalam tanda kurung menunjukkan *rating* untuk komponen itu sendiri.

Nilai bias maju atau bias mundur berulang maupun tidak (*forward reverse repetitive and non-repetitive voltage rating*) dalam aplikasi praktis penggunaan komponen harus diperhitungkan. Perhitungan tersebut bertujuan agar besaran aktual pada saat pemakaian tidak pernah melampaui besaran *rating* komponen yang tertera di *datasheet* karena dalam beberapa kasus, baik *forward* maupun *reverse voltage* transien yang nilainya melebihi nilai maksimum *non-repetitive rating* menyebabkan kerusakan permanen pada komponen. Nilai maksimum dari tegangan efektif atau RMS (*root mean square*) dan nilai rata-rata arus yang tertera pada *datasheet* merupakan nilai arus atau tegangan yang menyebabkan kenaikan suhu mencapai maksimum pada *junction*. Besaran yang lain seperti besarnya arus yang mampu dialirkan melalui anoda biasanya ditunjukkan berupa fungsi atau grafik, yang ditentukan oleh suhu kemasan luar komponen dan sudut penyalan karena arus maksimum yang mampu dialirkan melalui anoda tergantung pada bentuk gelombang dari arus dan kondisi suhu eksternal komponen.

Arus surja berbentuk setengah gelombang mampu merusak komponen seperti *thyristor*. Untuk menghindari hal tersebut, *thyristor* harus diproteksi dari kerusakan

yang diakibatkan beban berlebih dengan pemasangan pengaman (*fuse*) dengan *rating* I^2t lebih kecil dari *rating* maksimum komponen yang tertera pada *datasheet*. Perlu diperhatikan juga, besaran pada *gate* juga tidak boleh melebihi nilai yang tertera pada *datasheet* komponen seperti nilai arus, disipasi daya, dan tegangan baik maju atau mundur (*forward* atau *reverse* voltage) (Rashid, 2001:38).

Berbagai spesifikasi *thyristor* dan karakteristik elektris yang tertera pada *datasheet* dari satu manufaktur berbeda-beda dengan yang lain. Beberapa *datasheet* hanya memberikan nilai-nilai tertentu seperti nilai maksimum dan minimum dalam suatu tabel dan karakteristik lainnya ditunjukkan berupa grafik. Dalam Tabel 2.2 terangkum beberapa karakteristik komponen yang semuanya dalam batas nilai maksimum. Nilai maksimum dalam tabel karakteristik memiliki arti bahwa manufaktur komponen tersebut menjamin komponen tidak akan melebihi nilai yang diberikan jika dioperasikan pada besaran yang tertera. Sedang untuk nilai minimum memiliki arti manufaktur komponen tersebut menjamin komponen akan bekerja pula, dengan karakteristik jika dioperasikan pada besaran yang tertera. Sebagai tambahan keterangan, deskripsi komponen yang berada dalam tanda kurung menunjukkan *rating* khusus untuk komponen itu sendiri.

Tabel 2.1 *Rating* Maksimum Thyristor.

Symbol	Description
V_{RRM}	Peak repetitive reverse voltage
V_{RSM}	Peak non-repetitive reverse voltage (transient)
$V_{R(DC)}$	DC reverse blocking voltage
V_{DRM}	Peak repetitive forward off-state voltage
V_{DSM}	Peak non-repetitive forward off-state voltage (transient)
$V_{D(DC)}$	DC forward-blocking voltage
$I_{T(RMS)}, I_{F(RMS)}$	RMS forward on-state current
$I_T(AV), I_{F(AV)}$	Average forward on-state current at specified case or junction temperature
$I_{TSM}, I_{F(TSM)}$	Peak one-cycle surge on-state current (values specified at 60 and 50 Hz)
I_{TGQ} (GTO)	Peak controllable current
I^2t	Non-repetitive pulse overcurrent capability ($t = 8.3$ ms for a 60 Hz half cycle)
P_T	Maximum power dissipation
di/dt	Critical rate of rise of on-state current at specified junction temperature, gate current and forward-blocking voltage
P_{GM} (P_{FGM} for GTO)	Peak gate power dissipation (forward)
P_{RGM} (GTO)	Peak gate power dissipation (reverse)
$P_{G(AV)}$	Average gate power dissipation
V_{FGM}	Peak forward gate voltage
V_{RGM}	Peak reverse gate voltage
I_{FGM}	Peak forward gate current
I_{RGM} (GTO)	Peak reverse gate current
T_{STG}	Storage temperature
T_j	Junction operating temperature
V_{RMS}	Voltage isolation (modules)

Sumber: Rashid, 2001

2.5.3 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 AC, antara lain: VAR kompensator, saklar statis, *soft starter* dan *driver* motor (Rashid, 2001:44). Potongan melintang dan simbol dari TRIAC ditunjukkan pada Gambar 2.11.

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 pemutusan (*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.

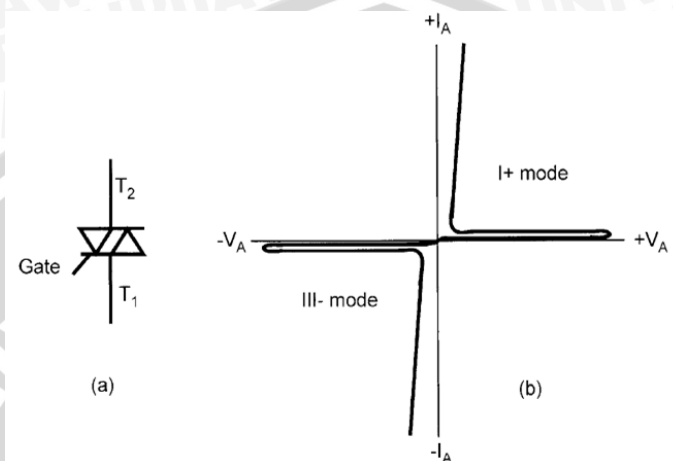
Tabel 2.2 *Rating* Komponen yang Umum Disertakan.

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_{gt} (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

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* dan terminal MT_1 . Bila MT_2 lebih

negatif terhadap terminal MT_1 , maka pemucuan 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).



Gambar 2.11 Simbol dan karakteristik $v - i$ dari TRIAC.
Sumber: Bose, 2002

2.6 Mikrokontroler

Mikrokontroler dianalogikan sebagai sebuah sistem komputer yang dikemas dalam sebuah chip. Artinya bahwa di dalam sebuah IC mikrokontroler sebetulnya sudah terdapat kebutuhan minimal agar mikroprosesor dapat bekerja, yaitu meliputi mikroprosesor, ROM, RAM, I/O dan *clock* seperti halnya yang dimiliki oleh sebuah komputer PC. Mengingat kemasannya yang hanya berupa sebuah chip dengan ukuran yang relatif kecil tentu saja spesifikasi dan kemampuan yang dimiliki oleh mikrokontroler menjadi lebih rendah bila dibandingkan dengan sistem komputer seperti PC baik dilihat dari segi kecepatannya, kapasitas memori maupun fitur-fitur yang dimilikinya. Mikrokontroler memiliki kelebihan yang tidak bisa diperoleh pada sistem komputer yaitu dengan kemasannya yang kecil membuat mikrokontroler menjadi lebih fleksibel dan praktis digunakan terutama pada sistem-sistem yang relatif tidak terlalu kompleks atau tidak membutuhkan beban komputasi yang tinggi meskipun dari sisi kemampuan lebih rendah.

2.6.1 Port pada Mikrokontroler

Berbagai jenis mikrokontroler yang digunakan selama ini dan masing-masing memiliki keluarga atau seri sendiri-sendiri, salah satunya adalah mikrokontroler AVR.

Mikrokontroler AVR ini mempunyai arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) 8 bit, dimana semua instruksi dikemas dalam kode 16-bit (*16-bit words*) dan sebagian besar instruksi dieksekusi dalam satu siklus *clock*.

Mikrokontroler ATmega16 mempunyai fitur utama sebagai berikut:

- Sistem mikroprosesor 8 bit berbasis RISC dengan kecepatan maksimal 16 MHz
- Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu *Port A*, *Port B*, *Port C*, dan *Port D*.
- ADC 10 bit sebanyak 8 saluran
- Tiga buah *Timer/Counter* dengan kemampuan perbandingan
- CPU yang terdiri atas 32 buah register
- *Watchdog Timer* dengan osilator internal
- SRAM sebesar 512 byte
- Memori *Flash* sebesar 8 kb dengan kemampuan *Read While Write*
- Unit interupsi internal dan eksternal
- Port antarmuka SPI
- EEPROM sebesar 512 byte yang dapat diprogram saat operasi
- Antarmuka komparator analog
- Port USART untuk komunikasi serial

Konfigurasi pin mikrokontroler ATmega16 ditunjukkan pada Gambar 2.12.

PDIP			
(XCK/T0) PB0	1	40	PA0 (ADC0)
(T1) PB1	2	39	PA1 (ADC1)
(INT2/AIN0) PB2	3	38	PA2 (ADC2)
(OC0/AIN1) PB3	4	37	PA3 (ADC3)
(SS) PB4	5	36	PA4 (ADC4)
(MOSI) PB5	6	35	PA5 (ADC5)
(MISO) PB6	7	34	PA6 (ADC6)
(SCK) PB7	8	33	PA7 (ADC7)
RESET	9	32	AREF
VCC	10	31	GND
GND	11	30	AVCC
XTAL2	12	29	PC7 (TOSC2)
XTAL1	13	28	PC6 (TOSC1)
(RXD) PD0	14	27	PC5
(TXD) PD1	15	26	PC4
(INT0) PD2	16	25	PC3
(INT1) PD3	17	24	PC2
(OC1B) PD4	18	23	PC1 (SDA)
(OC1A) PD5	19	22	PC0 (SCL)
(ICP1) PD6	20	21	PD7 (OC2)

Gambar 2.12 Konfigurasi pin ATmega16.
Sumber : Atmel, 2006

Dari Gambar 2.12 dijelaskan secara fungsional konfigurasi pin ATmega16 sebagai berikut:

- VCC merupakan pin yang berfungsi sebagai pin masukan catu daya.
- GND merupakan pin *ground*.
- *Port A* (PA0..PA7) merupakan pin I/O dua arah dan pin masukan ADC.

- *Port B* (PB0..PB7) merupakan pin I/O dua arah dan pin fungsi khusus yaitu *Timer/Counter*, komparator analog dan SPI.
- *Port C* (PC0..PC7) merupakan pin I/O dua arah dan pin fungsi khusus yaitu *Timer/Counter*, komparator analog dan *Timer Oscillator*.
- *Port D* (PD0..PD7) merupakan pin I/O dua arah dan pin fungsi khusus yaitu komparator analog, interupsi eksternal, dan komunikasi serial.
- RESET merupakan pin yang digunakan untuk mereset mikrokontroler.
- XTAL1 dan XTAL2 merupakan pin masukan *clock* eksternal.
- AVCC merupakan pin masukan tegangan untuk ADC.
- AREF merupakan pin masukan tegangan referensi ADC.

2.6.2 *Timer* pada Mikrokontroler

Mikrokontroler ATmega16 memiliki 3 modul *timer* (*timer 0*, *timer 1*, dan *timer 2*) yang terdiri dari 2 buah *timer/counter* 8-bit dan 1 buah *timer/counter* 16-bit. Ketiga modul *timer/counter* ini dapat diatur dalam pengaturan yang berbeda secara individu dan tidak saling mempengaruhi satu sama lain. Selain itu semua *timer/counter* juga dapat difungsikan sebagai sumber interupsi.

2.6.2.1 *Timer 0*

Timer 0 merupakan modul *timer/counter* 8-bit yang dapat berfungsi sebagai pencacah tunggal, pembangkit PWM 8-bit, pembangkit frekuensi, pembangkit interupsi *overflow* dan pembangkit interupsi *compare match*. Mode kerja *timer 0* dapat ditentukan dengan mengatur register TCCR0, TCNT0, OCR0 serta TIMSK dan TIFR. Mode operasi *timer/counter 0* dijelaskan dalam Tabel 2.3 berikut:

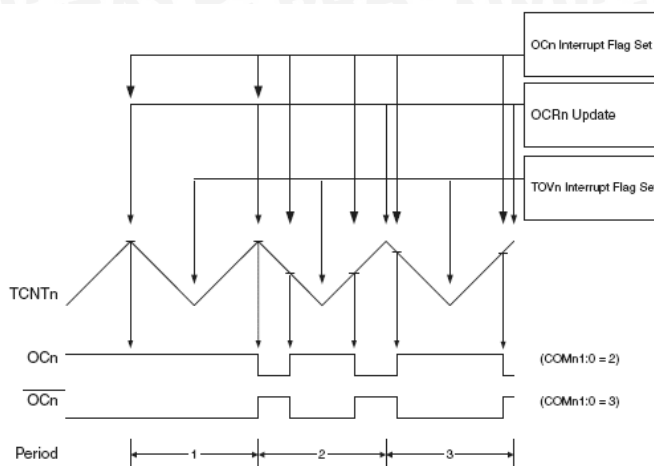
Tabel 2.3 Mode *Timer/Counter 0*.

Mode	WGM01 (CTC0)	WGM00 (PWM0)	Mode of Operation	TOP	Update of OCR0	TOV0 Flag Set on
0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	1	0	CTC	OCR0	Immediate	MAX
3	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX

Sumber: Atmel, 2006

a. *Mode 0*

Timer/counter 0 berfungsi sebagai pencacah tunggal yang mampu mencacah dari 0x00 sampai dengan 0xFF. Setelah mencapai nilai maksimum yaitu 0xFF maka register counter (TCNT0) akan reset atau kembali ke 0x00. Mode ini disebut *mode normal*.



Gambar 2.13 Mode phase correct PWM.

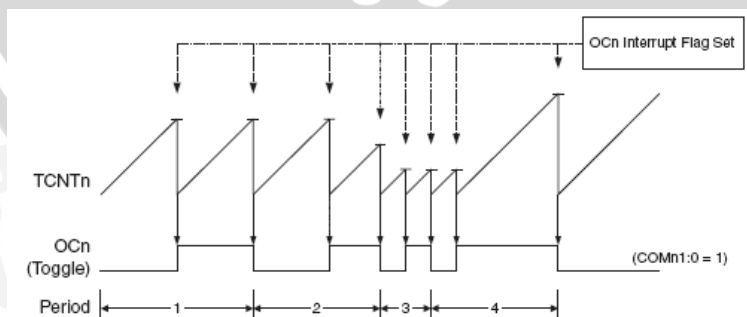
Sumber: Atmel, 2006

b. Mode 1

Timer/counter 0 berfungsi sebagai *phase correct PWM* (PCP). Mode ini digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM dimana nilai *register counter* (TCNT0) yang mencacah naik dan turun secara terus menerus akan selalu dibandingkan dengan *register pembanding* OCR0. Hasil perbandingan *register* TCNT0 dan OCR0 digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM yang dikeluarkan pada pin OC0 seperti dalam Gambar 2.13.

c. Mode 2

Timer/counter 0 berfungsi sebagai *clear time on compare match* (CTC) maksudnya adalah *register conter* (TCNT0) akan mencacah naik kemudian akan direset atau kembali menjadi 0x00 pada saat nilai TCNT0 sama dengan OCR0. Dengan mengatur pola keluaran OC0 bergulir secara *toggle* sehingga dapat dibangkitkan gelombang kotak sesuai dengan Gambar 2.14.



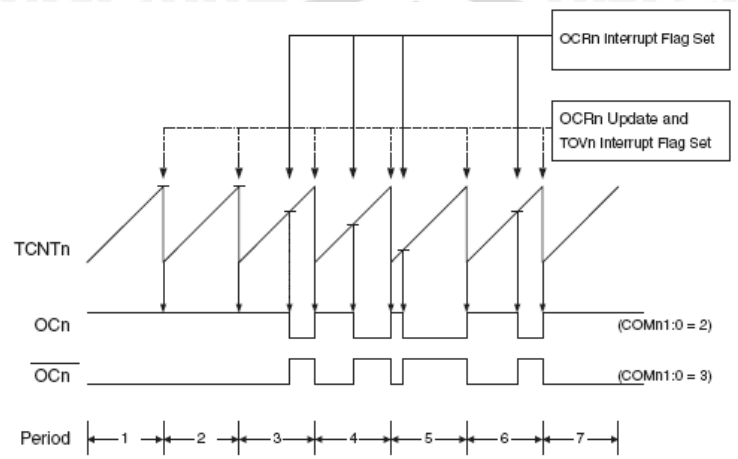
Gambar 2.14 Mode clear time on compare match (CTC).

Sumber: Atmel, 2006

Gelombang yang dihasilkan memiliki frekuensi :

$$f_{oco} = \frac{f_{osc}}{2 \times N \times (1 + OCR0)} \quad (2-3)$$

dimana f_{oco} merupakan Frekuensi luaran OC0 mode CTC, f_{osc} merupakan frekuensi osilator, N merupakan skala *clock*, dan $OCR0$ merupakan isi register $OCR0$.



Gambar 2.15 Mode *fast PWM*
Sumber: Atmel, 2006

d. Mode 3

Timer/counter 0 berfungsi sebagai *fast PWM*. Mode ini hampir sama dengan mode *phase correct PWM*, hanya perbedaannya adalah *register counter* (TCNT0) mencacah naik saja dan tidak pernah mencacah turun seperti terlihat dalam Gambar 2.15

2.6.2.2 Timer 1

Timer 1 merupakan modul *timer/counter* 16-bit yang dapat berfungsi sebagai pencacah tunggal, pembangkit PWM 16-bit, pembangkit frekuensi, pembangkit interupsi *overflow* dan pembangkit interupsi *output compare match*. Mode kerja *timer/counter1* dapat ditentukan dengan mengatur *register* TCCR1A, TCCR1B, TCNT1H, TCNT1L, OCR1AH, OCR1AL, OCR1BH, OCR1BL serta TIMSK dan TIFR. Mode operasi *timer/counter 1* dijelaskan dalam Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Mode *Timer/Counter 1*

Mode	WGM13	WGM12 (CTC1)	WGM11 (PWM11)	WGM10 (PWM10)	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCR1X at	TOV1 Flag Set on
0	0	0	0	0	Normal	0xFFFF	Immediate	MAX
1	0	0	0	1	PWM, Phase Correct, 8-bit	0x00FF	TOP	BOTTOM
2	0	0	1	0	PWM, Phase Correct, 9-bit	0x01FF	TOP	BOTTOM
3	0	0	1	1	PWM, Phase Correct, 10-bit	0x03FF	TOP	BOTTOM
4	0	1	0	0	CTC	OCR1A	Immediate	MAX
5	0	1	0	1	Fast PWM, 8-bit	0x00FF	BOTTOM	TOP
6	0	1	1	0	Fast PWM, 9-bit	0x01FF	BOTTOM	TOP
7	0	1	1	1	Fast PWM, 10-bit	0x03FF	BOTTOM	TOP
8	1	0	0	0	PWM, Phase and Frequency Correct	ICR1	BOTTOM	BOTTOM
9	1	0	0	1	PWM, Phase and Frequency Correct	OCR1A	BOTTOM	BOTTOM
10	1	0	1	0	PWM, Phase Correct	ICR1	TOP	BOTTOM
11	1	0	1	1	PWM, Phase Correct	OCR1A	TOP	BOTTOM
12	1	1	0	0	CTC	ICR1	Immediate	MAX
13	1	1	0	1	Reserved	-	-	-
14	1	1	1	0	Fast PWM	ICR1	BOTTOM	TOP
15	1	1	1	1	Fast PWM	OCR1A	BOTTOM	TOP

Sumber: Atmel, 2006

Prinsip dan cara kerja *mode operasi* pada *timer/counter1* sama dengan seperti yang dijelaskan pada *timer/counter 0*. Perbedaannya adalah *timer/counter1* memiliki ukuran *register* yang lebih besar yaitu 2 byte sehingga dalam satu kode dapat memiliki beberapa pilihan ukuran data misalnya 8-bit, 9-bit, 10-bit.

2.6.2.3 Timer 2

Timer 2 merupakan modul *timer/counter* 8-bit yang dapat berfungsi sebagai pencacah tunggal, pembangkit PWM 8-bit, pembangkit frekuensi, pembangkit interupsi *overflow* dan pembangkit interupsi *output compare match*. Mode kerja *timer/counter2* sama persis dengan mode kerja *timer/counter0*, hanya saja pada *timer/counter 2* memiliki satu fitur tambahan yaitu *asynchronous mode*. Untuk mode *synchronous*, pengaturan mode kerja *timer/counter2* dilakukan dengan menggunakan *register* TCCR2, TCNT2 dan OCR2 serta TIMSK dan TIFR. Sedangkan untuk mode *asynchronous* dilakukan dengan menggunakan *register* ASSR.

2.7 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 luaran (Mazda, 1997: 82). *Optocoupler* merupakan alat yang dipakai untuk mengkopel cahaya dari suatu sumber

ke detektor tanpa adanya perantara. Oleh karena itu piranti ini disebut dengan *optoisolator/optocoupler*.

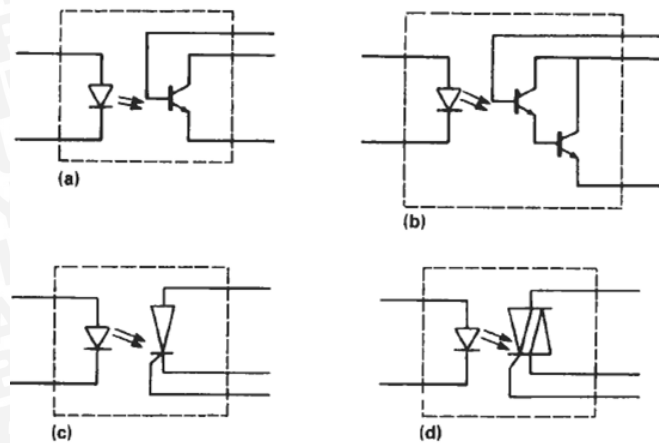
Optocoupler terbuat dari kombinasi dari sumber cahaya dan pendeteksi cahaya yang tergabung dalam satu kemasan. *Light emitting diode* atau LED seringkali digunakan sebagai sumber cahaya, dengan berbagai komponen semikonduktor sebagai detektor cahaya. Kaca atau plastik digunakan sebagai pemisah antara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

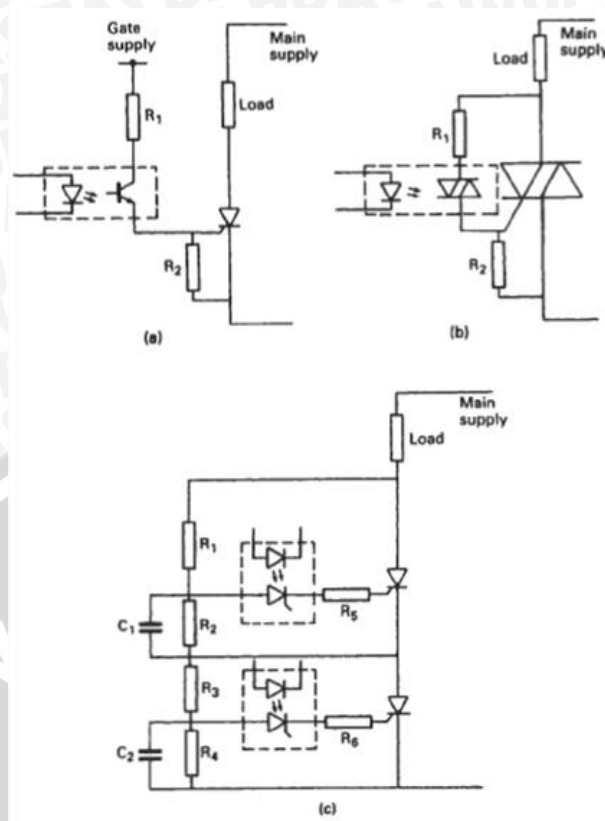
Berbagai jenis dari detektor yang digunakan pada *optocoupler* ditunjukkan pada Gambar 2.16. *Fototransistor-coupler* dikenal dalam kategori harga rendah dengan kecepatan operasi kerja 100-500 kHz dan minimum rasio transfer arus antara 20% dan 300%. *Fotodarlington* memiliki rasio transfer arus antara 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 2.16 Beberapa contoh detektor optik aplikasi elektronika daya.
 a) Transistor, b) Darlington, c) *Thyristor*, d) *Triac*
 Sumber: Mazda, 1997

Fotothyristor dan *phototriac* 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.

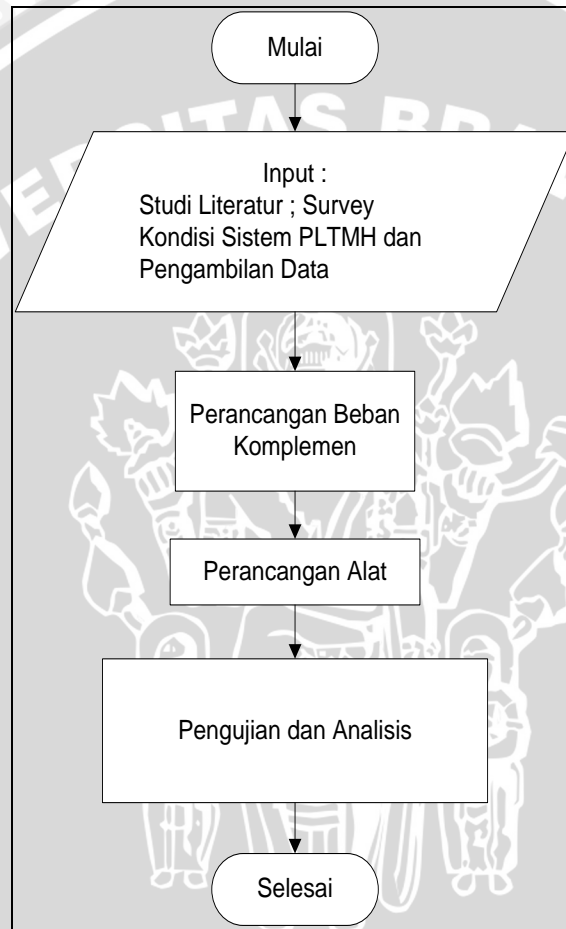
Gambar 2.17 menunjukkan beberapa contoh penggunaan dari *optocoupler*. Catu daya terpisah ditunjukkan pada Gambar 2.17(a) sehingga rating tegangan relatif rendah digunakan pada detektor optik pada rangkaian luaran. Rangkaian pada Gambar 2.17(b) tidak memerlukan catu daya pada *gate* yang terpisah, karena 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 2.17 Contoh rangkaian aplikasi penggunaan *optocoupler*
 a) Trisitor dengan catu daya terpisah,
 b) Triac dan beban dengan catu daya sama,
 c) Triac dengan konfigurasi seri.
 Sumber: Mazda, 1997

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan diuraikan metode penelitian yang akan dilakukan dalam proses perancangan dan pembuatan *electronic load controller* generator sinkron 3 fasa pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Metode penelitian yang digunakan secara umum tersusun sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang pertama dilaksanakan berupa kajian pustaka terhadap penelitian yang pernah dilakukan mengenai *Electronic Load Controller*. Bagian ini dimaksudkan untuk mengetahui hasil penelitian dan mengetahui jenis-jenis sensor yang dapat digunakan dalam pembuatan ELC. Referensi mengenai bagian-bagian pembangkitan dan pengaturan juga menjadi acuan.

Prinsip kerja generator sinkron tiga fasa, teori pengaturan beban komplemen generator tiga fasa pltmh metode *electronic load control* menggunakan komponen

elektronika daya, prinsip kerja sensor arus, prinsip kerja komponen elektronika daya TRIAC, pengetahuan dasar mikrokontroler, dan rangkaian isolasi *optocoupler*.

3.2 Survey Kondisi Sistem PLTMH dan Pengambilan Data

PLTMH Andungbiru beroperasi selama 24 jam sehari. Pada tahap ini pengukuran arus, tegangan, putaran, dan frekuensi dilakukan di sisi generator. Data hasil pengukuran kemudian akan digunakan sebagai acuan kondisi fluktuasi beban dan respon generator. Pengambilan data dilakukan dalam rentang waktu tertentu saat fluktuasi beban tinggi.

Data pengukuran arus, tegangan, putaran, dan frekuensi dilakukan pada jam 06.00 sampai jam 22.00, merupakan kondisi dimana terdapat fluktuasi beban yang tinggi. Data hasil pengukuran akan menunjukkan nilai ketidak seimbangan beban setiap fasa dan beban konsumen yang berubah. Data hasil pengukuran akan ditunjukkan dalam tabel 4.1.

3.3 Perancangan Beban Komplemen

Beban komplemen digunakan sebagai tempat pengalihan daya dari perubahan yang terjadi pada beban konsumen dengan tujuan untuk menjaga agar putaran, tegangan, dan frekuensi generator tetap konstan meskipun terjadi perubahan arus pada beban konsumen. Beban komplemen dapat berupa beban listrik yang senilai dengan nilai perubahan beban konsumen.

Nilai beban komplemen yang dirancang mempunyai nilai sebesar daya yang mampu dibangkitkan oleh generator. Hal ini dimaksudkan untuk mengatasi perkembangan beban yang terus meningkat sampai nilai nominal pembangkitan.

3.4 Perancangan Alat

Perancangan ELC generator sinkron 3 fasa PLTMH Dusun Sumberkapung Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo dibagi dalam dua bagian yaitu perancangan perangkat keras *electronic load controller* yang terdiri dari penentuan komponen triac, perancangan rangkaian pendeteksi arus beban utama, perancangan rangkaian pemecutan *gate* triac, perancangan kontrol sistem. Dilanjutkan dengan perancangan perangkat lunak yang terdiri dari perancangan diagram alir fungsi ELC, perancangan diagram alir pendeteksi arus beban utama.

3.5 Pengujian dan analisis

Generator sinkron 3 fasa yang digunakan dalam PLTMH harus memenuhi keseimbangan daya yang dibangkitkan dan daya yang digunakan. Selain itu daya setiap

fasa juga harus seimbang. Dalam pengujian dilakukan di Laboratorium Mesin Elektrik dengan mengacu pada spek teknis generator yang ada di lapangan yaitu

- Generator sinkron 3 fasa
- Generator sinkron hubungan bintang (Y)
- Daya 30 kW
- Tegangan *line* 380 volt
- Arus 57 ampere
- Faktor daya 0,8
- Tegangan medan 120 volt
- Arus medan 10 ampere
- Frekuensi 50 Hz
- Putaran generator 1500 rpm

Disesuaikan dengan generator yang ada di Laboratorium Mesin Elektrik dengan spesifikasi teknis

- Generator sinkron 3 fasa
- Generator sinkron hubungan bintang (Y)
- Daya 6,3 kW
- Tegangan *line* 380 volt
- Arus 9 ampere
- Faktor daya 0,8
- Tegangan medan 82 volt
- Arus medan 3,6 ampere
- Frekuensi 50 Hz
- Putaran generator 1500 rpm

Kapasitas ELC dalam perancangan akan mengacu pada spesifikasi teknis sistem PLTMH yang ada di lapangan. Komponen dan sistem kerja yang sama maka dibuat ELC berdasarkan skala Laboratorium. Komponen yang digunakan untuk pembuatan ELC adalah menggunakan komponen daya TRIAC sebagai pengendali daya tiga fasa pada *switching* ELC, sensor arus ACS 712 sebagai pendeteksi perubahan arus pada setiap fasa, mikrokontroler yang digunakan adalah mikrokontroler ATMega16 sebagai pengendali, *optocoupler* digunakan sebagai isolasi rangkaian mikrokontroler dengan komponen daya TRIAC.

Pengujian blok rangkaian ELC untuk mengamati hasil pengujian pada masing-masing blok yang telah dirangkai. Setelah pengujian pada masing-masing blok telah selesai, pengujian selanjutnya dilakukan pada keseluruhan blok yang telah tersusun menjadi satu sistem ELC generator sinkron 3 fasa PLTMH. Data dari keseluruhan pengujian akan dijadikan bahan acuan dalam mengambil kesimpulan.

Pengujian yang dilakukan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu:

1. Pengujian blok rangkaian pendeteksi arus beban utama
2. Pengujian blok rangkaian pemicuan
3. Pengujian pembebanan generator sinkron
4. Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Setelah melakukan pengujian terhadap ELC generator sinkron 3 fasa pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang telah dibuat tahap selanjutnya adalah

pengambilan kesimpulan dari keseluruhan sistem yang telah dibuat. Tahap terakhir adalah penulisan saran dalam penyusunan laporan penelitian ini, saran yang dimaksudkan untuk memperbaiki kesalahan-kesalahan yang terjadi serta menyempurnakan penelitian untuk pengembangan di masa mendatang.



BAB IV PERANCANGAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai kondisi pembebanan di lapangan, perancangan beban komplemen, dan perancangan dan pembuatan *electronic load controller* generator sinkron 3 fasa pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Perancangan ini dilakukan berdasarkan beberapa tahapan yaitu survey kondisi PLTMH, perancangan beban komplemen, perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, dan pembuatan alat yang sesuai dengan tujuan penelitian.

4.1 Pengukuran Arus Dan Tegangan

Pengukuran arus dan tegangan dilaksanakan untuk mengetahui beban atau daya yang terpakai konsumen pada setiap fasa yang terdiri atas Fasa R, Fasa S dan Fasa T. Sedangkan pengukuran putaran dan frekuensi dilaksanakan untuk mengetahui respon generator saat terjadi perubahan beban utama. Pengukuran arus dan tegangan tersebut dilakukan pada tanggal 16 dan 17 April dimulai pukul 06.00 s/d 22.00 WIB, dimana saat pukul 23.00 s/d 05.00 beban diasumsikan konstan.

Hasil pengukuran arus dan tegangan pada PLTMH Sumberkapung ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.1 Data Pengukuran Kondisi PLTMH

pukul	n _r (rpm)	f (hz)	tegangan (v)						arus fasa (a)		
			r-s	s-t	t-r	r-n	s-n	t-n	r	s	t
06.00	1503	50,1	381,0	380,3	380,6	220,4	220,2	220,3	18,6	11,4	12,1
07.00	1733	56,5	416,3	411,1	416,4	242,2	242,1	241,9	12,2	9,5	7,4
08.00	1713	56,9	417,6	410,9	419,3	243,4	240,0	240,6	11,1	9,4	6,3
09.00	1733	57,5	420,4	415,6	421,4	246,5	243,8	244,0	9,8	8,1	7,5
10.00	1753	58,3	419,6	409,5	415,7	242,9	242,0	241,8	10,8	8,2	7,3
11.00	1773	59,5	424,2	414,4	427,4	246,5	241,9	243,8	11,5	8,2	6,4
12.00	1753	59,1	425,3	421,5	426,5	248,5	246,2	245,8	11,7	10,6	7,1
13.00	1773	58,9	431,6	424,3	430,4	249,2	248,2	246,8	10,7	10,4	7,1
14.00	1763	58,5	415,4	405,2	415,1	242,5	237,7	238,4	11,2	8,4	6,4
15.00	1813	60,3	419,6	410,8	416,5	244,0	239,3	240,0	9,9	7,9	5,6
16.00	1793	59,7	432,4	427,1	431,6	253,0	248,9	248,8	11,3	8,5	7,0
17.00	1573	52,1	383,5	392,2	390,8	227,6	226,5	228,2	18,8	10,7	9,7
18.00	1273	42,3	320,9	325,3	329,2	183,0	181,7	187,0	21,5	17,0	14,0
19.00	1253	41,6	318,7	317,0	323,2	179,1	177,3	181,6	28,0	23,0	18,0
20.00	1263	42,0	319,1	317,6	327,1	182,1	179,3	186,0	27,0	22,0	16,0
21.00	1313	43,6	335,4	330,6	336,8	191,9	189,6	193,0	24,0	21,0	15,0
22.00	1533	50,5	382,1	384,2	385,2	222,4	223,1	224,0	19,4	15,2	10,6

Berdasarkan data beban utama, diketahui bahwa penggunaan daya oleh konsumen sebagian besar digunakan untuk penerangan. Data ini diperoleh dari pendataan semua beban terpasang pada PLTMH.

Operasi PLTMH berlangsung selama 24 jam sehari. Kondisi tersebut membuat tidak dapat dilaksanakan pengukuran $\cos \phi$ secara langsung, karena $\cos \phi$ meter yang ada harus terpasang seri dengan beban, sedangkan beban terpasang tidak dimungkinkan untuk dimatikan.

Berdasarkan kondisi operasi dan data beban utama, maka dapat diasumsikan bahwa $\cos \phi$ di PLTMH bernilai 1. Perhitungan daya P dapat dihitung dari data pengukuran arus dan pengukuran tegangan pada tabel 4.1 dimana besarnya daya generator ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Hasil perhitungan daya beban

pukul	daya (watt)		
	r	s	t
06.00	4099,44	2510,28	2665,63
07.00	2954,84	2299,95	1790,06
08.00	2701,74	2256,00	1515,78
09.00	2415,70	1974,78	1830,00
10.00	2623,32	1984,40	1765,14
11.00	2834,75	1983,58	1560,32
12.00	2907,45	2609,72	1745,18
13.00	2666,44	2581,28	1752,28
14.00	2716,00	1996,68	1525,76
15.00	2415,60	1890,47	1344,00
16.00	2858,90	2115,65	1741,60
17.00	4278,88	2423,55	2213,54
18.00	3934,50	3088,90	2618,00
19.00	5014,80	4077,90	3268,80
20.00	4916,70	3944,60	2976,00
21.00	4605,60	3981,60	2895,00
22.00	4314,56	3391,12	2374,40

Dari tabel hasil perhitungan tersebut terlihat bahwa beban setiap fasa tidak seimbang, daya maksimum fasa terletak pada pukul 19.00 sebesar 5014.8 watt. Sehingga perancangan ELC akan mempertimbangkan ketidakseimbangan tersebut dan dilakukan penyeimbangan pembebanan setiap fasa.

4.2 Perancangan Beban Komplemen

Nilai beban komplemen mengacu pada keseimbangan beban setiap fasa. Hal ini dimaksudkan agar sistem tiga fasa yang dibangkitkan oleh generator berada dalam kondisi beban seimbang.

4.2.1 Menghitung Besarnya Nilai Tahanan Beban Komplemen

Beban komplemen dirancang untuk menstabilkan nilai tegangan dan frekuensi berdasarkan perubahan nilai arus menuju beban utama, sehingga nilainya harus dibuat konstan. Perancangan nilai beban komplemen diawali dengan melakukan rekalkulasi daya beban dengan menetapkan nilai tegangan pada kondisi konstan yaitu $V_f = 220$ volt, sehingga nilai daya beban menjadi :

Tabel 4.3 Hasil perhitungan daya beban dengan tegangan 220 V

pukul	daya (watt)		
	r	s	t
06.00	4092	2508	2662
07.00	2684	2090	1628
08.00	2442	2068	1386
09.00	2156	1782	1650
10.00	2376	1804	1606
11.00	2530	1804	1408
12.00	2574	2332	1562
13.00	2354	2288	1562
14.00	2464	1848	1408
15.00	2178	1738	1232
16.00	2486	1870	1540
17.00	4136	2354	2134
18.00	4730	3740	3080
19.00	6160	5060	3960
20.00	5940	4840	3520
21.00	5280	4620	3300
22.00	4268	3344	2332

Tabel 4.3 menunjukkan beban fasa tertinggi terjadi pukul 19.00 pada fasa R sebesar 6160 watt. Beban komplemen yang dirancang, dibatasi oleh nilai daya maksimum output generator dan ketersediaan sensor ACS 712 yang ada di pasaran. Berdasarkan nilai debit $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{det}$, massa jenis air saat suhu 20°C $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$, percepatan gravitasi $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, tinggi jatuh bersih $H = 15.5 \text{ m}$, efisiensi turbin crossflow dipilih $\eta_h = 53.4\%$, efisiensi mekanis η_m diasumsikan 100% dan efisiensi generator sesuai name plate $\eta_g = 90\%$ (Sumber: Helmi), maka daya keluaran maksimum dapat dihitung :

$$P_{\text{output}}(\text{kW}) = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_h \cdot \eta_g$$

$$P_{\text{output}}(\text{kW}) = 998.2 \times 9.81 \times 0.3 \times 15.5 \times 0.534 \times 0.9$$

$$P_{\text{output}}(\text{kW}) = 21.883 \text{ kW}$$

Ketersediaan sensor arus ACS 712 yang ada di pasaran mempunyai nilai arus maksimum yang mampu dideteksi sebesar 30 A. Maka beban maksimum generator yang maksimal dapat dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned} P_{1\text{ fasa maks}} &= V \cdot I \cos \varphi \\ &= 220 \cdot 30 \cdot 1 = 6600 \text{ watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{3\text{ fasa maks}} &= 3 \cdot P_{1\text{ fasa maks}} \\ &= 3 \cdot 6600 \text{ watt} = 19800 \text{ watt} \end{aligned}$$

Dari besarnya daya setiap fasa maka nilai tahanan beban komplemen untuk setiap fasa dapat ditentukan dengan perhitungan :

$$R = \frac{\text{Daya setiap fasa}}{I^2} = \frac{6600}{30^2} = 7.33 \Omega$$

dengan membagi beban komplemen dan I_{fasa} dalam 8 buah tap, nilai arus setiap tap beban sebesar

$$I_{\text{tiap tap}} = \frac{I_{\text{fasa}}}{\text{jumlah tap}} = \frac{30}{8} = 3.75 \text{ A}$$

Nilai tahanan total setiap beban komplemen, sehingga dicari nilai R parallel dari ballast

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_{\text{tap 1}}} + \frac{1}{R_{\text{tap 2}}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{tap 8}}}$$

$$R_{\text{tap}} = 8 \times R_{\text{total}}$$

$$R_{\text{tap}} = 8 \times 7.33$$

$$R_{\text{tap}} = 58.64 \Omega$$

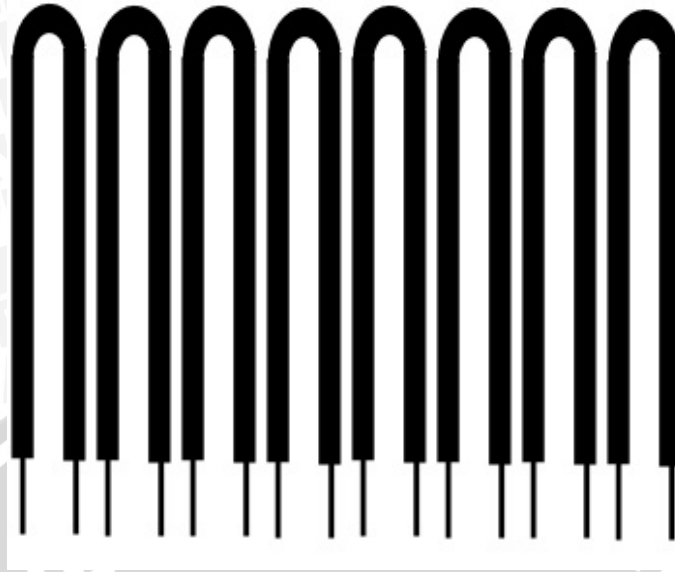
Perhitungan tersebut menghasilkan nilai-nilai yang dapat dilihat dalam tabel berikut :

Tabel 4.4 Tabulasi pemakaian beban dan beban komplemen

nilai pemakaian beban	fasa		
	r	s	t
daya fasa (watt)	6160	5060	3960
daya beban komplemen (watt)	6600		
tegangan (V)	220		
tahanan total beban komplemen (ohm)	7,33		
tahanan setiap tap beban komplemen (ohm)	58,64		
arus total beban komplemen (A)	30		
arus setiap tap beban komplemen (A)	3,75		

Pembuatan beban komplemen menggunakan kawat nikelin ukuran 1mm (diameter) dengan besar nilai tahanannya adalah 1 ohm / meter.

4.2.2 Konstruksi Beban Komplemen

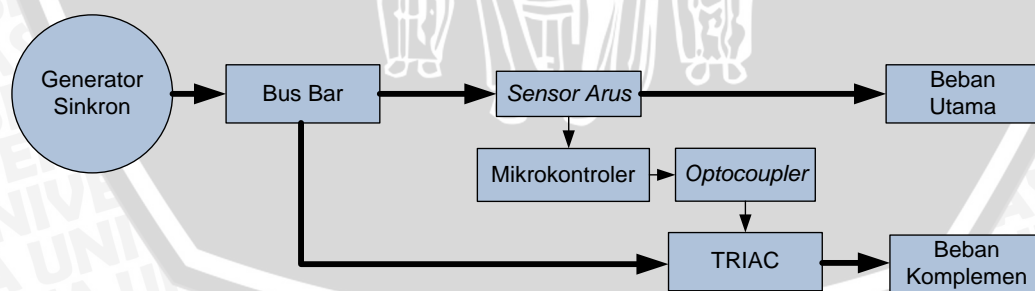


Gambar 4.1 Beban komplemen

Beban komplemen jenis ini digunakan karena rata-rata beban utama adalah beban resistif dimana $\cos \phi$ dianggap satu. Pembuatan beban komplemen menggunakan kawat nikelin dilapisi isolator listrik dan pipa tembaga jenis tubular heater. Sedangkan untuk pengujian di dalam laboratorium peranan kawat nikelin digantikan oleh lampu pijar.

4.3 Blok Diagram Sistem

Berdasarkan spesifikasi yang telah ditentukan, sistem ELC generator sinkron tiga fasa PLTMH dapat ditunjukkan dalam sebuah blok diagram keseluruhan sistem seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Blok diagram keseluruhan sistem

Keterangan masing-masing blok diagram di atas dimulai dari generator sinkron yang berfungsi menyuplai daya beban utama dan beban komplemen. Bus bar sebagai terminal penghubung antara generator, beban utama dan beban komplemen.

Rangkaian sensor mendeteksi perubahan arus menuju beban utama yang kemudian akan dikirim menuju mikrokontroler sehingga nilai arus menuju beban utama dapat terdeteksi. Mikrokontroler mendapatkan masukan dari rangkaian sensor arus dan meneruskan hasil perhitungan internal berupa logika digital sebagai bentuk sinyal pemicuan dan diteruskan ke rangkaian selanjutnya. *Optocoupler* berfungsi untuk mengisolasi antar rangkaian yang ada pada bagian rangkaian digital dan komponen elektronika daya dan juga digunakan sebagai rangkaian penyalur pulsa pemicuan dengan referensi sinyal digital sebagai tanda pemicuan *gate* komponen elektronika daya. TRIAC merupakan komponen utama pengontrol arus bolak-balik AC yang akan dialihkan menuju beban komplemen dan difungsikan sebagai saklar *on-off* pada sistem ELC.

Beban utama merupakan konsumen yang akan menggunakan suplai daya dari PLTMH. Beban komplemen berfungsi sebagai beban pengganti yang akan menggunakan daya yang tidak digunakan oleh beban utama.

4.4 Perancangan Perangkat Keras *Electronic Load Controller*

Perancangan perangkat keras modul ELC generator sinkron tiga fasa PLTMH terbagi menjadi beberapa langkah antara lain:

1. Pemilihan komponen TRIAC.
2. Perancangan rangkaian pendeteksi arus beban utama.
3. Perancangan rangkaian pemicuan *gate* TRIAC.
4. Perancangan kontrol sistem.

4.4.1 Pemilihan Komponen TRIAC

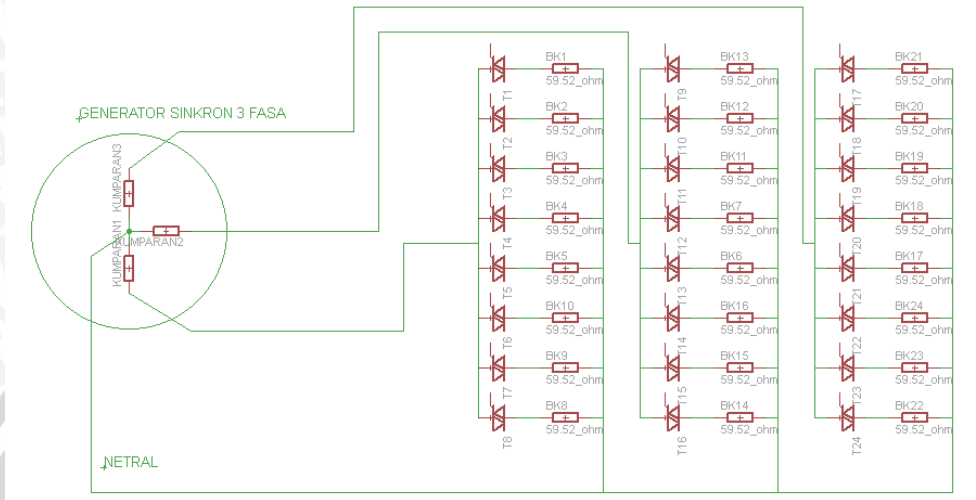
Beban komplemen generator sinkron yang nantinya digunakan merupakan beban resistif murni berupa kawat nikelin/lampu pijar. Nilai arus dan tegangan menuju tap beban komplemen dari perhitungan perancangan diperoleh nilai sebagai berikut :

- Arus/tap 3.75 A
- Tegangan 220 V

Kawat nikelin yang digunakan nantinya akan dihubungkan dengan setiap tap pada setiap fasa yang mana setiap fasa dibagi dalam 8 tap beban dengan tegangan setiap tap merupakan tegangan fasa dan netral (V_f) 220 V dari sumber generator.

Mengacu pada perhitungan dan ketersediaan komponen yang ada di lapangan maka TRIAC yang digunakan adalah BTA16-600B dengan rating arus kontinu sebesar

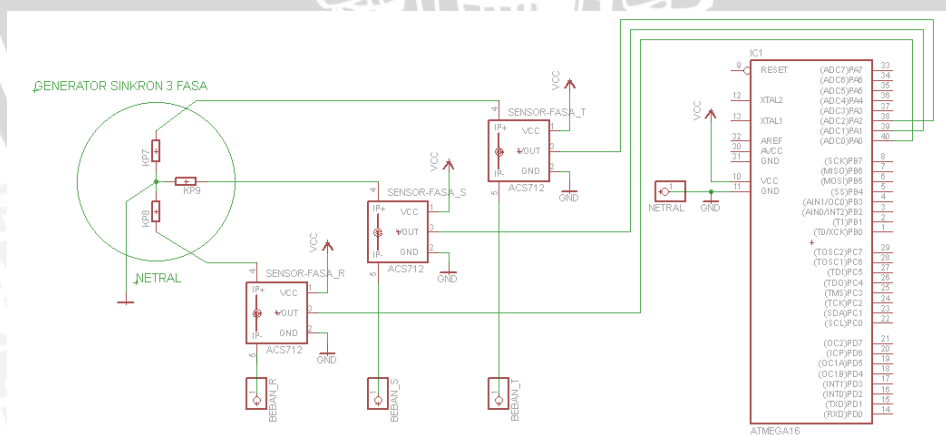
16 A dan tegangan maksimum 600 V. TRIAC yang digunakan nantinya berjumlah 8 buah setiap fasa sehingga akan untuk sistem 3 fasa yang dirancang akan menggunakan 24 buah TRIAC untuk tap beban komplemen. Bentuk rangkaian dapat dilihat pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Konfigurasi generator dengan komponen TRIAC.

4.4.2 Perancangan Rangkaian Pendeteksi Arus Beban Utama

Rangkaian pendeteksi arus beban digunakan sebagai pendeteksi arus AC yang mengalir menuju beban utama. Rangkaian pendeteksi arus beban ini dibuat berjumlah tiga buah sesuai dengan jumlah fasa generator PLTMH. Rangkaian ini mengacu pada gambar 4.4 dengan menggunakan tiga buah sensor arus ACS712 yang memberikan masukan menuju mikrokontroller. Bentuk rangkaian pendeteksi arus beban dapat ditunjukkan pada gambar 4.4



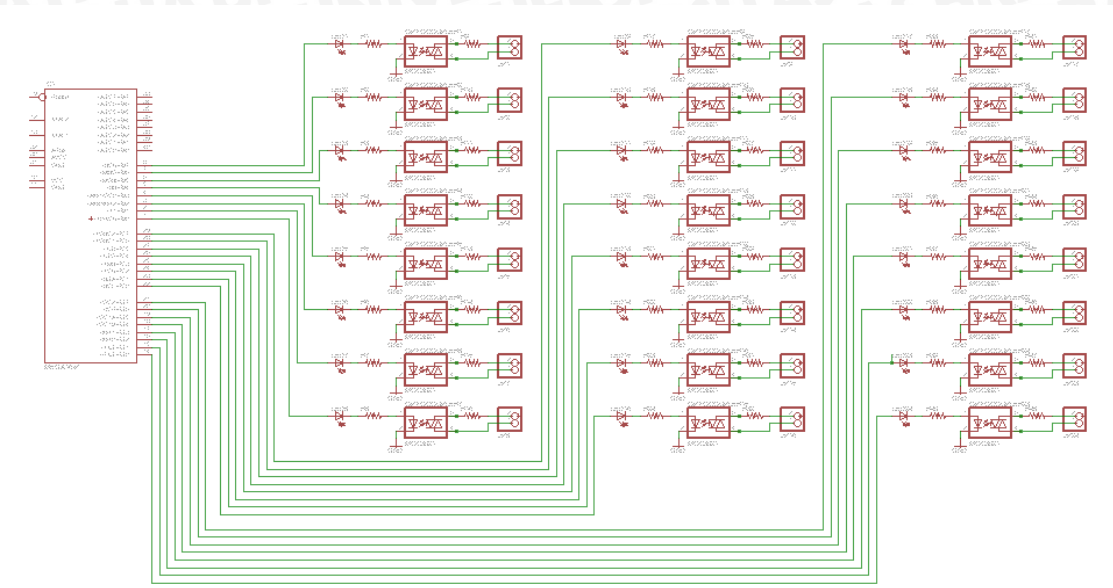
Gambar 4.4 Rangkaian sensor arus untuk sistem 3 fasa

4.4.3 Perancangan Rangkaian Pemicuan Gate TRIAC

Blok *optocoupler* berfungsi memisahkan rangkaian digital sebagai masukan pemicuan dan rangkaian elektronika daya sebagai luaran. Komponen *optocoupler* yang



digunakan berjumlah 24 buah setiap fasa bertipe MOC3021, dibagi menjadi 8 buah untuk setiap fasa. Rangkaian pemucuan TRIAC dengan menggunakan optocoupler MOC3021 dapat ditunjukkan pada gambar 4.5



Gambar 4.5 Rangkaian pemucuan *gate* TRIAC 3 fasa

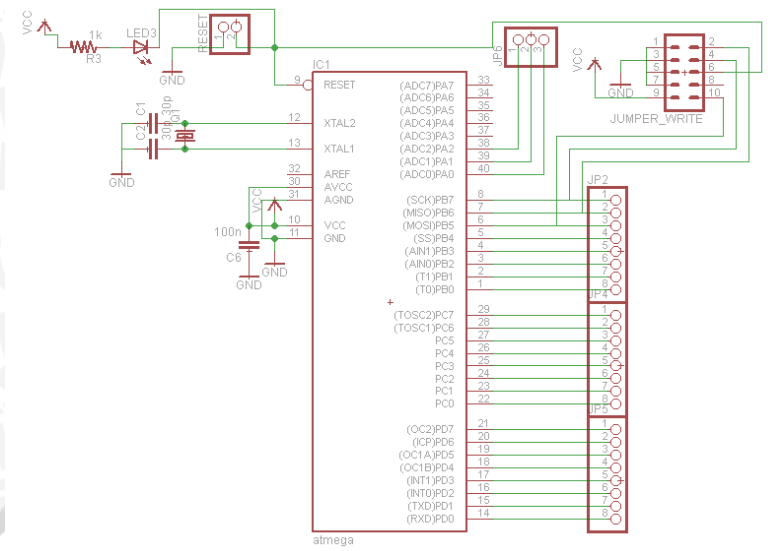
Rangkaian pemucuan *gate* TRIAC dilengkapi dengan LED indikator sehingga mampu dideteksi terjadinya pulsa pemucuan berupa sinyal cahaya untuk memudahkan pengamatan. Arus maksimal yang mampu memicu opto-TRIAC (I_{FT}) mengacu pada *datasheet* komponen sebesar 15mA. Nilai resistor R1-R8, R17-R24 dan R33-R40 yang digunakan untuk membatasi arus pemucuan opto-TRIAC sebesar:

$$\begin{aligned}
 V &= V_{LED} + I_{FT} \times R + V_{opto} \\
 R &= \frac{V - (V_{LED} + V_{opto})}{I_{FT}} \\
 &= \frac{5 - (0,7 + 1,5)}{15 \times 10^{-3}} \\
 &= 186,66 \Omega
 \end{aligned}$$

Nilai resistansi R9-R16, R25-R32 dan R41-R48 sebesar 180 Ω mengacu pada *datasheet* opto-TRIAC untuk memicu beban resistif termasuk dalam aplikasi kawat nikelin.

4.4.4 Perancangan Kontrol Sistem

Sinyal masukan sistem pengontrol berasal dari sensor arus dan diolah di dalam mikrokontroler, kemudian sinyal keluaran dari sistem digital akan melalui PORTB, PORT C, dan PORT D.



Gambar 4.6 Rangkaian mikrokontroler.

Mikrokontroler yang digunakan tipe ATmega16 yang memiliki 32 kaki masukan/luaran (PORT I/O) yang terbagi menjadi 4 PORT (PORTA, PORTB, PORTC, dan PORTD). Jumlah kaki tersebut harus mampu mencakupi fitur dari spesifikasi alat yang dirancang, alokasi kaki-kaki mikrokontroler dan fungsi :

- Tiga kaki (PORTA.0, PORTA.1, dan PORTA.2) difungsikan sebagai masukan dari sensor arus.
- Delapan kaki pada (PORTB.0 - PORTB.7) difungsikan sebagai antarmuka pemicuan dengan rangkaian opto-TRIAC fasa R.
- Delapan kaki pada (PORTC.0 - PORTC.7) difungsikan sebagai antarmuka pemicuan dengan rangkaian opto-TRIAC fasa S.
- Delapan kaki pada (PORTD.0 - PORTD.7) difungsikan sebagai antarmuka pemicuan dengan rangkaian opto-TRIAC fasa T.

4.5 Perancangan Perangkat Lunak

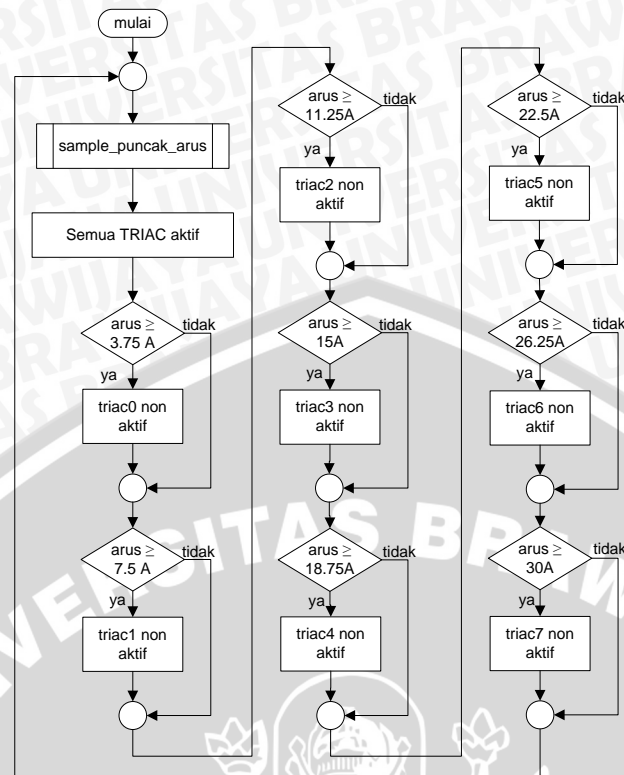
Perancangan perangkat lunak untuk mengontrol sistem ELC menggunakan bahasa pemrograman C dan *Software Code Vision AVR* yang digunakan untuk *compiler* program. Perancangan ini terbagi menjadi beberapa langkah antara lain:

1. Perancangan diagram alir fungsi ELC
2. Perancangan diagram alir pendeteksi arus beban utama

4.5.1 Perancangan Diagram Alir Fungsi ELC

Perancangan perangkat lunak ELC generator sinkron tiga fasa PLTMH terbagi menjadi beberapa langkah antara lain:





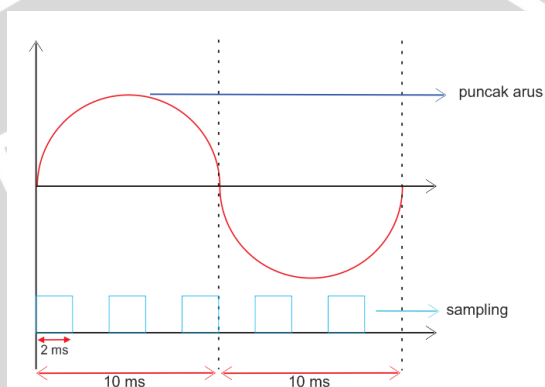
Gambar 4.7 Diagram alir fungsi ELC

Diagram alir diawali dengan menjalankan program pengambilan sampel yang akan menentukan TRIAC yang akan dipicu menurut perubahan nilai arus beban. Umpan balik dari sub fungsi menjadi acuan pemicuan dan pemadaman TRIAC. Jika terdeteksi penurunan arus menuju beban utama maka TRIAC akan dipicu. Pemicuan berlangsung terus selama deteksi dari sensor arus menunjukkan penurunan arus beban utama. Jika tidak maka dilakukan kembali pendeteksian arus menuju beban utama.

Sinyal dari program sample puncak arus akan dibaca melalui urutan program *default* semua triac aktif. Triac 0 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 3.75 , triac 1 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 7.5 , triac 2 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 11.25 , triac 3 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 15 , triac 4 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 18.75 , triac 5 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 22.5 , triac 6 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 26.25 , triac 7 non aktif ketika arus menuju beban utama bernilai ≥ 30 . Fungsi ELC akan terus melakukan proses perulangan, pemadaman dan pemicuan triac akan mengikuti fluktuasi arus beban menuju utama dengan disesuaikan syarat-syarat yang terdapat dalam fungsi ELC.

4.5.2 Perancangan Diagram Alir Pendeteksi Arus Utama

Pendeteksian nilai arus beban yang dilakukan oleh sensor arus memberikan keluaran berupa gelombang dengan nilai frekuensi yang sama. Nilai kenaikan amplitudo tegangan keluaran sensor mengikuti kenaikan nilai arus yang mengalir menuju beban utama. Output sensor berupa tegangan menjadi input pada PORT A (port *analog to digital converter*) mikrokontroler. Program di dalam mikrokontroler akan melakukan proses pengambilan sampel setiap 2 *milisecond* (mS), yang mana tegangan dari output sensor akan diambil beberapa nilai.

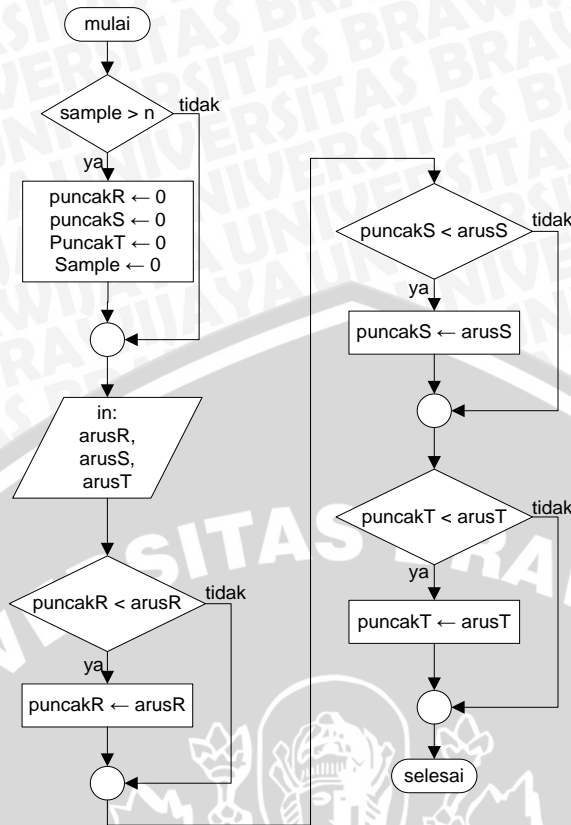


Gambar 4.8 Deteksi arus beban melalui proses pengambilan sampel

Nilai hasil pengambilan kemudian menjadi acuan besarnya nilai arus yang mengalir ke beban utama. Pendeteksian nilai arus ini dapat dilakukan secara bersamaan pada sistem 3 fasa yang mana tidak saling mempengaruhi respon setiap fasanya.

Perancangan diagram alir sub fungsi pendeteksi arus beban utama dirancang berdasarkan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Penjelasan diagram alir sub fungsi pendeteksi arus beban utama antara lain:

1. Berdasarkan Gambar 4.8, sinyal masukan pada PORT A merupakan sinyal tegangan AC yang merupakan keluaran sensor arus. Kenaikan nilai amplitudo tegangan AC dari sensor arus akan menunjukkan kenaikan arus beban utama, sedangkan penurunan nilai amplitudo tegangan AC dari sensor arus akan menunjukkan penurunan arus beban utama.
2. Jika terdeteksi kenaikan maupun penurunan nilai amplitudo tegangan keluaran sensor maka proses pengambilan sampel oleh sub fungsi pendeteksi arus beban utama akan memberikan nilai hasil sampel pada saat puncak amplitudo tegangan keluaran sensor.



Gambar 4.9 Diagram alir pengambilan sampel

Fungsi pengambilan sampel dilakukan bersamaan untuk keluaran sensor arus setiap fasa. Fungsi ini memanfaatkan program timer dalam mikrokontroler, yaitu pada saat sensor mengeluarkan gelombang dengan frekuensi yang sama dengan nilai frekuensi arus yang terdeteksi, maka gelombang yang merupakan besaran analog akan diubah menjadi nilai digital melalui pin ADC. Nilai pengambilan sampel ini dibaca dalam proses *read adc* dimana dalam 1 siklus gelombang dibaca oleh fungsi dengan timer setiap 2 mS.

Nilai sample *n* yang pertama saat tidak ada arus yang mengalir maka nilai puncak dari setiap fasa akan diberikan nilai nol. Kemudian pembacaan arus R, arus S, dan arus T dilakukan dengan pengambilan sampel yang baru, apabila nilai puncak R yang ditetapkan sebelumnya < puncak arus R yang baru maka nilai puncak R akan diubah menjadi nilai puncak R yang baru, apabila nilai puncak S yang ditetapkan sebelumnya < puncak arus S yang baru maka nilai puncak S akan diubah menjadi nilai puncak S yang baru, dan apabila nilai puncak T yang ditetapkan sebelumnya < puncak arus T yang baru maka nilai puncak T akan diubah menjadi nilai puncak T yang baru. Nilai puncak setiap fasa akan diteruskan menuju fungsi ELC dan menjadi acuan nilai arus yang sedang mengalir menuju beban utama.

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

5.1 Pengujian Rangkaian Pendeteksi Arus Beban Utama

5.1.1 Tujuan

Tujuan pengujian rangkaian pendeteksi arus beban utama adalah untuk mengkalibrasi blok pendeteksi arus beban utama yang digunakan mikrokontroler untuk mengetahui nilai arus yang sedang mengalir ke beban utama.

5.1.2 Peralatan

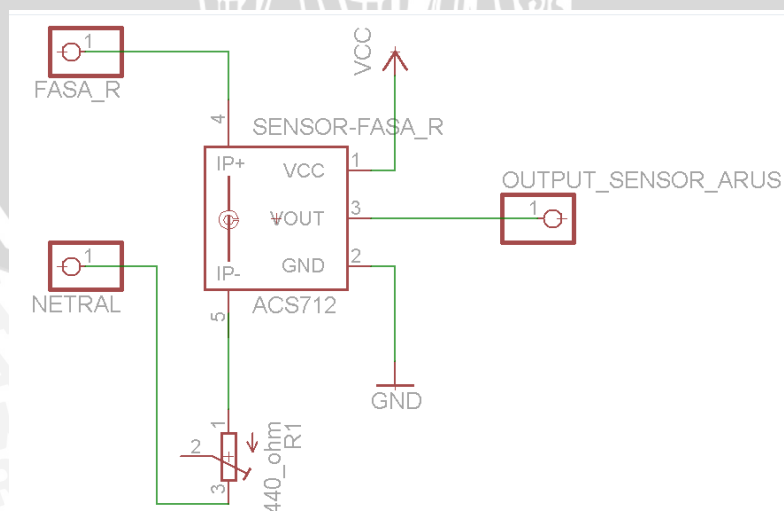
Peralatan yang akan digunakan dalam pengujian ini adalah:

1. Sumber tegangan AC 1 fasa
2. Sumber tegangan DC 5 volt
3. Resistor variabel 440 Ω
4. *Oscilloscope* Tektronik TD-2002

5.1.3 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian melakukan pengujian pendeteksi arus beban utama sebagai berikut:

1. Membuat rangkaian seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1.
2. Menghubungkan sumber AC 1 fasa ke rangkaian pada Gambar 5.1 dan sumber DC 5 volt ke sensor arus.
3. Menghubungkan *probe 1 oscilloscope* ke terminal luaran sensor arus dan ground.
4. Atur resistor variable hingga nilai arus mengalir mulai 0.5-5.5 A



Gambar 5.1 Rangkaian pengujian sensor arus

5.1.4 Data Hasil Pengujian

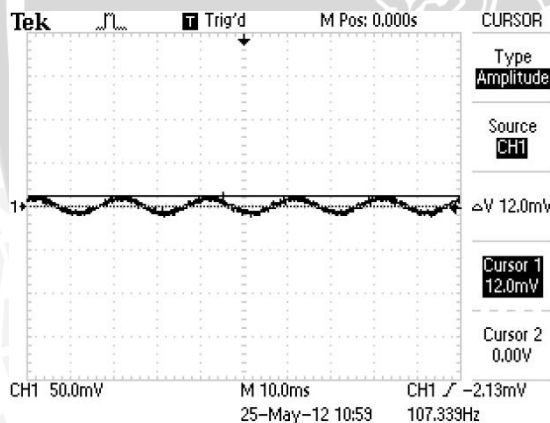
Data hasil pengujian rangkaian pendeteksi arus beban utama sebagai berikut:

1. Tegangan pada keluaran sensor arus dan nilai ADC ditunjukkan tabel 5.1

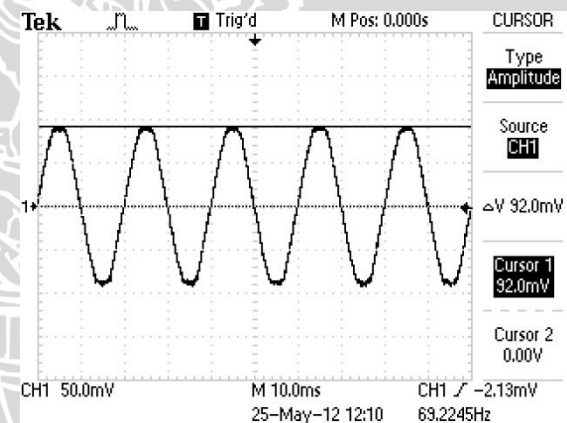
Tabel 5.1 Data tegangan keluaran sensor arus

arus beban (A)	keluaran sensor (mV)
0,0	0
0,5	12
1,0	18
1,5	28
2,0	36
2,5	44
3,0	52
3,5	60
4,0	68
4,5	76
5,0	84
5,5	92

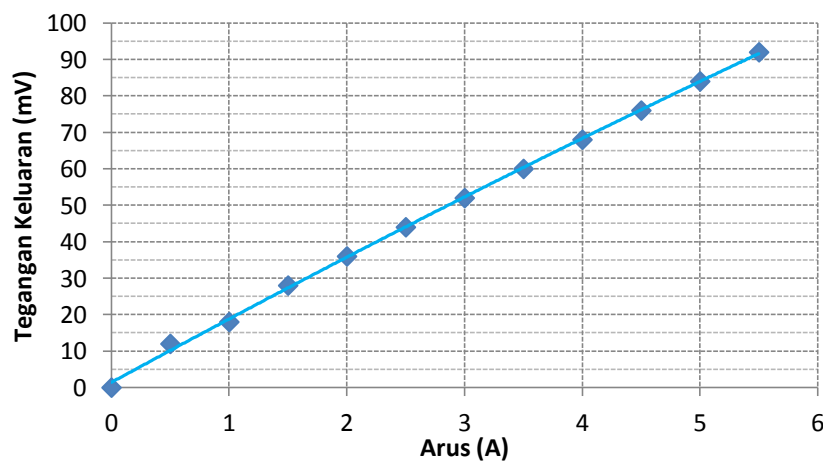
2. Contoh bentuk tegangan keluaran sensor arus sebagai masukan mikrokontroler ditunjukkan pada gambar berikut



Gambar 5.2 Bentuk keluaran sensor untuk arus 0,5A



Gambar 5.3 Bentuk keluaran sensor untuk arus 5,5A



Gambar 5.4 Tegangan keluaran sensor terhadap kenaikan arus

5.1.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran sensor arus mengikuti bentuk gelombang AC dari beban utama, dan berbentuk tegangan untuk arus dengan nilai 0 sampai 5.5 ampere dengan nilai 12 mV sampai 92 mV dapat dijadikan masukan mikrokontroler sebagai nilai arus yang mengalir menuju beban utama. Dari grafik dapat dilihat bahwa perubahan tegangan keluaran sensor (ΔV) naik secara linear sebesar $16^{\text{mV}}/\text{ampere}$. Dari pengujian tersebut rangkaian pendeteksi arus beban utama mampu bekerja sesuai tujuan dan fungsinya sebagai pendeteksi arus menuju beban utama.

5.2 Pengujian Rangkaian Pemicuan

5.2.1 Tujuan

Tujuan pengujian rangkaian pemicuan untuk mengetahui apakah rangkaian mampu bekerja sebagai rangkaian pemacu *gate* TRIAC dengan referensi sinyal digital berasal dari mikrokontroler.

5.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

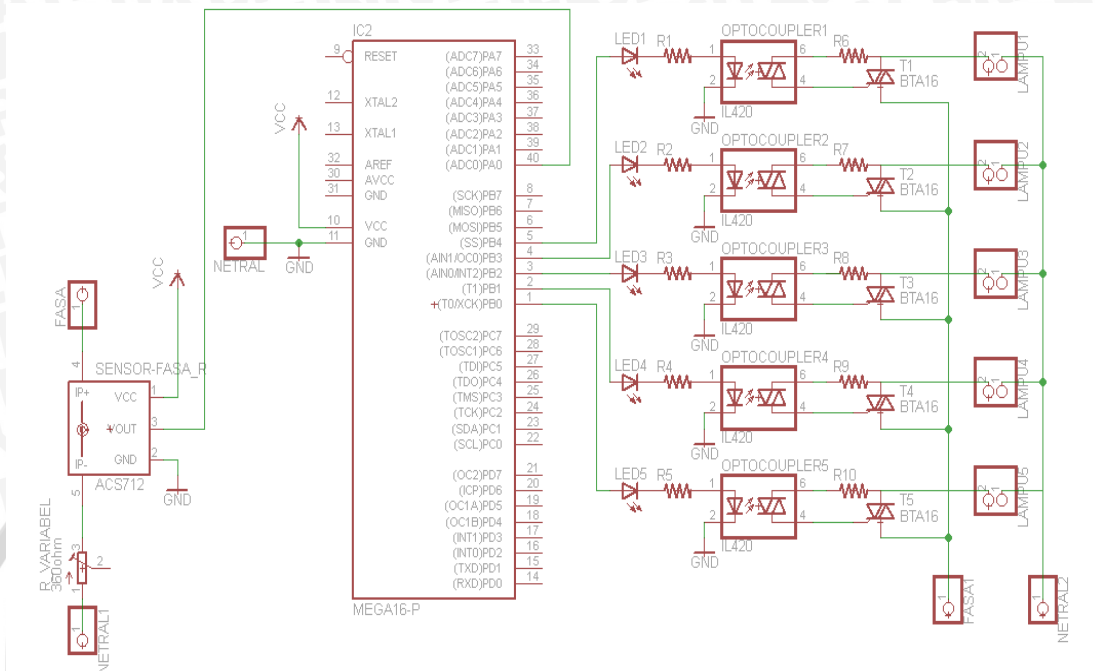
1. Sumber tegangan AC 1 fasa
2. Sumber tegangan DC 5 volt
3. *Oscilloscope*
4. Sensor arus ACS712
5. Mikrokontroler ATmega 16
6. *Optocoupler* MOC3021
7. TRIAC BTA16-600B
8. Resistor variabel 360 Ω
9. Lampu pijar 220 watt

5.2.3 Prosedur Pengujian

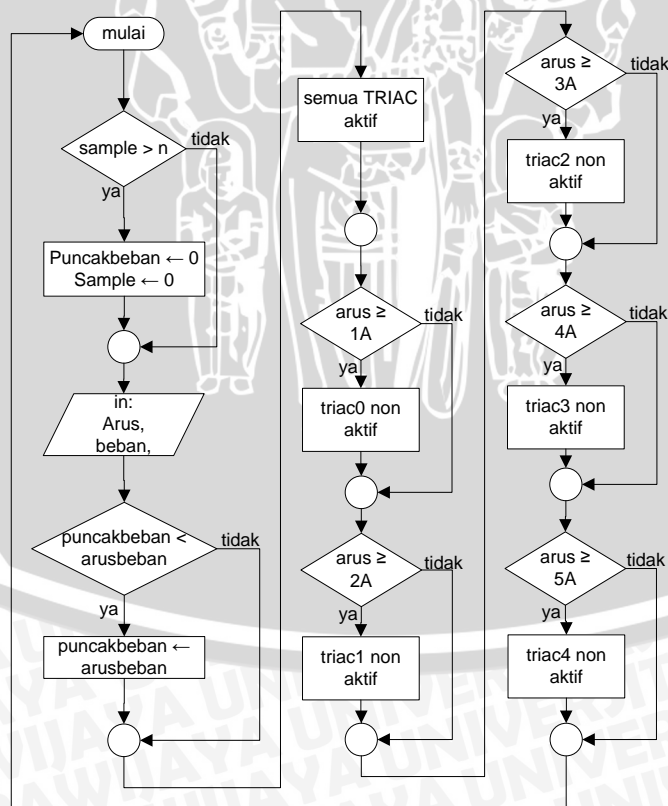
Prosedur pengujian rangkaian pemicuan sebagai berikut:

1. Membuat rangkaian seperti pada Gambar 5.14.
2. Membuat perangkat lunak dengan diagram alir seperti ditunjukkan Gambar 5.15.
3. Menghubungkan sumber tegangan AC, sumber tegangan DC 5 volt, dan lampu pijar ke rangkaian pada Gambar 5.14.
4. Memasang lampu pijar seperti pada rangkaian.

5. Menghubungkan probe 1 oscilloscope ke PORTA.0/keluaran sensor arus ACS712.



Gambar 5.5 Rangkaian pengujian pemucuan



Gambar 5.6 Diagram alir pengujian rangkaian pemucuan

Tabel 5.2 Hasil pengujian rangkaian pemucuan

arus beban	tegangan keluaran sensor	lampu 1	lampu 2	lampu 3	lampu 4	lampu 5
0	0 mV	on	on	on	on	on
1	18 mV	on	on	on	on	off
2	36 mV	on	on	on	off	off
3	52 mV	on	on	off	off	off
4	68 mV	on	off	off	off	off
5	84 mV	off	off	off	off	off

5.2.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian terlihat bahwa ketika terjadi perubahan nilai menuju resistor variabel sensor arus akan memberikan respon berupa nilai tegangan keluaran yang juga berubah, nilai perubahan tegangan ini kemudian akan diproses di dalam mikrokontroler. Dari proses di dalam mikrokontroler akan memberikan perintah kepada rangkaian *optocoupler* dan TRIAC yang harus aktif saat terjadi perubahan masukan. Dari tabel dapat dilihat bahwa ketika arus menuju resistor variabel naik secara bertahap maka indikator pemucuan berupa lampu yang *on* juga akan berkurang. Berdasarkan analisis di atas, maka rangkaian pemucuan dapat digunakan berdasarkan perintah yang diberikan oleh mikroprosesor melalui pin keluarannya.

5.3 Pengujian Pembebanan Generator Sinkron

Pengujian pembebanan generator sinkron menggunakan metode penurunan skala pengujian (*downscale*). Metode ini didasari ketersediaan peralatan yang ada di laboratorium mesin elektrik yaitu motor induksi sebagai penggerak utama, generator sinkron, dan beban tahanan geser. Sehingga skala perbandingan arus beban nominal untuk pengujian di laboratorium dengan perancangan adalah 1 : 6. Berdasarkan tabel 4.4, maka nilai-nilai untuk pengujian diperoleh dengan menurunkan arus nominal menuju beban :

Tabel 5.3 Tabulasi pemakaian beban dan beban komplemen untuk pengujian

nilai pemakaian beban	fasa		
	R	S	T
daya fasa maksimum (watt)	1100	1100	1100
daya beban komplemen (watt)	3300		
tegangan (V)	220		
arus beban total (A)	5		
arus setiap tap beban komplemen (A)	1		

Daya fasa maksimum mempunyai nilai yang sama bertujuan untuk menjaga keseimbangan pembebanan setiap fasa generator. Dengan menggunakan metode

penurunan skala tersebut maka nilai fluktuasi arus beban untuk pengujian dihitung seperti ditunjukkan tabel berikut ini :

Tabel 5.4 Nilai fluktuasi arus beban utama pengujian

arus beban utama (A)		
R	S	T
3,1	1,9	2,0
2,0	1,6	1,2
1,9	1,6	1,1
1,6	1,4	1,3
1,8	1,4	1,2
1,9	1,4	1,1
2,0	1,8	1,2
1,8	1,7	1,2
1,9	1,4	1,1
1,7	1,3	0,9
1,9	1,4	1,2
3,1	1,8	1,6
3,6	2,8	2,3
4,7	3,8	3,0
4,5	3,7	2,7
4,0	3,5	2,5
3,2	2,5	1,8

5.3.1 Tujuan

Tujuan dari pengujian pembebanan generator sinkron antar lain:

1. Mengetahui kinerja keseluruhan sistem yang telah dirancang sebelumnya.
2. Menguji keandalan alat yang telah dirancang dengan mengubah-ubah kondisi beban utama generator.
3. Membandingkan metode antara metode tanpa *electronic load controller* dengan metode *electronic load controller* untuk tiap data pengujian.
4. Mengetahui nilai fluktuasi putaran, frekuensi, tegangan antar fasa, dan tegangan fasa netral untuk tiap pengujian.

5.3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

1. Modul *Electronic Load Controller* yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti:
 - a. Sensor Arus ACS 712
 - b. Mikrokontroler AT Mega16

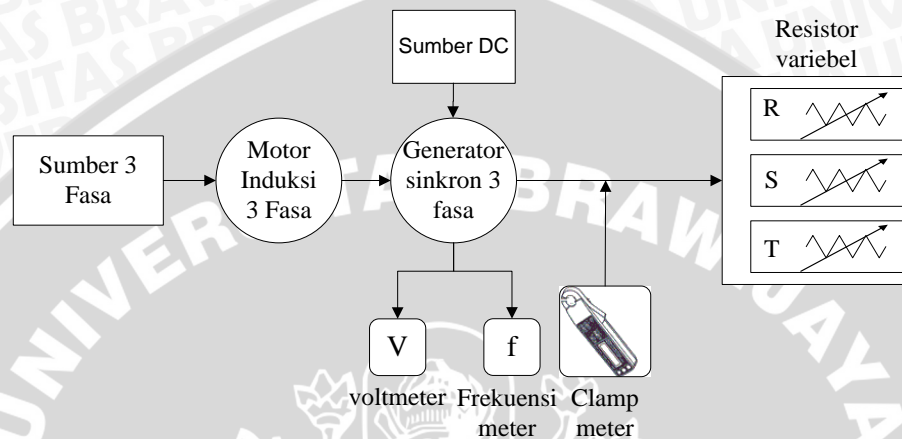
- c. TRIAC BTA16-600B
 - d. *Optocoupler* MOC3021
2. Sumber tegangan AC tiga fasa
 3. Sumber tegangan DC
 4. Motor induksi tiga fasa dengan kopling magnetic merk TECO
 5. Generator Sinkron 3 fasa merk MIN-DONG
 6. Voltmeter AC merk KAISE model SK5000B
 7. Voltmeter DC merk KAISE model SK5000G
 8. Amperemeter AC jenis Digital Clamp Meter merk TENMARS tipe TM-1017
 9. Frekuensimeter merk AEG
 10. *Tachometer* merk FUJIKOYO tipe 024276
 11. 30 Lampu 100 watt dan 15 lampu 25 watt sebagai beban komplemen
 12. Resistor variable merk AEG $6 \times 60\Omega$, $6 \times 40\Omega$, dan $6 \times 12\Omega$ sebagai beban utama

5.3.3 Prosedur Pengujian

Dalam pengujian pembebanan generator sinkron, prosedur pengujiannya adalah:

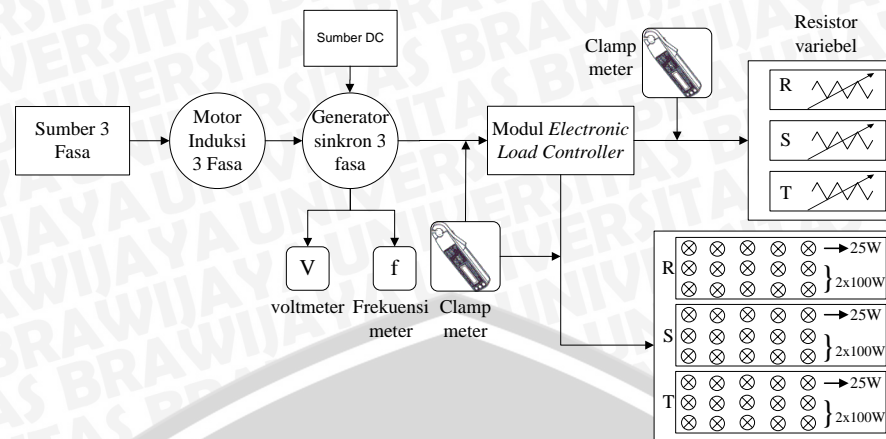
1. Menyusun rangkaian pengujian seperti blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 5.16 untuk pengujian pembebanan generator sinkron metode tanpa ELC dan Gambar 5.17 untuk pengujian metode ELC.
2. Mengukur arus keluaran generator sinkron dengan menggunakan *clamp meter*.
3. Pengujian metode tanpa ELC dilakukan terlebih dahulu, dengan langkah pengujian:
 - a. Catu motor induksi dengan sumber tiga fasa
 - b. Atur putaran melalui pengaturan kopling magnetic hingga putaran generator sinkron berada pada posisi putaran sinkron yaitu 1500rpm.
 - c. Masukkan beban resistor variable pada setiap fasa hingga terhubung Y
 - d. Atur sumber tegangan DC dan amati hingga keadaan mantap tegangan nominal $V_{L-L}=380$, $V_{L-N}=220$, dan frekuensi $f=50\text{Hz}$

- e. Generator dibebani resistor variable hingga arus setiap fasa bernilai 5 A dan generator tetap dalam keadaan mantap.
- f. Menggeser resistor variable hingga arus setiap fasa yang terukur pada *clamp meter* menunjukkan nilai sesuai Tabel 5.4.
- g. Catat nilai putaran (n), frekuensi (f), tegangan antar fasa (V_{L-L}) dan tegangan fasa netral (V_{L-N}) pada setiap kondisi arus beban.



Gambar 5.7 Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron metode tanpa ELC

4. Pengujian selanjutnya menggunakan metode *electronic load controller*, dengan langkah pengujian:
 - a. Catu motor induksi dengan sumber tiga fasa
 - b. Atur putaran melalui pengaturan kopling magnetic hingga putaran generator sinkron berada pada posisi putaran sinkron yaitu 1500rpm.
 - c. Hidupkan sistem ELC sehingga semua daya terserap menuju beban komplemen
 - d. Atur sumber tegangan DC dan amati hingga keadaan mantap tegangan nominal $V_{L-L}=380$, $V_{L-N}=220$, dan frekuensi $f=50\text{Hz}$
 - e. Sambungkan resistor variable sebagai beban utama kemudian atur sehingga arus setiap fasa yang terukur pada *clamp meter* menuju beban utama sesuai nilai sesuai Tabel 5.4.
 - f. Catat nilai putaran (n), frekuensi (f), arus keluaran generator total (I_T), arus beban komplemen (I_K), tegangan antar fasa (V_{L-L}) dan tegangan fasa netral (V_{L-N}) pada setiap kondisi arus beban.



Gambar 5.8 Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron metode ELC

5.3.4 Hasil Pengujian

Keseimbangan daya pembangkitan dan daya yang diserap beban harus dijaga, karena akan berpengaruh pada nilai putaran (n), frekuensi (f), tegangan antar fasa (V_{L-L}) dan tegangan fasa netral (V_{L-N}). Pengujian keseluruhan sistem diawali metode tanpa ELC dengan data hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 5.5 Hasil pengujian pembebanan generator sinkron metode tanpa ELC

pengujian ke-	arus beban total (A)			putaran (rpm)	frekuensi (Hz)	tegangan antar fasa (volt)			tegangan fasa netral (volt)		
	R	S	T			R-S	S-T	T-R	R-N	S-N	T-N
1	3,1	1,9	2,0	1640	55,0	425	430	430	240	240	240
2	2,0	1,6	1,2	1670	56,0	435	440	440	250	250	250
3	1,9	1,6	1,1	1674	56,0	440	440	440	250	250	250
4	1,6	1,4	1,3	1680	56,0	440	440	440	250	250	250
5	1,8	1,4	1,2	1676	56,0	440	440	445	250	250	250
6	1,9	1,4	1,1	1680	56,0	440	445	445	250	250	250
7	2,0	1,8	1,2	1680	56,0	440	440	445	250	250	250
8	1,8	1,7	1,2	1680	56,5	445	440	445	250	250	255
9	1,9	1,4	1,1	1684	56,5	445	445	450	250	250	250
10	1,7	1,3	0,9	1694	56,5	445	450	450	250	250	255
11	1,9	1,4	1,2	1686	56,5	445	445	450	250	250	255
12	3,1	1,8	1,6	1670	56,0	430	435	435	240	245	245
13	3,6	2,8	2,3	1652	55,0	425	425	425	240	240	240
14	4,7	3,8	3,0	1640	54,0	410	410	415	230	230	230
15	4,5	3,7	2,7	1625	54,5	410	410	415	230	230	235
16	4,0	3,5	2,5	1635	54,5	410	420	420	235	235	235
17	3,2	2,5	1,8	1658	55,5	425	430	430	240	240	245

Tabel 5.6 Hasil pengujian pembebanan generator sinkron metode ELC

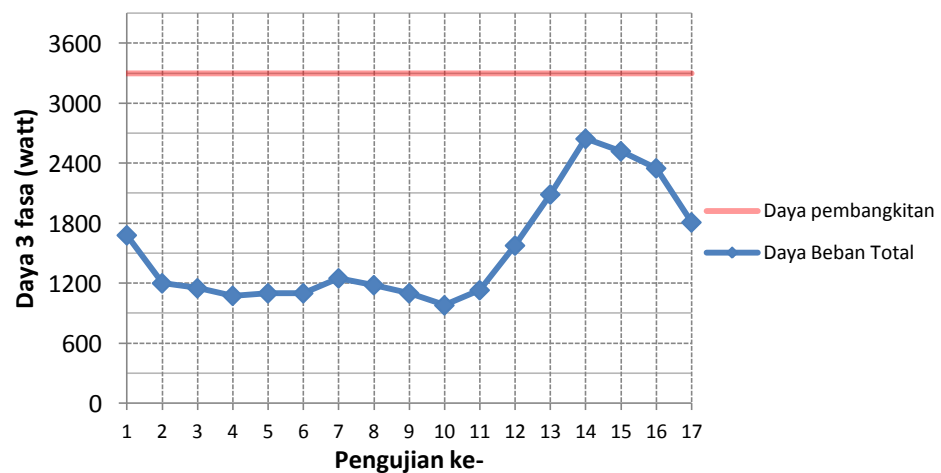
pengujian ke-	arus beban utama (A)			putaran (rpm)	frekuensi (Hz)	tegangan antar fasa (volt)			tegangan fasa netral (volt)			arus beban (A)					
	R	S	T			nr	f	R-S	S-T	T-R	R-N	S-N	T-N	total			komplemen
				R	S									T	R	S	T
1	3,1	1,9	2,0	1525	50,5	380	380	380	220	220	220	5,2	4,9	5,0	2,0	3,0	3,0
2	2,0	1,6	1,2	1510	50,5	385	385	380	220	220	220	5,1	4,7	5,2	3,0	3,1	4,0
3	1,9	1,6	1,1	1535	51,0	380	379	380	220	221	219	5,1	4,7	5,1	3,1	3,1	4,0
4	1,6	1,4	1,3	1515	50,5	385	385	385	220	222	222	4,8	5,4	5,3	3,1	4,0	4,0
5	1,8	1,4	1,2	1510	50,5	385	385	380	220	222	222	4,9	5,4	5,2	3,0	4,0	4,0
6	1,9	1,4	1,1	1515	50,5	380	380	375	220	220	219	5,0	5,4	5,1	3,0	4,0	4,0
7	2,0	1,8	1,2	1505	50,0	380	380	380	220	221	220	5,1	4,8	5,2	3,0	3,0	4,0
8	1,8	1,7	1,2	1525	50,0	380	380	380	220	220	219	4,9	4,7	5,2	3,0	3,0	4,0
9	1,9	1,4	1,1	1505	50,0	385	381	385	220	222	221	5,0	5,4	5,1	3,0	4,0	4,0
10	1,7	1,3	0,9	1530	51,0	385	388	385	225	225	225	4,9	5,3	4,9	3,1	4,0	4,0
11	1,9	1,4	1,2	1498	49,5	375	375	375	219	219	219	5,0	5,4	5,2	3,0	4,0	4,0
12	3,1	1,8	1,6	1510	50,5	389	388	388	225	225	225	5,2	4,8	4,6	2,0	3,0	3,0
13	3,6	2,8	2,3	1520	50,0	387	380	385	219	220	220	4,7	4,8	5,3	1,0	2,0	3,0
14	4,7	3,8	3,0	1525	50,5	380	380	380	220	220	220	4,9	4,8	5,0	0,1	1,0	2,0
15	4,5	3,7	2,7	1540	51,0	383	383	383	221	221	220	4,7	4,7	4,7	0,1	1,0	2,0
16	4,0	3,5	2,5	1496	49,0	370	370	370	215	215	215	5,1	5,5	5,5	1,0	2,0	3,0
17	3,2	2,5	1,8	1525	50,0	370	370	375	215	215	215	5,3	5,5	4,8	2,0	3,0	3,0

5.3.5 Analisis Hasil Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian pembebanan generator sinkron yang ditunjukkan pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 terlihat bahwa terjadi perbedaan nilai parameter putaran (n), frekuensi (f), tegangan antar fasa (V_{L-L}) dan tegangan fasa netral (V_{L-N}) pada metode tanpa ELC dengan metode ELC. Pada metode tanpa ELC nilai parameter tersebut melebihi nilai nominalnya, sedangkan pada metode ELC nilai parameter tersebut dapat terjaga di nilai nominalnya, karena dipengaruhi oleh kondisi daya pembangkitan dan daya beban yang ditandai dengan fluktuasi arus beban. Pemakaian daya oleh beban pengujian dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 5.7 Nilai daya beban total generator sinkron metode tanpa ELC

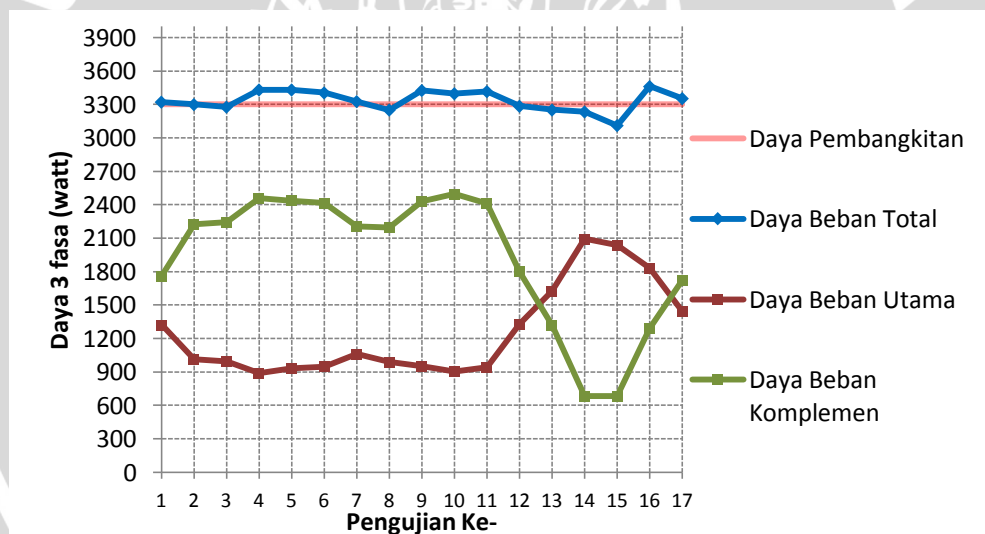
pengujian ke-	daya fasa (watt)			daya 3 fasa (watt)
	R	S	T	
1	744,0	456,0	480,0	1680,0
2	500,0	400,0	300,0	1200,0
3	475,0	400,0	275,0	1150,0
4	400,0	350,0	325,0	1075,0
5	450,0	350,0	300,0	1100,0
6	475,0	350,0	275,0	1100,0
7	500,0	450,0	300,0	1250,0
8	450,0	425,0	306,0	1181,0
9	475,0	350,0	275,0	1100,0
10	425,0	325,0	229,5	979,5
11	475,0	350,0	306,0	1131,0
12	744,0	441,0	392,0	1577,0
13	864,0	672,0	552,0	2088,0
14	1081,0	874,0	690,0	2645,0
15	1035,0	851,0	634,5	2520,5
16	940,0	822,5	587,5	2350,0
17	768,0	600,0	441,0	1809,0



Gambar 5.9 Fluktuasi daya beban total metode tanpa ELC

Tabel 5.8 Nilai daya beban total Metode ELC

pengujian ke-	daya 1 fasa (watt)			daya 3 fasa (watt)
	R	S	T	
1	1144,0	1078,0	1100,0	3322,0
2	1122,0	1034,0	1144,0	3300,0
3	1122,0	1038,7	1116,9	3277,6
4	1056,0	1198,8	1176,6	3431,4
5	1078,0	1198,8	1154,4	3431,2
6	1100,0	1188,0	1116,9	3404,9
7	1122,0	1060,8	1144,0	3326,8
8	1078,0	1034,0	1138,8	3250,8
9	1100,0	1198,8	1127,1	3425,9
10	1102,5	1192,5	1102,5	3397,5
11	1095,0	1182,6	1138,8	3416,4
12	1170,0	1080,0	1035,0	3285,0
13	1029,3	1056,0	1166,0	3251,3
14	1078,0	1056,0	1100,0	3234,0
15	1038,7	1038,7	1034,0	3111,4
16	1096,5	1182,5	1182,5	3461,5
17	1139,5	1182,5	1032,0	3354,0

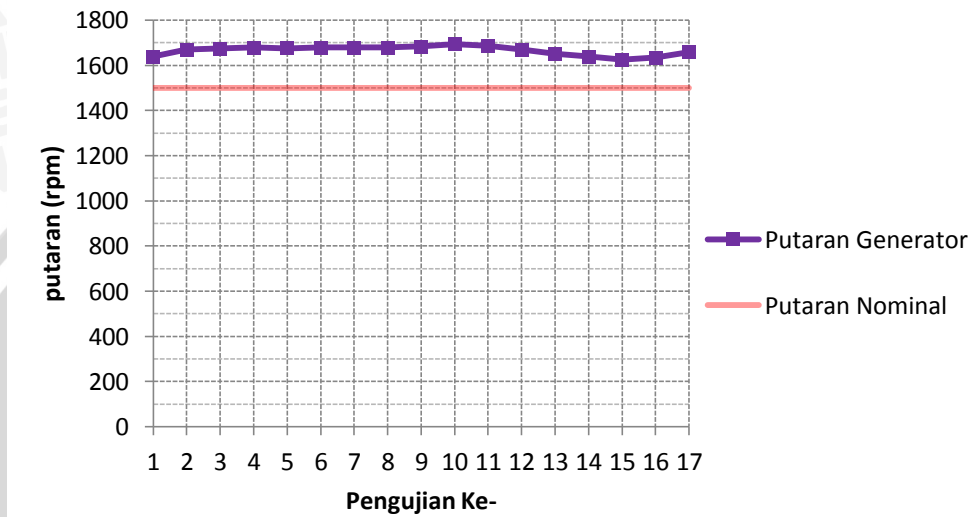


Gambar 5.10 Fluktuasi daya beban metode ELC

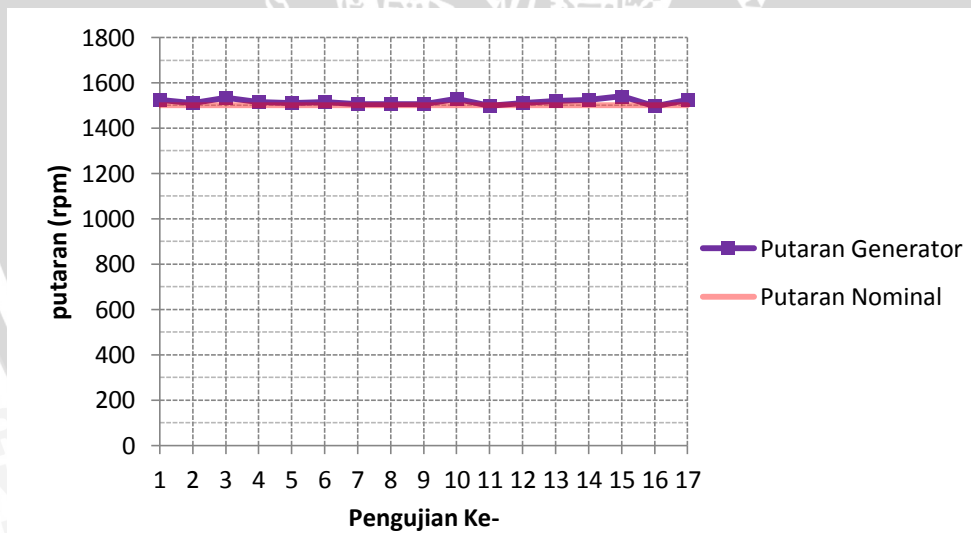
Perubahan arus menuju beban utama yang mengakibatkan perubahan daya beban utama yang ditunjukkan Tabel 5.7. Perubahan daya beban ini memberikan akibat ke sistem yang berada dalam kondisi daya pembangkitan yang tetap. Seperti terlihat pada Gambar 5.18 fluktuasi daya beban masih berada pada nilai yang lebih kecil dari daya pembangkitan dengan rata-rata daya beban sebesar 1525.65 Watt. Daya beban pada metode ELC juga mengalami fluktuasi namun dalam rentang yang masih pada kisaran daya pembangkitan dengan daya rata-rata sebesar 3334.22 Watt dengan fluktuasi beban seperti pada Gambar 5.19. Tabulasi daya beban dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 5.9 Tabulasi daya beban

metode	kondisi daya beban	watt	selisih dari daya pembangkitan
tanpa ELC	minimum	979,50	-70,32%
	maksimum	2645,00	-19,85%
	rata-rata	1525,65	-53,77%
ELC	minimum	3111,40	-5,72%
	maksimum	3461,50	+4,89%
	rata-rata	3334,22	+1,05%



Gambar 5.11 Fluktuasi putaran generator metode tanpa ELC



Gambar 5.12 Fluktuasi putaran generator metode ELC

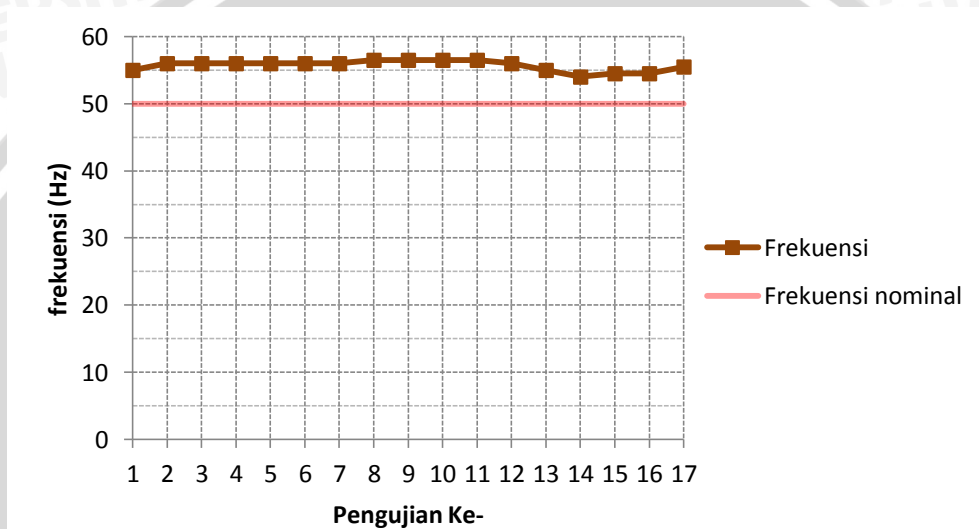
Respon putaran generator saat terjadi perubahan arus beban pada metode tanpa ELC menunjukkan nilai di atas putaran nominal generator. Fluktuasi putaran generator saat terjadi perubahan beban ditunjukkan oleh Gambar 5.20 dengan nilai putaran rata-rata 1666.12 rpm. Untuk metode ELC menunjukkan nilai putaran rata-rata bernilai

1515.82 rpm dengan fluktuasi putaran metode ELC ditunjukkan oleh Gambar 5.21.

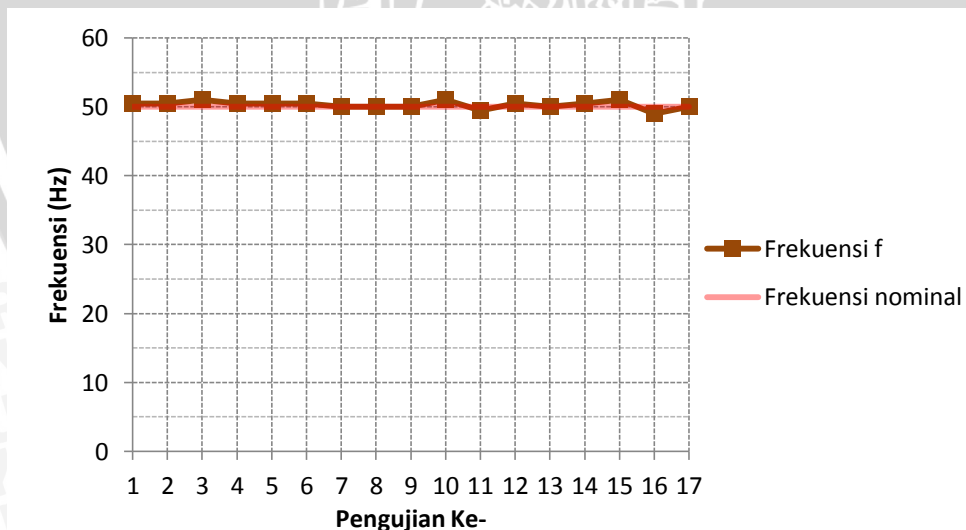
Tabulasi respon putaran generator ditunjukkan tabel berikut

Tabel 5.10 Tabulasi respon putaran generator

metode	kondisi putaran	rpm	selisih dari putaran nominal
tanpa ELC	minimum	1625,00	+8,33%
	maksimum	1694,00	+12,93%
	rata-rata	1666,12	+11,07%
ELC	minimum	1496,00	-0,27%
	maksimum	1540,00	+2,67%
	rata-rata	1515,82	+1,05%



Gambar 5.13 Fluktuasi frekuensi metode tanpa ELC



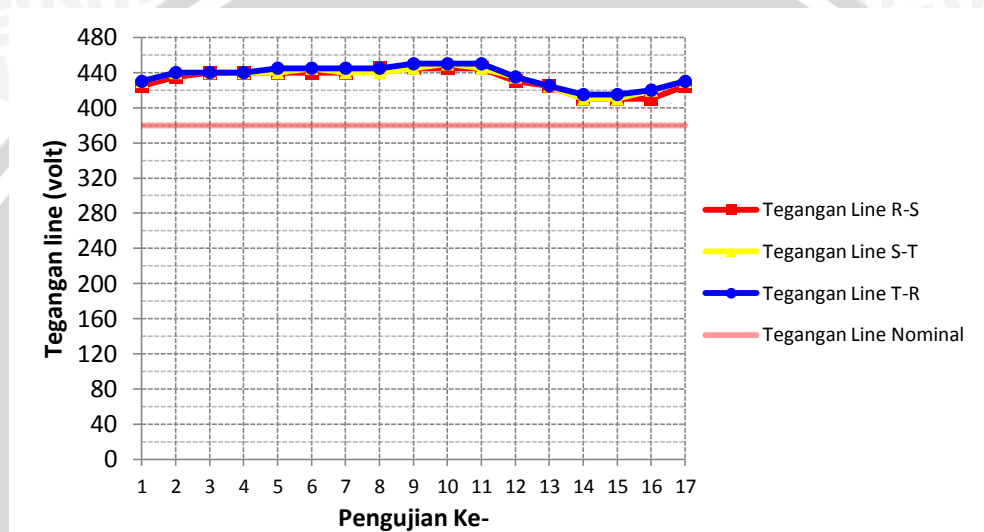
Gambar 5.14 Fluktuasi frekuensi metode ELC

Respon frekuensi saat pengujian dengan arus beban utama yang berubah-ubah pada metode tanpa ELC diperoleh nilai frekuensi rata-rata sebesar 55.68 Hz dengan fluktuasi frekuensi seperti pada gambar 5.22. Untuk pengujian metode ELC diperoleh

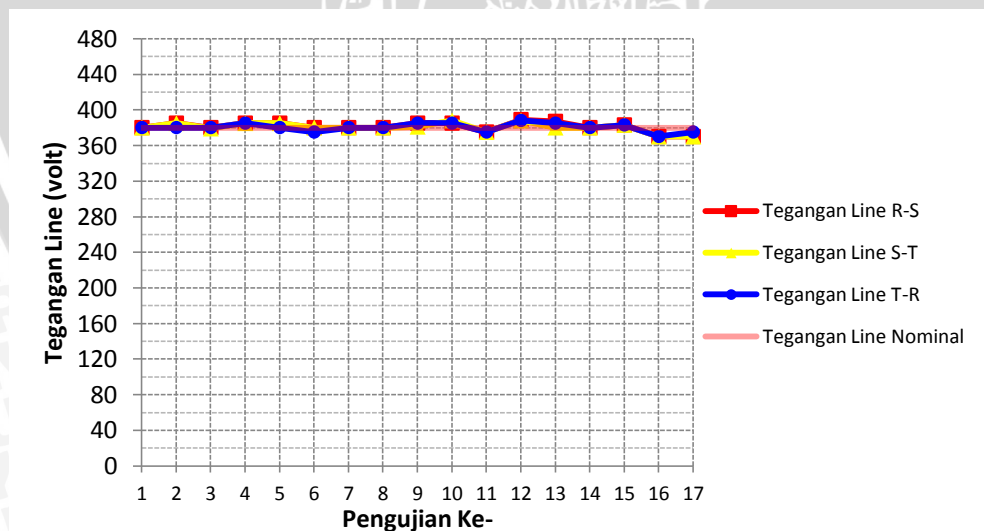
nilai frekuensi rata-rata sebesar 50.29 Hz dengan fluktuasi frekuensi seperti yang ditunjukkan Gambar 5.23. Tabulasi respon frekuensi ditunjukkan tabel berikut

Tabel 5.11 Tabulasi respon frekuensi

metode	kondisi frekuensi	hertz	selisih dari frekuensi nominal
tanpa ELC	minimum	54,0	+8,00%
	maksimum	56,5	+13,00%
	rata-rata	55,68	+11,35%
ELC	minimum	49,0	-2,00%
	maksimum	51,0	+2,00%
	rata-rata	50,29	+0,59%



Gambar 5.15 Fluktuasi tegangan antar fasa metode tanpa ELC



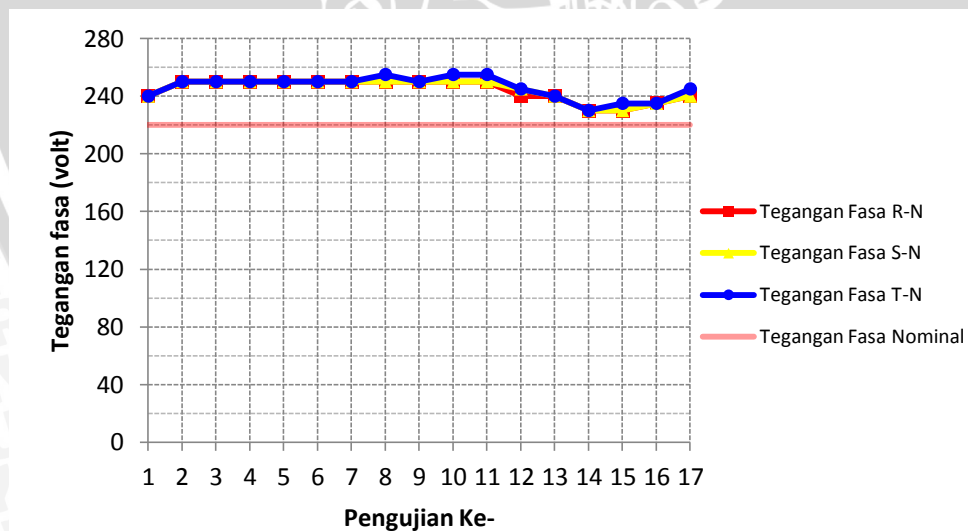
Gambar 5.16 Fluktuasi tegangan antar fasa metode ELC

Respon tegangan antar fasa V_{L-L} pada saat pengujian dengan metode tanpa ELC menunjukkan nilai rata-rata tegangan untuk $V_{R-S} = 432.35$ volt, $V_{S-T} = 434.41$ volt dan $V_{T-R} = 436.47$ volt dengan fluktuasi tegangan antar fasa pada metode tanpa ELC

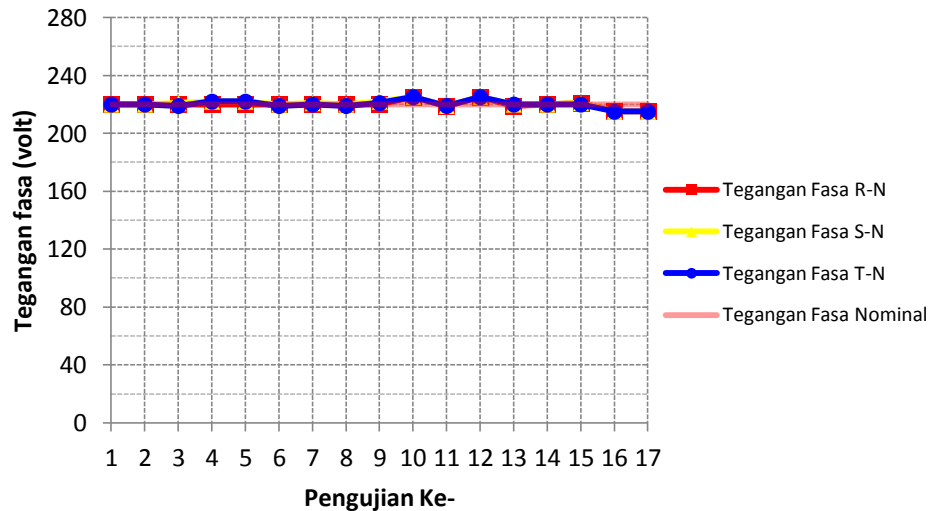
ditunjukkan pada Gambar 5.24. Untuk pengujian metode ELC menunjukkan nilai rata-rata tegangan untuk $V_{R-S} = 381.1$ volt, $V_{S-T} = 380.5$ volt dan $V_{T-R} = 380.4$ volt dengan fluktuasi tegangan antar fasa pada metode ELC ditunjukkan pada Gambar 5.25. Tabulasi respon tegangan antar fasa ditunjukkan tabel berikut

Tabel 5.12 Tabulasi respon tegangan antar fasa

metode	kondisi tegangan	antar fasa	volt	selisih dari tegangan nominal
tanpa ELC	minimum	r-s	410,00	+7,89%
		s-t	410,00	+7,89%
		t-r	415,00	+9,21%
	maksimum	r-s	445,00	+1,11%
		s-t	450,00	+18,42%
		t-r	450,00	+18,42%
	rata-rata	r-s	432,35	+13,78%
		s-t	434,41	+14,32%
		t-r	436,47	+14,86%
ELC	minimum	r-s	370,00	-2,63%
		s-t	370,00	-2,63%
		t-r	370,00	-2,63%
	maksimum	r-s	389,00	+2,40%
		s-t	388,00	+2,10%
		t-r	388,00	+2,10%
	rata-rata	r-s	381,10	+2,40%
		s-t	380,50	+0,10%
		t-r	380,40	+0,10%



Gambar 5.17 Fluktuasi tegangan fasa netral metode tanpa ELC



Gambar 5.18 Fluktuasi tegangan fasa netral metode ELC

Respon tegangan fasa netral V_{L-L} pada saat pengujian dengan metode tanpa ELC menunjukkan nilai rata-rata tegangan untuk $V_{R-N} = 244.41$ volt, $V_{S-N} = 244.71$ volt dan $V_{T-N} = 246.18$ volt dengan fluktuasi tegangan fasa netral pada metode ini ditunjukkan pada Gambar 5.26. Untuk pengujian metode ELC menunjukkan nilai rata-rata tegangan untuk $V_{R-N} = 219.9$ volt, $V_{S-N} = 220.5$ volt dan $V_{T-N} = 220.1$ volt dengan fluktuasi tegangan fasa netral pada metode ini ditunjukkan pada Gambar 5.27. Tabulasi respon tegangan fasa netral ditunjukkan tabel berikut

Tabel 5.13 Tabulasi respon tegangan fasa netral

metode	kondisi tegangan	fasa netral	volt	selisih dari tegangan nominal
tanpa ELC	minimum	r-n	230,00	+4,55%
		s-n	230,00	+4,55%
		t-n	230,00	+4,55%
	maksimum	r-n	250,00	+13,64%
		s-n	250,00	+13,64%
		t-n	255,00	+15,91%
	rata-rata	r-n	244,41	+11,10%
		s-n	244,71	+11,23%
		t-n	246,18	+11,90%
ELC	minimum	r-n	215,00	-2,27%
		s-n	215,00	-2,27%
		t-n	215,00	-2,27%
	maksimum	r-n	225,00	+2,30%
		s-n	225,00	+2,30%
		t-n	225,00	+2,30%
	rata-rata	r-n	219,90	-0,03%
		s-n	220,50	+0,20%
		t-n	220,10	+0,05%

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis di atas pengaturan beban menggunakan metode *electronic load controller* mampu menjaga nilai daya beban pada kisaran nilai daya pembangkitan sehingga nilai putaran (n), frekuensi (f), tegangan antar fasa (V_{L-L}) dan tegangan fasa netral (V_{L-N}) stabil pada nilai yang masih dapat ditoleransi. Berdasarkan hasil analisis pengujian ini modul *electronic load controller* yang telah dirancang mampu bekerja sesuai dengan tujuan awal ditulisnya penelitian ini yaitu menghasilkan modul *electric load controller* generator sinkron 3 fasa yang dapat menjaga sistem tetap stabil saat terjadi fluktuasi beban utama pada pembangkitan listrik tenaga mikrohidro.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Sensor arus ACS712 mampu mendeteksi perubahan arus menuju beban utama dengan memberikan respon berupa tegangan keluaran yang menjadi masukan mikrokontroler.
2. Rangkaian pemecutan yang dikontrol oleh mikrokontroler mampu memberikan sinyal untuk memicu komponen elektronika daya TRIAC melalui komponen *optocoupler* yang menjadi dasar sistem *electronic load controller*.
3. Modul *electronic load controller* mampu menjaga nilai daya beban pada kisaran daya pembangkitan dengan nilai fluktuasi terendah -5.72% , fluktuasi tertinggi $+4.89\%$, dan fluktuasi rata-rata $+1.05\%$ dari daya pembangkitan dengan cara mengalihkan arus saat tidak diserap beban utama menuju beban komplemen.
4. Modul *electronic load controller* mampu menjaga nilai putaran, frekuensi, tegangan antar fasa, dan tegangan fasa netral saat terjadi fluktuasi arus beban utama pada kisaran nilai nominalnya sehingga kerusakan peralatan listrik yang disebabkan fluktuasi nilai-nilai tersebut dapat diatasi.

6.2 Saran

Untuk penyempurnaan penelitian ini, ada beberapa saran yang perlu dilakukan antara lain :

1. Menambahkan beban ayun (*swing load*) pada beban komplemen yang berfungsi menambah pemakaian daya pada beban komplemen ketika perubahan beban utama belum mencapai pengaturan tap yang telah ditetapkan.
2. Mempertimbangkan kondisi faktor daya ($\cos \phi$) sebagai parameter sistem pengontrolan sehingga respon mikrokontroler yang lebih akurat.
3. Untuk memperbaiki sistem pengontrolan, dapat dipertimbangkan pengalihan beban secara halus (*smooth*) dengan sistem pengaturan sudut penyalan TRIAC dibandingkan dengan sistem step beban komplemen.
4. Pemanfaatan beban komplemen untuk hal-hal yang lebih bermanfaat dibanding hanya sekedar pemanas.
5. Menggunakan spesifikasi komponen yang lebih tinggi dari alat yang dibuat untuk kapasitas PLTMH yang lebih besar.

6. Mempertimbangkan pengaturan sistem *delay switch* pada sistem pengontrolan untuk mengetahui perubahan arus beban yang tidak kontinyu.



DAFTAR PUSTAKA

- Allegromicro. 2006. ACS712, *Fully Integrated, Half Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Massachusetts : Allegromicro.
- Arismunandar, Wiranto, 1997. Teknik Tenaga Listrik I. Bandung: ITB Press.
- Atmel. 2006. *ATmega8535/ATmega8535L, 8-bit AVR Microcontroller with 8 Kbytes in-System Programmable Flash*. California: Atmel.
- Bose, Bimal K. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Fifzgerald, A.E, Charles Kingley, Jr, Stephen, D, Umans. 1992. *Electric Machinery 5th edition*. Singapore: Mc.Graw-Hill, Inc
- Hasan, Achmad, 2006. Pengontrol Beban Elektronik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. P3 Teknologi Konversi dan Konservasi Energi Deputi Teknologi Informasi, Energi, Material dan Lingkungan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Mazda, Fraidoon. 1997. *Power Electronics Handbook 3rd Edition*. Oxford: Newnes.
- Paisey, Faourys Yudo Setiawan. 2009. Desain dan Rancang Bangun Kontrol Beban Elektronik pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. Yogyakarta : Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada.
- Rashid, Muhammad H. 2001. *Power Electronics Handbook*. London: Academic Press.

LAMPIRAN

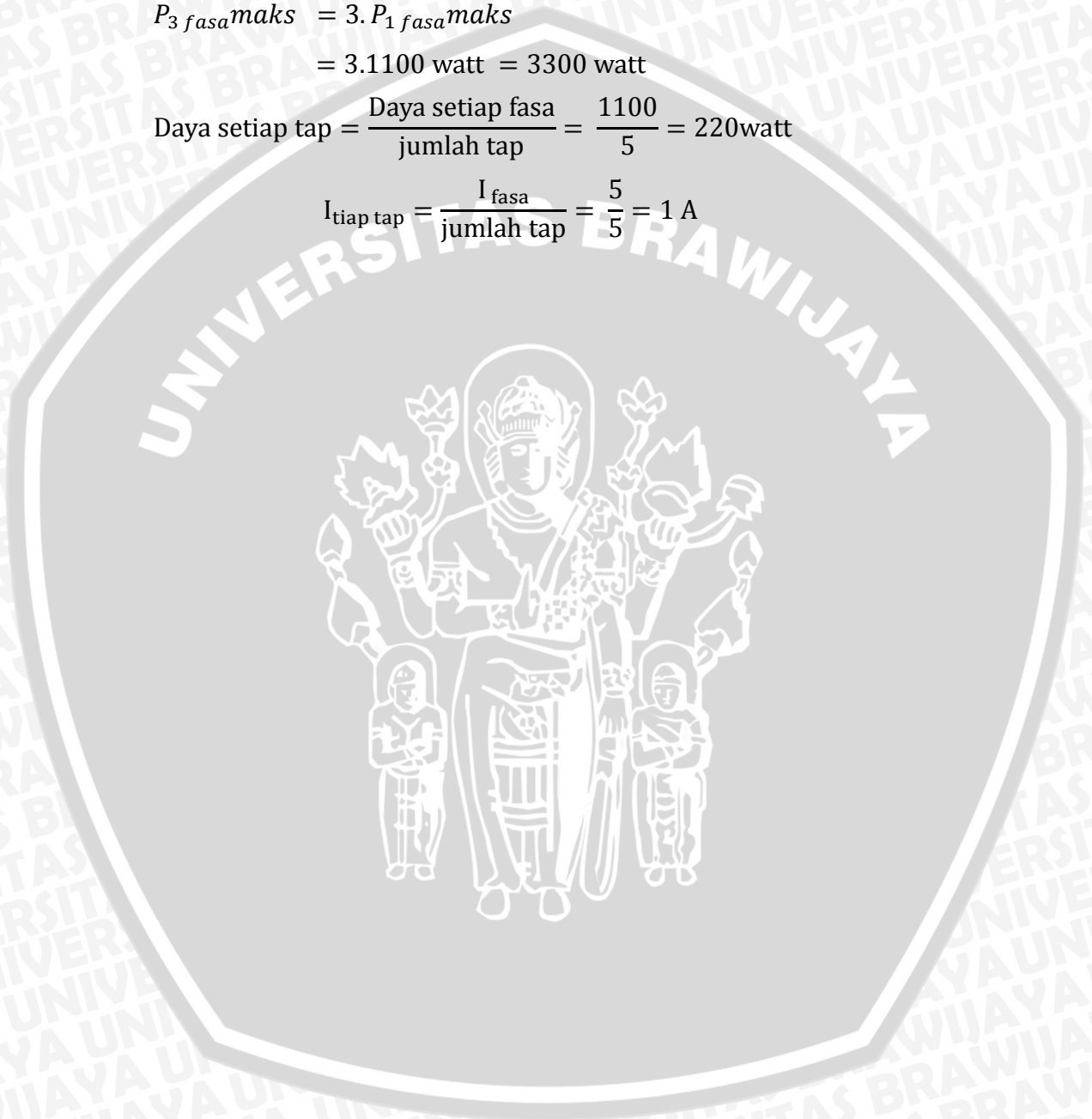
Lampiran 1 Perhitungan nilai pengujian

$$\begin{aligned}P_{1\text{fasa maks}} &= V \cdot I \cos \varphi \\ &= 220 \cdot 5.1 = 1100 \text{ watt}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{3\text{fasa maks}} &= 3 \cdot P_{1\text{fasa maks}} \\ &= 3 \cdot 1100 \text{ watt} = 3300 \text{ watt}\end{aligned}$$

$$\text{Daya setiap tap} = \frac{\text{Daya setiap fasa}}{\text{jumlah tap}} = \frac{1100}{5} = 220 \text{ watt}$$

$$I_{\text{tiap tap}} = \frac{I_{\text{fasa}}}{\text{jumlah tap}} = \frac{5}{5} = 1 \text{ A}$$



Dokumentasi





Kondisi luar PTLMH



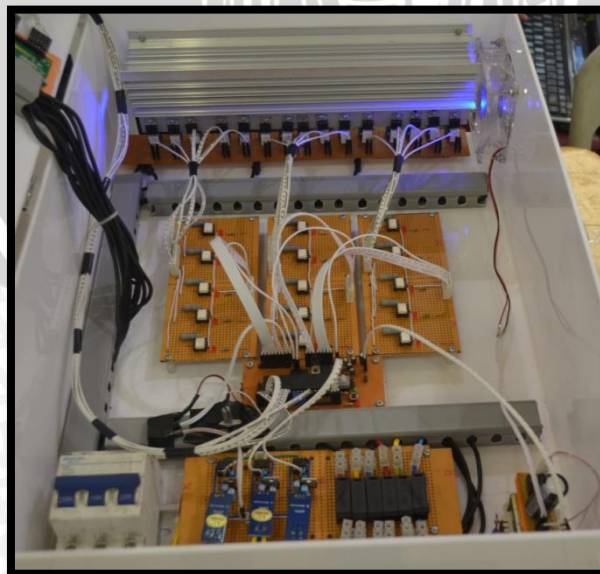
Kondisi di dalam PLTMH



Bagian depan ELC



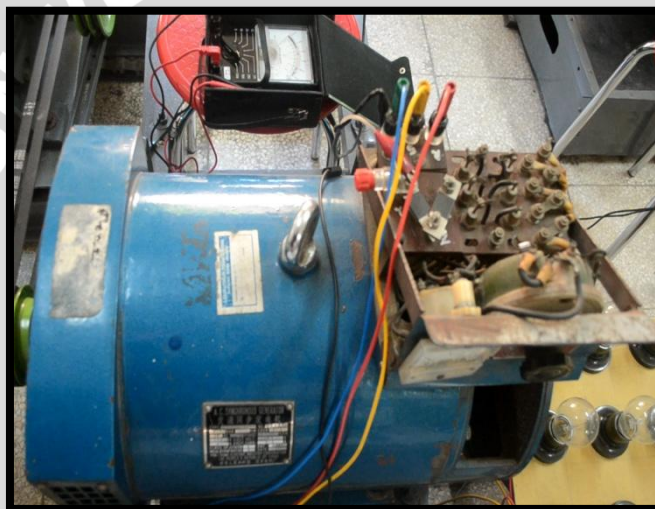
Tap ELC ke beban komplemen



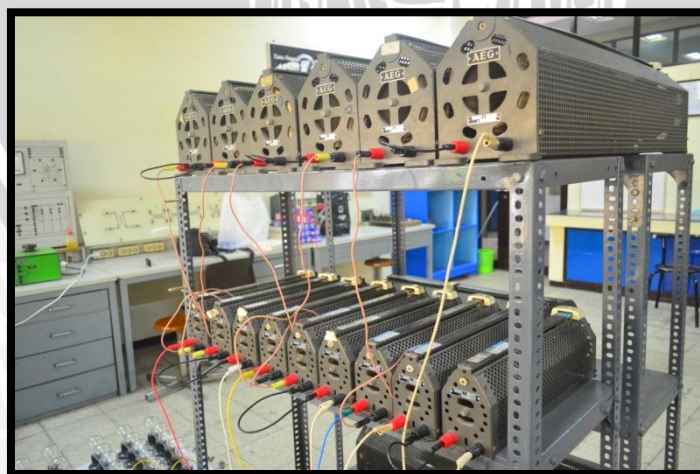
Bagian dalam ELC



Motor Induksi Tiga Fasa sebagai penggerak generator pengujian



Generator Sinkron 3 fasa



Resistor variabel sebagai beban utama pengujian




Lampu pijar sebagai beban komplemen pengujian



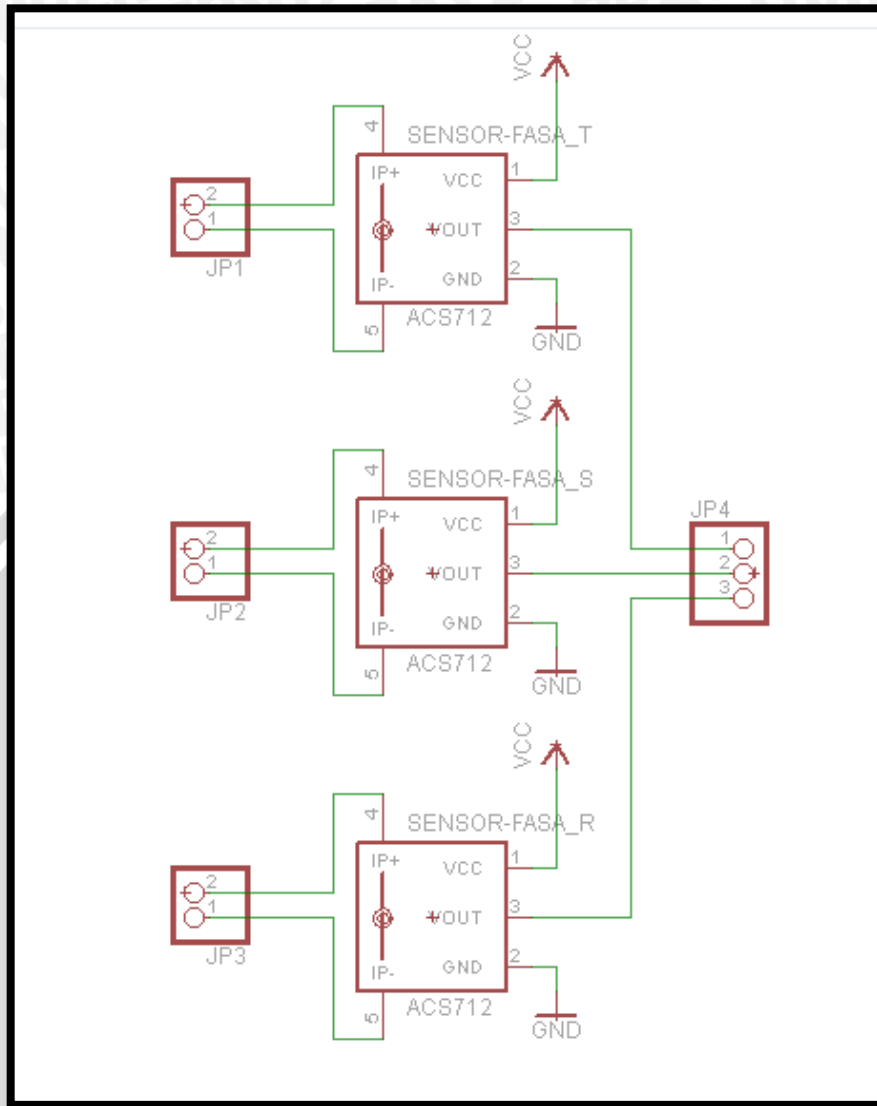
Keseluruhan sistem pengujian pembebanan generator sinkron



The logo of Universitas Brawijaya is a large, light gray shield-shaped emblem. It features a central white box with a blue border containing the text "Skematik Rangkaian". Below the text is a white line-art illustration of a group of figures, including a central figure in a long robe and two smaller figures on either side. The words "UNIVERSITAS BRAWIJAYA" are written in a semi-circle above the illustration.

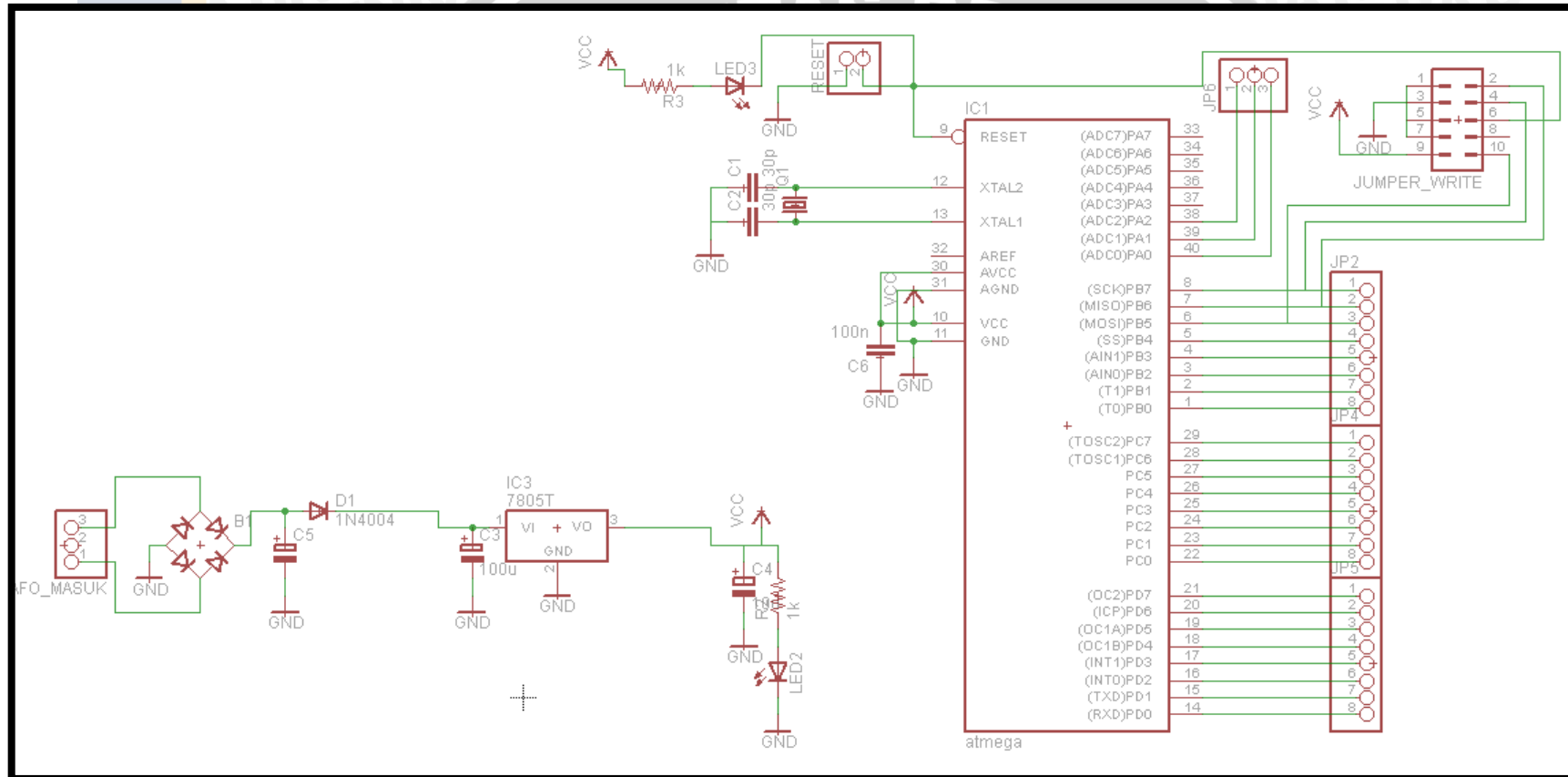
Skematik Rangkaian

A. Rangkaian Sensor Arus



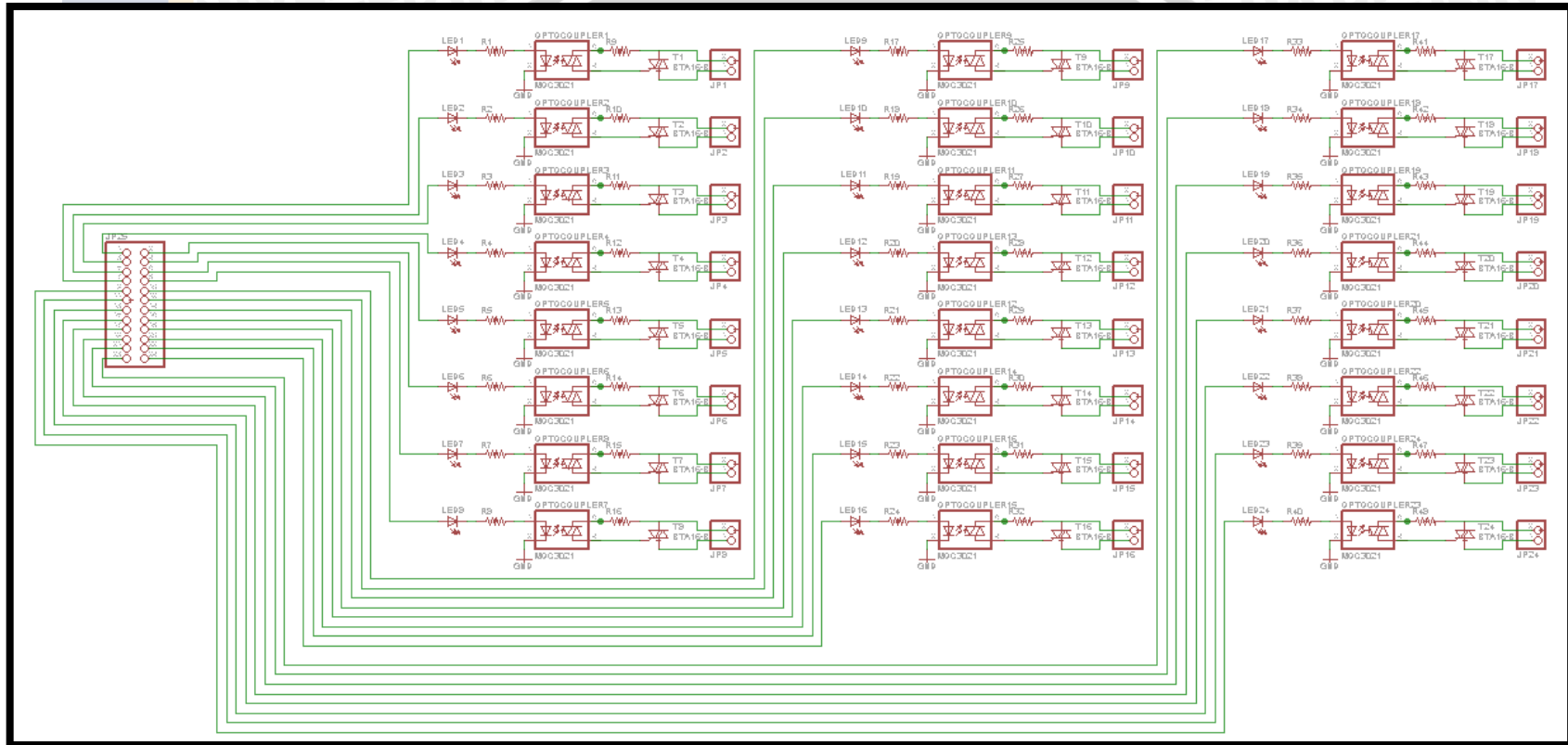
Skematik rangkaian sensor arus

B. Rangkaian Mikrokontroler



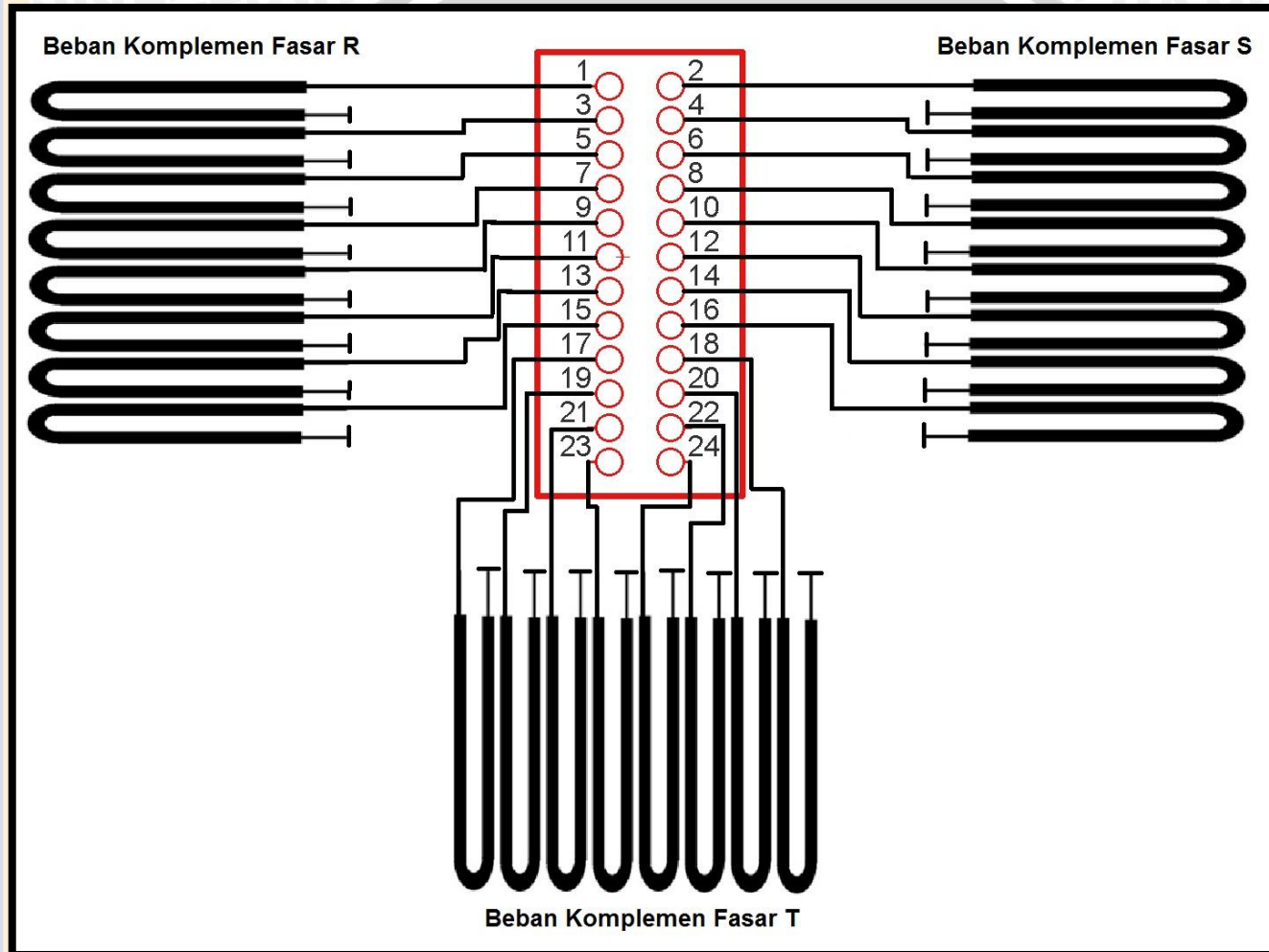
Skematik rangkaian mikrokontroler

C. Rangkaian Pemicuan



Skematik rangkaian pemicuan

D. Rangkaian Beban Komplemen



Skematik tap beban komplemen

Lampiran 4 Hasil Perancangan Perangkat Lunak Menggunakan Bahasa Pemrograman C pada *Software CodeVisionAVR*

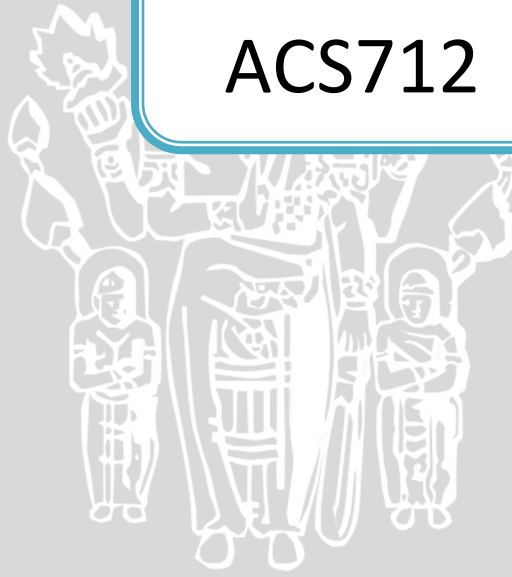


**Listing
Program**



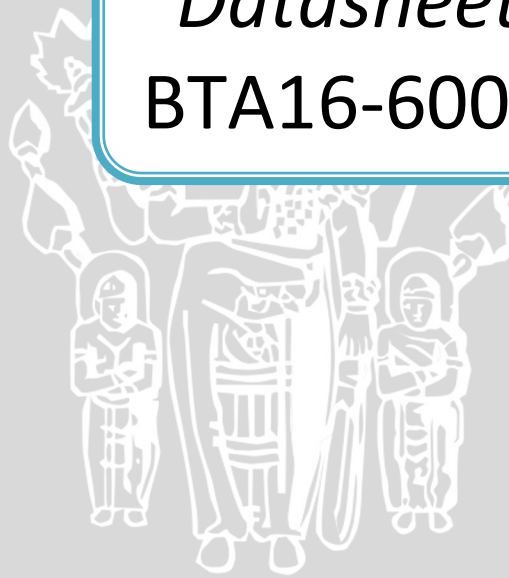
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Datasheet
ACS712



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Datasheet
BTA16-600B



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Datasheet
MOC3021

