

## RANCANG BANGUN PENGATUR BEBAN OTOMATIS BERBASIS MIKROKONTROLER SEBAGAI PENSTABIL TEGANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO

**Muhammad Najmul Fadli**

Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Padang  
Email: mnajmulfadli@pnp.ac.id

**Herisajani**

Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Padang  
Email: herisajani@pnp.ac.id

**Sirojul Hadi**

Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Bali  
Email: sirojulhadi@pnb.ac.id

**Dyah Ayu Kartika Sari**

Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Padang  
Email: dyahayu@pnp.ac.id

**Fanji Azhary Aرسال**

Jurusan Teknik Elektro  
Politeknik Negeri Padang  
Email: fanjiazhary@pnp.ac.id

### ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan salah satu solusi energi terbarukan yang banyak diterapkan di daerah terpencil. Namun, sistem ini memiliki kelemahan berupa fluktuasi tegangan akibat perubahan beban konsumen secara tiba-tiba. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengatur beban otomatis berbasis mikrokontroler dengan kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran generator mikrohidro. Perubahan tegangan keluaran sebuah generator dipengaruhi oleh salah satu faktor yaitu pengaturan penggunaan beban. Dalam penelitian ini dibuat suatu sistem pengatur beban otomatis (*ELC/Electronic Load Controller*) pada generator sinkron 1 fasa untuk menjaga kestabilan tegangan generator sesuai ratingnya sebesar 220 Volt. Mengimplentasikan kontroler PID untuk menstabilkan tegangan terminal pada generator sinkron 1 fasa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dengan kontrol PID mampu menstabilkan tegangan keluaran pada nilai  $220\text{ V} \pm 1\%$ . Dibandingkan dengan sistem tanpa control ELC, selisih tegangan berkurang hingga 80%. Berdasarkan hasil tersebut, kontrol PID terbukti efektif dalam menjaga kestabilan tegangan pada PLTMH skala kecil, serta berpotensi diterapkan pada sistem pembangkit terbarukan lainnya.

**Kata kunci:** Beban Komplemen, Mikrokontroler, ELC, kontrol PID.

### ABSTRACT

*Micro-hydropower plants (PLTS) represent an effective renewable energy solution for rural and remote regions. Nevertheless, these systems are prone to voltage instability caused by abrupt variations in consumer load. This study presents the design and implementation of a microcontroller-based automatic load controller employing a Proportional-Integral-Derivative (PID) scheme to stabilize the output voltage of a single-phase micro-hydro generator. An Electronic Load Controller (ELC) was developed to regulate the generator's load and maintain its rated output*

of 220 V. The PID controller was integrated to ensure stable terminal voltage under dynamic load conditions. Experimental results demonstrate that the proposed system maintains output voltage within  $220\text{ V} \pm 1\%$ , while reducing voltage deviations by up to 80% compared to operation without an ELC. These results indicate that the PID-based ELC provides an effective solution for enhancing voltage stability in small-scale MHP systems and may be adapted for other renewable energy applications.

**Keywords:** Complementary Load, Microcontroller, ELC, PID Control

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan masyarakat terhadap energi listrik terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan aktivitas manusia. Secara umum, sumber energi listrik terbagi menjadi dua kategori, yaitu energi tak terbarukan dan energi terbarukan [1]. Energi tak terbarukan bersifat terbatas karena ketersediaannya akan terus menurun akibat eksploitasi sumber daya alam. Sebaliknya, energi terbarukan mampu menghasilkan energi listrik secara berkelanjutan tanpa menghabiskan sumber daya alam dalam proses pemanfaatannya [2]. Salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang banyak dikembangkan di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). PLTMH menjadi solusi alternatif penyedia listrik bagi masyarakat yang tinggal di daerah terpencil atau wilayah yang belum terjangkau jaringan PLN [3]. Meskipun demikian, pembangunan PLTMH memerlukan perancangan yang tepat agar mampu beroperasi secara optimal, terutama dalam menjaga nilai tegangan dan frekuensi keluaran tetap sesuai standar ketika menghadapi beban maksimum.

PLTMH merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan di daerah terpencil karena memanfaatkan potensi aliran air sungai sebagai penggerak turbin [4]. Sistem PLTMH memiliki keunggulan utama berupa biaya operasi yang rendah dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca [5]. Namun demikian, salah satu permasalahan yang sering muncul pada PLTMH adalah fluktuasi tegangan keluaran akibat perubahan beban listrik secara tiba-tiba. Ketika beban menurun secara mendadak, energi mekanik dari turbin tidak dapat segera menyesuaikan, sehingga tegangan keluaran generator meningkat melebihi batas nominal [6]. Sebaliknya, jika beban meningkat tajam, tegangan dapat turun dan mengganggu kinerja peralatan listrik yang terhubung. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem PLTMH memerlukan mekanisme pengatur beban otomatis untuk menjaga kestabilan tegangan pada kondisi beban yang bervariasi. Karena ketidakstabilan tegangan akan menyebabkan ketidakstabilan sistem tenaga secara keseluruhan, terutama kualitas daya dari pembangkit ke konsumen [7].

Berdasarkan pada kondisi tersebut, maka dilakukan pembaruan suatu sistem pengaturan beban otomatis pada generator yaitu *Electronic Load Controller* atau disingkat ELC dengan kontrol PID (*Proportional, Integral, Derivative*). Beberapa penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa penggunaan penstabil tegangan manual secara umum kurang efektif, sehingga diperlukan penerapan sistem penstabil tegangan otomatis sebagai alternatif yang lebih optimal [8]. Kestabilan tegangan suatu sistem ditentukan oleh pengelolaan penggunaan beban komplemen yang diintegrasikan ke dalam sistem dan dihubungkan secara paralel dengan beban konsumen [9]. Metode kontrol yang digunakan meliputi *on-off control*, *proportional control*, hingga pengendalian berbasis mikrokontroler sederhana. Namun, sebagian besar pendekatan tersebut belum mampu memberikan respons kontrol yang cepat dan akurat terhadap variasi beban yang berubah secara tiba-tiba.

Meskipun banyak penelitian telah membahas ELC, sebagian besar masih menggunakan metode kontrol sederhana yang kurang responsif terhadap perubahan beban yang cepat. Selain itu, banyak desain yang tidak menunjukkan analisis mendalam terhadap kinerja sistem kontrol dalam mempertahankan tegangan pada rentang toleransi yang ketat. Belum banyak penelitian yang mengimplementasikan PID secara optimal pada ELC untuk generator mikrohidro skala kecil, terutama dengan evaluasi performa yang dikaitkan langsung dengan variasi beban nyata di lapangan.

Penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pengatur beban otomatis ELC berbasis mikrokontroler dengan kontrol PID terintegrasi untuk menjaga kestabilan tegangan pada generator

sinkron satu fasa PLTMH. Pendekatan ini menawarkan respons kontrol yang lebih cepat dan akurat dibandingkan ELC konvensional. Keunikan penelitian ini terletak pada penggabungan sistem zero crossing, AC-DC converter, dan aktuasi TRIAC yang dikendalikan PID sehingga menghasilkan pengaturan beban yang lebih presisi dan mampu menjaga tegangan pada rentang mendekati nilai referensi.

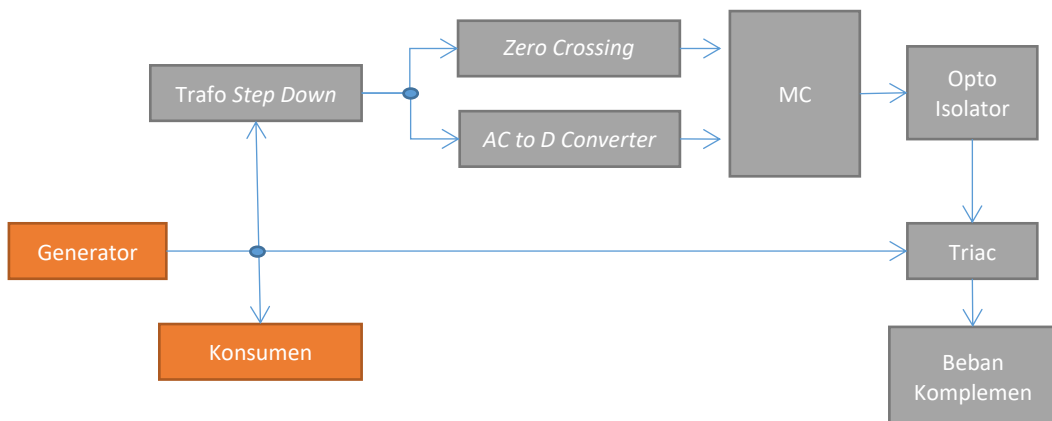
Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun prototipe ELC berbasis kontrol PID untuk generator PLTMH, menganalisis performa sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan pada berbagai variasi beban, dan mengevaluasi peningkatan kualitas tegangan sebelum dan sesudah menggunakan ELC. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan kualitas daya pada sistem PLTMH skala kecil dan menjadi acuan bagi pengembangan sistem pengatur beban pada pembangkit energi terbarukan lainnya.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan secara singkat bagaimana perancangan dan pembuatan ELC dengan kontrol PID. Sistem kontrol PID yang digunakan adalah kontrol PID digital dimana perbaikannya lebih mudah dibandingkan dengan sistem kontrol PID analog. ELC secara umum mengatur agar beban generator selalu konstan walaupun terjadi perubahan beban secara mendadak dan menjaga agar beban generator selalu maksimum [10]. ELC bekerja dengan metode membandingkan antara tegangan generator dengan suatu besaran referensi. Perbedaan tegangan ini akan dihilangkan dengan cara mengatur tegangan yang masuk pada beban komplemen. Putaran generator juga akan konstan jika pembebanan tetap pada keadaan maksimum, sehingga perubahan tegangan yang dialami tidak terjadi secara signifikan atau masih dalam batas yang ditentukan.

### 2.1. Diagram Blok Sistem

Diagram blok merupakan langkah paling awal dalam suatu perancangan alat. Pedoman pengerjaan dalam pembuatan ELC dan cara kerja ELC dapat dipahami dengan cara melihat diagram blok yang telah dibuat sebelumnya. Gambar 1 merupakan diagram blok dari perancangan pembuatan ELC yang digunakan.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Pada dasarnya, ELC berfungsi untuk menjaga beban generator tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban secara mendadak, serta memastikan generator beroperasi pada kapasitas maksimum dengan mengalihkan beban yang tidak digunakan ke beban komplemen. Melalui mekanisme ini, kecepatan putar generator dapat dipertahankan tetap stabil, sehingga fluktuasi tegangan yang terjadi menjadi tidak signifikan atau tetap berada dalam batas toleransi yang telah ditentukan. Cara kerja dari ELC ini pertama tegangan terminal yang dihasilkan oleh generator 1 fasa akan diturunkan oleh transformator *step down*. Transformator *step down* berfungsi untuk menurunkan tegangan terminal yang berasal dari generator agar dapat diolah oleh mikrokontroler

dan IC Op-Amp. Tegangan ini akan digunakan untuk tegangan *input* agar dapat diolah oleh rangkaian *zero crossing detector* dan *AC to DC converter*.

Rangkaian *zero crossing detector* berfungsi untuk mengetahui titik nol dari perpindahan gelombang sinusoidal positif ke gelombang sinusoidal negatif, atau sebaliknya dari gelombang sinusoidal negatif ke gelombang sinusoidal positif. *Zero crossing detector* ini bertujuan untuk sinkronisasi jala-jala tegangan terminal pada generator dengan sudut penyalan yang akan diberikan ke triac, sehingga sudut penyalan yang akan diberikan ke triac sesuai dengan yang diinginkan. Selanjutnya *AC to DC* konverter ini berfungsi untuk mengubah tegangan bolak-balik generator yang telah diturunkan oleh transformator *step down* lalu diubah menjadi tegangan searah. Tegangan searah inilah yang akan diolah oleh mikrokontroler sebagai tegangan *input* yang diidentikan dengan tegangan yang dihasilkan generator.

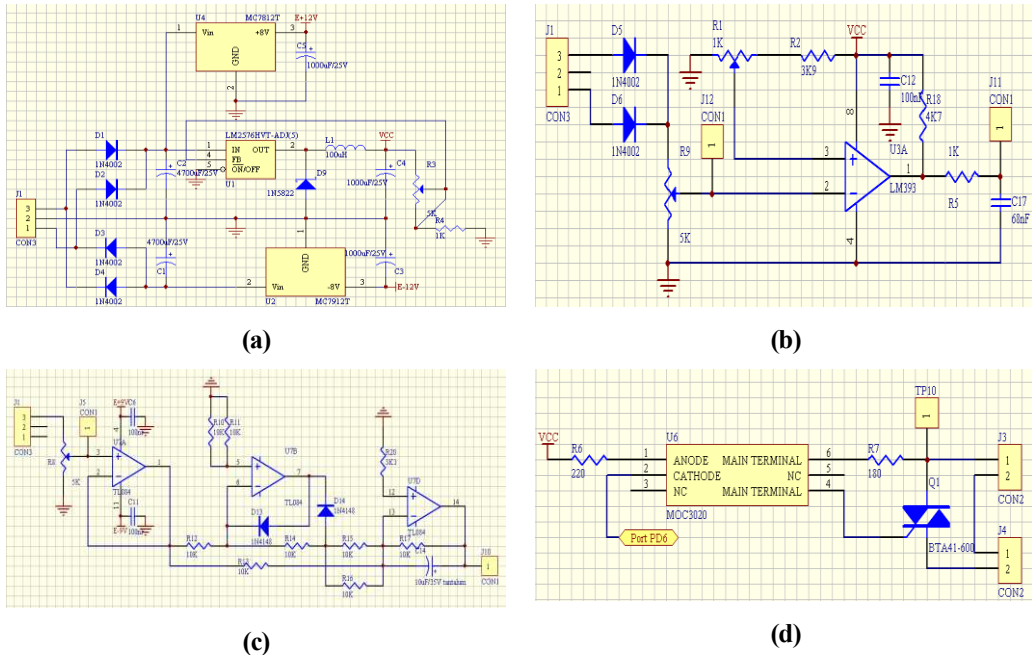
Mikrokontroler disini merupakan otak dari ELC yang berfungsi untuk menerima sinyal *input* dari rangkaian *zero crossing detector* dan *AC to DC* konverter. Kemudian mikrokontroler akan melakukan proses pengolahan dan perbandingan data sesuai dengan program yang dimasukkan. Mikrokontroler akan memutuskan apakah beban komplemen dibutuhkan atau tidak. Jika tegangan terminal pada generator sama dengan tegangan referensi maka beban komplemen tidak dibutuhkan. Jika tegangan terminal pada generator lebih besar dari tegangan referensi maka beban komplemen dibutuhkan untuk membuang energi listrik yang berlebihan. Jika tegangan terminal pada generator lebih kecil dari tegangan referensi maka beban pada beban komplemen akan diperkecil hingga tegangan terminal generator mencapai tegangan referensi yang telah ditetapkan. Mikrokontroler akan mengeluarkan sinyal *output* berupa *Pulse Width Modulation* (PWM) pada optoisolator untuk memberikan sudut penyalan untuk triac. Lamanya waktu tunda sinyal PWM akan menentukan besarnya sudut penyalan yang akan diberikan ke kaki *gate* triac.

Optoisolator berfungsi untuk mengisolasi level tegangan atau data pada sisi pemancar (mikrokontroler) dan sisi penerima (triac). Hal ini dilakukan agar sinyal listrik yang ada pada *input* dan *output* akan terisolasi sehingga mikrokontroler tidak rusak akibat tegangan tinggi. Selanjutnya optoisolator akan meneruskan sinyal PWM dari mikrokontroler ke saklar elektronik berupa triac. Triac akan mengatur besarnya tegangan masukan ke beban komplemen dengan mengatur sudut penyalan yang diberi ke kaki *gate* triac. Dapat dikatakan triac disini berfungsi sebagai keran air yang mengatur besarnya aliran air. Saklar ini berfungsi sebagai penghubung antara titik percabangan pada generator dengan beban komplemen. Penggunaan jenis saklar tersebut didasarkan pada karakteristik beban komplemen yang terdiri dari beban resistif murni dengan nilai yang konstan. Oleh karena itu, pengaturan besar pemakaian beban komplemen dapat dilakukan melalui pengendalian tingkat tegangan yang diberikan pada beban tersebut. Beban komplemen berfungsi untuk membuang energi listrik yang tidak terpakai konsumen. Hal ini ditujukan agar generator tetap dalam keadaan terbeban konstan sehingga tegangan terminal generator tetap konstan pula.

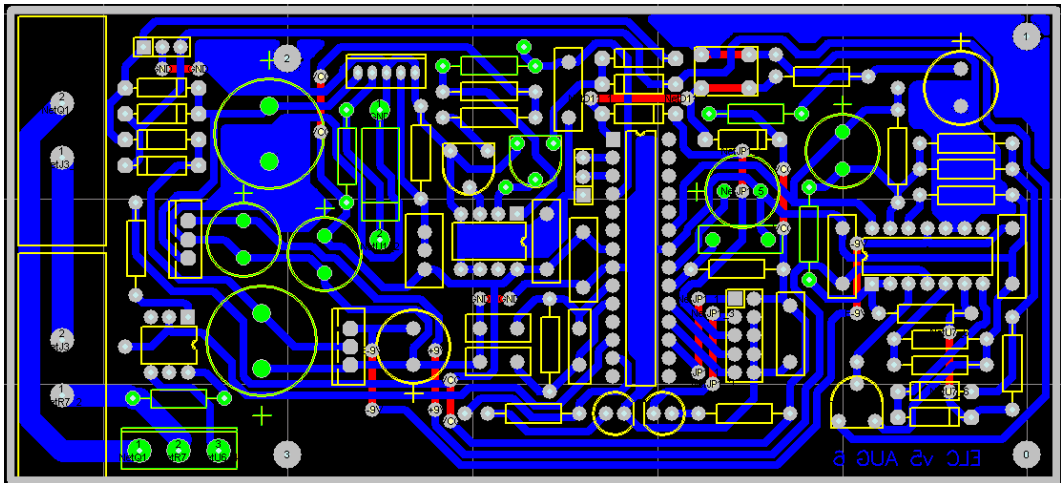
## 2.2. Rancangan Sistem

Setelah melaksanakan dan berhasil dalam percobaan pada papan *protoboard*, maka langkah selanjutnya yang penulis lakukan yaitu membuat *layout* pada papan PCB (*Printed Circuit Board*). Papan PCB ini berfungsi untuk menghubungkan komponen-komponen elektronika yang telah dirangkai dan sebagai kedudukan komponen-komponen elektronika yang digunakan. Rangkain ELC pada Gambar 2 menunjukkan rangkaian perbagian dari beberapa rangkaian sistem ELC secara keseluruhan yang telah dibuat yaitu : rangkaian catu daya, rangkaian *zero crossing detector*, rangkaian *AC to DC converter*, dan rangkaian *driver* triac.

Perancangan layout PCB dilakukan untuk meningkatkan keandalan dan kestabilan sistem ELC dibandingkan dengan rangkaian sementara pada papan *protoboard*. Dengan menggunakan PCB, susunan komponen menjadi lebih terstruktur, koneksi antar komponen lebih kuat, serta risiko gangguan sinyal dan kesalahan sambungan dapat diminimalkan. Selain itu, penggunaan PCB memudahkan proses perawatan, pengujian, dan pengembangan sistem di masa mendatang. Tata letak komponen pada PCB dirancang dengan mempertimbangkan pemisahan antara jalur sinyal kontrol dan jalur daya guna mengurangi interferensi, sehingga keseluruhan sistem ELC dapat bekerja secara optimal dalam menjaga kestabilan tegangan generator mikrohidro.



**Gambar 2. Rangkaian ELC (a) Bagian Catu Daya (b) Bagian Zero Crossing Detector (c) Bagian AC to DC Converter (d) Bagian Driver Triac**



**Gambar 3. Layout ELC Secara Keseluruhan**

Gambar 3 di atas menunjukkan rancangan PCB (*Printed Circuit Board*) untuk sistem ELC yang berfungsi sebagai pengatur beban otomatis pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro. *Layout* PCB ini dirancang dengan jalur tembaga yang tertata rapi untuk meminimalkan *noise* dan memastikan kestabilan sinyal, terutama pada bagian kontrol dan pemrosesan sinyal *zero-crossing*. Komponen-komponen utama seperti rangkaian kontrol mikrokontroler, *driver* triac, rangkaian optoisolator, penyearah AC-DC, serta bagian sensor tegangan ditempatkan terpisah sesuai fungsi untuk mengurangi interferensi antar blok. Secara keseluruhan, rancangan PCB ini menunjukkan desain terintegrasi yang menggabungkan bagian penginderaan, pemrosesan, dan pengendalian beban dalam satu papan sehingga memungkinkan ELC bekerja secara efisien dalam menjaga kestabilan tegangan generator mikrohidro.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas tentang pengujian dan hasil analisa alat yang telah dibuat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah alat yang dibuat bekerja sesuai dengan prinsip kerja yang diinginkan atau tidak. Metode yang digunakan dalam pengujian alat ini adalah dengan melakukan pengamatan langsung pada ELC yang telah dibuat dan mengamati pembacaan alat ukur yang dipasang, serta respon yang ditunjukkan alat sebelum dan sesudah pemasangan ELC dengan besar daya beban pengujian yang divariasikan. Beban yang digunakan merupakan lampu pijar.

Prosedur pengujian pada alat pengatur beban otomatis ini meliputi tahapan pengujian pembebanan generator yang dilakukan dengan menggunakan ELC. Cara pengujian ELC dilakukan saat generator menghasilkan tegangan  $\pm 220$  V. Setelah itu baru ELC disambungkan ke generator. Hal ini dilakukan untuk mencegah ELC rusak akibat kelebihan tegangan. Setelah ELC disambungkan ke generator, secara perlahan katup turbin dibuka hingga penuh.

#### 3.1 Pengujian Pembebanan tanpa Menggunakan ELC

Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk membuktikan secara nyata bahwa dengan menambahkan nilai daya beban pada generator dapat mengakibatkan perubahan tegangan yang dihasilkan generator dengan katup turbin tetap terbuka penuh. Beban pengujian yang digunakan adalah lampu pijar. Tabel 1 merupakan data pengukuran yang didapatkan.

Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa dengan menambahkan daya beban pada generator, dapat mengakibatkan perubahan tegangan yang dihasilkan oleh generator. Dengan bertambahnya beban pada generator maka kecepatan putar generator juga akan semakin lambat. Hal inilah yang mengakibatkan tegangan yang dihasilkan generator juga semakin kecil.

Pada saat kondisi tanpa beban dan kondisi katup turbin terbuka penuh, tegangan yang dapat dihasilkan oleh generator yaitu sebesar 403 V. Tegangan tersebut lebih besar 83% dari tegangan referensi (220 V) yang ditetapkan dalam buku standar konstruksi PLN yaitu sebesar 231 V atau 5% dari tegangan referensi PLN. Jika hampir keseluruhan beban generator dilepaskan saat bersamaan saat kondisi katup turbin terbuka penuh, peralatan listrik yang masih terhubung dengan generator akan mengalami kerusakan akibat mendapatkan tegangan masukan diambang batas normal.

**Tabel 1. Hasil Pengukuran Tegangan Generator dengan Daya Beban Variasi Sebelum Menggunakan ELC**

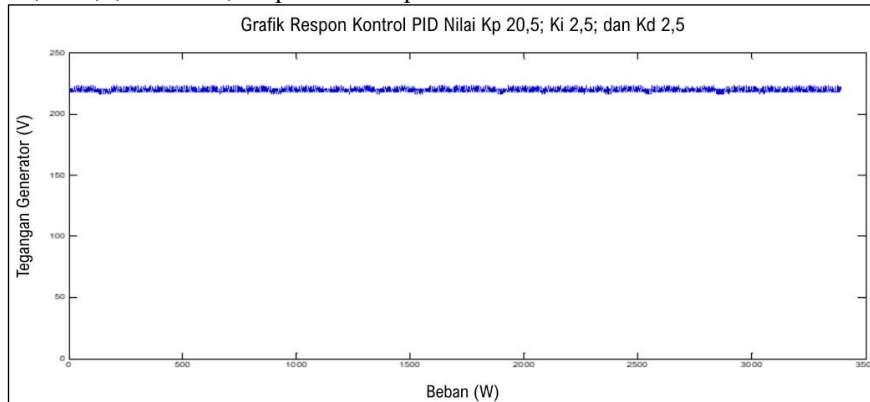
No	Beban (W)	Tegangan Generator (V)	Persentase Perubahan Tegangan Generator dari Tegangan Referensi
1	0	403	83%
2	200	363	65%
3	400	322	46%
4	600	290	32%
5	800	252	15%
6	1000	227	3%

Tabel 1 diatas menunjukkan bahwa tegangan keluaran generator mengalami penurunan signifikan seiring meningkatnya beban ketika sistem belum dilengkapi dengan ELC. Pada kondisi tanpa beban, tegangan generator tercatat sebesar 403 V atau 83% di atas tegangan referensi 220 V. Namun, ketika beban dinaikkan secara bertahap hingga 1000 W, tegangan turun drastis menjadi 227 V, hanya 3% di atas nilai referensi. Pola penurunan tegangan yang konsisten ini mengindikasikan bahwa generator tidak mampu mempertahankan kestabilan tegangan saat terjadi variasi beban, sehingga fluktuasi tegangan menjadi sangat besar dan berpotensi merusak peralatan listrik konsumen. Data ini mempertegas pentingnya penggunaan sistem pengatur beban otomatis seperti ELC untuk menjaga tegangan tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban yang signifikan.

#### 3.2. Pengujian Respon Kontrol PID

Pengujian ini dilakukan dengan cara mengganti-ganti nilai kontrol PID ( $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ ). Penggantian nilai kontrol PID ini bertujuan untuk melihat gambar grafik dan nilai tegangan rata-rata yang dihasilkan oleh generator. Pemilihan nilai kontrol PID akan dipilih berdasarkan gambar grafik yang lebih stabil dan selisih tegangan rata-rata yang terkecil dengan tegangan referensi. Setelah

menggunakan beberapa variasi nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Didapatkan nilai respon terbaik ketika di variasi nilai  $K_p$  20;  $K_i$  2,5; dan  $K_d$  2,5 seperti terlihat pada Gambar 4 di bawah.



**Gambar 4. Grafik Respon Kontrol PID dengan  $K_p$  20;  $K_i$  2,5;  $K_d$  2,5**

Gambar 4 menunjukkan respon tegangan keluaran generator setelah diterapkan sistem kontrol PID pada pengatur beban otomatis ELC. Berdasarkan grafik tersebut, dapat terlihat bahwa tegangan berada pada kondisi yang sangat stabil di sekitar nilai nominal, dengan fluktuasi yang sangat kecil sepanjang waktu pengamatan. Tidak tampak adanya penyimpangan tegangan yang signifikan, baik berupa *overshoot* maupun *undershoot*, yang menunjukkan bahwa parameter PID telah disetel secara optimal sesuai karakteristik dinamis sistem mikrohidro.

Karakteristik grafik yang hampir berupa garis lurus dengan noise minimal menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga total daya yang diserap generator tetap konstan melalui pengaturan beban komplementer. Sistem hanya menunjukkan fluktuasi kecil yang merupakan respons alami dari generator dan rangkaian pensaklaran beban, namun nilai tersebut masih berada jauh di bawah batas toleransi tegangan  $\pm 5\%$  sesuai standar kualitas daya listrik. Hal ini membuktikan bahwa penerapan kontrol PID pada ELC mampu meningkatkan kualitas regulasi tegangan secara signifikan dibandingkan sistem tanpa kontrol, yang sebelumnya menunjukkan penurunan tegangan yang tajam seiring pertambahan beban.

### 3.3. Pengujian Pembebanan Generator Menggunakan ELC

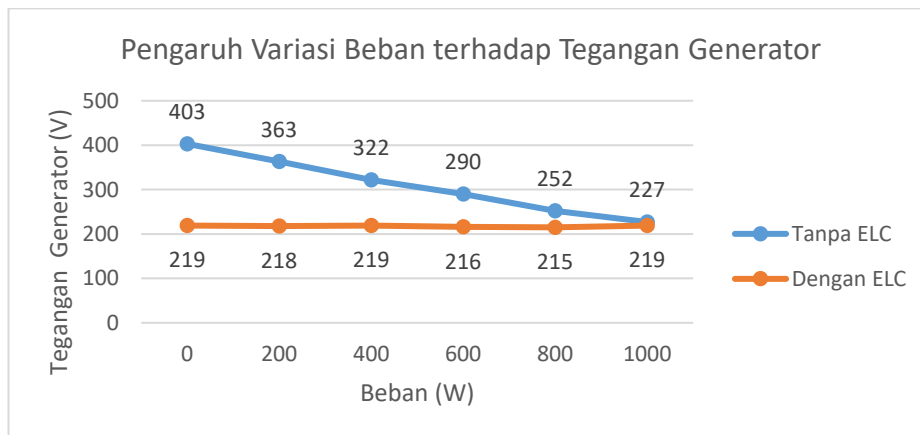
Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk menguji ELC sebagai penstabil tegangan dengan kontrol PID. ELC yang dilengkapi dengan kontrol PID dirancang untuk meningkatkan respons sistem, menghilangkan terjadinya *offset*, serta menghasilkan perubahan awal yang signifikan. Pengujian ELC ini dilakukan dengan cara menambahkan daya beban percobaan pada generator dengan keadaan katup turbin terbuka penuh, kemudian melihat gambar grafik tegangan yang dihasilkan oleh generator. Beban pengujian yang digunakan merupakan lampu pijar. Tabel 2 merupakan pengukuran tegangan generator.

**Tabel 2. Hasil Pengukuran Tegangan Generator Pengujian dengan Daya Beban Pengujian Bervariasi Setelah Menggunakan ELC**

No	Beban Pengujian (W)	Tegangan Generator (V)	Persentase Perubahan Tegangan Generator dari Tegangan Referensi
1	0	219	0,45 %
2	200	218	0,91 %
3	400	219	0,45 %
4	600	216	1,82 %
5	800	215	2,27 %
6	1000	219	0,45 %

Analisa lebih lanjut mengenai perbandingan tegangan generator pada saat tanpa dan dengan ditambahkan ELC dapat dilihat pada gambar 5. Pada kondisi tanpa ELC, tegangan keluaran generator menunjukkan penurunan yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya beban. Tegangan awal pada beban 0 W tercatat sebesar 403 V, kemudian menurun secara bertahap menjadi 227 V saat beban mencapai 1000 W. Penurunan ini bersifat hampir linear, yang menunjukkan bahwa sistem generator sangat bergantung pada perubahan beban tanpa adanya mekanisme pengatur daya. Hal ini disebabkan karena peningkatan beban menyebabkan arus keluaran generator bertambah, sedangkan daya mekanik turbin tidak mampu menyesuaikan secara cepat, sehingga terjadi *voltage drop* yang cukup besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem tanpa pengendalian beban tidak dapat menjaga kestabilan tegangan yang diperlukan untuk operasi beban listrik secara optimal.

Sebaliknya, pada kondisi dengan penerapan ELC berbasis kontrol PID, tegangan keluaran generator mampu dipertahankan dalam rentang yang jauh lebih stabil, yaitu antara 215 V hingga 219 V pada seluruh variasi beban dari 0 hingga 1000 W. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem ELC mampu menjaga keseimbangan antara daya yang dihasilkan generator dan daya yang dikonsumsi oleh beban utama. Ketika terjadi penurunan beban, ELC secara otomatis menambahkan beban komplementer, sedangkan saat beban meningkat, sistem mengurangi beban komplementer tersebut. Dengan mekanisme ini, total beban yang diterima generator tetap konstan sehingga tegangan keluaran dapat dipertahankan mendekati nilai nominal 220 V.



**Gambar 5. Grafik Pengaruh Variasi Beban terhadap Tegangan Generator**

Pada kondisi tanpa ELC, tegangan keluaran generator menunjukkan penurunan yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya beban. Tegangan awal pada beban 0 W tercatat sebesar 403 V, kemudian menurun secara bertahap menjadi 227 V saat beban mencapai 1000 W. Penurunan ini bersifat hampir linear, yang menunjukkan bahwa sistem generator sangat bergantung pada perubahan beban tanpa adanya mekanisme pengatur daya. Hal ini disebabkan karena peningkatan beban menyebabkan arus keluaran generator bertambah, sedangkan daya mekanik turbin tidak mampu menyesuaikan secara cepat, sehingga terjadi *voltage drop* yang cukup besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem tanpa pengendalian beban tidak dapat menjaga kestabilan tegangan yang diperlukan untuk operasi beban listrik secara optimal.

Sebaliknya, pada kondisi dengan penerapan *Electronic Load Controller* (ELC) berbasis kontrol PID, tegangan keluaran generator mampu dipertahankan dalam rentang yang jauh lebih stabil, yaitu antara 215 V hingga 219 V pada seluruh variasi beban dari 0 hingga 1000 W. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem ELC mampu menjaga keseimbangan antara daya yang dihasilkan generator dan daya yang dikonsumsi oleh beban utama. Ketika terjadi penurunan beban, ELC secara otomatis menambahkan beban komplementer, sedangkan saat beban meningkat, sistem mengurangi beban komplementer tersebut. Dengan mekanisme ini, total beban yang diterima generator tetap konstan sehingga tegangan keluaran dapat dipertahankan mendekati nilai nominal 220 V.

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa sistem tanpa ELC memiliki deviasi tegangan sebesar  $\pm 176$  V dari tegangan nominal, atau sekitar  $\pm 80\%$ , sedangkan sistem dengan ELC hanya mengalami deviasi sebesar  $\pm 4$  V, atau sekitar  $\pm 2\%$ . Nilai ini menunjukkan bahwa sistem ELC berbasis kontrol PID berhasil meningkatkan kestabilan tegangan hingga 40 kali lipat dibandingkan sistem tanpa kontrol. Selain itu, kestabilan tegangan yang diperoleh telah memenuhi standar kualitas daya yang direkomendasikan oleh PLN, yaitu  $\pm 5\%$  dari nilai nominal 220 V.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penerapan ELC dengan algoritma kontrol PID terbukti efektif dalam mempertahankan kestabilan tegangan generator mikrohidro terhadap variasi beban. Sistem ini mampu merespons perubahan daya secara cepat dan proporsional, sehingga dapat menjaga kualitas daya listrik yang dihasilkan. Dengan demikian, rancangan pengatur beban otomatis yang dikembangkan dapat diimplementasikan secara nyata pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro skala kecil untuk meningkatkan keandalan sistem dan kenyamanan pengguna.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem pengatur beban otomatis menggunakan kontrol PID pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro, dapat disimpulkan bahwa sistem yang dirancang mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran generator secara efektif terhadap variasi beban. Pada pengujian tanpa pengatur beban, tegangan generator mengalami penurunan signifikan dari 403 V menjadi 227 V saat beban meningkat hingga 1000 W. Namun, setelah penerapan *Electronic Load Controller* (ELC) berbasis kontrol PID, tegangan keluaran dapat dipertahankan stabil dalam rentang 215–219 V, mendekati nilai nominal 220 V dengan deviasi hanya  $\pm 2\%$ . Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan kestabilan tegangan dibandingkan kondisi tanpa ELC.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Basri, M.A., Sofyan, dan Kurnia. 2021. “Rancang Bangun Electronic Load Control Generator Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Berbasis Mikrokontroler dan IoT”. *SNTEI*. 1. 288-293.
- [2] Hadi, Muhktar, Afrianto, and Imam Syaekani. 2025. “Perancangan dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia : Tinjauan Literatur”. *Impression: Jurnal Teknologi dan Informasi*. 4. 2, 258-270.
- [3] Larobu, Feliks Eldad, et al. 2025. “Rancang Bangun PLTMH Skala Kecil dengan Sistem On-Grid untuk Respons Dinamis terhadap Perubahan Beban Listrik”. *KAPALAMADA : Jurnal Multidisipliner*. 4. 01. 7-18.
- [4] Iksan, Nur, et al. 2023. “Electronic Load Controller based on Modified Firefly Algorithm to Reduce Frequency Fluctuation of Generator in Micro Hydro Power Plants”. *International Journal of Renewable Research*. 13. 2. 601-611.
- [5] Marhatang and Andreas P. 2021. “Rancang Bangun Pengendali Tegangan dan Frekuensi PLTMH”. *Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*. 1. 155-159.
- [6] Fan, Youpiang, et al. 2018. “A Control Scheme for Variable-Speed Micro-Hydropower Plants. *MDPI Sustainability*. 10. 1-19.
- [7] Daksa, Darmaputra Catra, et al. 2020. “Prototipe Penstabil Tegangan pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro”. *Jurnal Teknik Elektro*. 9. 3. 669-675.
- [8] Sofyan, et al. 2022. “Rancang Bangun Electronic Load Control Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Berbasis Mikrokontroler dan IoT”. *Jurnal Teknologi Elektrika*. 19.1. 23-29.
- [9] Putra, Pratama Ilham, R. Sulistyowati, H.A. Sujono et al. “Rancang Bangun PID Controlled Buck Boost Converter Sebagai Penstabil Tegangan Pembangkit Listrik Picohydro Portable”. *SinarFe7*. 6. 3-8.
- [10] Utomo, Teguh, I. Ardhenta et al. 2021. “Rancang Bangun ELC (Electronic Load Controller) sebagai Pengendali Beban PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro) Kali Jari”. *Jurnal EECCIS*. 15. 2. 36-42.