

Rancang Bangun ELC (*Electronic Load Controller*) sebagai Pengendali Beban PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) Kali Jari

Ir. Teguh Utomo, M.T¹, Lunde Ardhenta, ST., M.Sc², Riswandha Yusuf At Tamimi³,
^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang
Email: teguhutomo_jte@ub.ac.id, lunde.ardhenta@ub.ac.id, mail.riswandha@gmail.com

Abstract— Increased demand for electricity in context increase development of a district causes increasing renewable power plant. Micro hydro power plant is an example renewable power plant that utilize energy from water flow with a capacity below 200 kW. Micro hydro power plant is expected to be able to work efficiently and stably to controlling load. The electronic load controller is one of supporting equipment that function to control load of generator in increase stability and efficiency. In this study, the method used is through detection of frequency and current that caused by changes of main load. The result of frequency and current detection used to processing of switching component which set by arduino as main processor. Tests conducted show that ELC installation is able to maintain system stability with an error below 2% which can be tolerated.

Keywords—Micro hydro power plant, electronic load controller, frequency, main load, complement load.

Abstrak— Peningkatan kebutuhan listrik dalam rangka peningkatan perkembangan suatu wilayah mengakibatkan peningkatan sumber-sumber tenaga listrik terbarukan. PLTMH merupakan salah satu contoh sumber tenaga listrik terbarukan yang memanfaatkan energi dari laju air dengan kapasitas dibawah 200 kW. Sistem PLTMH diharapkan mampu bekerja secara efisien dan stabil dalam pengendalian beban. Electronic load controller merupakan salah satu alat penunjang yang berfungsi pengendali beban generator dalam upaya meningkatkan stabilitas dan efisiensi. Pada penelitian ini metode yang digunakan melalui deteksi frekuensi dan arus yang disebabkan oleh perubahan pada beban utama. Hasil dari deteksi frekuensi dan arus yang didapat diolah menggunakan mikrokontroler arduino untuk pensaklaran komponen switching beban komplemen. Pengujian yang dilakukan menunjukkan pemasangan ELC mampu menjaga kestabilan sistem dengan error dibawah 2% yang masih dapat ditoleransi.

Kata Kunci—PLTMH, electronic load controller, frekuensi, beban utama, beban komplemen.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan listrik setiap tahun mengalami peningkatan [1]. Upaya pemenuhan kebutuhan listrik terutama pada daerah terpencil memanfaatkan sumber daya terbarukan sebagai sumber pembangkitan. Salah satu sumber daya terbarukan adalah air. Pemanfaatan laju air pada skala kecil adalah PLTMH (Pembangkit Listrik tenaga Mikrohidro).

PLTMH merupakan pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi dari laju air yang dikonversi menjadi energi listrik dengan kapasitas dibawah 200 kW. Prinsip dasar dari PLTMH adalah memanfaatkan perbedaan ketinggian dan jumlah debit air yang akan memutar turbin dimana pada poros turbin terhubung dengan generator sebagai mesin konversi mekanik menjadi elektrik.

Permasalahan dalam sistem PLTMH adalah terjadinya fluktuasi frekuensi pada generator akibat perubahan beban utama. Fluktuasi yang bersifat kontinyu dapat mengurangi tingkat efisiensi dan stabilitas dari peralatan pada PLTMH. Salah satu peralatan yang digunakan dalam upaya peningkatan kualitas sistem PLTMH adalah ELC (*Electronic Load Controller*) [2].

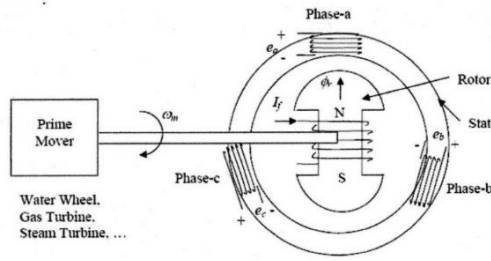
Pemilihan komponen ELC didasarkan pada keuntungan daripada ELC dimana memiliki respon yang lebih cepat dan harga lebih ekonomis dibandingkan peralatan proteksi lainnya. ELC juga berfungsi sebagai pengendali beban agar beban tetap pada kondisi stabil [3].

Pada penelitian yang dilakukan ini adalah rancang dan bangun ELC dengan metode deteksi frekuensi dan arus yang berubah sesuai kondisi beban utama. Proses keseluruhan sistem menggunakan mikrokontroler Arduino sebagai komponen pemrosesan data utama. Setelah pemasangan sistem ELC diharapkan PLTMH mampu bekerja secara efisien dan stabil.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Generator Sikron

Klasifikasi generator berdasarkan prinsip kerja dan konfigurasi terbagi menjadi 3 yaitu generator sinkron, generator induksi, dan generator parametric. Generator sinkron yaitu generator yang bekerja secara sinkron antara frekuensi elektrik dengan putaran mekanis generator ($n_s=n_r$). Konstruksi utama pada generator sinkron adalah stator dan rotor [4]. Stator merupakan bagian dari generator yang diam dan rotor merupakan bagian dari generator yang berputar berdasarkan pada poros yang terhubung dengan penggerak utama. Konstruksi dari generator ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Konstruksi generator

Generator pada PLTMH yang digunakan merupakan jenis generator sinkron dengan konstruksi rotor kutub tonjol (*salient pole*) dan merupakan kutub dalam. Pemilihan jenis generator tersebut berdasarkan karakteristik dari penggerak utama dari PLTMH.

Prinsip kerja dari generator sinkron diawali dengan memberikan sumber tegangan DC pada bagian belitan medan di sisi rotor. Selanjutnya poros pada rotor diputar menggunakan penggerak utama berupa turbin air. Rotor generator yang sudah dialiri oleh arus eksitasi (pengutan) akan menginduksi stator yang terdapat belitan jangkar. Belitan jangkar yang terinduksi akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi. Tegangan terinduksi selanjutnya akan dimanfaatkan oleh beban melalui terminal generator.

Hubungan antara frekuensi pada stator dengan medan magnet putar pada rotor ditunjukkan pada persamaan 2-1.

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

dimana,

f = frekuensi (Hz)

n = jumlah putaran rotor per menit (rpm)

p = jumlah kutub

berdasarkan persamaan diatas diketahui bahwa frekuensi di pengaruhi oleh putaran pada rotor.

Generator sinkron dalam pengoperasiannya harus berdasar pada regulasi yang ditentukan oleh sistem tenaga listrik di Indonesia. Salah satu regulasi yang diatur adalah frekuensi. Frekuensi tenaga listrik di Indonesia menggunakan frekuensi 50 Hz. Hal tersebut sudah menjadi acuan dalam pengaturan pada pembangkitan ataupun pengembangan peralatan listrik.

B. Electronic Load Controller

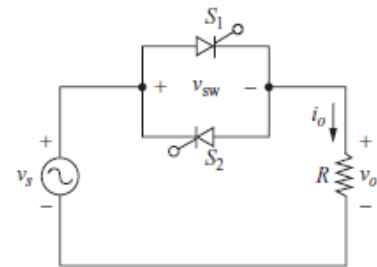
Electronic Load Controller (ELC) merupakan sebuah kontroler yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro dalam upaya mengendalikan frekuensi generator agar stabil dengan cara membuang kelebihan daya yang dibangkitkan menuju *dummy/ballast load*. Pengalihan daya menuju *dummy/ballast load* dilakukan secara

elektronik menggunakan komponen thyristor yang sudah diatur secara otomatis. Tujuan penggunaan ELC adalah memastikan daya yang dihasilkan generator sama dengan daya yang dikonsumsi oleh beban dengan demikian frekuensi dan tegangan stabil

Pembangkit mikrohidro dengan daya di bawah 200 kW pengendalian menggunakan peralatan elektronik merupakan pilihan paling populer. Penggunaan ELC memungkinkan penyimpanan air lebih baik dalam kondisi kurangnya suplai air. Sehingga daya keluaran yang dihasilkan tetap sesuai dengan kebutuhan beban

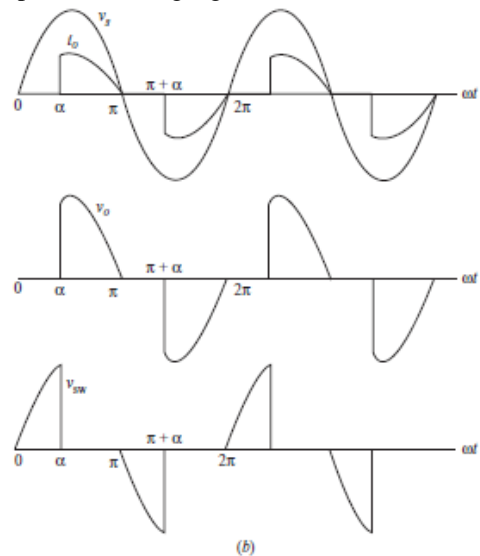
C. Pengaturan Tegangan Satu Fasa

Dasar pengaturan tegangan satu fasa dapat dilakukan dengan cara memasang 2 buah SCR yang dipasang anti paralel sebagai saklar. Gambar 2 merupakan rangkaian dasar pengaturan tegangan satu fasa dengan beban resistif.



Gambar 2 Rangkaian dasar pengaturan tegangan.

Pengaturan SCR yang dipasang antiparalel digunakan untuk menghasilkan arus bolak balik (AC) pada beban resistif. Selain menggunakan SCR antiparalel penggunaan TRIAC juga merupakan salah satu perangkat yang dapat menggantikan komponen SCR antiparalel. Gambar 3 merupakan bentuk gelombang proses pensaklaran tegangan.



Gambar 3 Gelombang pengaturan tegangan

Untuk mengetahui besaran tegangan keluaran yang diatur dapat dihitung menggunakan rumus 2-2 dan persamaan 2-3.

$$V_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [V_m \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} \quad (2-2)$$

$$V_o = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (2-3)$$

dimana :

V_o = Tegangan keluaran (V)

V_m = Tegangan maksimum (V)

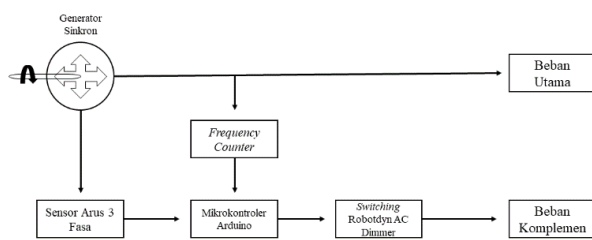
α = Sudut penyalaaan ($^{\circ}$)

π = panjang satu siklus gelombang ($^{\circ}$).

III. PERANCANGAN

A. Diagram Blok Sistem

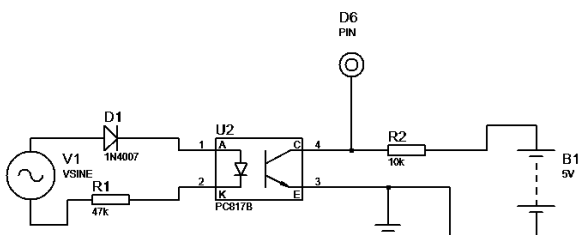
Diagram blok sistem dibuat berdasarkan spesifikasi ELC pada skala laboratorium dengan kondisi beban yang telah ditentukan. Diagram blok sistem ELC ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram blok sistem.

B. Perancangan Frequency Counter

Perancangan *frequency counter* sebagai pendeteksi frekuensi pada sistem ELC. Rangkaian *frequency counter* menggunakan photocoupler PC817 sebagai detektor tegangan dari generator. Gambar 5 merupakan rangkaian skematik dari rangkaian *frequency counter*.

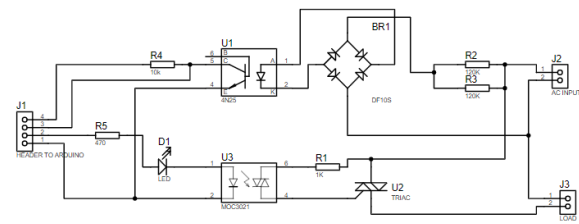


Gambar 5 Rangkaian *frequency counter*

Prinsip kerja dasar dari rangkaian *frequency counter* yang dibuat adalah tegangan bolak-balik disearahkan menjadi setengah gelombang positif dan selanjutnya dideteksi oleh PC817. Informasi sinyal dari PC817 selanjutnya dimasukkan pada arduino untuk diproses sebagai parameter frekuensi.

C. Perancangan Rangkaian Switching

Rangkaian *switching* beban komplemen merupakan rangkaian yang berfungsi mengubah tegangan pada beban komplemen. Rangkaian *switching* menggunakan beberapa komponen seperti dioda bridge, optocoupler, optoisolator, dan TRIAC. Gambar skematik dari rangkaian *switching* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Rangkaian *Switching*.

Komponen dari rangkaian *switching* adalah optocoupler 4N25. Pemilihan komponen optocoupler tersebut disebabkan komponen tersebut memiliki kemampuan zero-crossing detector yang selanjutnya digunakan sebagai pendeteksi titik nol pada tegangan bolak balik (AC).

Komponen selanjutnya adalah TRIAC sebagai komponen pensaklaran terhadap beban komplemen. Pemilihan TRIAC harus memiliki rating arus dan tegangan diatas dari kebutuhan beban. Pada kondisi normal, rating maksimum yang dibutuhkan beban komplemen sebesar 220 V dan 4,54 A. Pemilihan komponen TRIAC juga harus memperhatikan tegangan yang mampu ditahan pada saat kondisi off state (kondisi mati). Perhitungan tegangan maksimal yang dapat ditahan oleh TRIAC didasarkan pada persamaan 3-1.

$$V_{maks} = \sqrt{2} x V_t \quad (3-1)$$

dimana:

V_{maks} = tegangan maksimum (V)

V_t = tegangan terminal (V)

Berdasarkan diatas dapat diperhitungkan bahwa tegangan maksimum yang dihasilkan dari beban sebesar 311,126 V.

Pemilihan TRIAC yang sesuai dengan rating diatas dan tersedia di pasaran adalah BTA16-600B dimana memiliki spesifikasi rating arus 16 A dan tegangan 600 V.

D. Beban Utama

Beban utama yang dirancang disesuaikan dengan keadaan dilapangan yang diturunkan sebesar 42% untuk menyesuaikan dari spesifikasi generator yang terpasang pada laboratorium mesin elektrik. Berdasarkan data dilapangan maka didapatkan variasi dari beban utama yang ditampilkan pada Tabel 1.

TABEL I
DAYA BEBAN UTAMA

Beban	Daya (W)			Total (W)
	R	S	T	
1	190	375	545	1110
2	190	400	500	1090
3	190	430	530	1150
4	190	400	530	1120
5	190	475	545	1210
6	190	430	560	1180

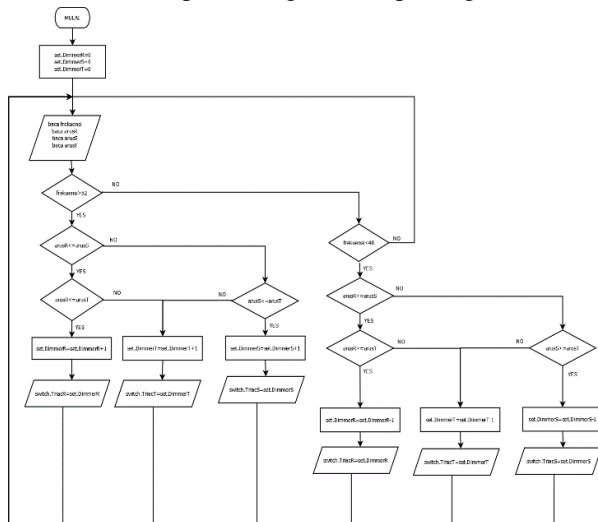
7	190	430	530	1150
8	190	415	545	1150
9	190	430	530	1150
10	275	430	515	1220
11	275	430	515	1220
12	200	390	545	1135
13	200	430	530	1160

E. Beban Komplemen

Beban komplemen merupakan beban yang dipasang untuk meningkatkan kestabilan nilai frekuensi ketika terjadi perubahan beban utama. Pada pengujian ini pemilihan beban komplemen yang digunakan merupakan beban resistif. Pemilihan beban resistif dipertimbangkan karena tidak merubah power factor dari generator. Beban komplemen yang terpasang pada setiap fasa sebesar 1000 W sehingga memiliki total 3000 W yang memenuhi 50% dari kapasitas daya generator terpasang.

F. Perancangan Perangkat Lunak ELC

Perangkat lunak yang digunakan untuk komunikasi dan pemrograman mikrokontroler arduino adalah Arduino IDE. Software yang digunakan menggunakan bahasa pemrograman C. Komunikasi antara software dengan hardware menggunakan kabel micro usb. Gambar 7 merupakan diagram alir pemrograman ELC.

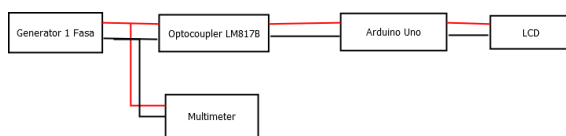


Gambar 7 Diagram alir ELC

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

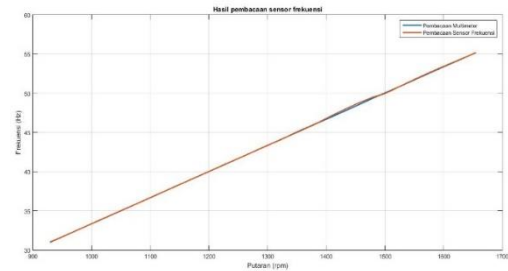
A. Pengujian Frequency Counter

Pengujian frequency counter dilakukan dengan cara menghubungkan komponen frequency counter yang telah dirangkai seperti pada Gambar 8.



Gambar 8 Rangkaian pengujian sensor frekuensi

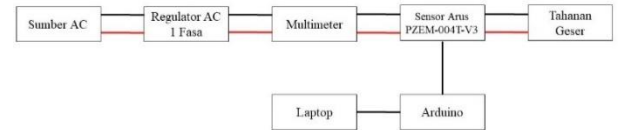
Hasil pengujian *frequency counter* didapatkan nilai rata-rata kesalahan dari pembacaan sensor sebesar 0,0982% dari nilai sebenarnya. Gambar 9 menunjukkan grafik perbedaan pembacaan sensor frekuensi dan pembacaan multimeter. Terlihat garis pada grafik saling berhimpit yang menunjukkan memiliki nilai yang sama.



Gambar 9 Grafik hasil pengujian frequency counter

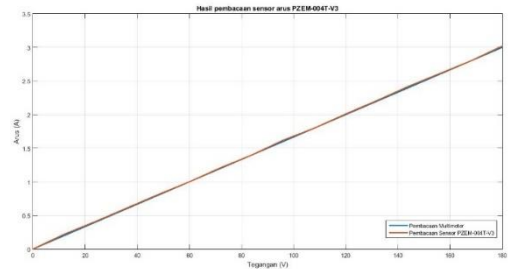
B. Pengujian Sensor Arus PZEM 004T-V3

Pengujian sensor arus bertujuan untuk mengetahui tingkat keakuratan dari sensor. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan sensor arus menjadi rangkaian seperti gambar 10.



Gambar 10 Rangkaian pengujian sensor arus

Dari hasil pengujian sensor arus didapatkan rata-rata kesalahan pembacaan sensor arus sebesar 1,2712% dari nilai sebenarnya. Gambar 11 merupakan grafik hasil pembacaan sensor arus. Terlihat garis pada grafik saling berhimpit yang menunjukkan hasil pembacaan memiliki nilai yang sama.

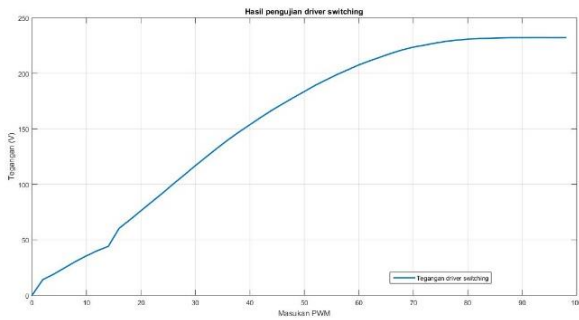


Gambar 11 Grafik hasil pengujian sensor arus

C. Pengujian Switching Beban

Pengujian *driver switching* beban komplemen bertujuan untuk mengetahui nilai keluaran yang dihasilkan oleh rangkaian ketika dihubungkan pada tegangan 220V. Nilai tegangan akan diubah-ubah berdasarkan besaran *duty cycle* dari program pada mikrokontroler menggunakan serial monitor pada aplikasi Arduino IDE.

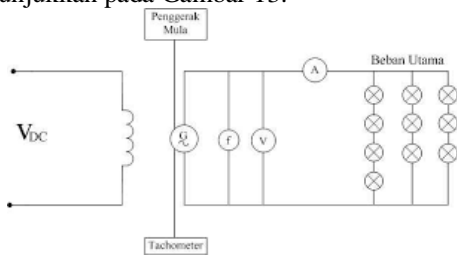
Dari hasil pengujian rangkaian switching didapatkan rata-rata kenaikan pada setiap persen masukan sebesar 2%. Pada input diatas 80% kenaikan terjadi lebih kecil dan tegangan menjadi stabil. Hal tersebut disebabkan oleh pengaturan waktu pensaklaran pada arduino. Gambar grafik dari pengujian switching ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Grafik hasil pengujian switching beban

D. Pengujian Pembebanan Sebelum Pemasangan ELC

Pengujian pembebanan sebelum pemasangan ELC keseluruhan sistem dirangkai sesuai rangkaian pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13 Rangkaian pengujian pembebanan sebelum penggunaan ELC

Hasil pengujian pembebanan sebelum penggunaan ELC ditunjukkan pada Tabel 5. Data yang diambil pada pengujian adalah kecepatan, frekuensi, arus beban utama dan tegangan keluaran generator.

Hasil pengujian pembebanan sebelum penggunaan ELC ditunjukkan pada Tabel 2. Data yang diambil pada pengujian adalah kecepatan, frekuensi, arus beban utama dan tegangan keluaran generator.

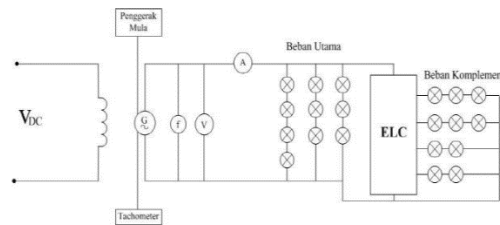
TABEL 2

HASIL PENGUJIAN SEBELUM PEMASANGAN ELC

Beban (W)	Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Arus Beban Utama (A)			Tegangan (V)		
			R	S	T	R-N	S-N	T-N
1110	1611	53,71	0,5	1,2	1,9	222,3	224,9	220,4
1090	1610	53,66	0,5	1,3	1,7	214,7	209,9	212,6
1150	1602	53,42	0,5	1,5	1,8	217,4	213,7	217,2
1120	1614	53,83	0,5	1,3	1,9	214,3	212,4	215,7
1210	1593	53,19	0,5	1,6	1,9	213,2	212,2	214,8
1180	1610	53,65	0,5	1,5	2,0	215,6	212,6	216,6
1150	1596	53,26	0,5	1,5	1,9	214,6	213,3	216,5
1150	1601	53,36	0,5	1,4	1,9	214,8	211,9	214,9
1150	1605	53,57	0,5	1,5	1,9	213,3	210,7	214,1
1220	1605	53,55	0,8	1,5	1,8	211,2	212,0	214,3
1220	1586	52,87	0,8	1,5	1,8	211,5	212,0	214,3
1135	1591	53,03	0,5	1,3	1,9	214,8	212,2	214,8
1160	1588	52,93	0,5	1,5	1,8	212,6	211,1	214,5
Rata-rata						214,6	212,9	215,4

E. Pengujian Pembebanan Setelah Pemasangan ELC

Pengujian setelah pemasangan ELC keseluruhan sistem dirangkai sesuai rangkaian pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 14. Pada gambar rangkaian dapat dilihat pemasangan ELC pada sistem dipasang secara paralel pada beban utama.



Gambar 14 Rangkaian pengujian pembebanan setelah pemasangan ELC

Hasil pengujian pembebanan setelah pemasangan ELC ditunjukkan pada Tabel 3. Data yang diambil pada pengujian adalah kecepatan, frekuensi, arus beban utama, dan tegangan. Penambahan data setelah pemasangan ELC adalah arus beban komplemen yaitu arus yang masuk pada beban komplemen terpasang. Kondisi arus beban komplemen ditunjukkan pada Tabel 4.

TABEL 3

HASIL PENGUJIAN SETELAH PEMASANGAN ELC

Beban (W)	Kecepatan (rpm)	Frekuensi (Hz)	Arus Beban Utama (A)			Tegangan (V)		
			R	S	T	R-N	S-N	T-N
1110	1514,7	50,49	0,5	1,2	1,9	199,5	199,3	193,3
1090	1494,9	49,83	0,5	1,3	1,7	194,5	195,4	194,1
1150	1472,4	49,08	0,5	1,5	1,8	198,3	197,3	194,6
1120	1474,2	49,14	0,5	1,3	1,9	197,5	197,6	195,9
1210	1518,6	50,62	0,5	1,6	1,9	199,1	199,4	196,2
1180	1518,3	50,61	0,5	1,5	2,0	197,3	196,8	195,6
1150	1509,9	50,33	0,5	1,5	1,9	197,2	197,4	194,8
1150	1519,2	50,64	0,5	1,4	1,9	200,6	196,7	196,1
1150	1493,1	49,77	0,5	1,5	1,9	194,4	194,4	194,5
1220	1513,2	50,44	0,8	1,5	1,8	196,3	194,3	197,2
1220	1518,9	50,63	0,8	1,5	1,8	197,5	194,8	196,4
1135	1504,2	50,14	0,5	1,3	1,9	194,8	193,6	191,4
1160	1497,6	49,92	0,5	1,5	1,8	193,5	194,6	192,7
Rata-rata						196,6	196,2	194,8

TABEL 4

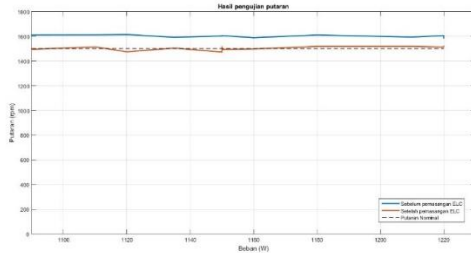
HASIL PENGUJIAN BEBAN KOMPLEMEN

Beban	Arus beban komplemen (A)		
	R	S	T
1	3,25	2,27	2,13
2	3,31	2,34	2,35
3	3,42	2,16	2,42
4	3,37	2,38	2,32
5	3,4	2,41	2,40
6	3,33	2,28	2,30
7	3,31	2,26	2,38
8	3,37	2,33	2,44
9	3,31	2,25	2,46
10	3,48	2,28	2,55
11	3,47	2,26	2,54

12	3,33	2,26	2,49
13	3,38	2,21	2,33

F. Analisis Pengujian

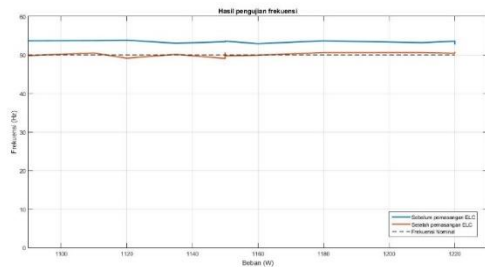
Berdasarkan data pada tabel 2 dan tabel 3 dapat dibandingkan antara sebelum dan sesudah pemasangan ELC pada sistem. Gambar 15 merupakan grafik perbandingan putaran sebelum dan sesudah pemasangan ELC dibandingkan dengan nilai nominal.



Gambar 15 Grafik perbandingan putaran

Terlihat sebelum pemasangan ELC putaran rata-rata berada pada 1600 rpm dengan selisih dari nominal sebesar 6,728% sedangkan setelah penggunaan ELC putaran rata-rata berada pada 1503,3 rpm dengan selisih dari nominal. Terjadinya penurunan putaran generator karena kenaikan torsi beban akibat penambahan beban komplemen pada generator.

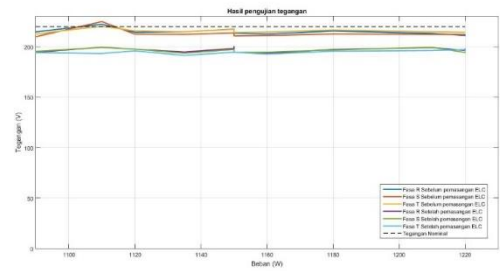
Pada hasil pengujian frekuensi juga didapatkan data sama dengan hasil putaran. Gambar 16 menunjukkan grafik perbandingan frekuensi sebelum dan sesudah pemasangan ELC dibandingkan dengan nilai nominal.



Gambar 16 Grafik Perbandingan Frekuensi

Pada perbandingan frekuensi didapatkan rata-rata frekuensi sebelum pemasangan ELC sebesar 53,38 Hz dengan selisih dari nominal sebesar 6,77% sedangkan setelah pemasangan ELC rata-rata frekuensi sebesar 50,12 Hz dimana memiliki selisih dari nominal sebesar 0,94%. Nilai pada putaran dan frekuensi memiliki nilai yang sama karena terdapat hubungan antara frekuensi dengan putaran sesuai persamaan (2-1).

Pengujian tegangan yang ditampilkan pada Tabel 2 dan 3 menunjukkan adanya penurunan. Untuk lebih jelas Gambar 17 merupakan grafik tegangan generator sebelum dan sesudah pemasangan ELC..



Gambar 17 Grafik perbandingan tegangan

Berdasarkan data dari tabel pengujian tegangan yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan 3 didapatkan tegangan pada fasa R memiliki rata-rata 214,63V sebelum pemasangan ELC dan 196,96V setelah pemasangan ELC. Tegangan pada fasa S memiliki rata-rata 212,99V sebelum pemasangan ELC dan 196,27V setelah pemasangan ELC. Tegangan pada fasa T memiliki rata-rata 215,43V sebelum pemasangan ELC dan 194,83V setelah pemasangan ELC. Data tersebut dapat disimpulkan ketika sebelum pemasangan ELC tegangan memiliki selisih sebesar 2,56% dari tegangan nominal sedangkan setelah pemasangan ELC memiliki selisih sebesar 10,89% dari tegangan nominal. Penurunan tegangan tersebut diakibatkan karena sistem tidak memiliki *automatic voltage regulator (AVR)* di sisi belitan medan pada saat beban mengalami kenaikan. Penggunaan beban komplemen resistif pada beban komplemen membantu penurunan tegangan secara tidak signifikan. Hal tersebut dikarenakan beban resistif memiliki power factor mendekati 1.

V. KESIMPULAN

Dari pengujian dan analisis perancangan ELC sebagai pilot project pengendali beban pada PLTMH Kali Jari didapat beberapa kesimpulan yaitu :

1. Komponen ELC terdiri dari sensor arus PZEM-004T-V3 sebagai pembaca arus keluaran dari generator , *frequency counter* sebagai sensor pembaca frekuensi, dan *switching Robotdyn AC Dimmer* sebagai modul pensaklaran tegangan dari generator menuju beban komplemen. Selain modul sensor dan modul pensaklaran terdapat LCD yang berfungsi sebagai penampil data yang dibaca oleh sensor. Seluruh komponen dihubungkan pada mikrokontroler arduino due yang berfungsi sebagai unit kontrol dan pemroses data. Sebelum dilakukan pengujian seluruh sensor dan modul dilakukan pengujian dan kalibrasi sehingga didapatkan nilai yang lebih akurat.
2. Pengaruh putaran dan frekuensi setelah penggunaan ELC memiliki nilai selisih yang lebih kecil daripada nilai nominalnya yaitu sebesar 0,93%. Sedangkan pengaruh pada tegangan mengalami penurunan setelah penggunaan ELC. Hal tersebut disebabkan karena pada pengujian keseluruhan sistem, generator tidak dilengkapi dengan AVR. Pada parameter arus, setelah penggunaan ELC arus lebih seimbang pada nilai

3,7-4,2 A sehingga mengurangi dampak dari ketidakseimbangan beban pada generator.

REFERENSI

- [1] Ketenagalistrikan, D. (2018). Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2018. Jakarta: Sekjen Ketenagalistrikan.
- [2] Sulistiono, D. (2016). Pengembangan Monitoring System dan Electronic Load Controller (ELC) pada Pembangkit Listrik Tenaga Arus Sungai (PLTAS). Pontianak: Universitas Tanjungpura.
- [3] Slamet. (2012). Pengendali Beban Elektronik Tiga Fasa Menggunakan Mikrokontroler pada Pembangkit Listrik Mikro Hidro (PLTMH). Jakarta Selatan: Dirjen Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan.
- [4] Boldea, I. (2016). *Synchronous Generator Second Edition*. Florida: CRC Press.
- [5] Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition*. New York: McGraw-Hill.
- [6] Dzulqarnain, M. W. (2015). Evaluasi Kemampuan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Check Dam V Kalijari Kabupaten Blitar Karena Perubahan Jumlah dan Distribusi Beban. Malang: Universitas Brawijaya.
- [7] Fitzgerald, A. (1992). *Electric Machinery Fifth Edition*. Singapore: Mc.Graw-Hill.
- [8] Hafid, A. (2018). Analisis Pengendali Beban Elektronik Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Dengan Metode Kendali Sudut Fase dan Beban Biner. Makassar: Unismuh Makassar.
- [9] Hart, D. W. (2011). *Power Electronic*. New York: McGraw-Hill.
- [10] Ketenagalistrikan, D. (2008). IMIDAP. Jakarta: Dirjen Ketenagalistrikan.
- [11] Mazda, F. (1997). *Power Electronic Handbook Third Edition*. Burlington: Newnes.
- [12] P.C.Sen. (1997). *Principle of Electric Machine and Power Electronic Third Edition*. India: Wiley India Pvt.
- [13] Pandey, B. (2017). *Hydroelectric Energy*. Boca Raton: CRC Press.
- [14] Renerconsys. (2010). *Digital Load Controller (DLC) for Induction Generator and Synchronous Generator*. Bandung: Renerconsys.