

Desain Kontrol Beban Elektronik pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

(Electronic load controller design on microhydro power plan)

MACHMUD EFFENDY

ABSTRACT

Due to its lower cost and quicker response in comparison with governor, electronic load control (ELC) has been widely used to replace governor in microhydro power plant. It has lower price and quicker response than governor. The synchronous generator used in microhydro power plant produces stable voltage, because it has been controlled by an AVR (automatic voltage regulator). If consumer loads changes, the frequency not the voltage of the electrical wave will change. Therefore, ELC is used to stabilize the electrical wave frequency and detect the change of consumer load to be transferred to ballast load. This ELC uses frequency sensor to detect the change of consumer load. Frequency sensor processes linearity level to the change of voltage which equals to $R^2 = 0.97$. The use of ELC causes the generator voltage is approximately 220,3V to 224,4V with percentage of voltage unbalance 0,56% and the generator frequency is 49,5Hz to 50,1Hz with percentage of frequency unbalance 0,41%.

Keywords: ELC, governor, ballast, microhydro

PENDAHULUAN

PLTMh (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) merupakan salah satu sumber energi terbarukan (*renewable energy*) yang masih belum banyak digunakan di wilayah Indonesia. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM, 2003), Indonesia mempunyai potensi tenaga air sebesar 75.000 MW dan saat ini baru 2,5 % potensi tersebut dimanfaatkan. Oleh karena itu perlu ditingkatkan penggunaan PLTMh di daerah-daerah yang berpotensi untuk dibangun mikrohidro, sehingga masyarakat tidak lagi terlalu bergantung kepada PLN.

Pembangunan pembangkit listrik tenaga mikrohidro bermanfaat bagi daerah – daerah pedesaan yang masih belum teraliri jaringan listrik PLN. Dengan adanya PLTMh, maka daerah-daerah mendapatkan listrik mandiri yang dimanfaatkan untuk kebutuhan rumah tangga, informasi dan kebutuhan industri kecil (Kamal, 2000).

Seperti diketahui bahwa *governor* atau biasa disebut dengan *guide vane* pada PLTMh

merupakan peralatan mekanis yang berfungsi mengatur debit air yang masuk ke dalam turbin agar tenaga air yang masuk turbin sesuai dengan daya listrik yang dikeluarkan oleh pembangkit hingga putaran akan menjadi konstan (Warsito, 2005). Penggunaan *governor* tersebut kurang menguntungkan bila ditinjau secara ekonomis, karena harganya lebih mahal dibandingkan dengan peralatan elektronis seperti ELC. Para produsen di dalam negeri masih belum sanggup bersaing dengan produksi luar negeri, baik dari segi kualitas maupun harganya. Untuk itu, perlu dibuat desain kontrol beban elektronika atau sering disebut dengan *electronic load controller* (ELC) sebagai pengganti dari *governor*. Alat ini berfungsi untuk menstabilkan beban generator dengan cara menambahkan beban komplemen pada PLTMh dengan kapasitas sesuai yang dibutuhkan di lapangan. Dengan stabilnya beban generator, maka putaran generator menjadi konstan dan akhirnya frekuensi yang dihasilkan juga ikut menjadi konstan.

Setelah mengetahui latar belakang penelitian bahwa putaran generator harus dijaga kestabilannya, agar frekuensi yang dihasilkan

konstan, maka dapat dirumuskan beberapa masalah pada penelitian ini, yaitu bagaimana memperoleh desain alat rangkaian kontrol beban elektronik pada PLTMh, dan bagaimana mengukur unjuk kerja sistem yang ditinjau dari kestabilan frekuensi yang dihasilkan oleh generator dengan beban yang berubah-ubah.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh desain alat rangkaian kontrol beban elektronik pada PLTMh, dan mengetahui unjuk kerja sistem ditinjau dari kestabilan frekuensi yang dihasilkan oleh generator.

METODE PENELITIAN

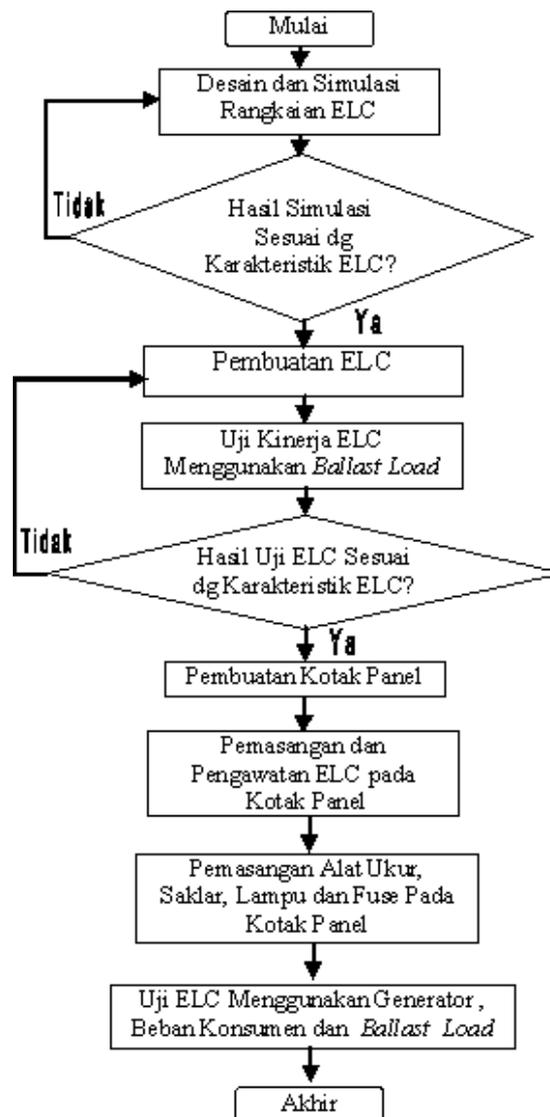
Langkah-langkah penelitian dalam pembuatan alat kontrol beban elektronik (ELC) dapat dilihat pada Gambar 1.

Pembuatan Desain Sistem ELC

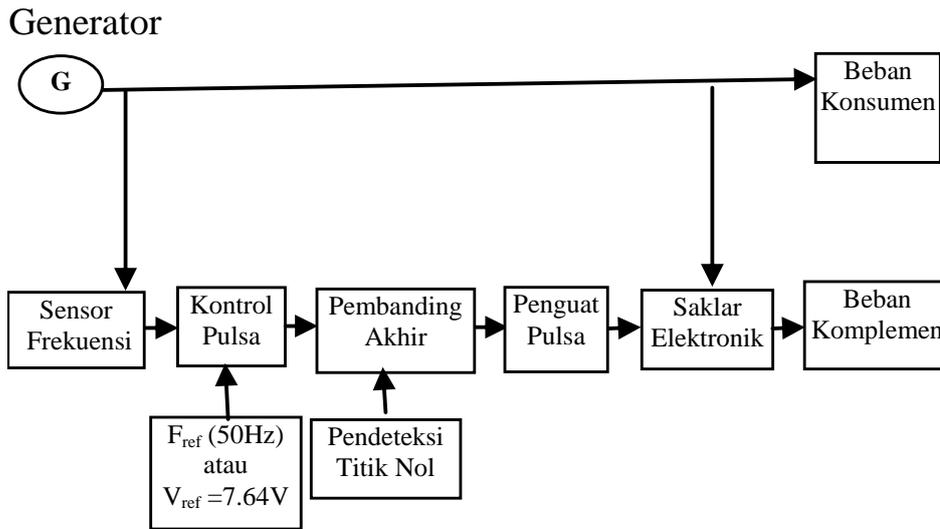
Diagram blok sistem ELC ditampilkan pada Gambar 2.

Pembuatan Rangkaian Sensor Frekuensi

Untuk mendeteksi perubahan frekuensi pada generator, maka diperlukan suatu rangkaian yang dapat mengubah besaran frekuensi menjadi besaran tegangan. Rangkaian ini dikenal juga dengan rangkaian gelombang segitiga (*sawtooth wave*). Prinsip dari rangkaian ini adalah jika frekuensi pada generator naik, maka tegangan keluaran dari rangkaian gelombang segitiga akan turun, dan demikian sebaliknya.



GAMBAR 1. Diagram alir penelitian

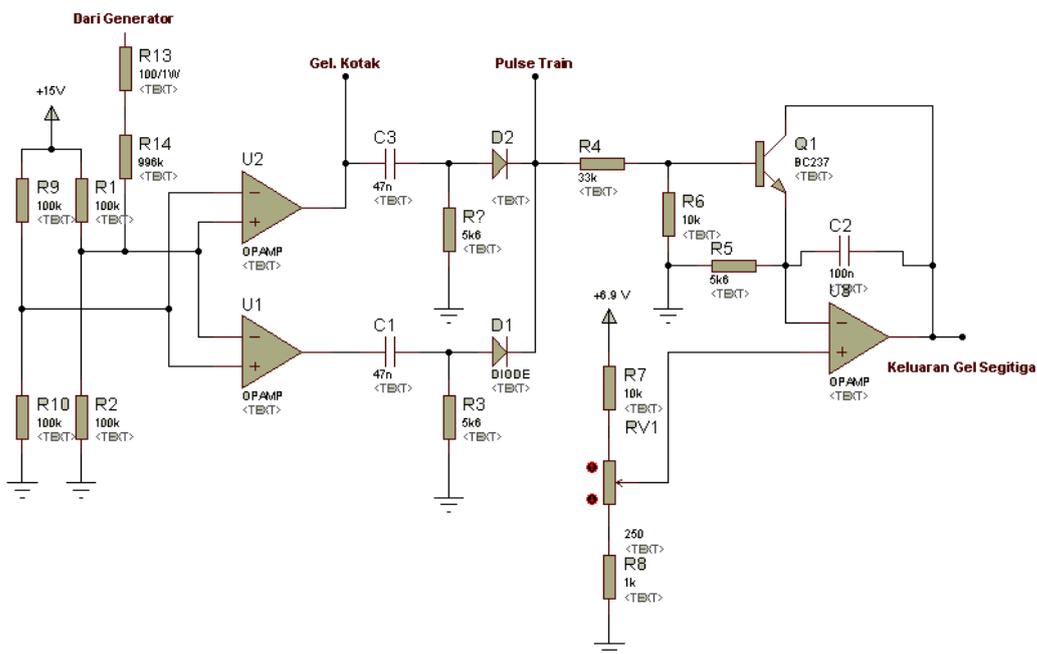


Gambar 2. Diagram blok sistem ELC

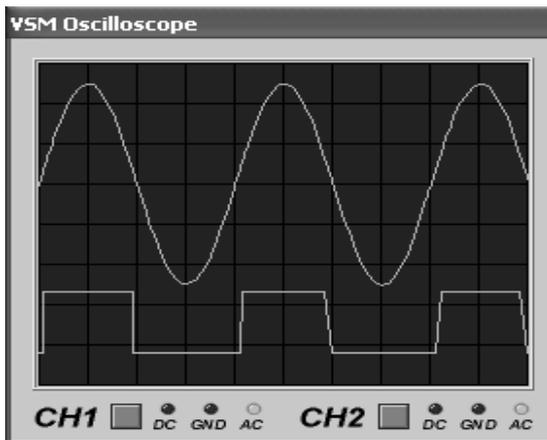
Sebelum menjadi gelombang segitiga, maka gelombang sinusoida keluaran dari generator harus diubah terlebih dahulu menjadi gelombang kotak (*block wave*) dan selanjutnya diubah lagi menjadi gelombang pulsa sesaat (*pulse train*) pada waktu terjadi peralihan dari *high* ke *low*, maupun sebaliknya. Rangkaian selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari rangkaian tersebut dapat dijelaskan bahwa tegangan efektif generator sebesar 220V dengan frekuensi 50 Hz dapat diubah menjadi gelombang kotak oleh dua Op-Amp yang

berfungsi sebagai pembanding dengan tegangan catu sebesar +15V. Oleh itu, apabila tegangan pada *non inverting* op-amp lebih besar dari tegangan pada *inverting* op-amp, maka keluarannya menjadi *saturation* sebesar +15V, sebaliknya jika tegangan pada *non inverting* op-amp lebih kecil dari tegangan pada *inverting* op-amp, maka keluarannya menjadi *cut off* sebesar 0V, seperti terlihat dalam hasil tampilan osciloskop pada Gambar 4.

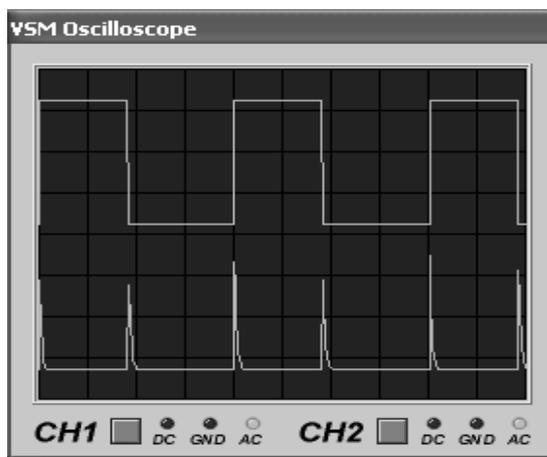


GAMBAR 3. Rangkaian sensor frekuensi



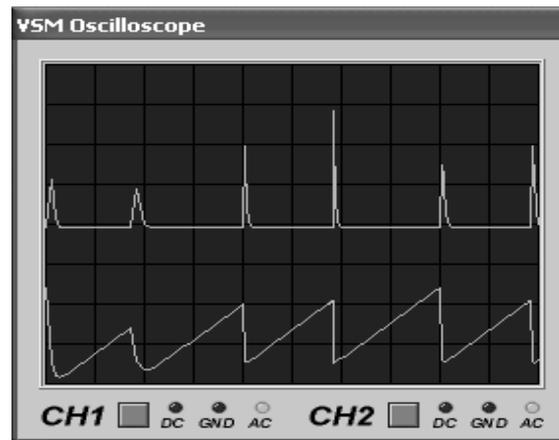
GAMBAR 4. Tampilan keluaran gelombang kotak

Keluaran dari gelombang kotak diumpankan pada sebuah kapasitor yang berfungsi sebagai pengisi (*charge*) dan pengosong (*discharge*) muatan, sehingga pada saat keluaran gelombang kotak berubah dari *high* ke *low* atau sebaliknya, maka akan terjadi pulsa sesaat selama 0,156 milidetik (Gambar 5).



GAMBAR 5. Tampilan keluaran gelombang pulsa train

Pulsa sesaat ini digunakan sebagai saklar elektronik yang menutup selama 0,156 milidetik dan diumpankan pada rangkaian pembangkit gelombang segitiga dan menghasilkan tegangan puncak untuk frekuensi sumber 50 Hz sebesar 7,64V, seperti terlihat pada tampilan di Gambar 6.



GAMBAR 6. Keluaran gelombang segitiga

Pembuatan Rangkaian Pendeteksi Titik Nol

Rangkaian ini berfungsi untuk mengetahui titik nol dari gelombang sumber generator AC. Hal ini diperlukan untuk menentukan kapan sudut penyalaan pada triac dimulai. Rangkaian lengkapnya ditunjukkan pada Gambar 7.

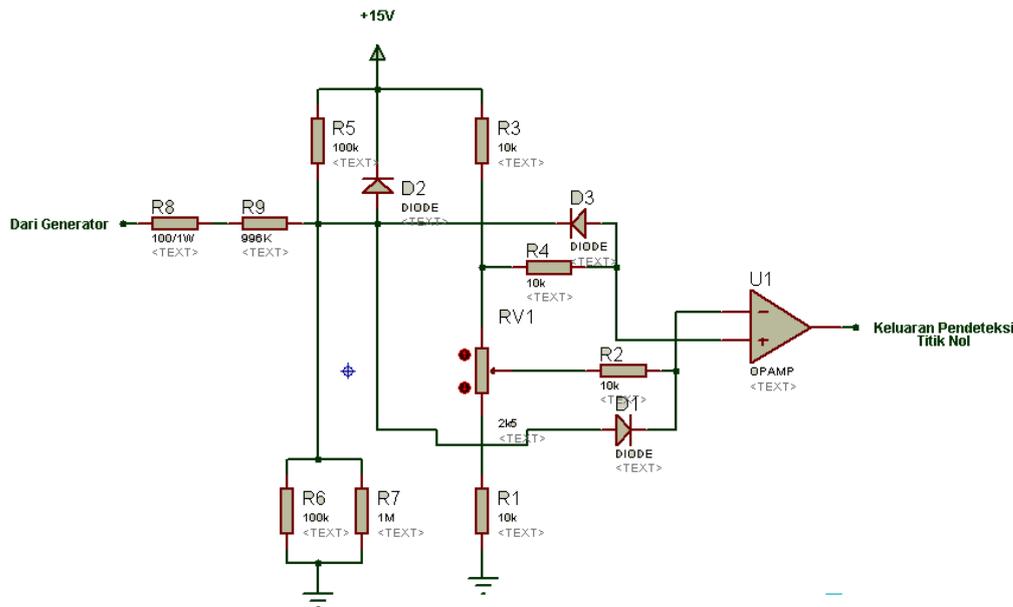
Rangkaian tersebut terdiri dari rangkaian *proportional* (op-amp yang atas) dan rangkaian *integrator* (op-amp yang bawah). Fungsi rangkaian *proportional* adalah sebagai pembanding antara frekuensi generator dengan frekuensi referensi (50 Hz atau 7,64V) dan sekaligus sebagai penguat tegangan, sedangkan rangkaian *integrator* berfungsi sebagai pembanding dan sebagai pengatur pulsa.

Jika frekuensi generator lebih kecil dari frekuensi referensi, maka kontrol pulsa akan mengeluarkan pulsa *high*, pulsa ini diperkuat oleh rangkaian *proportional* dan diatur kecepatan peralihan dari pulsa *low* ke *high* oleh rangkaian *integrator*, begitu juga sebaliknya jika frekuensi generator lebih tinggi dari frekuensi referensi, maka kontrol pulsa akan mengeluarkan pulsa *low*, pulsa ini diperkuat oleh rangkaian *proportional* dan diatur kecepatan peralihan dari pulsa *high* ke *low* oleh rangkaian *integrator*.

Nilai penguatan dari rangkaian *proportional* sesuai dengan rumus penguatan tak membalik (*non inverting*) yaitu (Coughlin, 1982):

$$A_v = \frac{R_{20}}{R_{V_5}} + 1 \quad (1)$$

Jika nilai $R_{V_5} = 25k$, maka penguatan tegangannya sebesar:



GAMBAR 7 Rangkaian kontrol pulsa

$$A_v = \frac{220k}{25k} + 1 = 9,8 \text{ kali}$$

Waktu yang dibutuhkan oleh rangkaian integrator untuk berubah dari kondisi *high* menjadi *low* atau sebaliknya adalah:

$$V_o = V_i \cdot \frac{t}{R.C} \quad (2)$$

$$t = \frac{V_o \cdot R.C}{V_i}$$

Pada saat $V_i = 7,64V$ (frekuensi 50 Hz), V_o terukur adalah 15V, maka:

$$t = \frac{15 \cdot 100k \cdot 470n}{7,64} = 0,024 \text{ detik}$$

Pembuatan Rangkaian Pembanding Akhir

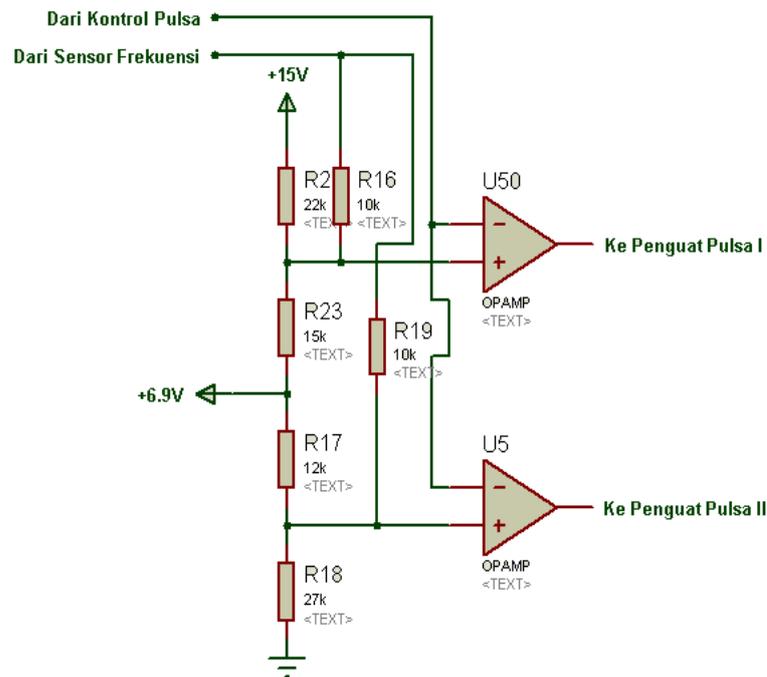
Rangkaian pembanding akhir (Gambar 8) berfungsi sebagai pembanding akhir antara keluaran sensor frekuensi generator dengan keluaran kontrol pulsa. Oleh itu, jika beban konsumen turun, maka frekuensi generator naik (tegangan turun di bawah tegangan frekuensi), maka keluaran kontrol pulsa akan berubah dari *high* menjadi *low*. Seterusnya, pulsa *low* ini akan diumpangkan ke rangkaian pembanding untuk dibandingkan kembali dengan frekuensi generator dengan hasil

keluaran dari rangkaian pembanding akhir adalah pulsa *high*. Pulsa *high* ini akan diumpangkan ke rangkaian penguat pulsa agar dapat dihasilkan arus keluaran sebesar 50 mA. Arus ini akan diumpangkan ke rangkaian saklar elektronik (TRIAC), sehingga akan menimbulkan arus yang mengalir pada beban komplement. Sebaliknya jika beban konsumen naik, maka rangkaian pembanding akhir akan mengeluarkan pulsa *low*, sehingga mengakibatkan rangkaian penguat pulsa tidak bekerja (mengalami *cut-off*), dan *pin gate* TRIAC tidak mendapatkan arus, maka tidak terdapat arus yang mengalir pada beban komplement.

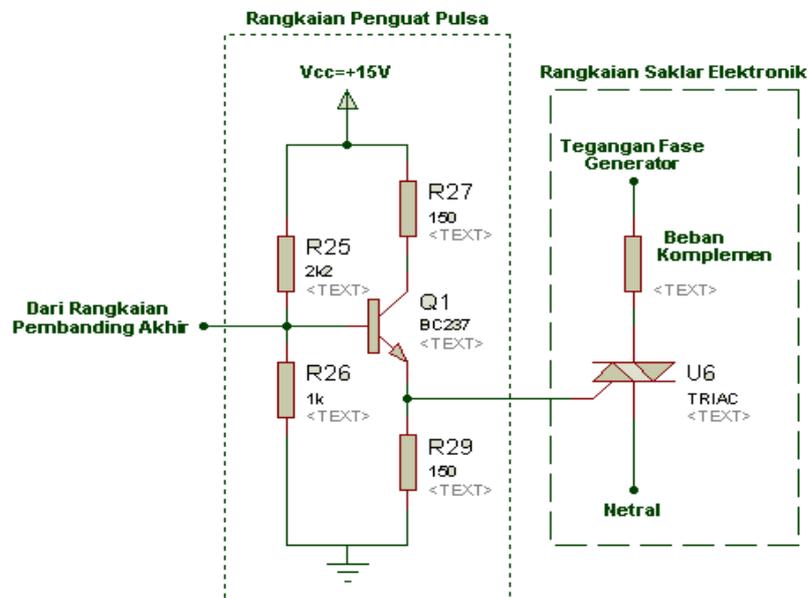
Dari rangkaian pada Gambar 8 terlihat adanya dua rangkaian pembanding akhir yang menuju ke penguat pulsa. Hal ini dikarenakan terdapat dua beban komplement yang akan digunakan (dua grup dalam satu fase).

Pembuatan Rangkaian Penguat Pulsa dan Saklar Elektronik

Rangkaian penguat pulsa berfungsi menguatkan arus keluaran rangkaian pembanding akhir, karena arus keluarannya hanya 5 mA, sedangkan untuk memicu TRIAC dibutuhkan arus *gate* sebesar 50 mA seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.



GAMBAR 8. Rangkaian pembanding akhir



GAMBAR 9 Rangkaian penguat pulsa dan saklar elektronik

Rangkaian penguat pulsa di atas menggunakan transistor BC237 yang mempunyai nilai $h_{FE}=120$, sehingga apabila arus pada basis (I_b)=5 mA, maka sesuai dengan rumus penguatan arus pada transistor yaitu (Malvino, 1992):

$$I_c \cong I_e = h_{FE} \times I_b \quad (3)$$

$$= 120 \times 5 \text{ mA} = 600 \text{ mA} (I_c \text{ maksimal})$$

Karena TRIAC hanya membutuhkan arus gate sebesar 50 mA, maka transistor hanya perlu mengeluarkan arus minimal 50 mA. Oleh karena itu dibutuhkan R_c dan R_e sebagai pembatas arus pada transistor. Nilai R_c dan R_e dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_{cc} = I_c \cdot R_c + V_{ce} + I_e \cdot R_e \quad (4)$$

$$= I_e (R_c + R_e) + V_{ce}$$

$$15 = 50 \cdot 10^{-3} (R_c + R_e) + 0.2$$

$$14.8 = 50 \cdot 10^{-3} (R_c + R_e)$$

$$(R_c + R_e) = 296 \cong 300 \Omega.$$

Dari persamaan di atas, dapat ditentukan nilai $R_c = R_e = 150 \Omega$, sedangkan rangkaian saklar elektronik berfungsi untuk melewatkan arus generator pada beban komplemen jika terdapat arus gate sebesar 50 mA. Rangkaian ini menggunakan TRIAC jenis BTA40 yang dapat melewatkan arus maksimal 40A dengan tegangan AC sampai dengan 600 V (Rasyid, 1998). Dengan demikian, rangkaian ELC yang didesain mempunyai kemampuan maksimal mengatur beban dengan daya sekitar 8 kW.

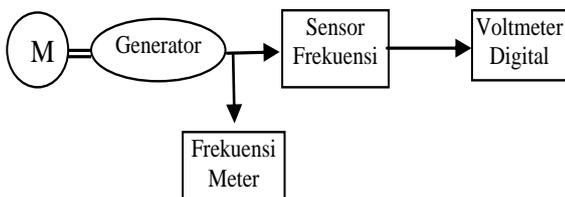
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perancangan diimplementasikan dalam bentuk pembuatan alat dengan cara merangkai komponen elektronik ke dalam PCB, yang dilanjutkan dengan pengujian di laboratorium.

Pengujian menggunakan generator sinkron 0.5 kW 1 fase dengan penggerak utama sebuah motor AC 1 hp, beban konsumen dan komplemen menggunakan lampu pijar, AVO meter, *power meter socomec*, tang amper dan *Hertz meter*.

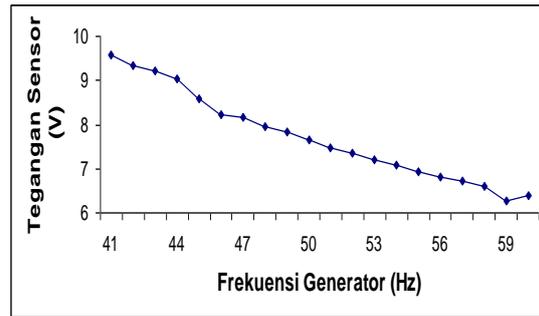
Pengujian Rangkaian Sensor Frekuensi

Pengujian rangkaian sensor frekuensi berhubungan dengan keluaran frekuensi generator. Diagram blok pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 10.



GAMBAR 10, Diagram pengujian sensor frekuensi

Dari hasil pengujian diperoleh bentuk grafik hubungan antara frekuensi generator dengan nilai tegangan dari sensor frekuensi seperti ditunjukkan pada Gambar 11.

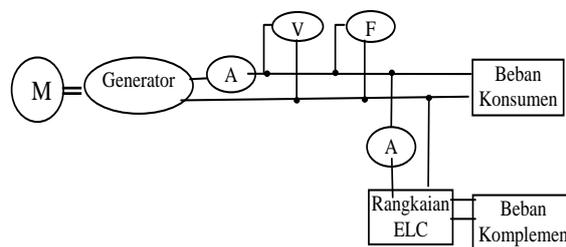


GAMBAR 11. Grafik pengujian sensor frekuensi

Pada Gambar 11 terlihat bahwa pengujian sensor frekuensi bersifat linier dengan nilai $R^2 = 0,97$. Hal ini menunjukkan bahwa besaran frekuensi generator dapat diwakili menjadi besaran tegangan, yang selanjutnya dapat dijadikan referensi untuk rangkaian berikutnya.

Pengujian Rangkaian Kontrol Beban Elektronik (ELC)

Untuk mewujudkan pengujian ini digunakan diagram blok pengujian seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 12.



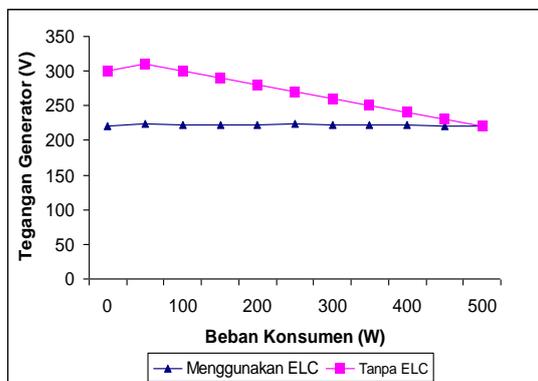
GAMBAR 12. Diagram blok pengujian ELC

Adapun langkah-langkah pengujian rangkaian ELC ini adalah sebagai berikut:

1. Setelah rangkaian ELC sudah diuji dan berada di dalam kotak panel listrik beserta dengan alat ukur arus, tegangan dan frekuensi, maka ELC dapat dihubungkan ke generator listrik sebagai sumber listrik, kemudian ELC juga dihubungkan dengan beban konsumen dan beban komplemen. Perlu diingat di sini bahwa besarnya daya beban komplemen adalah 20% lebih besar dari daya yang dimiliki oleh beban konsumen.
2. Saklar (MCB) yang menghubungkan antara generator dengan beban konsumen dimatikan. Jadi pertama kali daya generator akan dialirkan ke beban komplemen.

3. Motor AC penggerak dijalankan untuk memutar generator sinkron sampai mengeluarkan tegangan AC 220V dengan frekuensi 50 Hz dan pastikan bahwa semua arus sudah diserap oleh beban komplemen, hal ini ditunjukkan oleh ampermeter yang terpasang pada kotak panel.
4. Apabila tegangan generator tetap stabil sekitar 220V dengan frekuensi sekitar 50 Hz, maka beban konsumen siap untuk menerima arus generator dengan menghidupkan saklar yang menghubungkan antara generator dengan beban konsumen.
5. Bila saat beban konsumen sudah terhubung, dipastikan arus pada beban komplemen berkurang dan frekuensi generator tetap stabil pada angka sekitar 50 Hz dengan tegangan 220V.
6. Kemudian diuji unjuk kerja rangkaian ELC dengan mengubah-ubah besarnya beban konsumen. Dalam kondisi seperti ini, maka frekuensi dan tegangan generator harus tetap stabil, seperti yang ditunjukkan pada hasil pengujian di bawah ini (Gambar 13).

Hasil pengujian di atas ditunjukkan dalam Gambar 13.



GAMBAR 13 Grafik tegangan fungsi beban

Berdasarkan grafik di atas terlihat bahwa tegangan generator cenderung konstan terhadap beban konsumen, apabila menggunakan ELC. Dan nilai tegangannya berkisar antara 220,3V - 224,2V.

Dari hasil tersebut dapat dihitung nilai simpangan bakunya (*standard deviation*) pengukurannya dengan persamaan (Sujono, 1999):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{5}$$

dengan,

- S : standard deviasi.
- n : jumlah percobaan.
- X_i : nilai ke .i
- \bar{x} : nilai rata-rata.

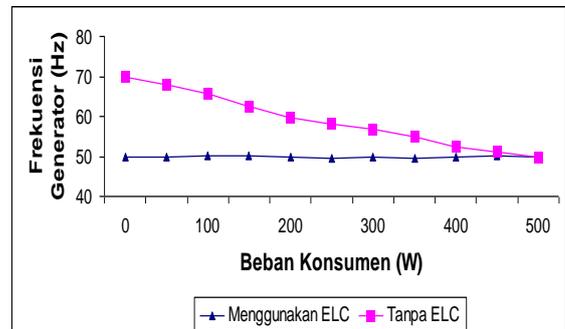
Persentase ketidakseimbangannya juga dapat dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{ ketidakseimbangan} = \left(\frac{S}{\bar{x}} \right) \times 100 \tag{6}$$

Hasil perhitungan simpangan baku dan persentase ketidaksimbangannya adalah sebagai berikut:

TABEL 1. Hasil perhitungan simpangan baku dan persentase ketidakseimbangan tegangan

Tanpa ELC		Menggunakan ELC	
Simpangan Baku	% Ketidak seimbangan	Simpangan Baku	% Ketidak seimbangan
±30,68	11,42%	±1,23	0,56%



GAMBAR 14. Grafik frekuensi fungsi beban

Pada Gambar 14 terlihat bahwa frekuensi generator cenderung konstan terhadap beban konsumen, apabila menggunakan ELC. Nilai frekuensinya berkisar antara 49,5 - 50,1 Hz, sedangkan hasil perhitungan simpangan baku dan persentase ketidaksimbangannya dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2. Hasil perhitungan simpangan baku dan persentase ketidakseimbangan frekuensi

Tanpa ELC		Menggunakan ELC	
Simpangan Baku	% Ketidak seimbangan	Simpangan Baku	% Ketidak Seimbangan
±6,83	11,59%	±0,21	0,41%

KESIMPULAN

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan maka berikut ini dapat diambil beberapa kesimpulan:

1. Dengan menggunakan pengontrol beban elektronik (ELC) sebagai pengganti *governor* pada PLTMh dan beban komplemen, maka selain sangat ekonomis juga konstruksi turbin menjadi lebih sederhana, karena tidak memerlukan pengaturan sudut.
2. Frekuensi sistem PLTMh sepenuhnya bergantung pada kecepatan generator yang diputar oleh penggerak mulanya (turbin air). Oleh karena itu kontrol frekuensi pada dasarnya adalah kontrol kecepatan putaran turbin generator.
3. Dengan menggunakan rangkaian ELC, tegangan generator pada saat terjadi perubahan beban konsumen memiliki standard deviasi sebesar $\pm 1,23$ dengan prosentase ketidakseimbangan tegangan sebesar 0,56%, sedangkan frekuensi generator pada saat terjadi perubahan beban konsumen memiliki standard deviasi sebesar $\pm 0,21$ dengan prosentase ketidakseimbangan frekuensi sebesar 0,41%.

DAFTAR PUSTAKA

- ESDM (2003). Kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi (Energi Hijau). Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Coughlin, R. (1982). *Operational amplifiers and linier integrated circuits*. London: Prentice Hall.
- Kamal (2000). Metode seleksi lokasi potensi PLTMh. *Energi dan Listrik*, X(1).
- Malvino (1992). *Electronic principles*. London: Mc-graw Hill.
- Rasyid, H.M (1998). *Power Electronic, Devices and Application*. Bombay: Prentice Hall.
- Sujono (1999). *Ilmu-ilmu Statistika Untuk Teknik*. Jakarta: Erlangga.
- Warsito (2005). Studi awal perencanaan sistem mekanikal dan kelistrikan pembangkit

listrik tenaga mikrohidro. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Ketenagalistrikan SNTKI*, Semarang, p.A-62-A-66.

PENULIS:

Machmud Effendy

Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas 246 Malang.

✉Email: machmudeffendy@yahoo.com

Diskusi untuk makalah ini dibuka hingga tanggal 1 Oktober 2010 dan akan diterbitkan dalam jurnal edisi November 2010.