

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk menganalisis permasalahan yang terjadi di PLTMH. Salah satu permasalahan yang ada adalah kondisi beban yang tidak kontinu sementara suplai daya dari generatornya kontinu. Hal ini dikarenakan tidak adanya pengaturan debit air (Harvey, 1993). Akibatnya, frekuensi dan tegangan keluaran generator akan naik saat generator tidak dibebani.

Sistem pengendalian frekuensi dan tegangan generator pada PLTMH terbagi menjadi dua, yaitu pengendalian mekanik dan elektrik (Mbabazi, 2010). Pengendalian secara mekanik yaitu menggunakan peralatan *governor* sedangkan pengendalian secara elektrik adalah dengan menggunakan *Electronic Load Controller* (ELC). *Governor* adalah katup pada turbin yang bisa ditutup untuk menyesuaikan aliran air dengan beban listrik yang digunakan. Penggunaan *governor* sendiri dinilai kurang ekonomis, karena harganya hampir sama atau bahkan melebihi harga turbin generator (Hasan, 2006). Sehingga, banyak PLTMH di dunia lebih memilih mempekerjakan operator dibandingkan menggunakan *governor* tersebut.

Kemudian, sistem *Electronic Load Controller* (ELC) mulai dikembangkan. ELC adalah peralatan elektronik pengendali frekuensi generator. ELC berfungsi untuk mengatur kestabilan beban generator dengan cara mengalihkan daya listrik ke beban komplemen secara elektronik bila terjadi penurunan pemakaian beban konsumen (beban sesungguhnya), sehingga putaran generator akan selalu konstan.

Perancangan desain ELC telah banyak dilakukan oleh berbagai pihak. Salah satu yang paling populer adalah Humming Bird ELC yang dikembangkan oleh Jan Portegijs (Portegijs, 2000). ELC jenis ini menggunakan prinsip pengendalian sudut fasa TRIAC dengan komponen-komponen yang banyak dan relatif rumit. Rangkaian ELC ini masih sulit dikembangkan.

Kemudian Manfred Mornhinweg (<http://ludens.cl/Electron/picelc/picelc.html>) membuat ELC yang merupakan pengembangan dari jenis Humming Bird. ELC dari Manfred Mornhinweg ini menggunakan prinsip pemecuan beberapa TRIAC untuk beberapa beban komplemen. Sayangnya, sistem ELC Manfred Mornhinweg ini masih memiliki kelemahan. Pada beban komplemen resistif yang digunakan kerap terjadi kedip tegangan.

Selama ini, ELC dirancang hanya menggunakan beban resistif sebagai beban komplemennya. Pada penelitian ini, dilakukan kajian terhadap perancangan ELC yang menggunakan mikrokontroler ATmega16 sebagai pengendali beban komplemen dinamik, di samping penggunaan beban komplemen resistif yang sudah biasa dilakukan. Beban komplemen dinamik itu berupa motor induksi dan motor penggerak kipas angin. Ketika terjadi penurunan beban utama, maka beban komplemen resistif akan aktif lebih dahulu dan pada penurunan beban utama yang lebih banyak, beban komplemen dinamik akan aktif.

1.2 Rumusan Masalah

Pokok permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana mempertahankan kestabilan tegangan dan frekuensi keluaran generator sinkron menggunakan beban komplemen jika terjadi perubahan beban utama.
2. Bagaimana merancang suatu sistem pengendali yang dapat secara otomatis membebani generator dengan beban komplemen resistif ketika beban utamanya berkurang.
3. Bagaimana merancang pengalihan otomatis daya generator ke beban komplemen dinamik dan/atau beban komplemen resistif ketika beban utamanya berkurang lebih banyak.

1.3 Batasan Masalah

Pelaksanaan penelitian skripsi ini dilingkupi oleh batasan masalah sebagai berikut:

1. Generator yang akan digunakan untuk pengujian adalah yang ada di laboratorium mesin elektrik, dengan spesifikasi generator sinkron satu fasa 230 V; 8,7 A; 50 Hz; 1500 rpm; dan daya pembebanan 1 kW.
2. Motor induksi yang digunakan untuk pengujian berupa motor induksi satu fasa (motor kapasitor) dengan spesifikasi: 220 V; 2 A; 50 Hz; $n = 2850$ rpm; daya 300 W; dan $\cos \varphi = 0,97$ dan motor penggerak kipas angin dengan spesifikasi: 220 V; 50 Hz; dan daya 55 W. Total daya kedua motor ini adalah 355 W.
3. Parameter yang diukur adalah nilai tegangan dan arus pada keluaran generator, motor induksi, dan beban komplemen resistif.
4. Penelitian ini dibuat dalam skala laboratorium sesuai spesifikasi generator di atas.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan membuat perangkat *Electronic Load Controller* yang berfungsi mempertahankan frekuensi dan tegangan keluaran generator sinkron akibat fluktuasi pemakaian beban konsumen, serta dapat diaplikasikan untuk menyuplai beban komplemen resistif serta dinamik, yang dalam penelitian ini berupa motor induksi dan motor penggerak kipas angin.

1.5 Sistematika Pembahasan Skripsi

Sistematika pembahasan penelitian tersusun dengan urutan sebagai berikut:

- BAB I : Berisi latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup, tujuan, dan sistematika pembahasan.
- BAB II : Berisi dasar teori atau pustaka yang digunakan sebagai dasar penelitian yang dilakukan serta mendukung perancangan dan pembuatan *Electronic Load Controller* (ELC) untuk beban komplemen resistif dan dinamik yang meliputi : generator sinkron, teori mengenai beban komplemen, penelitian tentang pembuatan ELC beserta komponen yang bisa digunakan di dalamnya, serta prinsip motor induksi.
- BAB III : Berisi tahapan penyelesaian skripsi yang meliputi studi literatur, perancangan alat dan sistem keseluruhan, pengujian, analisis, serta pengambilan kesimpulan dan saran.
- BAB IV : Berisi pembahasan, analisis, dan perancangan alat yang diajukan dalam penelitian dengan memperhatikan hasil perhitungan yang telah diselesaikan.
- BAB V : Berisi pengujian dan analisis performansi dari hasil perancangan alat dengan kemampuan alat sehingga mampu disimpulkan apakah peralatan yang telah dirancang sesuai atau tidak.
- BAB VI : Berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilaksanakan beserta saran dari penulis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tinjauan pustaka yang digunakan untuk mendukung perancangan dan pembuatan *Electronic Load Controller* (ELC) untuk beban komplemen dinamik, yang meliputi: generator sinkron, teori mengenai beban komplemen, penelitian tentang pembuatan ELC beserta komponen yang bisa digunakan di dalamnya, serta prinsip motor induksi.

2.1 Generator Sinkron

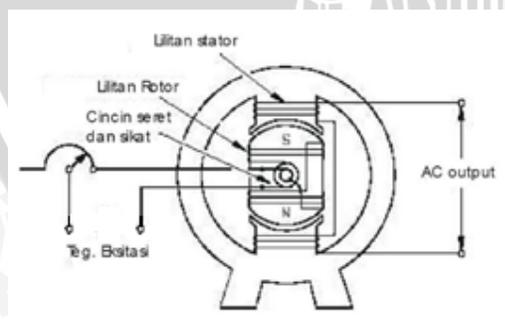
Maksud kata sinkron pada generator sinkron adalah frekuensi listrik yang dihasilkan sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron (diputar dengan penggerak mula) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan 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 (Fitzgerald, 2003).

$$f = \frac{n_s \cdot p}{120} \quad (2-1)$$

di mana : f = frekuensi stator (Hz)

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

p = jumlah kutub.



Gambar 2.1 Konstruksi generator sinkron

Sumber : <http://dc166.4shared.com/img/ofZWDSwf/preview.html>

Generator sinkron seperti Gambar 2.1, menggunakan sumber tegangan DC untuk menciptakan medan magnet yang diperlukan untuk menghasilkan tegangan pada sisi

keluaran generator. Oleh karenanya, penguatan medan dari generator tidak tergantung pada jaringan listrik sehingga ideal untuk sistem pembangkitan yang berdiri sendiri.

Prinsip kerja dari generator sinkron adalah sebagai berikut:

- 1) Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan menyuplai 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.
- 3) 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.

Dengan memutar generator sinkron pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan (E_0) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator, sesuai Persamaan 2.2 (Zuhal, 1991).

$$E_0 = c \cdot n \cdot \phi \quad (2-2)$$

di mana : c = konstanta mesin

n = putaran sinkron

ϕ = fluks yang dihasilkan I_f .

Dalam keadaan berbeban, arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar itu bersifat reaktif dan dikenal juga dengan reaktansi pemagnet (X_m). Reaktansi pemagnet ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s).

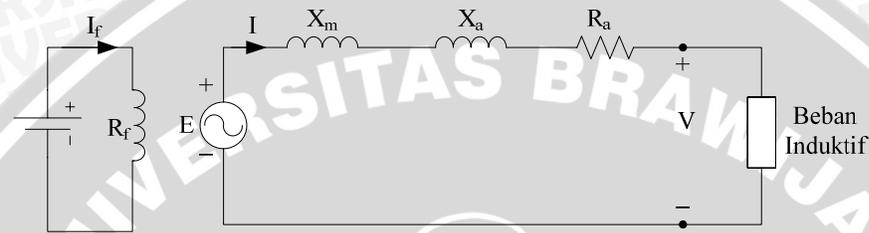
Reaksi jangkar ini menimbulkan rugi tegangan yang nilainya dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.3 dan 2.4 (Zuhal, 1991).

$$E = V_{rugi} + V \quad (2-3)$$

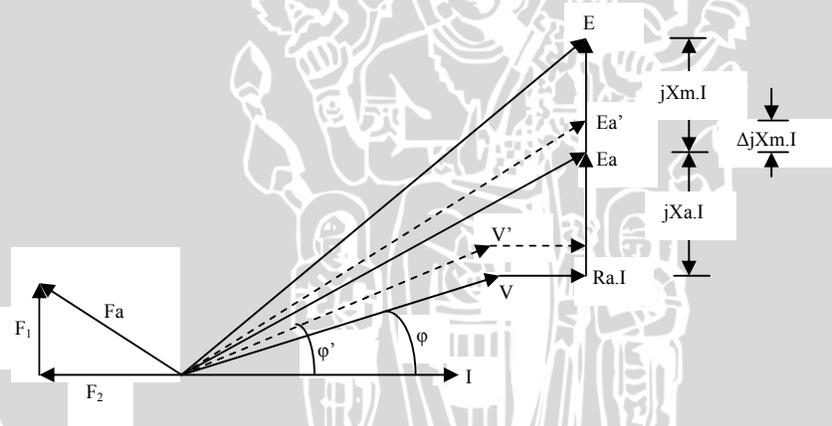
$$V_{rugi} = R_a \cdot I + j(X_m \cdot I + X_a \cdot I) \quad (2-4)$$

- di mana : E = gaya gerak listrik
- V = tegangan terminal
- R_a = resistansi jangkar
- X_a = reaktansi fluks bocor
- X_m = reaktansi pemagnet.

Sedangkan rangkaian pengganti generator sinkron dengan beban induktif dan diagram fasornya ditunjukkan oleh Gambar 2.2 dan 2.3 (Zuhail, 1991).



Gambar 2.2 Rangkaian pengganti generator sinkron dengan beban induktif
Sumber: Zuhail, 1991



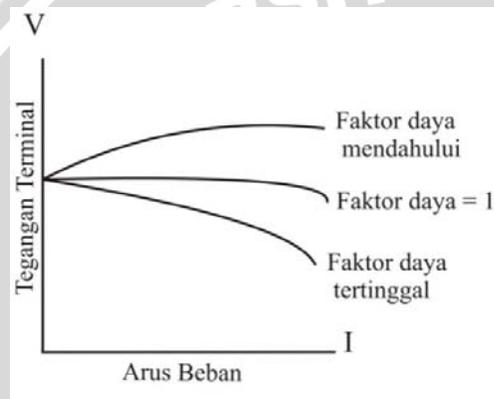
Gambar 2.3 Diagram fasor generator sinkron dengan beban induktif
Sumber: Zuhail, 1991

E merupakan gaya gerak listrik yang dihasilkan gaya gerak magnet F_2 . E_a merupakan gaya gerak listrik yang dihasilkan gaya gerak magnet F_a . Adanya kenaikan daya beban yang dalam hal ini juga kenaikan arus beban I menyebabkan reaksi jangkar dengan gaya gerak magnet F_1 .

V adalah tegangan terminal dan I adalah arus beban yang mengalir pada stator. Karena adanya reaksi jangkar, harga X_m tidak konstan tetapi berubah sesuai dengan perubahan beban. Untuk mendapatkan nilai E yang konstan, F_2 harus dibuat konstan. Jika arus beban I bertambah, reaksi jangkar F_1 bertambah dan vektor F_a menjadi lebih

kecil. Dengan sendirinya E_a menjadi lebih kecil, demikian pula V . Penurunan E_a ini mengakibatkan turunnya putaran dan frekuensi generator sesuai persamaan 2.2 dan 2.1.

Ada tiga macam sifat beban yang terhubung dengan generator, yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Akibat pembebanan ini akan berpengaruh terhadap tegangan beban dan faktor dayanya. Gambar 2.4 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*).



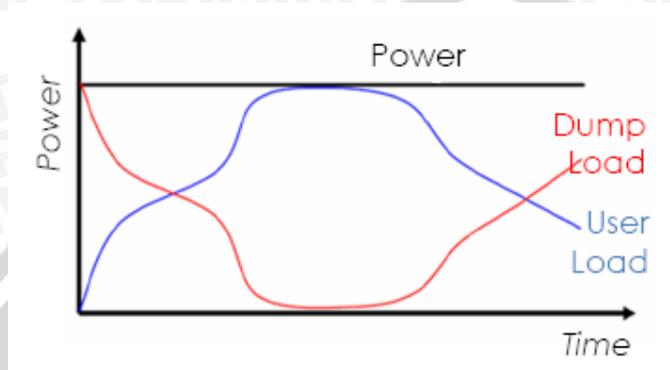
Gambar 2.4 Karakteristik generator sinkron berbeban
Sumber: Zuhul, 1991

2.3 Beban Komplemen

Pada sistem mikrohidro dengan pengendali elektronik, beban komplemen (dikenal juga dengan *ballast load*) disuplai dengan daya yang tidak digunakan oleh beban konsumen melalui ELC. Jumlah beban komplemen yang terdapat pada suatu ELC berpengaruh pada sistem. Memiliki 2 atau 3 beban komplemen dibandingkan hanya sebuah memiliki beberapa keuntungan, antara lain (Portegijs, 2000):

1. Kapasitas tiap beban komplemen kini hanya setengah atau sepertiga dari sebuah beban. Sehingga *noise* yang timbul bisa berkurang.
2. Daya yang dialihkan ke beban komplemen menjadi lebih proporsional, sehingga ELC akan bekerja lebih optimal.
3. Karena ada dua atau tiga TRIAC yang bekerja paralel, rating TRIAC bisa lebih rendah.

Saat daya yang digunakan oleh beban konsumen turun, daya yang disuplai generator tetap konstan. Perubahan ini dideteksi oleh ELC, kemudian mengalihkan daya berlebih ke beban komplemen. Gambar 2.5 menunjukkan daya konstan yang dihasilkan generator dengan menyeimbangkan daya pada beban konsumen dengan daya ke beban komplemen.



Keterangan :

: Daya beban utama

: Daya beban komplemen

Gambar 2.5 Daya generator = daya beban konsumen + daya beban komplemen

Sumber : Renerconsys, 2010

2.3.1 Beban Komplemen Resistif

Pada umumnya, perancang ELC menggunakan beban komplemen yang bersifat resistif. Beban resistif ini bersifat statik dengan nilai resistansi dan disipasi daya yang tetap. Beban komplemen ini biasanya berupa kawat nikelin atau lampu pijar. Penggunaan kawat nikelin memiliki kekurangan, yaitu biayanya yang lebih mahal daripada lampu pijar. Selain itu, perlu diperhitungkan dimensi kawat yang digunakan sesuai dengan nilai resistansi yang diperlukan. Sedangkan penggunaan lampu pijar sebagai beban komplemen lebih praktis. Selain itu, lampu juga dapat dimanfaatkan sebagai sarana penerangan.

2.3.2 Motor Induksi Sebagai Beban Dinamik

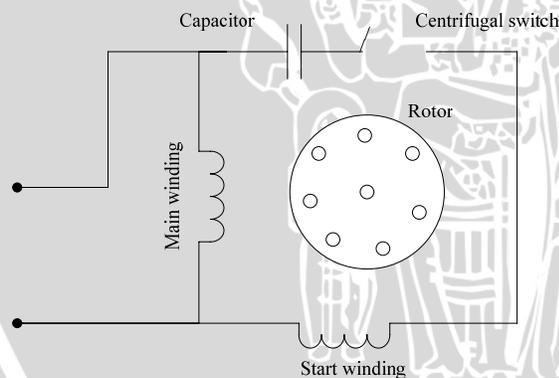
Beban dinamik adalah beban yang menghasilkan gerakan/putaran dengan intensitas yang tidak tetap dan memiliki karakteristik tertentu. Salah satu jenis beban dinamik adalah motor induksi. Motor induksi memiliki karakteristik yang berbeda-beda sesuai jenis motor induksi yang digunakan dan juga jenis beban yang terhubung dengan motor tersebut.

Saat ini, penggunaan motor induksi satu fasa adalah yang paling banyak dibandingkan motor jenis lainnya (Parekh, 2003). Sesuai namanya, motor ini memiliki

satu belitan stator (belitan utama) dan beroperasi pada sumber tegangan satu fasa. Jenis rotor yang digunakan adalah sangkar tupai (*squirrel cage*).

Motor induksi satu fasa tidak dapat melakukan starting sendiri. Saat motor terhubung dengan sumber tegangan satu fasa, belitan utamanya dialiri arus AC. Arus ini menghasilkan medan magnet. Meski timbul medan magnet, torsi yang mampu membuat motor berputar belum dicapai. Hal ini disebabkan medan magnet yang dihasilkan hanya berupa *pulsating magnetic field* (denyutan). Karenanya, motor membutuhkan mekanisme pengasutan untuk membuat rotornya berputar.

Pada penelitian ini, penulis menggunakan motor induksi satu fasa dengan mekanisme pengasutan menggunakan kapasitor. Mekanisme pengasutan dengan kapasitor seperti pada Gambar 2.6 adalah : saat motor dicatu sumber tegangan, sudut fasa arus pada belitan utama tertinggal dari sudut fasa tegangan sumber akibat adanya impedansi belitan utama. Pada waktu yang sama, arus pada belitan pengasutan mendahului/tertinggal dari tegangan sumber tergantung impedansi belitan pengasutan. Interaksi antara medan magnet yang dihasilkan belitan utama dengan medan magnet belitan pengasutan menghasilkan medan magnet resultan yang berputar pada satu arah. Sehingga motor berputar mengikuti arah medan putar tersebut.



Gambar 2.6 Mekanisme pengasutan dengan kapasitor
Sumber : Parekh, 2003

Motor induksi lebih banyak digunakan dibandingkan motor DC karena lebih ekonomis dan memiliki keandalan dalam pengoperasiannya. Selain itu, pemeliharaan motor induksi juga lebih mudah. Pengendalian motor induksi dapat dilakukan secara konvensional menggunakan piranti utama magnetik kontaktor. Pengendalian konvensional ini menghasilkan unjuk kerja yang sangat terbatas yakni tegangan dan kecepatan putaran motor harus sesuai dengan kapasitasnya (*rating*-nya) (Djatkiko,

2009). Perkembangan piranti semikonduktor yang semakin pesat memungkinkan pengendalian motor induksi dilakukan secara elektronis.

Dalam aplikasi nyata terdapat berbagai variasi dari beban motor dengan karakteristik torsi terhadap waktu yang berbeda (Pillai, 2004). Beberapa jenis beban motor berdasarkan torsinya antara lain:

1. Torsi kontinu dan beban konstan : pompa dan kipas angin
2. Torsi kontinu dan beban variabel : konveyor dan kerekan
3. *Pulsating load* : kompresor
4. *Impact load* : penggilingan baja
5. *Short time intermittent* : crane, excavator
6. *Short time load* : motor servo

Adanya perubahan torsi motor yang digunakan akan berimbas pada perubahan daya yang digunakan oleh motor sesuai Persamaan 2.5.

$$\tau = \frac{P - P_{rugi}}{\omega} \quad (2-5)$$

di mana : τ = torsi motor

P = daya masukan motor

P_{rugi} = daya rugi tembaga dan inti besi

ω = kecepatan motor.

Perubahan daya yang terjadi ini akan menyebabkan perubahan nilai arus yang mengalir ke beban generator sehingga menyebabkan perubahan pada tegangan keluaran, putaran, dan frekuensi generator. Semakin besar torsi yang dibutuhkan motor, maka penurunan tegangan keluaran, putaran, dan frekuensi generator semakin besar pula.

2.4 Electronic Load Controller (ELC)

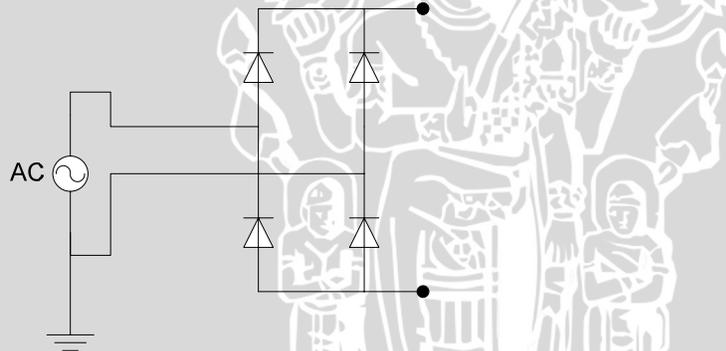
Pengendalian tegangan dan frekuensi pada PLTMH dapat dilakukan lebih mudah dengan menggunakan ELC. Pengendalian ini dipilih karena dapat merespon dengan cepat perubahan beban konsumen, dapat dibuat dari komponen yang murah, serta tidak membutuhkan perawatan yang rumit.

Pada PLTMH yang dilengkapi dengan ELC, turbin berputar pada daya penuh dan pengendalian kecepatan/frekuensi dilakukan dengan membandingkan daya listrik keluaran generator dengan daya hidrolik masukan. Sebuah ELC adalah *electronic governor* yang berfungsi sebagai pengendali frekuensi dan/atau tegangan pada generator dengan mengalihkan energi tak terpakai ke beban komplemen.

ELC terdiri dari beberapa komponen elektronika yang dirangkai menjadi satu modul. Beberapa komponen yang umum digunakan pada suatu ELC antara lain transformator penurun tegangan, rangkaian penyearah gelombang penuh, dan *voltage regulator*.

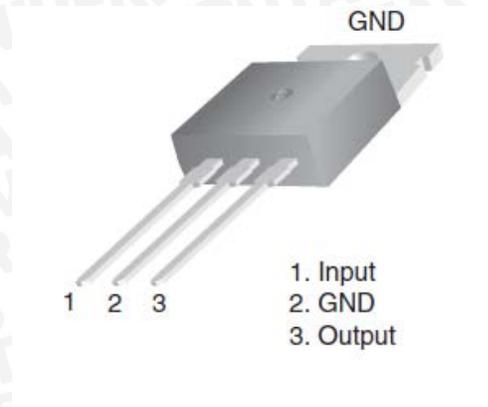
Transformator adalah suatu peralatan listrik sederhana yang terdiri dari dua atau lebih rangkaian listrik yang dikopel dengan rangkaian magnetik (Fitzgerald, 2003). Salah satu jenis dari transformator adalah transformator penurun tegangan (*step down transformer*). Pada ELC, transformator penurun tegangan digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran generator dari 220 V ke 9 V. Hal ini disebabkan rangkaian ELC adalah rangkaian elektronika yang membutuhkan tegangan rendah .

Setelah tegangan generator diturunkan oleh transformator, maka selanjutnya digunakan rangkaian penyearah gelombang penuh untuk menyearahkan tegangan bolak balik menjadi tegangan DC yang dibutuhkan oleh rangkaian mikrokontroler. Rangkaian penyearah gelombang penuh ini terdiri dari 4 buah dioda yang disusun seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Rangkaian penyearah gelombang penuh
Sumber : Rashid, 2001

Sebelum digunakan untuk mencatu mikrokontroler, tegangan yang sudah disearahkan oleh rangkaian penyearah gelombang penuh harus diturunkan lagi menjadi tegangan DC 5 volt. Oleh karenanya, digunakan komponen *voltage regulator* LM7805. LM7805 adalah komponen dengan tiga buah kaki (input, output, dan ground) yang mampu menghasilkan tegangan keluaran yang tetap antara 5-24 volt sesuai kebutuhan (Fairchild, 2012). Bentuk fisik dari LM7805 tampak pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bentuk fisik *voltage regulator* 7805
 Sumber : Fairchild, 2012

2.4.1 TRIAC (*Triode for Alternating Current*)

Salah satu komponen yang juga biasa digunakan pada suatu ELC sebagai saklar arus yang menuju beban komplemen adalah TRIAC. TRIAC merupakan gabungan dua *thyristor* yang terpasang antiparalel yang terintegrasi dalam satu komponen dengan sebuah terminal *gate*. Aplikasi praktis dari penggunaan TRIAC sebagai saklar elektronik pada umumnya sebagai pengatur tegangan AC, antara lain: VAR kompensator, saklar statis, *soft starter*, dan *driver* motor (Rashid, 2001).

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. Selain itu, pemicuan TRIAC dikenal tidak simetris. Maksudnya, TRIAC tidak akan terpicu pada tepat tegangan yang sama antara polaritas positif dengan negatif.

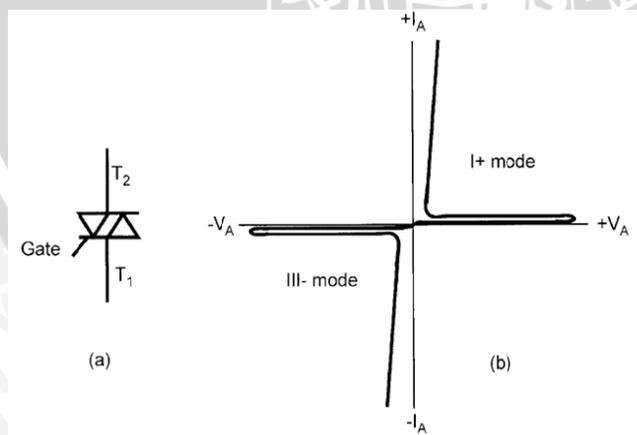
TRIAC memiliki rating tertentu yang tertera pada *datasheet*-nya. Rating yang tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.1.

| 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 switching conditions) |
| 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) |

Tabel 2.1 Rating TRIAC yang umum disertakan.
 Sumber: Rashid, 2001

TRIAC pada dasarnya merupakan komponen dua arah, kerana itulah terminalnya tidak dapat disebut sebagai anoda maupun katoda. Sebagai gantinya, terminalnya disebut MT_1 dan MT_2 . Jika tegangan terminal MT_2 lebih positif terhadap terminal MT_1 , TRIAC dipicu dengan memberikan sinyal pada *gate* dan terminal MT_1 . Bila MT_2 lebih negatif terhadap terminal MT_1 maka pemicuan dilakukan dengan memberikan sinyal pulsa negatif pada *gate* dan terminal MT_1 . Tanpa memperdulikan kedua polaritas sinyal *gate*, TRIAC dapat dinyalakan baik dengan 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). Simbol dan karakteristik TRIAC ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Simbol dan karakteristik $v - i$ dari TRIAC.
 Sumber: Bose, 2002

2.4.2 Mikrokontroler ATmega16

Pada suatu ELC yang berbasis mikrokontroler, komponen mikrokontroler inilah yang berfungsi sebagai pengendali aktif tidaknya komponen elektronika daya yang terhubung dengan beban komplemen. Mikrokontroler dianalogikan sebagai sebuah sistem komputer yang dikemas dalam sebuah *chip*. Artinya bahwa di dalam sebuah *IC* mikrokontroler sebetulnya sudah terdapat kebutuhan minimal agar mikrokontroler dapat bekerja, yaitu meliputi mikroprosesor, ROM, RAM, I/O, dan *clock* seperti halnya yang dimiliki oleh sebuah PC.

Mengingat kemasannya yang hanya berupa sebuah *chip* dengan ukuran yang relatif kecil, tentu saja spesifikasi 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.

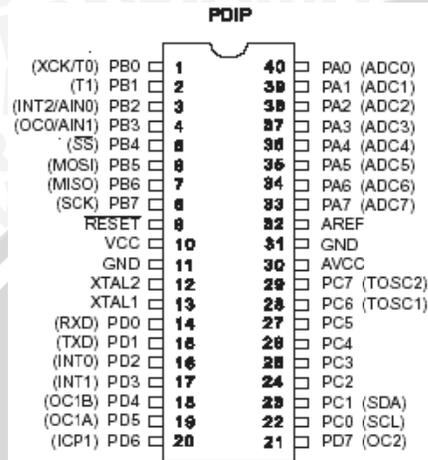
Berbagai jenis mikrokontroler yang digunakan selama ini dan masing-masing memiliki keluarga atau seri sendiri-sendiri, salah satunya adalah mikrokontroler AVR. Mikrokontroler AVR ini memiliki beberapa tipe berdasarkan jumlah dan fitur pin yang dimilikinya. Salah satunya adalah ATmega16.

Mikrokontroler ATmega16 mempunyai fitur utama sebagai berikut:

1. Sistem mikroprosesor 8 bit berbasis RISC dengan kecepatan maksimal 16 MHz
2. Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu *Port A*, *Port B*, *Port C*, dan *Port D*
3. ADC 10 bit sebanyak 8 saluran. ADC (*Analog to Digital Converter*) adalah fitur pada mikrokontroler untuk mengubah masukan berupa sinyal analog untuk diolah menjadi sinyal digital sesuai kebutuhan yang diinginkan.
4. Tiga buah *Timer/Counter* dengan kemampuan perbandingan
5. CPU yang terdiri atas 32 buah register
6. *Watchdog Timer* dengan osilator internal. ATmega16 dapat pula menggunakan kristal 12 MHz sebagai osilator eksternal.
7. SRAM sebesar 512 byte
8. Memori *Flash* sebesar 8 kb dengan kemampuan *Read While Write*
9. Unit interupsi internal dan eksternal

10. Port antarmuka SPI
11. EEPROM sebesar 512 byte yang dapat diprogram saat operasi
12. Antarmuka komparator analog
13. Port USART untuk komunikasi serial.

Konfigurasi pin mikrokontroler ATmega16 ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Diagram pin ATmega16
Sumber : Atmel, 2006

2.4.3 Optocoupler

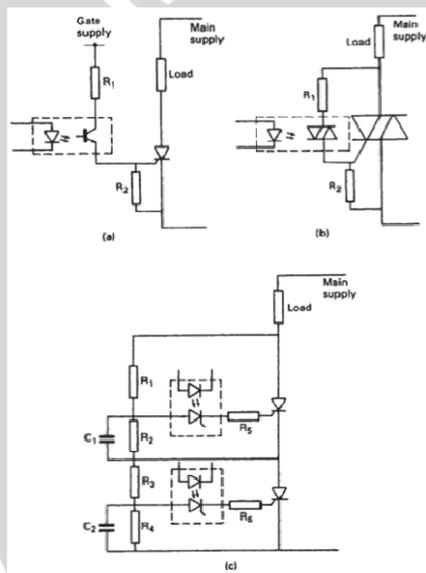
Komponen yang digunakan untuk mengisolasi komponen elektronika daya dengan rangkaian berdaya rendah yang sebagai rangkaian pengontrol salah satunya adalah *optocoupler*. Sering kali ditemukan rangkaian elektronika daya orde megawatt dikontrol hanya dengan rangkaian beberapa watt. *Optocoupler* berfungsi sebagai pengisolasi sinyal listrik antara rangkaian sinyal masukan dan keluaran (Mazda, 1997: 82). *Optocoupler* merupakan alat yang 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 keluaran sehingga dapat digunakan transmisi sinyal antar rangkaian.

Gambar 2.11 menunjukkan beberapa contoh penggunaan dari *optocoupler*. Rangkaian *thyristor* dengan catu daya terpisah ditunjukkan pada Gambar 2.11(a). Rangkaian pada Gambar 2.11(b) tidak memerlukan catu daya pada *gate* yang terpisah, karena diambil dari sumber yang sama dengan beban. Namun bagian detektor optik pada rangkaian keluaran 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 meminimalisasi interferensi gelombang radio.



Gambar 2.11 Contoh rangkaian aplikasi penggunaan *optocoupler*

- Trisitor dengan catu daya terpisah
- TRIAC dan beban dengan catu daya sama
- TRIAC dengan konfigurasi seri

Sumber: Mazda, 1997

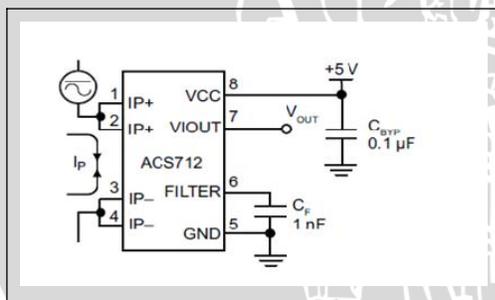
2.4.4 Sensor Arus ACS712

Pemanfaatan sensor arus ACS712 pada rangkaian *Electronic Load Controller* (ELC) pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro adalah sebagai sensor arus yang mengalir pada beban konsumen. Sensor arus ini bekerja dengan 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 (Allegromicro, 2006). Paket peralatan ini memungkinkan untuk diimplementasikan dengan mudah oleh konsumen. Jenis aplikasinya antara lain pengendalian motor, deteksi dan manajemen beban, pemodelan tombol suplai daya, dan proteksi gangguan arus lebih.

Peralatan ini terdiri dari sebuah rangkaian yang presisi, *offset* rendah, rangkaian Hall linier dengan suatu alur hubungan tembaga. Arus yang mengalir melalui alur konduksi tembaga menghasilkan medan magnetik pada rangkaian Hall yang dikonversikan menjadi tegangan proporsional.

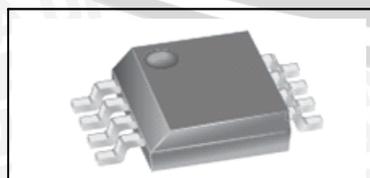
Skema dari modul sensor arus ini ditunjukkan pada Gambar 2.12. Output dari peralatan ini memiliki slope positif ($>V_{IOUT}(Q)$) ketika arus yang mengalir meningkat melalui konduksi alur primer (dari pin 1 dan 2, ke pin 3 dan 4), yang mana alur digunakan untuk *sampling* arus. Resistansi internal pada alur konduksi adalah sebesar 1,2 M Ω . 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.



Gambar 2.12 Skema sensor arus ACS712

Sumber : Allegromicro, 2006

Sedangkan bentuk fisik dan rangkaian dari sensor arus ACS712 ditunjukkan dalam Gambar 2.13.

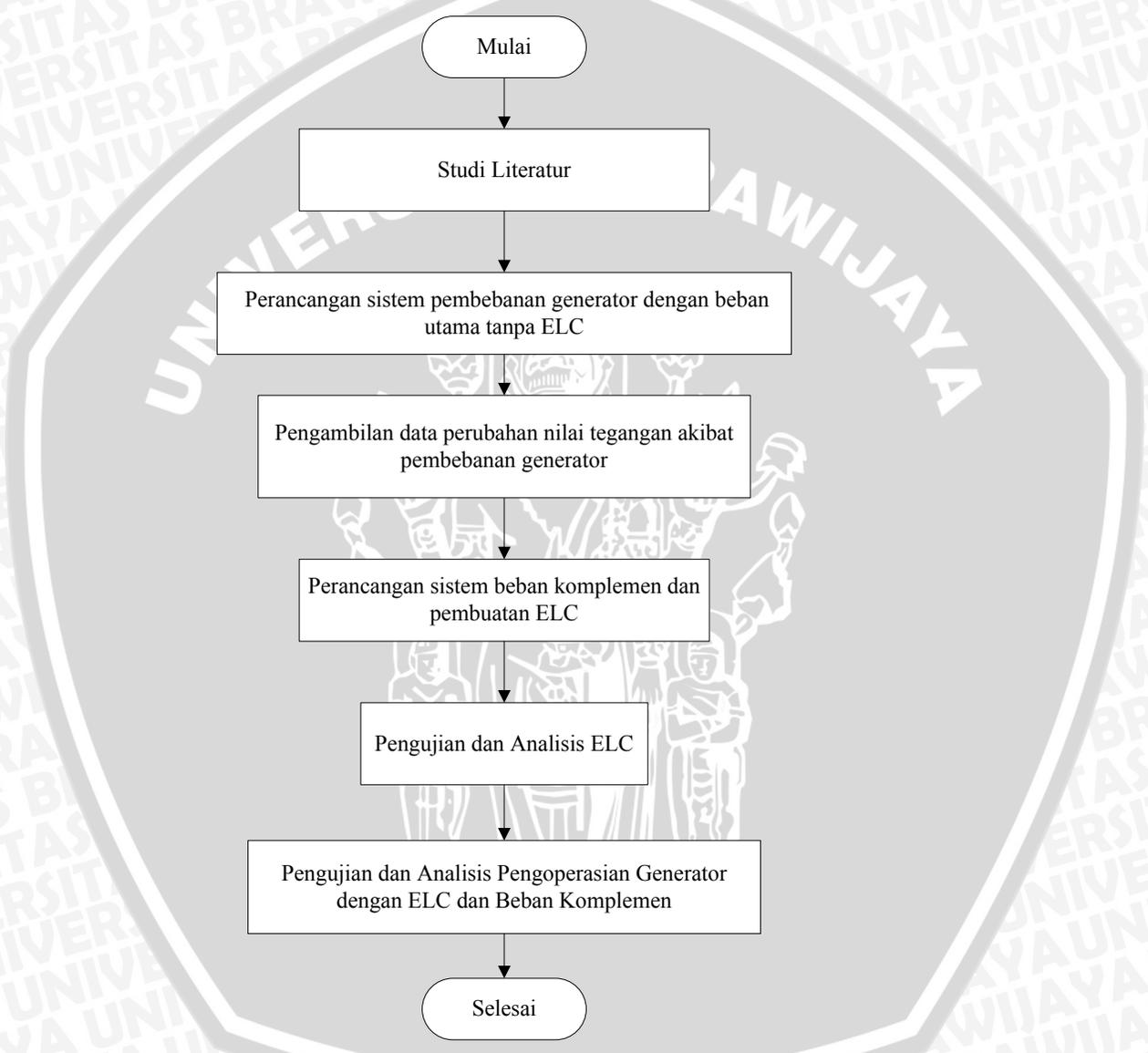


Gambar 2.13 Bentuk fisik sensor arus ACS712

Sumber : Allegromicro, 2006

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini memuat metode penelitian yang akan dilakukan dalam proses perancangan dan pembuatan ELC untuk beban komplemen resistif dan dinamik. Metode penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian
Sumber : Penulis

3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilaksanakan berupa kajian pustaka terhadap sumber-sumber bacaan yang relevan sehingga mampu menunjang dalam proses perancangan dan pembuatan ELC untuk beban komplemen resistif dinamik. Literatur yang diperlukan

antara lain mengenai prinsip generator sinkron, teori mengenai beban komplemen, prinsip motor induksi, serta penelitian tentang pembuatan ELC beserta komponen yang bisa digunakan di dalamnya (TRIAC, mikrokontroler ATmega16, *optocoupler* dan sensor arus ACS712).

3.2 Perancangan Beban Utama, Beban Komplemen, dan ELC

Perancangan sistem beban utama meliputi pembebanan generator dengan beban utama berupa lampu pijar. Kemudian dilakukan pengambilan data perubahan nilai tegangan akibat pembebanan tersebut. Sedangkan perancangan sistem beban komplemen dan ELC harus memenuhi spesifikasi dari peralatan yang akan digunakan. Spesifikasi peralatan yang digunakan antara lain:

1. Generator sinkron satu fasa yang ada di Laboratorium Mesin Elektrik, yaitu generator sinkron satu fasa merek Hupeh:
 - Daya pembebanan 1 kW
 - Tegangan 230 volt
 - Arus 8,7 ampere
 - Frekuensi 50 Hz
 - Putaran generator 1500 rpm.
2. Motor induksi yang digunakan sebagai beban komplemen dinamik dari generator sekaligus penggerak pada sistem adalah sebagai berikut:
 - a. Motor induksi satu fasa (motor kapasitor) merek Leybold-Didactic dengan spesifikasi:
 - Daya 300 W
 - Tegangan 220 volt
 - Arus 2 ampere
 - Frekuensi 50 Hz
 - Putaran motor 1430 rpm.
 - b. Motor yang digunakan sebagai penggerak kipas angin dengan spesifikasi:
 - Daya 55 W
 - Tegangan 220 V
 - Frekuensi 50 Hz.
3. Menggunakan TRIAC sebagai komponen *switching* daya pada ELC.

4. Mikrokontroler yang digunakan adalah ATmega16 sebagai pengendali utama dari ELC.
5. Beban utama dari sistem adalah lampu pijar dengan daya nominal total 1000 watt.
6. Beban komplemen resistif berupa lampu pijar dengan daya 100 W, 200 W, dan 400 W.

3.3 Pembuatan Alat

Proses pembuatan alat terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu pembuatan perangkat keras setelah itu pembuatan perangkat lunak. Pembuatan perangkat keras meliputi pembuatan skema rangkaian berikut pemasangan komponen-komponen dari modul ELC. Untuk pembuatan *lay out* rangkaian menggunakan *software* Eagle 5.6.0, perakitan komponen dilakukan pada PCB dan *project board*.

Untuk pembuatan perangkat lunak dilakukan dengan pembuatan diagram alir pengalihan daya tak terpakai ke motor induksi dan beban komplemen resistif. Kemudian, diagram alir tersebut disusun menjadi program dalam bahasa C menggunakan *software* AVR Codevision Compiler. Program tersebut ditulis pada mikrokontroler ATmega16 dalam bahasa heksadesimal menggunakan rangkaian *writer*. Setelah program selesai ditulis, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian.

3.4 Pengujian Alat dan Analisis

Pengujian dilakukan untuk memastikan rangkaian ELC dapat bekerja untuk menjaga tegangan keluaran generator tetap konstan. Kapasitas dari ELC tersebut mengacu pada daya pembebanan maksimum yang dirancang, yakni 1 kW. Komponen yang digunakan untuk pembuatan ELC adalah TRIAC sebagai pengendali beban komplemen mana yang aktif, sensor arus ACS712 untuk mendeteksi perubahan nilai arus beban utama, ATmega16 sebagai pengendali TRIAC yang harus aktif, *optocoupler* digunakan sebagai isolasi rangkaian mikrokontroler dengan TRIAC.

Tahap pengujian yang pertama adalah pengujian blok rangkaian ELC. Pengujian blok ini meliputi pengujian komponen transformator, *voltage regulator*, TRIAC, sensor arus ACS712, serta pemicuan melalui ATmega16. Setelah pengujian semua blok selesai, baru dilakukan pengujian keseluruhan blok sebagai satu modul ELC.

Pengujian yang dilakukan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu:

1. Pengujian pembebanan generator dengan beban utama (lampu pijar)

2. Pengujian pembebanan generator dengan motor induksi
3. Pengujian sensor arus ACS712
4. Pengujian pembebanan generator dengan ELC untuk beban komplemen dinamik (motor induksi) dan beban komplemen resistif.

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Setelah melakukan pengujian terhadap modul ELC untuk beban komplemen dinamik, tahap selanjutnya adalah pengambilan kesimpulan dari keseluruhan sistem yang telah dibuat dan penulisan saran dalam penyusunan laporan penelitian ini. Dari kesimpulan yang didapatkan maka akan diketahui apakah tujuan penelitian telah tercapai. Sedangkan saran yang dimaksudkan untuk kemajuan penelitian-penelitian yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini di masa yang akan datang.



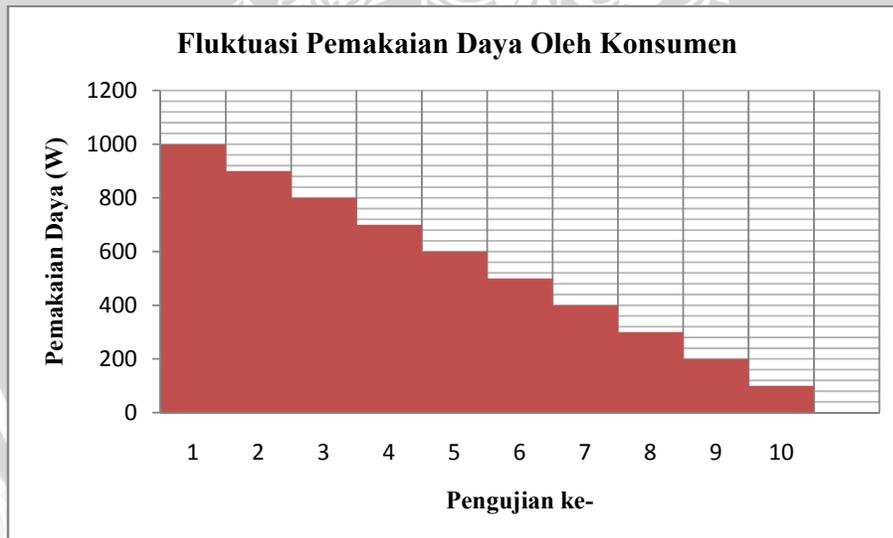
BAB IV PERANCANGAN

Pada bab ini akan diuraikan proses perancangan modul ELC untuk beban komplemen dinamik. Perancangan sistem ini meliputi perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) dan tahap selanjutnya diwujudkan dalam sebuah modul ELC untuk pengendalian beban komplemen resistif dan dinamik.

4.1 Kondisi Pembebanan

Sebenarnya untuk perancangan ELC pada suatu sistem pembangkitan yang sudah ada, dilakukan pengukuran parameter (arus dan tegangan). Namun karena pada perancangan ini dilakukan untuk skala laboratorium, maka kondisi pembebanan generator diasumsikan dengan nilai-nilai yang menggambarkan kondisi fluktuatif mulai dari beban maksimal yang digunakan konsumen hingga yang terendah.

Pada sistem pembangkitan dengan generator sinkron sebagai sumber dayanya, terjadi fluktuasi penggunaan daya oleh konsumen dalam satu harinya. Oleh karenanya, diasumsikan perubahan pembebanan generator seperti pada Gambar 4.1.

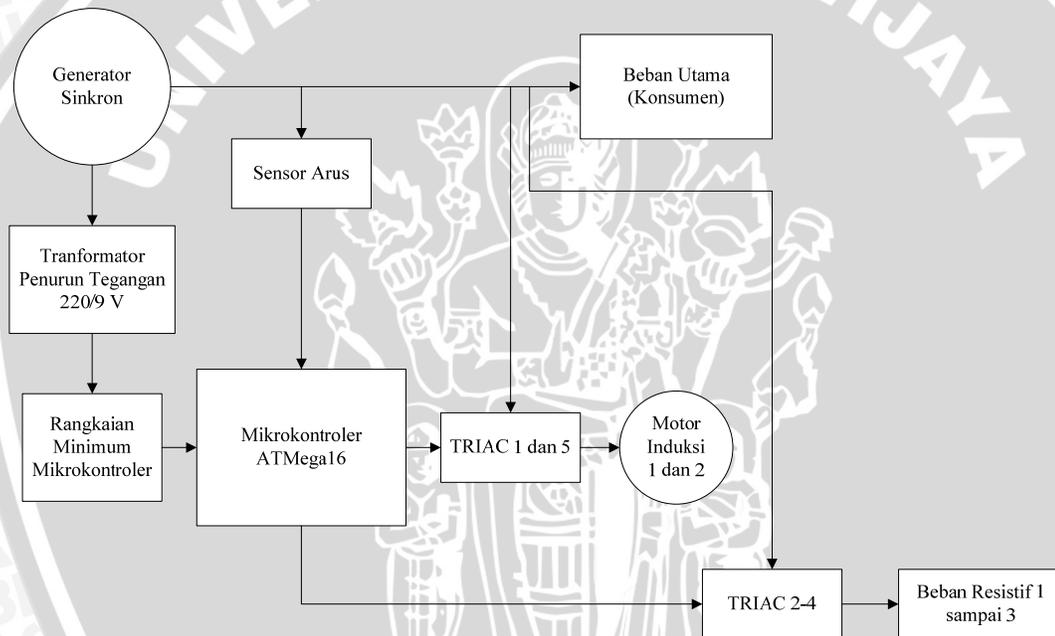


Gambar 4.1 Fluktuasi pemakaian daya beban utama
Sumber : Penulis

Dari perubahan pemakaian beban harian yang telah diasumsikan, maka dilakukan pengujian pembebanan generator dengan perubahan daya sebesar tiap 100 W dengan beban puncak (*peak load*) sebesar 1000 W. Maka, sensor arus harus mampu mendeteksi perubahan nilai arus pada beban utama sehingga mikrokontroler ATmega16 bekerja mengatur beban komplement mana yang harus aktif. Sehingga diharapkan tegangan dan putaran generator tetap konstan.

4.2 Blok Diagram Sistem

Berdasarkan spesifikasi perancangan alat pada bab sebelumnya dan kondisi pembebanan di atas, sebuah sistem ELC untuk beban komplement dinamik dapat disusun menjadi suatu blok diagram seperti Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Blok diagram sistem ELC
Sumber: Penulis

Keterangan blok diagram sistem ELC untuk beban komplement dinamik adalah sebagai berikut:

1. Generator sinkron sebagai pembangkit listrik untuk beban konsumen (utama) sekaligus catu daya pada rangkaian ELC.
2. Sensor arus ACS712 sebagai pendeteksi perubahan nilai arus pada beban utama dan menghasilkan tegangan yang merepresentasikan nilai arus beban utama ke mikrokontroler.

3. Transformator penurun tegangan berfungsi untuk menurunkan tegangan AC 220 menjadi 9 V sesuai kebutuhan rangkaian ELC.
4. Rangkaian minimum mikrokontroler untuk menyesuaikan tegangan dari transformator dengan kebutuhan catu daya mikrokontroler sekaligus untuk mengaktifkan fungsi pin mikrokontroler.
5. Mikrokontroler ATmega16 sebagai pengolah data masukan tegangan dari sensor arus dan melakukan perhitungan internal berupa logika digital sebagai bentuk sinyal pemicuan ke TRIAC.
6. TRIAC merupakan komponen pengendali mengalir atau tidaknya arus ke beban komplemen dinamik (motor induksi) dan/atau beban komplemen resistif. TRIAC 1-2 adalah TRIAC untuk pengalihan daya ke 2 buah motor induksi sedangkan TRIAC 3-5 adalah TRIAC untuk pengalihan daya ke 3 buah beban komplemen resistif.
7. Beban komplemen dinamik berupa motor induksi dan beban komplemen resistif berupa lampu pijar yang nantinya akan menerima arus dari sistem kemudian membuangnya dalam bentuk panas. Beban komplemen resistif ini berfungsi sebagai komplemen dari beban motor induksi.

4.3 Beban Komplemen

Beban komplemen dirancang untuk menstabilkan nilai tegangan dan frekuensi berdasarkan perubahan nilai arus menuju beban utama. Nilai beban komplemen ini mengacu pada perubahan arus yang mengalir pada beban konsumen. Perubahan tersebut berdasarkan Persamaan 4.1.

$$I_{generator} = I_{beban\ konsumen} + I_{beban\ komplemen} \quad (4-1)$$

Melalui pengujian pembebanan generator (Subbab 5.1), saat generator dibebani beban berupa lampu pijar 100 watt dalam kondisi nominal (tegangan 220 volt, putaran 1500 rpm), terjadi perubahan pada tegangan dan arus seperti ditunjukkan Tabel 4.1.

| Daya Beban (W) | Tegangan Generator (V) | Arus Lampu (A) |
|-------------------|---------------------------|-------------------|
| 0 | 220 | 0 |
| 100 | 216 | 0,3 |
| 200 | 213 | 0,7 |
| 300 | 209 | 1,1 |
| 400 | 205 | 1,5 |
| 500 | 202 | 1,9 |
| 600 | 198 | 2,3 |
| 700 | 194 | 2,7 |

Tabel 4.1 Nilai kenaikan arus beban untuk penambahan lampu pijar
Sumber : Pengujian

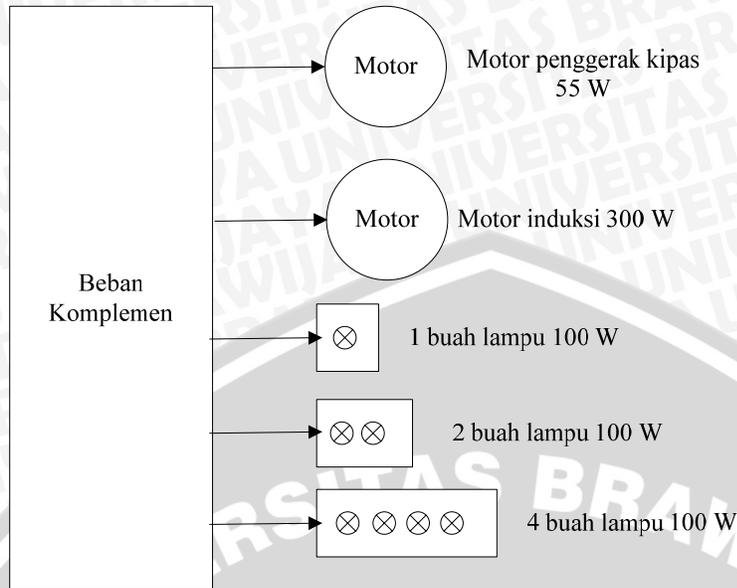
Setelah mengetahui kenaikan arus yang terjadi, maka dirancang 3 buah tap beban komplemen resistif sebagai berikut:

1. Beban resistif 1 (Sebuah lampu pijar 100 W) untuk kenaikan arus beban sebesar 0,3 ampere
2. Beban resistif 2 (Dua buah lampu pijar masing-masing 100 W) untuk kenaikan arus beban sebesar 0,7 ampere
3. Beban resistif 3 (Empat buah lampu pijar masing-masing 100 W) untuk kenaikan arus beban sebesar 1,5 ampere.

Sementara itu, untuk penggunaan beban komplemen dinamik, yaitu motor induksi, selain memperhitungkan kenaikan arus, maka perlu dipertimbangkan pula penurunan tegangan yang terjadi akibat penggunaan beban yang bersifat induktif. Berdasarkan pengujian pembebanan generator dengan motor induksi pada Subbab 5.2, maka didapatkan:

1. Penggunaan motor induksi 300 W mengakibatkan kenaikan arus sebesar 2 ampere dan penurunan tegangan sebesar 12 V.
2. Penggunaan motor induksi 55 W mengakibatkan kenaikan arus sebesar 0,28 ampere dan penurunan tegangan sebesar 3 V.

Maka dapat disusun sistem beban komplemen yang terdiri dari beban resistif dan dinamik seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Beban Komplemen
Sumber : Penulis

Data pada Tabel 4.1 menjadi acuan menentukan pola kombinasi beban komplemen (Tabel 4.2) yang akan aktif sesuai dengan penurunan yang terjadi pada beban konsumen. Semakin kecil arus yang mengalir ke beban konsumen, maka semakin banyak beban komplemen yang akan aktif.

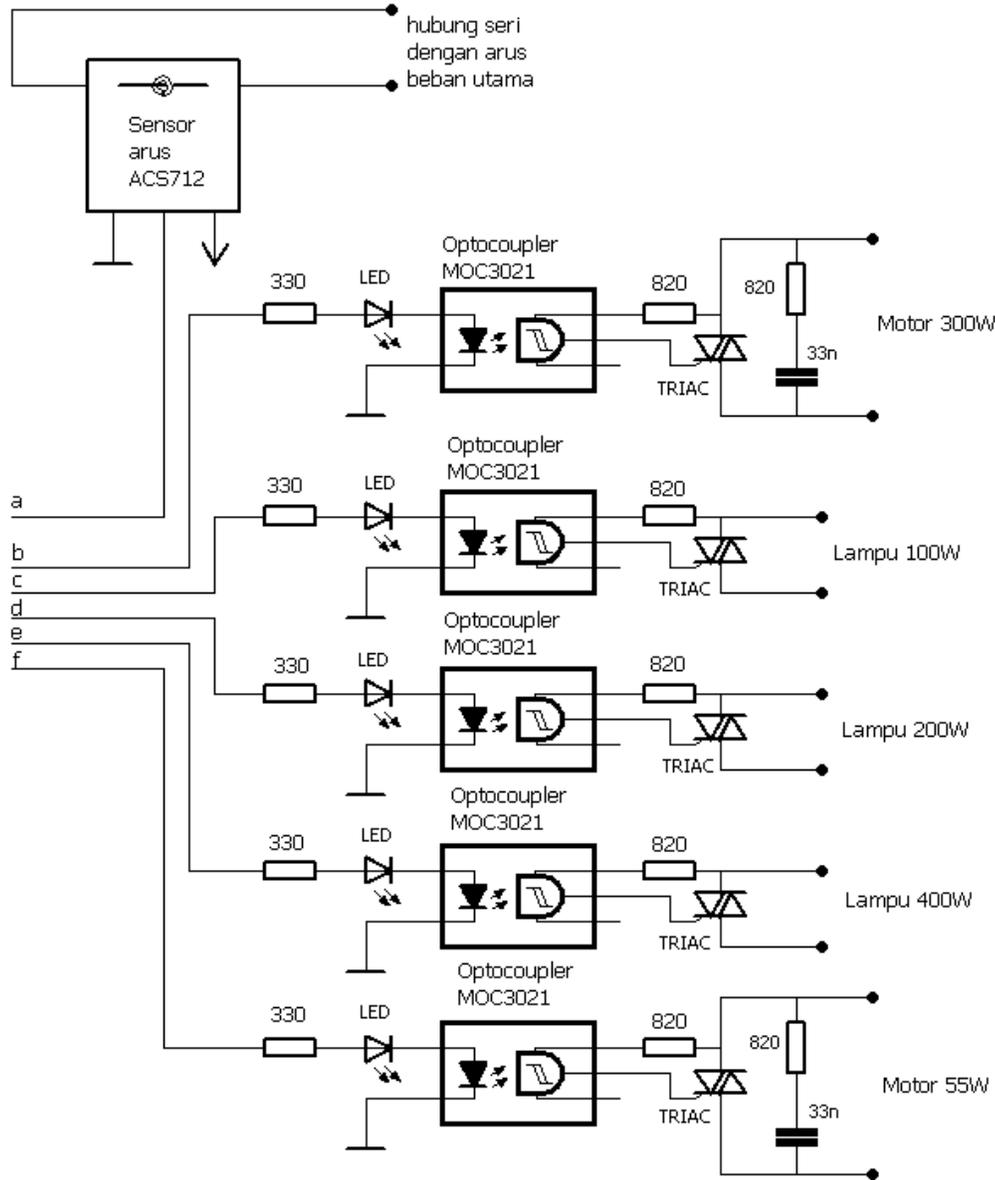
| Pengujian ke- | Daya Beban Utama | Beban Komplemen 1 (100 W) | Beban Komplemen 2 (200 W) | Beban Komplemen 3 (400 W) | Motor 1 (300 W) | Motor 2 (55 W) |
|---------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 1000 | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> |
| 2 | 900 | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> |
| 3 | 800 | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> |
| 4 | 700 | <i>on</i> | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> |
| 5 | 600 | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>on</i> |
| 6 | 500 | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>on</i> |
| 7 | 400 | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>on</i> |
| 8 | 300 | <i>on</i> | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>on</i> |
| 9 | 200 | <i>off</i> | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>on</i> | <i>on</i> |
| 10 | 100 | <i>on</i> | <i>off</i> | <i>on</i> | <i>on</i> | <i>on</i> |

Tabel 4.2 Kombinasi beban komplemen
Sumber : Penulis

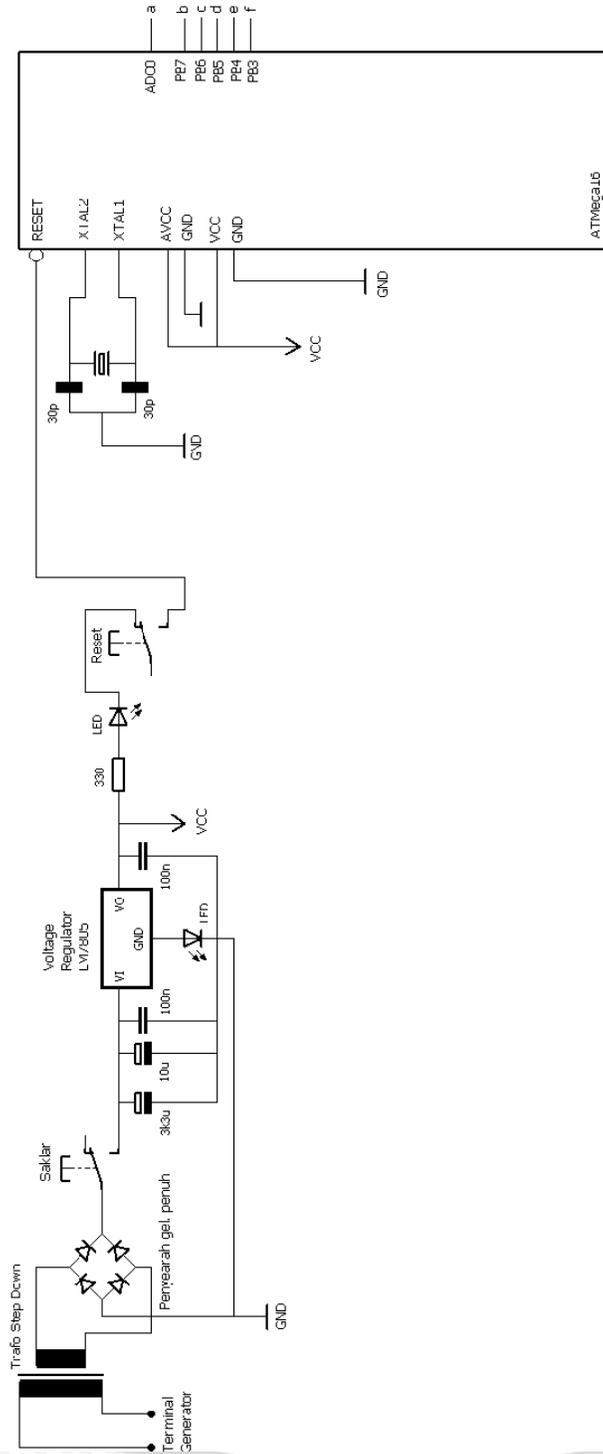
4.4 Perancangan Perangkat Keras Modul ELC

4.4.1 Perancangan Rangkaian ELC

Perancangan perangkat keras modul ELC pada PLTMH untuk beban komplemen resistif dan dinamik mengacu pada Gambar 4.4(a) untuk rangkaian pemecuan beban komplemen dan Gambar 4.4(b) untuk rangkaian minimum mikrokontrolernya.



Gambar 4.4(a) Rangkaian pemecuan beban komplemen
 Sumber : Penulis



Gambar 4.4(b) Rangkaian minimum mikrokontroler ATMega16
 Sumber: Penulis

Penjelasan rangkaian ELC di atas adalah sebagai berikut. Pengendali utama pada ELC ini adalah mikrokontroler ATmega16. Supaya dapat bekerja, mikrokontroler ini harus dirangkai dengan beberapa komponen berikut:

1. Transformator penurun tegangan 220/9 V.
2. Rangkaian dioda penyearah gelombang penuh untuk menyearahkan arus dari transformator penurun tegangan.
3. *Voltage regulator* LM7805 untuk menurunkan tegangan 9 volt menjadi tegangan 5 volt untuk mikrokontroler.
4. Kapasitor 3300uF, 10uF, dan 100nF untuk meratakan riak tegangan.

Sementara itu penjelasan dari fungsi pin-pin mikrokontroler adalah sebagai berikut:

1. Pin 11 (GND) adalah pin *ground*.
2. Pin 10 (VCC) adalah pin sumber tegangan.
3. Pin 9 (RESET) adalah pin *reset*. Pin ini terhubung pada sebuah *push button* untuk melakukan *reset* pada program mikrokontroler.
4. Pin 12 dan 13 adalah pin untuk kristal (*external oscillator*).
5. Pin 8 (PB7) adalah pin keluaran untuk pemicuan *gate* TRIAC1 yang terhubung dengan motor induksi 300 W.
6. Pin 4 (PB3) adalah pin keluaran untuk pemicuan *gate* TRIAC2 yang terhubung dengan motor penggerak kipas angin 55 W.
7. Pin 7 (PB6) adalah pin keluaran untuk pemicuan *gate* TRIAC3 yang terhubung dengan beban komplemen resistif 1.
8. Pin 6 (PB5) adalah pin keluaran untuk pemicuan *gate* TRIAC4 yang terhubung dengan beban komplemen resistif 2.
9. Pin 5 (PB4) adalah pin keluaran untuk pemicuan *gate* TRIAC5 yang terhubung dengan beban komplemen resistif 3.
10. Pin 40 (ADC0) adalah pin masukan berupa tegangan keluaran sensor arus ACS712.

Di antara pin keluaran mikrokontroler dengan TRIAC terdapat komponen LED dan *optocoupler* MOC3021. LED berfungsi mengindikasikan port keluaran mana dari mikrokontroler yang aktif dan memicu *optocoupler*. Sedangkan *optocoupler* MOC3021 berfungsi untuk memicu *gate* TRIAC sekaligus pemisah antara rangkaian berdaya kecil (mikrokontroler) dengan rangkaian berdaya besar (TRIAC dan beban komplemen).

Khusus untuk TRIAC1 dan TRIAC5 yang digunakan untuk mengatur menyala tidaknya motor induksi 300 W dan motor penggerak kipas angin 55 W, pada kaki MT1 dan MT2 dipasang pula rangkaian *snubber* sebagai pengaman TRIAC dari lonjakan tegangan saat pensaklaran.

4.4.2 Penentuan Komponen TRIAC

Kegagalan dalam pengoperasian ELC akibat kerusakan komponen merupakan hal yang perlu dihindari. Dalam hal ini, TRIAC yang dipilih harus memiliki *rating* arus dan tegangan di atas arus dan tegangan yang dibutuhkan. Beban motor induksi yang digunakan memiliki *rating* sebagai berikut:

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

Arus pada saat pengasutan motor yang melalui komponen TRIAC selalu melebihi arus nominal. Berdasarkan pengujian pembebanan generator pada Subbab 5.2, arus saat pengasutan motor 5 kali arus nominalnya. Sedangkan tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh TRIAC pada saat *off state* (kondisi mati) dihitung berdasarkan Persamaan 4.2.

$$\begin{aligned} V_{maks} &= \sqrt{2} \times 220 \\ &= 311,126 \text{ volt} \end{aligned} \quad (4-2)$$

Berdasarkan perhitungan dan estimasi di atas, setelah disesuaikan dengan ketersediaan komponen di pasaran, maka TRIAC yang digunakan adalah BTA16-600B dengan *rating* arus dan tegangan sebesar 16 A dan 600 V.

4.4.3 Perancangan Pengaman Terhadap Laju Pertambahan Arus di/dt

Kerusakan TRIAC yang disebabkan oleh di/dt yang tinggi dapat dihindari dengan memasang induktor terpasang seri dengan beban. di/dt adalah tingkat perubahan arus yang mengalir melalui *thyristor* atau TRIAC ketika terjadi perubahan kondisi dari mati (*off state*) ke nyala (*on state*). Dalam perancangan pengaman terhadap laju pertambahan arus di/dt harus di bawah spesifikasi di/dt maksimum komponen, hal ini dapat dilakukan dengan memasang induktor secara seri dengan komponen. Secara pendekatan, di/dt maksimum dapat dihitung melalui Persamaan 4.3 dan 4.4.

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \text{ volt} \quad (4-3)$$

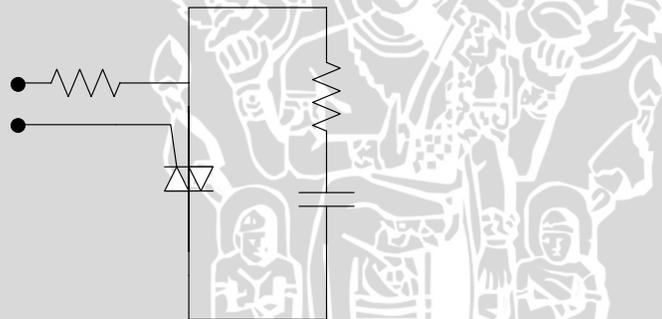
$$\frac{di}{dt}_{maks} = \frac{V}{L} \text{ A/s} \quad (4-4)$$

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

di/dt maksimum komponen TRIAC pada *datasheet* sebesar 50 A/ μ s, sehingga tidak diperlukan lagi pengaman di/dt .

4.4.4 Perancangan Pengaman Terhadap Laju Pertambahan Tegangan dv/dt

Pengaman terhadap laju kenaikan tegangan dv/dt perlu dilakukan karena jika dv/dt dari TRIAC terlampaui maka TRIAC akan terkonduksi meskipun tidak ada arus *trigger* pada terminal *gate* TRIAC. Pengaruh dv/dt bisa dikurangi dengan menggunakan rangkaian *snubber* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Rangkaian *snubber* pada ELC
Sumber: Rashid, 2001

Setiap TRIAC mempunyai spesifikasi dv/dt maksimumnya yang tertera pada setiap *datasheet* komponen. dv/dt pada *datasheet* TRIAC BTA16-600B tertera sebesar 10V/ μ detik. Perhitungan nilai dari kapasitor *subber* C_S dan resistor *snubber* R_S adalah berdasarkan Persamaan 4.5 (Fairchild, 2002).

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

Nilai C_s ditentukan dengan perhitungan berdasarkan Persamaan 4.6 dan 4.7.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4-6)$$

$$C_s = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \quad (4-7)$$

$$= \frac{1}{(2\pi \times 5,1 \times 10^3)^2 \times 0,02565}$$

$$= 37,96 \times 10^{-9} \text{ F}$$

Nilai dari R_s ditentukan dengan perhitungan berdasarkan Persamaan 4.8.

$$R_s = \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (4-8)$$

$$= \sqrt{\frac{0,02565}{37,96 \times 10^{-9}}}$$

$$= 822,01 \Omega$$

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

4.5 Perancangan Perangkat Lunak ELC

Perancangan perangkat lunak pada skripsi ini berupa pemrograman pada mikrokontroler ATmega16. Program yang ditulis disesuaikan dengan prinsip kerja suatu ELC, yaitu pengalihan daya ke beban komplemen saat terjadi penurunan nilai arus beban utama. Program ini bertujuan agar mikrokontroler mampu menghasilkan sinyal penyalan TRIAC. Selain itu, program juga memuat pencuplikan arus pada beban utama sebagai proses *sensing*.

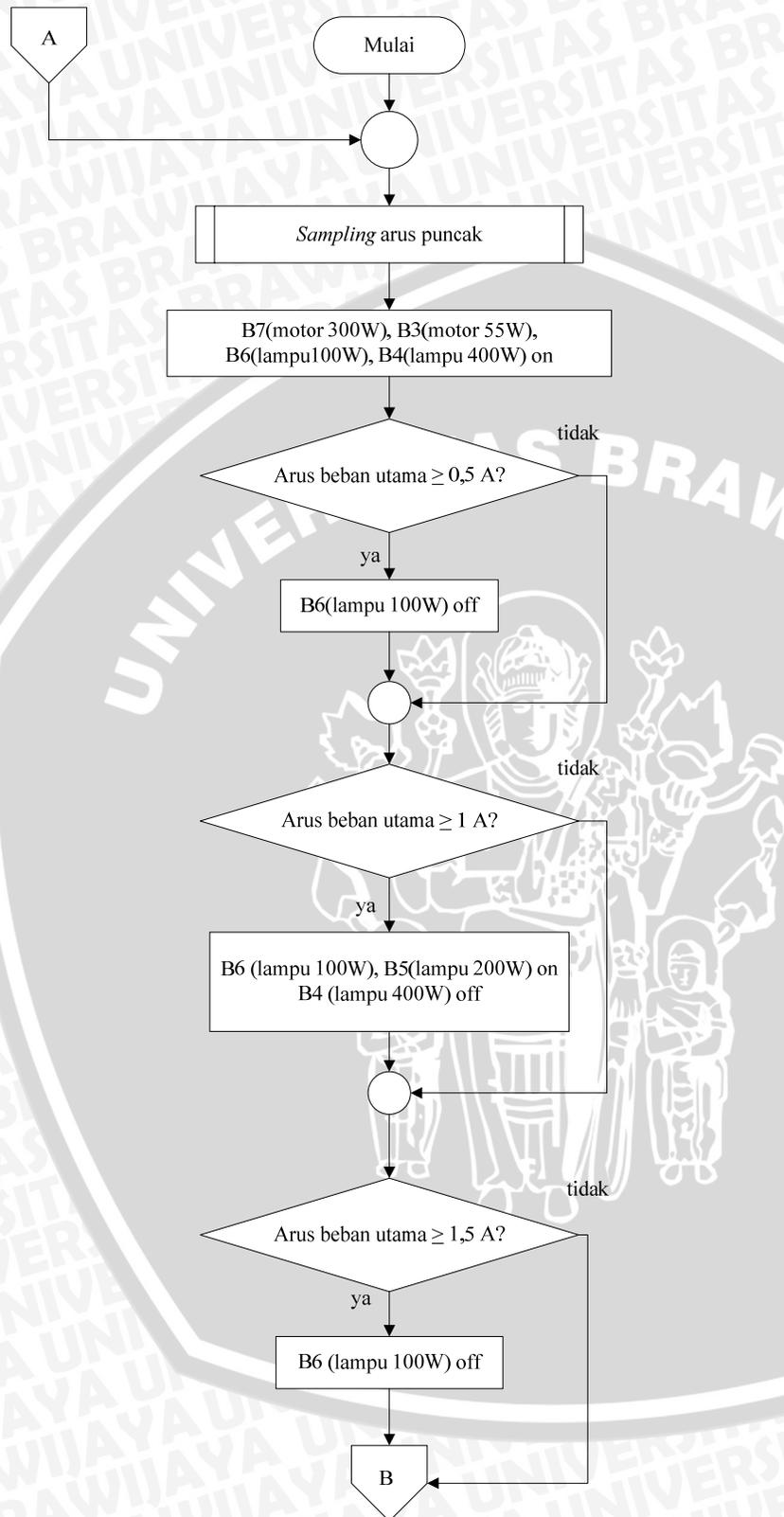
Perangkat lunak yang akan digunakan adalah perangkat lunak untuk pemrograman mikrokontroler ATmega16. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah bahasa C. *Software* yang digunakan untuk proses *writing* dan *compile* program adalah Codevision C Compiler. Selanjutnya program tersebut ditulis dalam kode heksadesimal pada ATmega16 menggunakan *writer software* MyWrite.

Diagram alir dari program ELC yang ditunjukkan Gambar 4.6 diawali dengan menjalankan program pengambilan sampel arus beban utama. Umpan balik dari sub

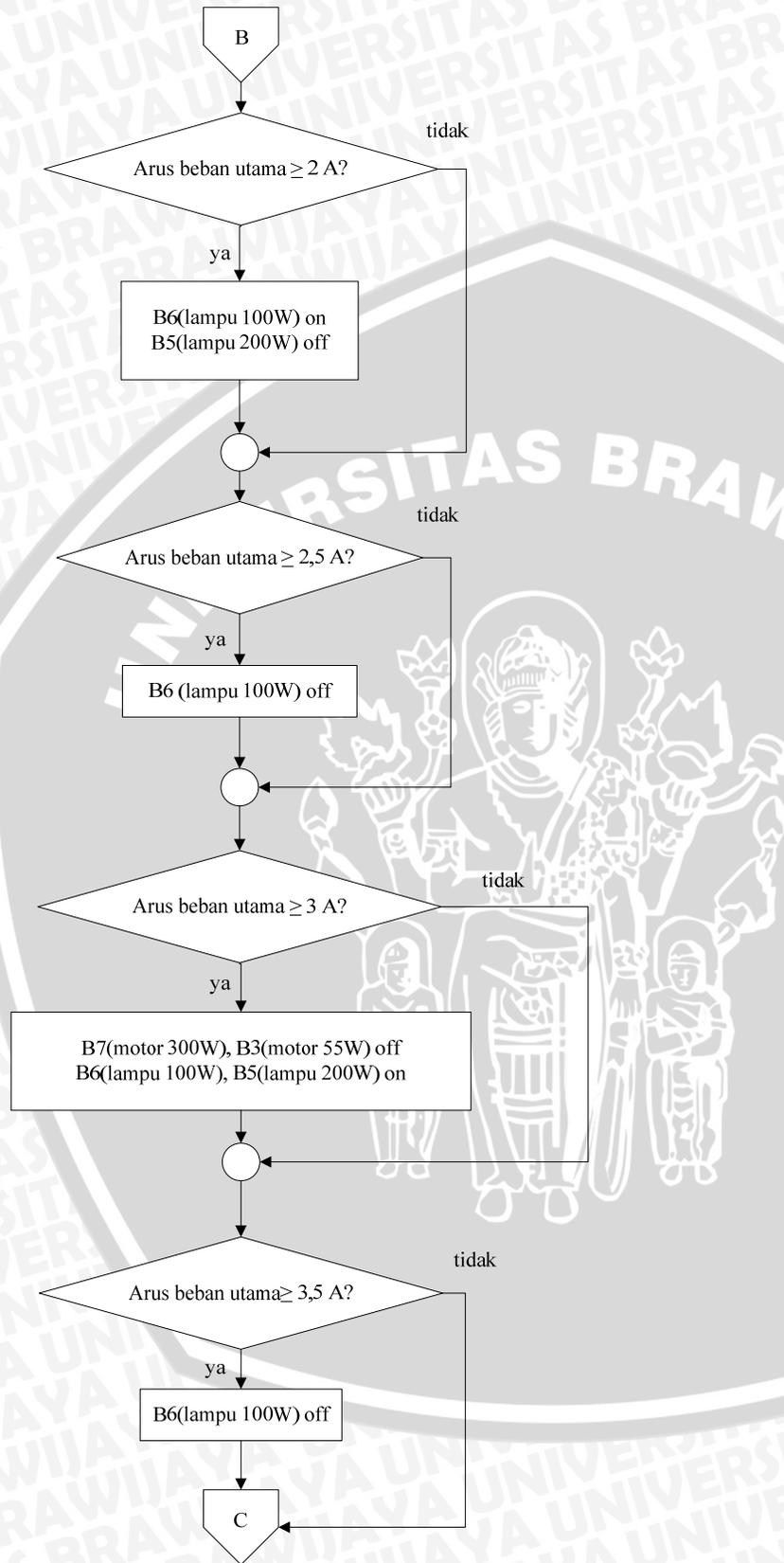
fungsi pengambilan sampel ini menjadi acuan pemicuan dan pemadaman TRIAC. Jika terdeteksi penurunan arus menuju beban utama maka TRIAC akan dipicu. Pemicuan berlangsung terus selama deteksi dari sensor arus menunjukkan penurunan arus beban utama. Jika tidak maka dilakukan kembali pendeteksian arus menuju beban utama. Kombinasi dari TRIAC mana yang akan aktif sesuai nilai arus yang terdeteksi.

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. Nilai hasil pengambilan kemudian menjadi acuan besarnya nilai arus yang mengalir ke beban utama.

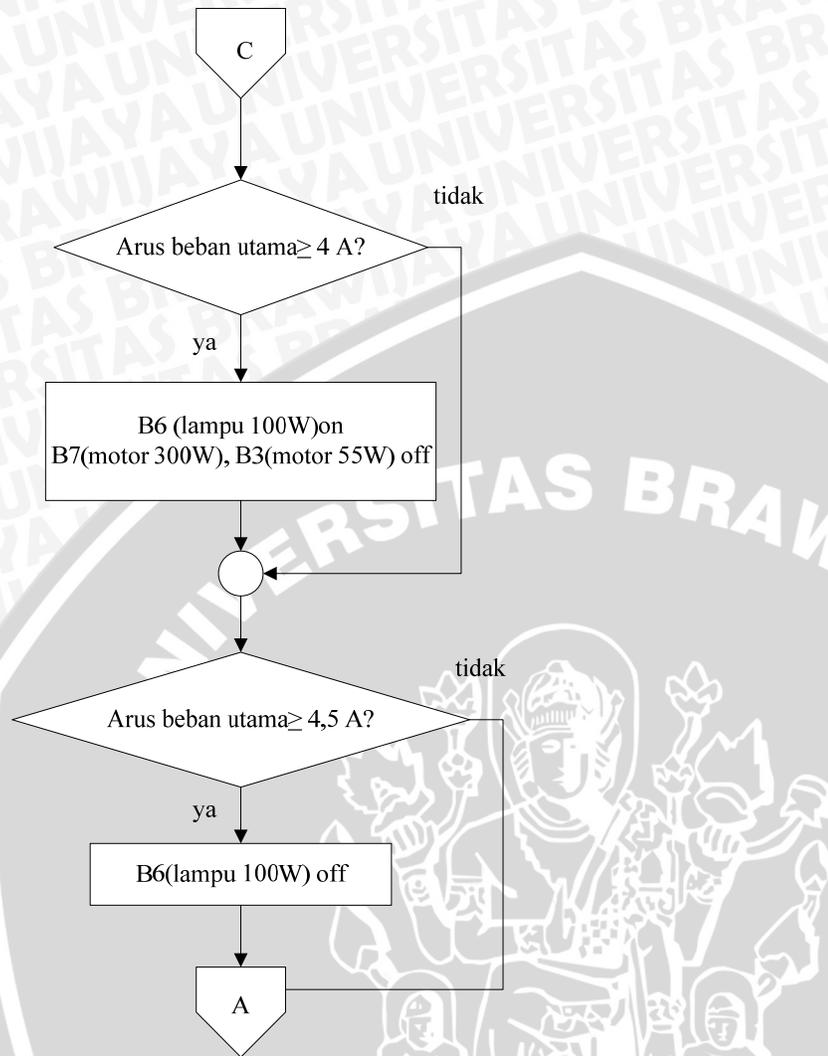




Gambar 4.6(a) Diagram alir ELC
Sumber : Penulis



Gambar 4.6(b) Lanjutan diagram alir ELC
Sumber : Penulis



Gambar 4.6(c) Lanjutan diagram alir ELC
Sumber : Penulis



BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Setelah beban dan modul ELC selesai dirancang, maka perlu dilakukan pengujian. Pengujian yang dilakukan dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu pengujian pembebanan generator dengan beban utama (konsumen), pengujian pembebanan generator dengan motor induksi, pengujian sensor arus ACS712, serta pengujian pembebanan generator dengan ELC untuk beban komplemen dinamik (motor induksi) dan beban komplemen resistif.

5.1 Pengujian Pembebanan Generator Sinkron Dengan Beban Utama

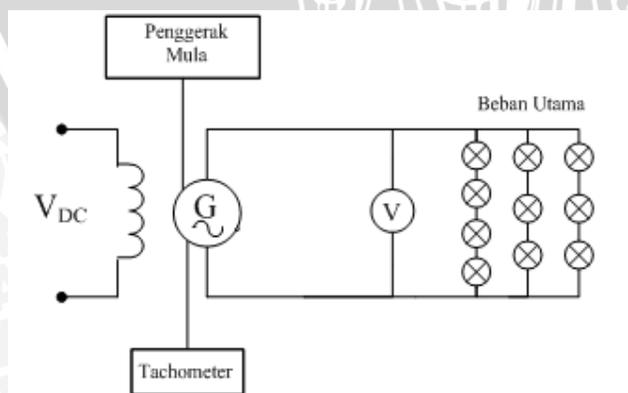
Pengujian pembebanan generator sinkron tanpa ELC bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan beban utama terhadap putaran dan tegangan generator. Ini menggambarkan kondisi PLTMH yang belum menggunakan ELC. Ada dua macam pengujian, yaitu pembebanan generator dengan beban resistif (lampu) yang dayanya dinaikkan dari nol hingga 1000 W serta diturunkan dari 1000 W hingga tanpa beban.

Peralatan yang akan digunakan dalam pengujian ini adalah:

1. Generator sinkron 1 fasa merek Hupeh 2 kW
2. Lampu pijar 100 W (10 buah dirangkai seri)
3. *Voltage Regulator* DC merek Protek
4. *Tachometer* merek FUJIKOGYO tipe 024276
5. Voltmeter merek KAISE model SK5000B

Prosedur pengujian generator sinkron tanpa ELC sebagai berikut :

1. Menghubungkan peralatan-peralatan seperti pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron dengan beban utama
Sumber : Penulis

2. Menambah putaran generator hingga putaran nominalnya (1500 rpm)

3. Menaikkan tegangan penguatan medan hingga tegangan keluaran generator mencapai 220 V
4. Menyalakan lampu satu demi satu dengan kenaikan daya sebesar 100 W hingga daya totalnya 1000 W
5. Mencatat penurunan tegangan dan putaran generator
6. Setelah selesai, maka tegangan penguatan medan dinaikkan hingga tegangan keluaran generator kembali ke 220 V
7. Menambah putaran generator hingga kembali ke 1500 rpm
8. Mematikan lampu satu demi satu dengan penurunan daya sebesar 100 W hingga semua lampu mati
9. Mencatat kenaikan tegangan dan putaran generator.

Data hasil pengujian generator sinkron tanpa ELC sebagai berikut:

1. Dengan kondisi awal tegangan generator 220 V, putaran generator 1500 rpm, tegangan penguatan medan 29 V, daya beban utama 0 W, maka pengaruh kenaikan daya beban utama tiap 100 W ditunjukkan Tabel 5.1.

| Daya Beban Utama (W) | Tegangan Generator (V) | Putaran Generator (rpm) |
|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 0 | 220 | 1500 |
| 100 | 216 | 1494 |
| 200 | 213 | 1456 |
| 300 | 209 | 1430 |
| 400 | 205 | 1410 |
| 500 | 202 | 1460 |
| 600 | 198 | 1450 |
| 700 | 194 | 1446 |
| 800 | 189 | 1440 |
| 900 | 185 | 1436 |
| 1000 | 181 | 1426 |

Tabel 5.1 Pengaruh kenaikan daya beban utama
Sumber : Pengujian

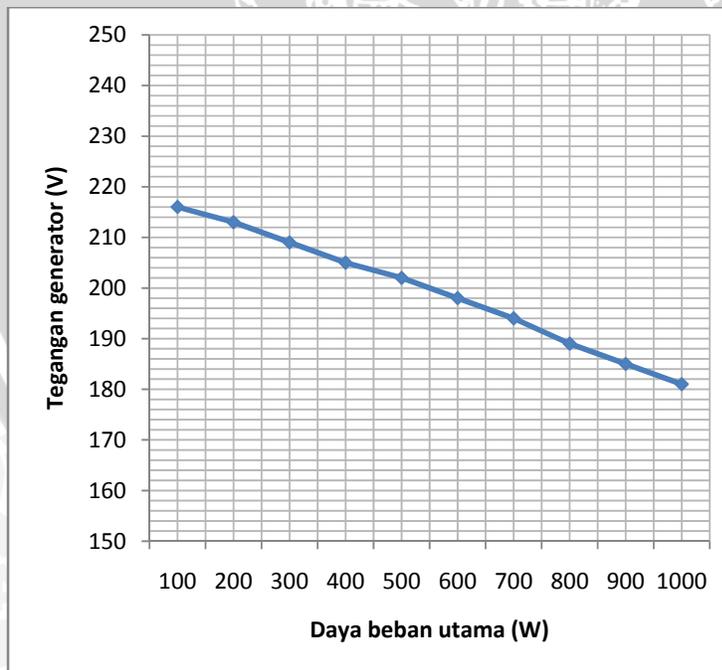
2. Dengan kondisi awal tegangan generator 220 V, putaran generator 1500 rpm, tegangan penguatan medan 29 V, daya beban utama 1000 W, maka pengaruh penurunan daya beban utama ditunjukkan pada Tabel 5.2.

| Daya Beban Utama (W) | Tegangan Generator (V) | Putaran Generator (rpm) |
|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 1000 | 220 | 1500 |
| 900 | 223 | 1516 |
| 800 | 228 | 1522 |
| 700 | 232 | 1534 |
| 600 | 236 | 1546 |
| 500 | 240 | 1558 |
| 400 | 244 | 1562 |
| 300 | 247 | 1572 |
| 200 | 251 | 1586 |
| 100 | 254 | 1596 |
| 0 | 258 | 1612 |

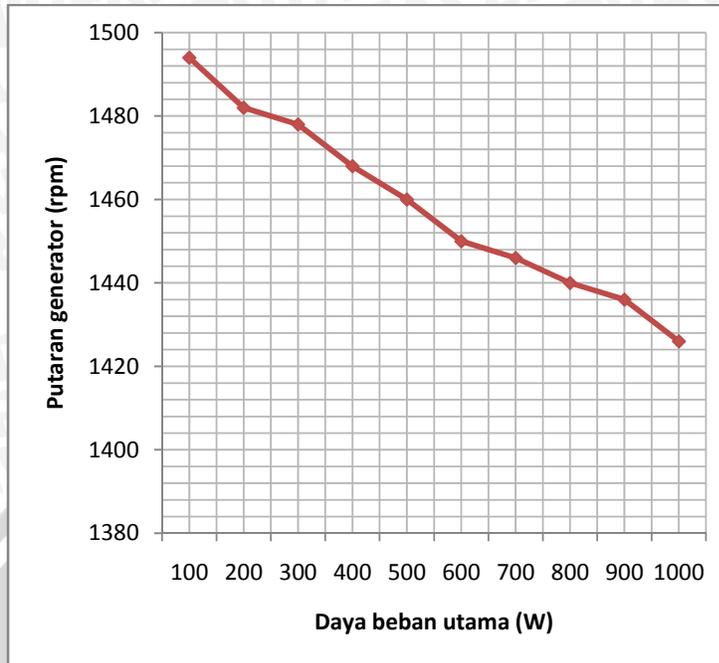
Tabel 5.2 Pengaruh penurunan daya beban utama
 Sumber : Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian, maka dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Kenaikan daya beban utama sebesar 100 W menyebabkan penurunan tegangan generator dengan nilai maksimal sebesar 5 V dan penurunan putaran generator maksimal sebesar 38 rpm.

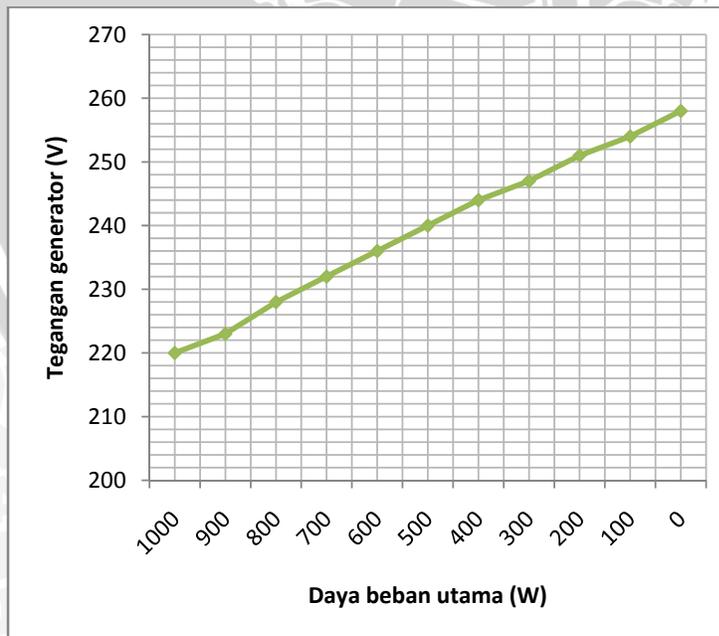


Gambar 5.2 Grafik pengaruh kenaikan daya beban utama terhadap tegangan generator
 Sumber : Pengujian

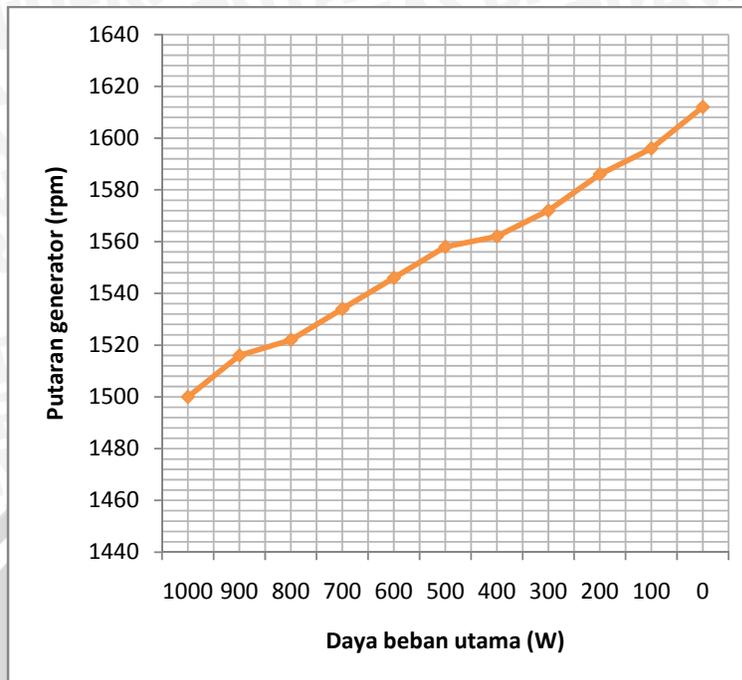


Gambar 5.3 Grafik pengaruh kenaikan daya beban utama terhadap putaran generator
 Sumber : Pengujian

2. Penurunan daya beban utama sebesar 100 W menyebabkan kenaikan tegangan generator dengan nilai maksimal sebesar 5 V dan kenaikan putaran generator sebesar 16 rpm.



Gambar 5.4 Grafik pengaruh penurunan daya beban utama terhadap tegangan generator
 Sumber : Pengujian



Gambar 5.5 Grafik pengaruh penurunan daya beban utama terhadap putaran generator
Sumber : Pengujian

5.2 Pengujian Pembebanan Generator Dengan Motor Induksi

Pengujian pembebanan generator dengan motor induksi bertujuan untuk mengetahui:

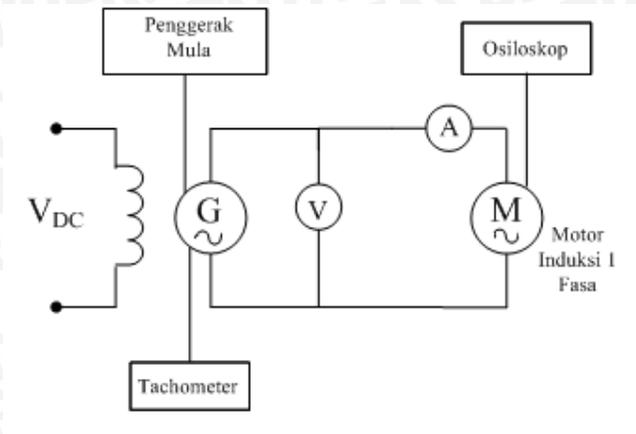
1. Pengaruh penggunaan motor induksi terhadap tegangan dan putaran generator
2. Perbandingan arus starting dengan arus keadaan tunak pada motor induksi
3. Penentuan *rating* TRIAC

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

1. Generator sinkron 1 fasa Hupeh 2 kW
2. Motor induksi 1 fasa Leybold-Didactic 0,3 kW
3. *Voltage Regulator* DC Protek
4. Voltmeter AC merk KAISE model SK5000B
5. *Tachometer* merk FUJIKOGYO tipe 024276
6. *Oscilloscope* Tektronik TD-2002

Prosedur pengujian rangkaian pemecutan sebagai berikut:

1. Membuat rangkaian seperti pada Gambar 5.6.

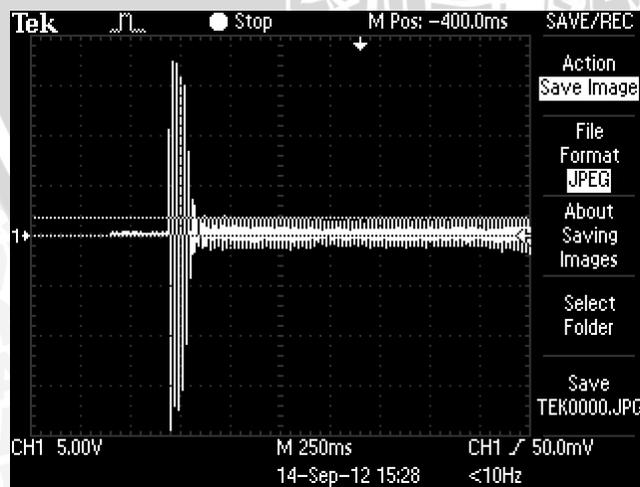


Gambar 5.6 Blok diagram pengujian pembebanan generator dengan motor induksi
 Sumber : Penulis

2. Menambah putaran generator hingga putaran nominalnya (1500 rpm).
3. Menaikkan tegangan penguatan medan hingga tegangan keluaran generator mencapai 220 V.
4. Menghubungkan motor induksi ke terminal keluaran generator sinkron.
5. Mengamati bentuk gelombang arus pengasutan motor induksi melalui osiloskop.
6. Mencatat penurunan tegangan dan putaran generator.

Dari pengujian pembebanan generator, didapatkan dua data sebagai berikut:

1. Melalui osiloskop, dapat diamati perbandingan antara arus pengasutan dengan arus keadaan mantap pada motor induksi seperti Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Arus motor induksi
 Sumber : Pengujian

2. Hasil pengukuran tegangan dan putaran generator setelah dibebani motor induksi ditunjukkan pada Tabel 5.3.

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| $V_{\text{tanpa beban}}$ | V_{berbeban} |
| 220 volt | 208 volt |
| $n_{\text{tanpa beban}}$ | n_{berbeban} |
| 1520 rpm | 1510 rpm |
| $I_{\text{keadaan mantap}}$ | |
| 2 ampere | |

Tabel 5.3 Pengujian generator berbeban motor induksi
Sumber : Pengujian

Berdasarkan data hasil pengujian terlihat bahwa ketika motor diasut, terjadi kenaikan arus mencapai 5 kali arus keadaan mantapnya. Oleh karena itu, hal ini menjadi pertimbangan dalam pemilihan kapasitas arus dari TRIAC, yaitu TRIAC BTA 16-600B untuk arus maksimum 16 A. Selain itu, tampak pula terjadi penurunan tegangan keluaran generator sebesar 12 volt. Berarti beban motor hanya bisa dipicu saat ada kenaikan tegangan pada generator dengan nilai kenaikan minimal sebesar 12 volt. Hal ini untuk menghindari penurunan tegangan keluaran generator terlalu jauh di bawah tegangan nominal, yaitu 220 volt.

5.3 Pengujian Rangkaian Pendeteksi Arus Beban Utama

Tujuan pengujian rangkaian pendeteksi arus beban utama adalah untuk mengkalibrasi blok pendeteksi arus beban utama (sensor arus ACS712) yang digunakan mikrokontroler untuk mengetahui nilai arus yang sedang mengalir ke beban utama.

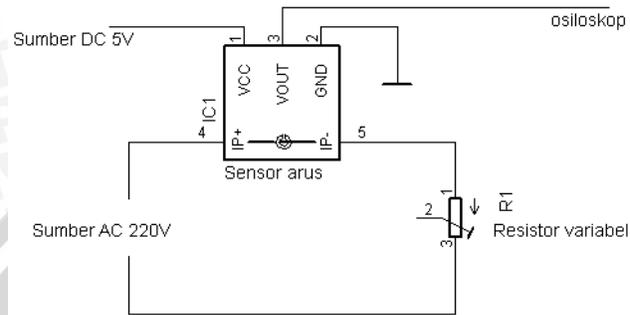
Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

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

Sedangkan dalam pengujian blok pendeteksi arus beban utama untuk pemucuan TRIAC ini, prosedur pengujiannya adalah:

1. Membuat rangkaian seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8.

2. Menghubungkan sumber AC 1 fasa ke resistor variabel dan sumber DC 5 volt ke sensor arus.
3. Menghubungkan *probe 1 oscilloscope* ke terminal keluaran sensor arus dan *ground*.
4. Atur resistor variabel hingga nilai arus mengalir mulai 0,5-5,5 A.



Gambar 5.8 Rangkaian pengujian sensor arus
Sumber : Penulis

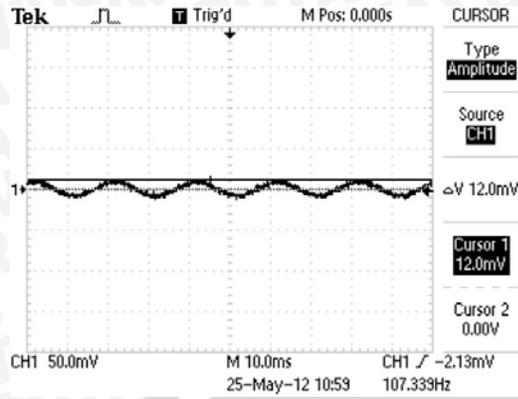
Data hasil pengujian rangkaian pendeteksi arus beban utama sebagai berikut:

1. Tegangan pada keluaran sensor arus ditunjukkan Tabel 5.4.

| 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 |

Tabel 5.4 Data tegangan keluaran sensor arus
Sumber : Pengujian

2. Contoh bentuk tegangan keluaran sensor arus sebagai masukan mikrokontroler ditunjukkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Bentuk keluaran sensor untuk arus 0,5 A
 Sumber : Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran sensor arus mengikuti bentuk gelombang dari arus beban utama. Tegangan keluaran sensor arus dengan nilai 12 mV sampai 92 mV ini dapat dijadikan masukan mikrokontroler sebagai representasi nilai arus yang mengalir menuju beban utama. Dari Tabel 5.4 dapat dilihat bahwa perubahan tegangan keluaran sensor (ΔV) naik secara linear sebesar $\pm 16 \text{ mV/ampere}$. Dari pengujian tersebut rangkaian pendeteksi arus beban utama mampu bekerja sesuai tujuan dan fungsinya sebagai pendeteksi arus menuju beban utama.

5.4 Pengujian Pembebanan Generator Dengan ELC Untuk Beban Komplemen Dinamik (Motor Induksi) dan Beban Komplemen Resistif

Berdasarkan Gambar 4.1 (perubahan daya beban utama yang telah dirancang), maka nilai-nilai untuk pengujian diperoleh dengan melakukan perubahan arus nominal menuju beban utama sesuai nilai-nilai pada fluktuasi tersebut seperti ditunjukkan Tabel 5.5.

| Parameter Pemakaian Beban | Nilai |
|--------------------------------------|---------------|
| daya beban utama (watt) | 1000 |
| daya beban komplemen resistif (watt) | 100; 200; 400 |
| daya motor induksi (watt) | 300;55 |
| tegangan (V) | 220 |
| arus beban komplemen total (A) | 4,5 |
| arus setiap tap beban komplemen (A) | 0,3; 0,7; 1,5 |

Tabel 5.5 Tabulasi pemakaian beban untuk pengujian
 Sumber : Penulis

Daya maksimum beban utama mempunyai nilai yang hampir sama dengan daya total beban komplemen. Hal ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan pembebanan generator. Dengan melakukan perubahan daya beban utama, maka didapatkan nilai arus pada beban utama seperti ditunjukkan Tabel 5.6.

| Pengujian ke- | Daya Beban Utama (W) | Arus Beban Utama (A) |
|---------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 1000 | 4,5 |
| 2 | 900 | 4 |
| 3 | 800 | 3,7 |
| 4 | 700 | 3,2 |
| 5 | 600 | 2,7 |
| 6 | 500 | 2,2 |
| 7 | 400 | 1,8 |
| 8 | 300 | 1,4 |
| 9 | 200 | 0,9 |
| 10 | 100 | 0,5 |

Tabel 5.6 Fluktuasi arus beban utama
Sumber : Pengujian

Tujuan dari pengujian pembebanan generator sinkron dengan ELC antara lain:

1. Mengetahui kinerja keseluruhan sistem yang telah dirancang sebelumnya.
2. Menguji keandalan alat yang telah dirancang dengan mengubah-ubah kondisi beban utama generator sesuai durasi pada karakteristik beban harian.
3. Membandingkan hasil pengukuran antara metode tanpa ELC dengan metode ELC untuk tiap data pengujian.
4. Mengetahui nilai fluktuasi putaran, frekuensi, dan tegangan untuk tiap pengujian.

Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

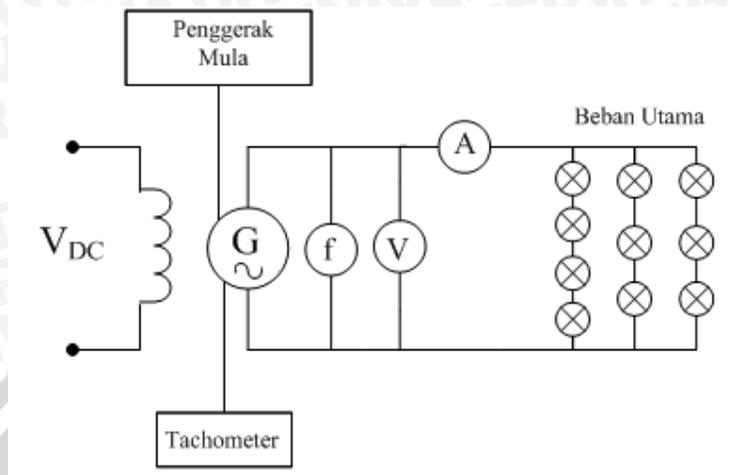
1. Modul *Electronic Load Controller* yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti:
 - a. Rangkaian catu mikrokontroler
 - b. Mikrokontroler ATmega16
 - c. Sensor arus ACS712
 - d. TRIAC BTA16-600B
 - e. *Optocoupler* MOC3021
2. Generator sinkron 1 fasa Hupeh 2 kW

3. Motor induksi 1 fasa Leybold-Didactic 300 W sebagai beban komplemen dinamik
4. Motor induksi 1 fasa 55 W berupa kipas angin sebagai beban komplemen dinamik
5. *Voltage Regulator* DC Protek
6. Voltmeter AC merek KAISE model SK5000B
7. Amperemeter AC jenis Digital Clampmeter merek TENMARS tipe TM-1017
8. Frekuensimeter merk AEG
9. *Tachometer* merk FUJIKOGYO tipe 024276
10. Sepuluh lampu pijar 100 watt sebagai beban utama
11. Tujuh lampu pijar 100 watt sebagai beban komplemen resistif

Dalam pengujian pembebanan generator sinkron, prosedur pengujiannya adalah:

1. Menyusun rangkaian pengujian seperti blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 5.10 untuk pengujian pembebanan generator sinkron metode tanpa ELC dan Gambar 5.11 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. Memberikan catu pada motor induksi penggerak generator dengan sumber satu fasa
 - b. Atur putaran generator melalui pengaturan kopling magnetik hingga putaran generator sinkron berada pada posisi putaran sinkron yaitu 1500 rpm
 - c. Menghubungkan beban utama (10 buah lampu pijar 100 W) pada keluaran generator
 - d. Mengatur sumber tegangan DC dan amati hingga keadaan mantap tegangan nominal $V = 220$ volt dan frekuensi $f = 50$ Hz
 - e. Generator dibebani lampu hingga arus beban bernilai 4,5 A dan generator tetap dalam keadaan mantap
 - f. Menyalakan dan mematikan lampu pijar untuk mendapatkan pemakaian daya sesuai nilai-nilai beban utama (gambar 4.1) lalu mengukur nilai arus menggunakan *clampmeter*

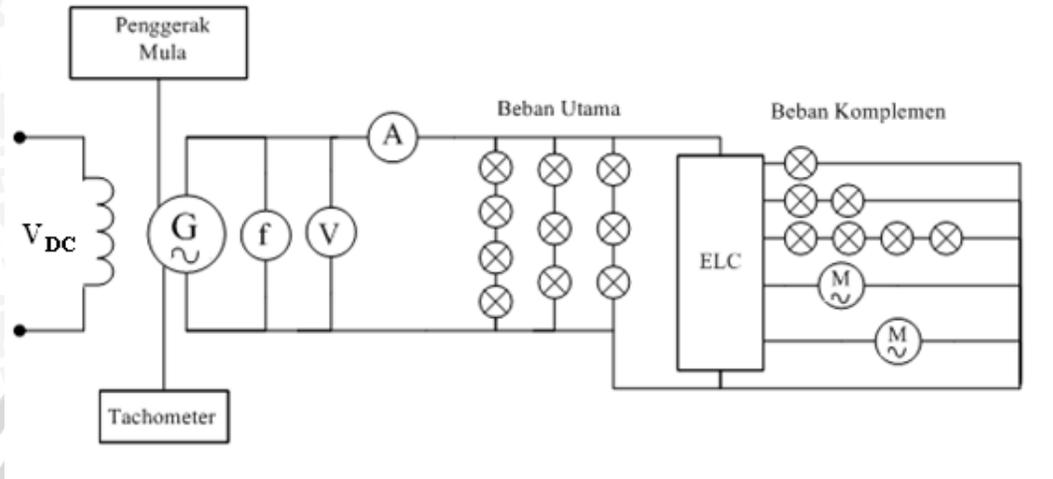
- g. Mencatat nilai putaran (n), frekuensi (f) dan tegangan (V) pada setiap kondisi arus beban.



Gambar 5.10 Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron tanpa ELC
Sumber : Penulis

4. Pengujian selanjutnya menggunakan modul ELC, dengan langkah pengujian:
 - a. Mencatu motor penggerak dengan sumber satu fasa
 - b. Mengatur putaran melalui pengaturan kopling magnetik hingga putaran generator sinkron berada pada posisi putaran sinkron yaitu 1500 rpm
 - c. Menghubungkan beban utama (10 buah lampu pijar 100 W) pada keluaran generator
 - d. Mengatur sumber tegangan DC dan amati hingga keadaan mantap tegangan nominal $V = 220$ volt dan frekuensi $f = 50$ Hz
 - e. Generator dibebani lampu hingga arus beban bernilai 4,5 A dan generator tetap dalam keadaan mantap
 - f. Menghubungkan modul ELC pada keluaran generator (modul ELC telah terhubung pula dengan beban komplemen resistif dan motor induksi)
 - g. Menyalakan dan mematikan lampu pijar untuk mendapatkan pemakaian daya sesuai fluktuasi beban utama (gambar 4.1) lalu mengukur nilai arus menggunakan *clampmeter*

- h. Mengamati perubahan yang terjadi secara otomatis pada beban komplemen yang telah ditentukan pada program mikrokontroler
- i. Mencatat nilai putaran (n), frekuensi (f) dan tegangan (V) pada setiap kondisi arus beban.



Gambar 5.11 Blok diagram pengujian pembebanan generator sinkron dengan ELC
 Sumber : Penulis

Pengujian keseluruhan sistem diawali tanpa penggunaan ELC dengan data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 5.7.

| Daya Beban Utama (W) | Arus Beban Utama (A) | Putaran (rpm) | Frekuensi (Hz) | Tegangan Generator (V) |
|----------------------|----------------------|---------------|----------------|------------------------|
| 1000 | 4,5 | 1510 | 50 | 220 |
| 900 | 4 | 1515 | 50,4 | 223 |
| 800 | 3,7 | 1530 | 50,8 | 227 |
| 700 | 3,2 | 1530 | 51 | 231 |
| 600 | 2,7 | 1550 | 51,2 | 235 |
| 500 | 2,2 | 1535 | 51,6 | 239 |
| 400 | 1,8 | 1540 | 52 | 243 |
| 300 | 1,4 | 1580 | 52,4 | 247 |
| 200 | 0,9 | 1580 | 53 | 252 |
| 100 | 0,5 | 1620 | 53,8 | 257 |

Tabel 5.7 Hasil pengujian pembebanan generator sinkron tanpa ELC
 Sumber : Pengujian

Sedangkan untuk hasil pengujian pembebanan generator sinkron dengan menggunakan ELC dapat dilihat pada Tabel 5.8.

| Daya Beban Utama (W) | Arus Beban Utama (A) | Putaran (rpm) | Frekuensi (Hz) | Tegangan Generator (V) | Arus Beban Total (A) | Arus Beban Komplemen Resistif (A) | Arus Motor Induksi 1 (A) | Arus Motor Induksi 2 (A) |
|----------------------|----------------------|---------------|----------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1000 | 4,4 | 1500 | 50,4 | 220 | 4,4 | 0 | 0 | 0 |
| 900 | 4 | 1520 | 50,6 | 219 | 4,5 | 0,5 | 0 | 0 |
| 800 | 3,5 | 1515 | 50,4 | 217 | 4,3 | 0,8 | 0 | 0 |
| 700 | 3,1 | 1510 | 50,4 | 217 | 4,4 | 1,3 | 0 | 0 |
| 600 | 2,6 | 1525 | 50,5 | 220 | 4,88 | 0 | 2 | 0,28 |
| 500 | 2,1 | 1515 | 51,4 | 217 | 4,88 | 0,5 | 2 | 0,28 |
| 400 | 1,7 | 1525 | 50,4 | 219 | 4,78 | 0,8 | 2 | 0,28 |
| 300 | 1,2 | 1535 | 51,4 | 215 | 4,78 | 1,3 | 2 | 0,28 |
| 200 | 0,9 | 1520 | 50,6 | 219 | 4,88 | 1,7 | 2 | 0,28 |
| 100 | 0,4 | 1520 | 50,8 | 215 | 4,88 | 2,2 | 2 | 0,28 |

Tabel 5.8 Hasil pengujian pembebanan generator sinkron dengan ELC
Sumber : Pengujian

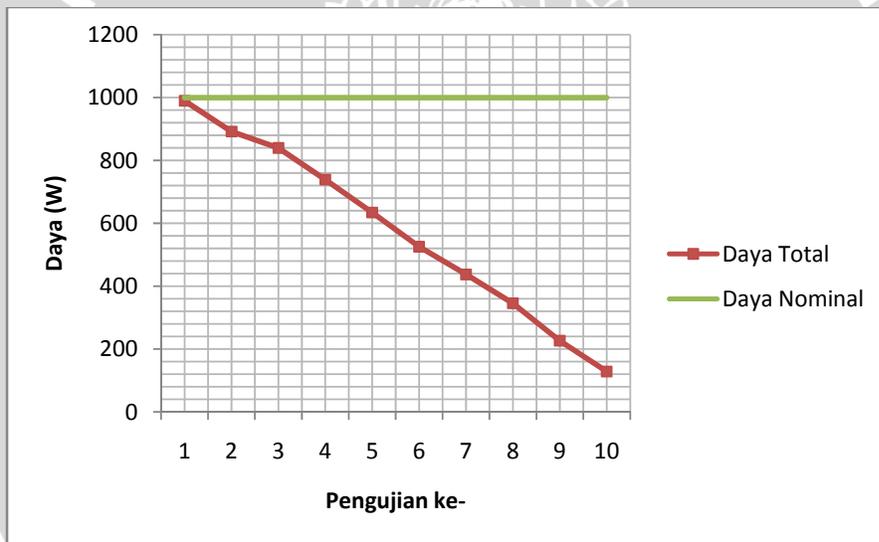
Berdasarkan data hasil pengujian pembebanan generator sinkron yang ditunjukkan pada tabel 5.7 dan tabel 5.8 terlihat bahwa terjadi perbedaan nilai parameter putaran (n), frekuensi (f), dan tegangan (V) pada pengujian tanpa ELC dengan pengujian menggunakan ELC. Pada pengujian tanpa ELC nilai parameter tersebut melebihi nilai nominalnya, sedangkan pada metode ELC nilai parameter tersebut dapat terjaga pada kisaran nilai nominalnya.

Pada saat motor induksi menyala, beban keseluruhan dari generator bersifat induktif. Sehingga sistem memerlukan lebih banyak daya reaktif dari pembangkit. Secara teoritis, keperluan daya reaktif berbanding kuadrat dengan tegangannya. Maka, ketika beban memerlukan daya reaktif yang lebih banyak akan menyebabkan penurunan tegangan.

Pemakaian daya oleh beban utama saat ELC belum digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.9 (untuk beban resistif menggunakan asumsi $\cos \phi = 1$).

| Pengujian ke- | Daya Nominal Beban Utama (W) | Daya Beban Utama Hasil Pengukuran (W) |
|---------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1000 | 990 |
| 2 | 900 | 892 |
| 3 | 800 | 839,9 |
| 4 | 700 | 739,2 |
| 5 | 600 | 634,5 |
| 6 | 500 | 525,8 |
| 7 | 400 | 437,4 |
| 8 | 300 | 345,8 |
| 9 | 200 | 226,8 |
| 10 | 100 | 128,5 |

Tabel 5.9 Nilai daya beban total generator sinkron tanpa penggunaan ELC
 Sumber : Perhitungan

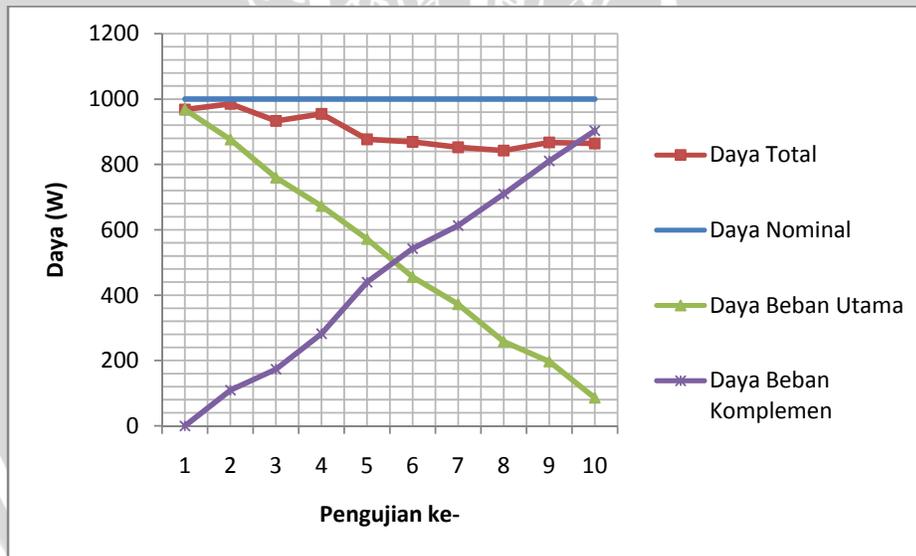


Gambar 5.12 Fluktuasi daya beban total pada pengujian tanpa ELC
 Sumber : Perhitungan

Sedangkan pemakaian daya saat ELC digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.10 (untuk beban resistif menggunakan asumsi $\cos \phi = 1$ dan untuk beban dinamik berdasarkan hasil pengukuran dengan menggunakan wattmeter).

| Pengujian ke- | Daya Nominal Beban Utama (W) | Daya Total Beban Utama dan Komplemen (W) | Daya Beban Komplemen Resistif (W) | Daya Beban Komplemen Dinamik (W) | Daya Beban Utama (W) |
|---------------|------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 1 | 1000 | 968 | 0 | 0 | 968 |
| 2 | 900 | 985,5 | 109,5 | 0 | 876 |
| 3 | 800 | 933,1 | 173,6 | 0 | 759,5 |
| 4 | 700 | 954,8 | 282,1 | 0 | 672,7 |
| 5 | 600 | 877 | 0 | 305 | 572 |
| 6 | 500 | 870,2 | 108,5 | 306 | 455,7 |
| 7 | 400 | 853,5 | 175,2 | 306 | 372,3 |
| 8 | 300 | 842,5 | 279,5 | 305 | 258 |
| 9 | 200 | 864,4 | 372,3 | 302 | 197,1 |
| 10 | 100 | 861 | 473 | 302 | 86 |

Tabel 5.10 Nilai daya beban total pada pembebanan dengan penggunaan ELC
 Sumber : Perhitungan



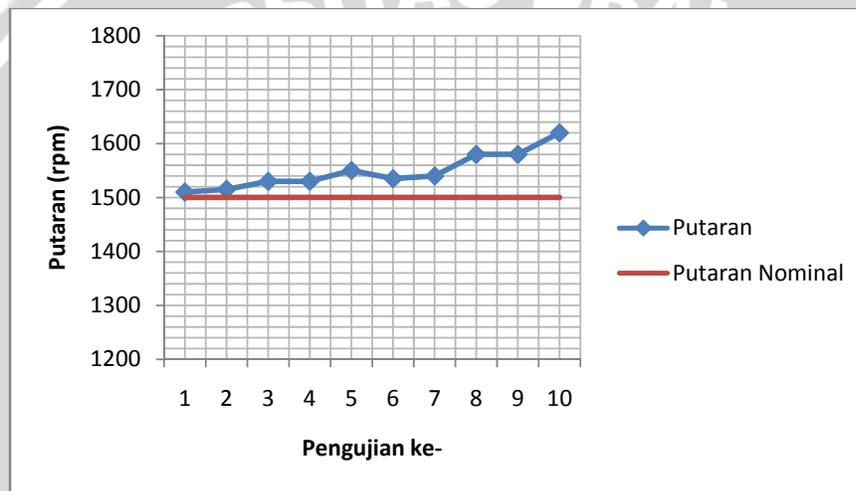
Gambar 5.13 Fluktuasi daya beban total pada pengujian dengan ELC
 Sumber : Perhitungan

Perubahan arus menuju beban utama yang mengakibatkan perubahan daya beban utama yang ditunjukkan Tabel 5.9. Perubahan daya beban ini memberikan akibat pada sistem yang daya nominalnya tetap. Seperti terlihat pada Gambar 5.12 fluktuasi daya beban masih berada pada nilai yang lebih kecil dari daya nominal dengan rata-rata daya beban sebesar 575,99 watt. Daya beban pada metode ELC juga mengalami fluktuasi

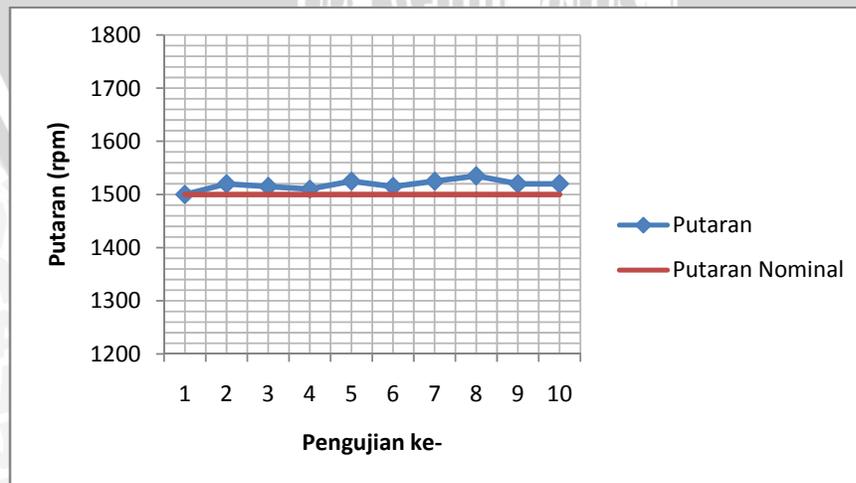
namun dalam rentang yang masih pada kisaran daya nominal dengan daya rata-rata sebesar 902,1 watt. Tabulasi daya beban dapat dilihat pada Tabel 5.11.

| Metode | Kondisi daya beban | watt | Selisih dari daya nominal |
|-----------|--------------------|--------|---------------------------|
| tanpa ELC | minimum | 128,5 | -87,15% |
| | maksimum | 990 | -1% |
| | rata-rata | 575,99 | -42,4% |
| ELC | minimum | 842,5 | -15,75% |
| | maksimum | 985,5 | -1,45% |
| | rata-rata | 902,1 | -9,79% |

Tabel 5.11 Tabulasi daya beban
Sumber : Perhitungan data pengujian



Gambar 5.14 Fluktuasi putaran generator tanpa penggunaan ELC
Sumber : Pengujian

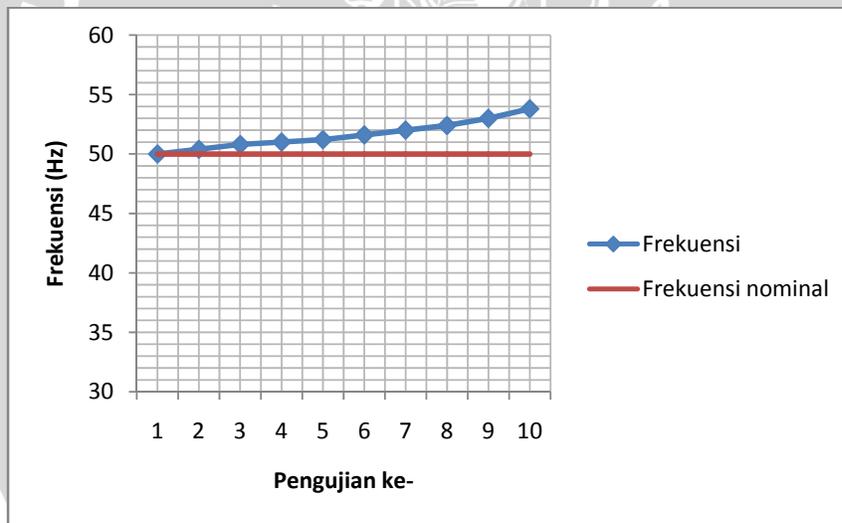


Gambar 5.15 Fluktuasi putaran generator dengan penggunaan ELC
Sumber : Pengujian

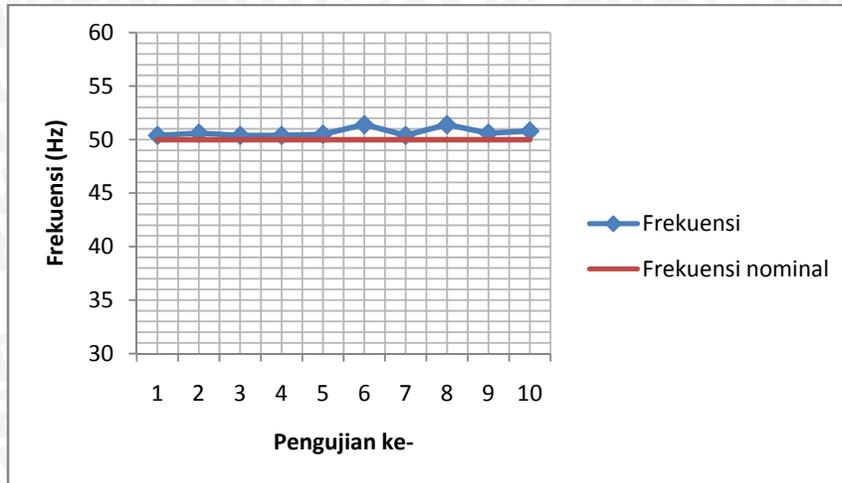
Respon putaran generator saat terjadi perubahan arus beban pada pengujian tanpa ELC menunjukkan nilai di atas putaran nominal generator. Fluktuasi putaran generator saat terjadi perubahan beban ditunjukkan oleh Gambar 5.14 dengan nilai putaran rata-rata 1549 rpm. Untuk pengujian dengan ELC menunjukkan nilai putaran rata-rata bernilai 1518,5 rpm dengan fluktuasi putaran metode ELC ditunjukkan oleh Gambar 5.15. Tabulasi respon putaran generator ditunjukkan Tabel 5.12.

| Metode | Kondisi | rpm | Selisih dari putaran nominal |
|-----------|-----------|--------|------------------------------|
| tanpa ELC | minimum | 1510 | +0,67% |
| | maksimum | 1620 | +8% |
| | rata-rata | 1549 | +3,26% |
| ELC | minimum | 1500 | 0% |
| | maksimum | 1535 | +2,3% |
| | rata-rata | 1518,5 | +1,23% |

Tabel 5.12 Tabulasi respon putaran generator
 Sumber : Perhitungan data pengujian



Gambar 5.16 Fluktuasi frekuensi tanpa penggunaan ELC
 Sumber : Pengujian

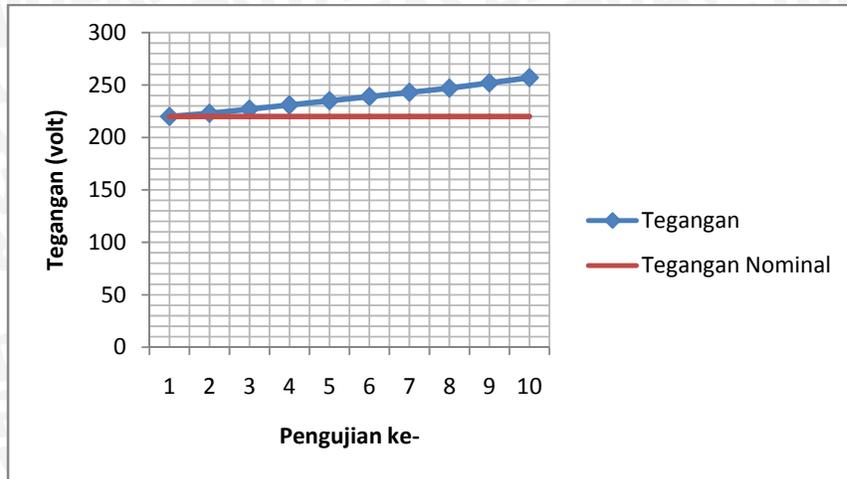


Gambar 5.17 Fluktuasi frekuensi dengan penggunaan ELC
 Sumber : Pengujian

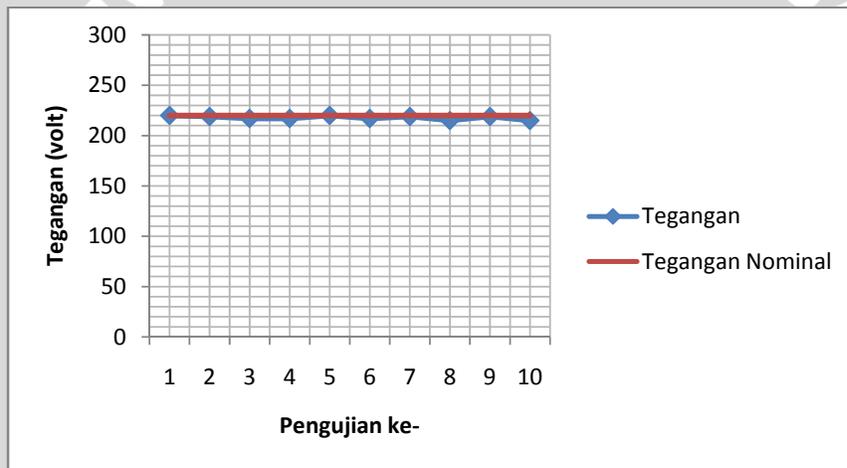
Respon frekuensi saat pengujian dengan arus beban utama yang berubah-ubah pada pengujian tanpa ELC diperoleh nilai frekuensi rata-rata sebesar 51,62 Hz dengan fluktuasi frekuensi seperti pada Gambar 5.16. Untuk pengujian dengan ELC diperoleh nilai frekuensi rata-rata sebesar 50,69 Hz dengan fluktuasi frekuensi seperti yang ditunjukkan Gambar 5.17. Tabulasi respon frekuensi ditunjukkan Tabel 5.13.

| Metode | Kondisi frekuensi | hertz | Selisih dari frekuensi |
|-----------|-------------------|-------|------------------------|
| tanpa ELC | minimum | 50 | 0% |
| | maksimum | 53,8 | +7,6% |
| | rata-rata | 51,62 | +3,24% |
| ELC | minimum | 50,4 | +0,8% |
| | maksimum | 51,4 | +2,8% |
| | rata-rata | 50,69 | +1,38% |

Tabel 5.13 Tabulasi respon frekuensi
 Sumber : Perhitungan data pengujian



Gambar 5.18 Fluktuasi tegangan pada pengujian tanpa ELC
 Sumber : Pengujian



Gambar 5.19 Fluktuasi tegangan pada pengujian dengan ELC
 Sumber : Pengujian

Respon tegangan pada saat pengujian tanpa ELC menunjukkan nilai rata-rata tegangan sebesar 237,4 volt dengan fluktuasi tegangan pada pengujian tanpa ELC ditunjukkan pada Gambar 5.18. Untuk pengujian menggunakan ELC menunjukkan nilai rata-rata tegangan sebesar 217,8 volt dengan fluktuasi tegangan pada pengujian menggunakan ELC ditunjukkan pada Gambar 5.19. Tabulasi respon tegangan ditunjukkan pada Tabel 5.14.

| Metode | Kondisi | volt | Selisih dari tegangan |
|--------------|-----------|-------|-----------------------|
| tanpa ELC | minimum | 220 | 0% |
| | maksimum | 257 | +16,81% |
| | rata-rata | 237,4 | +7,9% |
| ELC | minimum | 215 | -2,27% |
| | maksimum | 220 | 0% |
| | rata-rata | 217,8 | -1% |

Tabel 5.14 Tabulasi respon tegangan
Sumber : Perhitungan data pengujian

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis di atas, pengendalian beban menggunakan peralatan *Electronic Load Controller* mampu menjaga nilai daya beban pada kisaran nilai daya nominal sehingga nilai putaran (n), frekuensi (f), dan tegangan (V) stabil pada nilai yang masih dapat ditoleransi. Selain itu, peralatan ELC ini juga mampu mengaktifkan beban komplemen resistif saat terjadi penurunan arus beban utama lebih besar dari 0,5 A. Sedangkan motor induksi sebagai beban komplemen dinamik dapat berputar dengan nilai arus nominalnya pada saat terjadi penurunan arus beban utama lebih besar dari 2,5 A.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Beban komplemen, baik berupa beban resistif maupun dinamik dapat digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan generator saat terjadi fluktuasi pemakaian daya oleh beban utama karena beban komplemen berfungsi menggantikan daya beban utama yang berkurang.
2. Modul *Electronic Load Controller* mampu mendeteksi perubahan daya (nilai arus) beban utama lalu melakukan pemicuan pada komponen TRIAC untuk mengaktifkan beban komplemen yang diinginkan.
3. Lampu pijar sebagai beban komplemen resistif mampu aktif saat terjadi penurunan arus beban utama lebih besar dari 0,5 A. Sedangkan motor induksi dan motor penggerak kipas angin sebagai beban komplemen dinamik dapat berputar pada saat terjadi penurunan arus beban utama lebih besar dari 2,5 A.
4. Modul *Electronic Load Controller* mampu menjaga nilai tegangan keluaran generator dengan nilai fluktuasi rata-rata -1% dari tegangan nominalnya dan nilai frekuensi keluaran generator dengan nilai fluktuasi rata-rata +1,38%.

6.2 Saran

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

1. Mempertimbangkan pengaturan sudut penyalaan TRIAC sebagai pengalihan daya ke beban komplemen dinamik untuk mengurangi nilai arus pengasutan dan mendapatkan pengalihan daya yang lebih halus.
2. Menggunakan spesifikasi komponen yang lebih tinggi dari alat yang dibuat untuk kapasitas PLTMH yang lebih besar.
3. Mewujudkan sistem ELC dengan sistem pembebanan motor sebagai beban komplemen secara nyata pada PLTMH.

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.
- Anonim. *Laporan Kerja Praktek*.
<http://dc166.4shared.com/img/oFZWDSwf/preview.html> (diakses tanggal 16 April 2012)
- Atmel. 2006. *ATmega8535/ATmega8535L, 8-bit AVR Microcontroller with 8 Kbytes in-System Programmable Flash*. California: Atmel.
- Arismunandar, Wiranto. 1997. *Teknik Tenaga Listrik I*. Bandung: ITB Press.
- Bose, Bimal K. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Djarmiko,I., Kustono. 2009. *Performasi Parameter Motor Induksi Tiga Fasa dengan Sumber Tegangan dan Frekuensi Variabel*. Jurnal Edukasi@Elektro Vol. 5 Maret 2009
- Fitzgerald,A.E, Charles Kingley,Jr, Stephen, D, Umans. 2003. *Electric Machinery 5th edition*. Singapore: Mc.Graw-Hill,Inc
- Fairchild. 2012. *LM78XX Datasheet*. Fairchild Semiconductor Corporation
- Fairchild. 2002. Application Note AN-3004: *Applications of Zero Voltage crossing Optically Isolated Triac Drivers*. Fairchild Semiconductor Corporation.
- Harvey, Adam. 1993. *Micro-Hydro Design Manual*. Schumacher Centre for Technology and Development Bourton Hall, UK.
- Hasan, Achmad. 2006. *Pengontrol Beban Elektronik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
- Mazda, Fraidoon. 1997. *Power Electronics Handbook 3rd Edition*. Oxford: Newnes.
- Mbabazi, Shoan. 2010. *Analysis and Design of Electronic Load Controllers for Micro-hydro System in the Developing World*. University of Sheffield
- Mornhinweg, Manfred. *Electronic Load Controller for Microhydro System*.
<http://ludens.cl/Electron/picelc/picelc.html>. (diakses tanggal 22 Maret 2012)
- Parekh, Rakesh. 2003. *AC Induction Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc.
- Pillai, S. K. 2004. *A First Course of Electrical Drives*. New Age International Publisher

Portegijs, Jan. 2000. *The 'Humming Bird' Electronic Load Controller*. Zwaag: Eneco

Rashid, Muhammad H. 2001. *Power Electronics Handbook*. London: Academic Press.

Renerconsys. 2010. *Digital Load Controller for Synchronous Generator*. Renerconsys.

SGS-Thomson. 1995. *BTA16-B Datasheet*. SGS-Thomson Microelectronic.

Zuhal. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung : ITB

