

Desain Kendali Tegangan Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Menggunakan Konverter SEPIC dengan Tuning Fuzzy Logic Control

Noer Soedjarwanto*, Osea Zebua, Fadil Hamdani, Dona Eliza dan Luki Nuralik

Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

Received: 05-08-2025
Accepted: 26-08-2025

Keywords:

Pico-Hydro;
SEPIC;
Fuzzy Logic Control;
voltage stability.

Correspondent Email:

noer.soedjarwanto@eng.unila.ac.id

Abstrak. Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) merupakan solusi untuk memenuhi kebutuhan suplai listrik pada daerah terpencil yang tidak terjangkau jaringan listrik nasional. Tantangan utama dalam implementasi PLTPH adalah ketidakstabilan tegangan keluaran yang dihasilkan karena fluktuasi debit air yang menggerakkan turbin. Pada penelitian ini dilakukan integrasi Konverter SEPIC dan Pengendali Logika Fuzzy pada prototipe PLTPH untuk menstabilkan tegangan keluaran yang dihasilkan pembangkit. Integrasi konverter SEPIC memungkinkan penstabilan tegangan menuju nilai setpoint dengan menaikkan dan menurunkan tegangan sesuai kondisi operasi. Pengendali Logika Fuzzy menggunakan sistem logika untuk menangani ketidakpastian pada tegangan input. Pengujian dengan setpoint 12 V dan beban lampu DC 12 V menghasilkan nilai rise time 1,5420 detik dan Settling time rata-rata 1,7414 detik. Hasil ini menunjukkan sistem mampu mencapai setpoint secara cepat tanpa fluktuasi berkepanjangan. Nilai Maximum overshoot rata-rata 0,583% dan Error steady-state rata-rata 0,0146% sehingga tidak terdapat lonjakan tegangan berlebih dan tegangan keluaran mendekati nilai setpoint.

Abstract. The Pico-Hydro Power Plant (PHPP) is a solution to meet the electricity supply needs in remote areas that are not connected to the national power grid. The main challenge in implementing PHPP is the instability of the output voltage caused by fluctuations in the water flow driving the turbine. In this study, a SEPIC Converter and Fuzzy Logic Controller were integrated into a PHPP prototype to stabilize the generator's output voltage. The integration of the SEPIC converter enables voltage stabilization towards the setpoint value by boosting or bucking the voltage according to operating conditions. The Fuzzy Logic Controller applies a logic-based system to handle uncertainties in the input voltage. Testing with a 12 V setpoint and a 12 V DC lamp load resulted in a rise time of 1.5420 seconds and an average settling time of 1.7414 seconds. These results indicate that the system can reach the setpoint quickly without prolonged fluctuations. The average maximum overshoot of 0.583% and the average steady-state error of 0.0146% indicate the absence of excessive voltage spikes and that the output voltage remains close to the setpoint value.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat mendorong pengembangan sumber energi terbarukan. Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) merupakan salah satu solusi bagi sumber

energi terbarukan yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi di lokasi yang belum dijangkau oleh jaringan listrik nasional. PLTPH memanfaatkan saluran irigasi atau sungai kecil untuk menghasilkan listrik dengan kapasitas daya kurang dari 5 kW [1].

Pada implementasinya, perubahan debit aliran air dan ketinggian jatuhnya air memengaruhi kestabilan tegangan keluaran PLTPH yang mengakibatkan tegangan yang dihasilkan menjadi tidak konstan. Kondisi ini dapat merusak perangkat elektronik yang terhubung sebagai beban PLTPH tersebut. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan sistem pengendali kestabilan tegangan keluaran PLTPH [2]. Pada penelitian ini, untuk mengatasi masalah kestabilan tersebut dilakukan pendekatan pengintegrasian rangkaian *Single Ended Primary Inductor Converter* (SEPIC) berpengendali *Fuzzy Logic Control* (FLC) pada sistem kendali PLTPH. Desain ini diajukan untuk menghadirkan kehandalan konverter SEPIC dan FLC pada PLTPH sehingga dapat memberikan keluaran tegangan yang stabil.

Konverter SEPIC mampu menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai dengan nilai *setpoint* yang diberikan. FLC memiliki kemampuan untuk menangani ketidakstabilan tegangan keluaran PLTPH[3]. Penggunaan logika fuzzy memungkinkan sistem kendali dapat beradaptasi terhadap variasi kondisi operasional, sehingga tegangan keluaran dapat dipertahankan dalam rentang yang diinginkan meskipun terjadi perubahan debit air dan beban [4][5].

2. TINJAUAN PUSTAKA

PLTPH merupakan pembangkit listrik skala kecil yang dapat dioperasikan dengan memanfaatkan aliran sungai yang mempunyai debit air yang kontinyu untuk menghasilkan daya listrik kurang dari 500 Watt [6][7]. Turbin merupakan komponen utama pada sistem PLTPH yang berfungsi mengubah energi kinetik dan energi potensial dari aliran air menjadi energi mekanik [8][9]. Air dari sungai, waduk atau bendungan dialirkan melalui pipa menuju turbin. Aliran air ini akan menghantam sudu-sudu pada turbin sehingga menyebabkan turbin berputar. Putaran ini menggerakkan generator yang terhubung langsung dengan turbin. Melalui induksi elektromagnetik, energi mekanik dari turbin diubah menjadi energi listrik. [10][11]

Generator DC merupakan mesin DC yang menghasilkan daya listrik arus searah atau *Direct Current* (DC). Generator DC memiliki kumparan medan di stator yang merupakan bagian yang diam dan kumparan jangkar di rotor yaitu bagian yang berputar. Kapasitas pembangkitan energi listrik akan dipengaruhi oleh jumlah kumparan pada rotor

[12][13]. Generator DC bekerja berdasarkan hukum Faraday mengenai induksi elektromagnetik. Apabila suatu konduktor digerakkan dan memotong garis-garis gaya magnetik (fluks), maka pada konduktor tersebut akan timbul suatu gaya gerak listrik (GGL). Jika kumparan kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan timbul arus listrik yang mengalir pada rangkaian [14]. GGL pada kumparan dinyatakan pada persamaan 1.

$$E = -N(d\phi/dt) \quad (1)$$

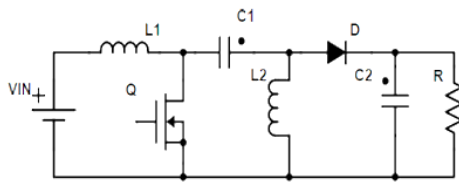
dimana E merupakan GGL dalam volt, N adalah jumlah lilitan kumparan, perubahan fluks magnet ($d\phi$) dalam Weber (Wb), dan perubahan waktu (dt) dalam detik.

2.1. Konverter SEPIC

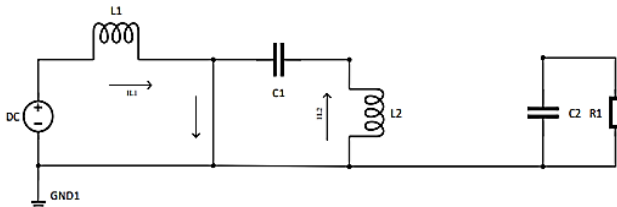
Pada penelitian ini, jenis konverter DC-DC digunakan untuk mengubah tingkat tegangan dari sumber arus DC menjadi tingkat tegangan DC yang berbeda. Jenis konverter ini dapat meningkatkan (*boost*) atau menurunkan (*buck*) nilai tegangan [15]. Konverter DC-DC bekerja menggunakan komponen aktif seperti transistor, dioda, dan induktor. Beberapa jenis konverter DC-DC diantaranya adalah konverter *Buck*, konverter *Boost*, konverter *Buck-Boost*, dan konverter SEPIC.

Konverter Buck menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah. Prinsip kerjanya adalah saat saklar (*switch*) ON, arus mengalir melalui induktor sehingga energi tersimpan di dalamnya, sedangkan saat saklar OFF, energi dari induktor dilepaskan ke beban melalui dioda, menghasilkan tegangan rata-rata yang lebih rendah dari input [16]. Konverter *Boost* meningkatkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih tinggi. Saat saklar ON, energi tersimpan dalam induktor, dan saat saklar OFF, tegangan induktor dijumlahkan dengan tegangan input melalui dioda menuju beban, sehingga tegangan output lebih tinggi dari input. Besar kecilnya tegangan output pada kedua konverter ini ditentukan oleh *duty cycle* sinyal PWM yang mengendalikan saklar [17]. Konverter *Buck-Boost* menggabungkan fungsi *buck* dan *boost*, memungkinkan konverter menghasilkan output yang lebih tinggi atau lebih rendah dari input [15].

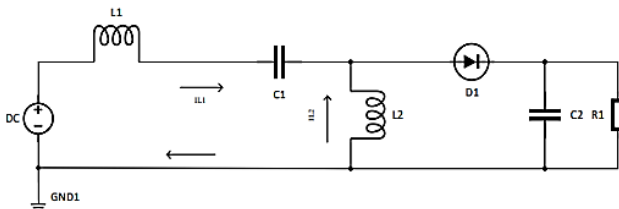
Konverter SEPIC merupakan jenis konverter DC-DC dengan tegangan keluaran (V_{out}) dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan masukan (V_{in}). Berbeda dengan konverter *Buck-Boost*, pada konverter SEPIC tidak terdapat inversi



Gambar 1. Rangkaian konverter SEPIC



Gambar 2. Rangkaian konverter SEPIC saklar ON



Gambar 3. Rangkaian konverter SEPIC saklar OFF

polaritas atau polaritas output sama dengan input (output tetap sefase dengan input). Konverter SEPIC tersusun atas komponen utama yaitu dua buah induktor (L_1 dan L_2), Kapasitor kopling (C_1), saklar (MOSFET), dioda (D) dan kapasitor output (C_2) seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Dalam keadaan stabil (*steady state*), rata-rata tegangan pada induktor adalah nol. Pada kondisi ini, karena L_1 terhubung ke V_{in} dan C_1 , maka diperoleh $V_{C_1} = V_{in}$. Prinsip kerja konverter SEPIC terdiri dari dua kondisi utama, yaitu saat saklar dalam keadaan ON dan saat saklar dalam keadaan OFF.

Pada saat saklar ON, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, maka induktor L_1 akan menyimpan energy (*charging*) dengan mengalirkan arus dari sumber tegangan V_{in} melalui saklar dan kembali ke sumber. Pada kondisi ini, kapasitor C_1 mengalami pelepasan muatan (*discharge*) sehingga mengalirkan arus ke induktor L_2 melalui saklar semikonduktor Q . Kapasitor C_1 sebelumnya telah terisi saat Q pertama kali berkonduksi. Pada kondisi Q_{ON} maka induktor L_1 dan L_2 akan terputus dari beban karena dioda mengalami bias balik atau *reverse bias*. Dalam kondisi saklar ON diperoleh nilai $V_{L_1} = V_{in}$.

Pada kondisi saklar semikonduktor OFF, seperti ditunjukkan pada Gambar 3, maka arus dari sumber tegangan V_{in} akan mengalir ke induktor L_1 dan mengisi kapasitor C_1 (*charging*) serta sekaligus mengalir ke beban. Sementara itu, induktor L_2 melepaskan energi (*discharging*) sehingga arus mengalir melalui dioda yang berada pada kondisi bias maju atau *forward bias* menuju kapasitor C_2 dan beban. Dalam kondisi saklar OFF diperoleh nilai $V_{L_1} = -V_{C_1}$.

2.2. Pulse Width Modulation

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan teknik untuk mengatur tegangan atau daya rata-rata yang dikirim ke beban dengan memodifikasi lebar pulsa sinyal periodik. PWM dapat diterapkan pada aplikasi kendali daya, seperti pengendalian kecepatan motor dan pengaturan kecerahan LED. Dengan memodulasi durasi sinyal ON dan OFF dalam satu periode, PWM dapat mengubah tingkat daya yang diberikan kepada beban tanpa memerlukan rangkaian analog yang kompleks [18][19].

PWM bekerja dengan cara mengubah rasio waktu antara kondisi aktif (ON) dan kondisi tidak aktif (OFF), yang disebut juga sebagai *duty cycle*. *Duty cycle* didefinisikan sebagai persentase lama waktu sinyal berada dalam kondisi aktif (t_{on}) selama satu periode (T), seperti dinyatakan pada persamaan 2. Misalnya, jika *duty cycle* adalah 50%, maka sinyal aktif selama setengah dari periode dan tidak aktif selama setengah lainnya. Besarnya tegangan rata-rata keluaran (V_{out}) berbanding lurus dengan nilai *Duty cycle* (D), seperti pada persamaan 3 [20],

$$D = t_{on}/T \quad (2)$$

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (3)$$

PWM digunakan untuk mengendalikan saklar (MOSFET) pada konverter SEPIC. Kendali tegangan output dapat diatur secara dinamis dengan melakukan perubahan nilai D .

Sinyal PWM yang berasal dari sistem kendali dikuatkan dan dikendalikan menggunakan rangkaian *gate driver* agar mampu mengaktifkan saklar semikonduktor (MOSFET). MOSFET memerlukan *gate driver* karena kapasitansi *gate*-nya relatif besar sehingga dibutuhkan arus puncak yang cukup tinggi untuk melakukan pengisian dan pengosongan muatan *gate* secara cepat. *Gate driver* memastikan tegangan *gate* mencapai level yang

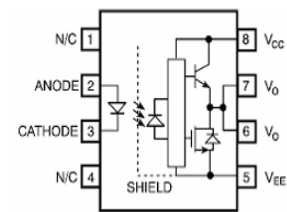
dibutuhkan untuk meminimalkan rugi daya konduksi (*conduction loss*) dan rugi daya peralihan (*switching loss*). *Gate driver* juga berfungsi sebagai penghubung antara sinyal kontrol dan tegangan pada terminal gate (*G*) MOSFET terhadap terminal source (*S*). Sehingga, menghasilkan tegangan *gate-to-source* (V_{GS}) yang menentukan kapan sakelar semikonduktor aktif atau nonaktif. MOSFET alam berada pada kondisi ON jika V_{GS} melebihi tegangan ambang (*threshold voltage*, V_{th}) atau $V_{GS} > V_{th}$, dan akan berada pada kondisi OFF jika $V_{GS} \leq V_{th}$. Pada penelitian ini, digunakan optocoupler gate driver HCPL-3210 untuk mengendalikan MOSFET. HCPL-3210, seperti ditunjukkan pada Gambar 4, memiliki isolasi optic antara sisi input (PWM) dan sisi output (MOSFET) untuk memisahkan tegangan tinggi dan rendah. Pada bagian input terdapat pemancar berupa LED inframerah yang mengubah sinyal listrik menjadi cahaya inframerah. Cahaya ini diterima oleh elemen fotodetektor pada sisi output, kemudian diubah kembali menjadi sinyal listrik.

2.3. Microcontroller Board

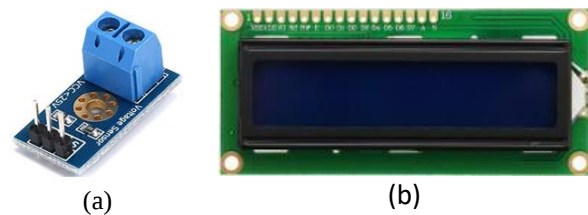
Pada penelitian ini, digunakan *microcontroller board* Arduino UNO R3 berbasis chip ATmega328 yang bekerja pada tegangan operasional sebesar 5 volt dan dilengkapi dengan memori flash sebesar 32 KB untuk menyimpan program serta kecepatan clock mikrokontroler 16 MHz. Platform ini memiliki 14 pin digital yang dapat digunakan sebagai input atau output, 6 pin input analog untuk membaca sinyal analog, dan pin khusus untuk mendukung komunikasi data seperti UART, SPI, dan I2C [21].

Pengukuran besarnya tegangan listrik dalam rangkaian atau sistem elektronik dilakukan dengan menggunakan sensor tegangan. Pada penelitian ini, sensor tegangan didesain untuk membaca tegangan dalam rentang antara 1 volt hingga 25 volt dengan modul sensor tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.a. Sensor tegangan bekerja dengan membagi tegangan masukan menggunakan rangkaian pembagi tegangan resistif dengan nilai resistor tetap. Hasil pembagian tersebut dapat diolah dengan mikrokontroler. Hubungan antara tegangan masukan (V_{in}) dan tegangan keluaran (V_{out}) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut,

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_{low}}{R_{high} + R_{low}} \quad (4)$$



Gambar 4. HCPL3120



Gambar 5. (a) Modul Sensor Tegangan; (b) LCD

dimana R_{high} merupakan resistor yang terhubung ke tegangan input, dan R_{low} adalah resistor yang terhubung ke ground.

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan komponen yang digunakan untuk menampilkan data. Strukturnya LCD terdiri dari dua komponen utama yaitu backlight yang berwarna putih dan liquid chystal yang merupakan cairan organik terletak di antara dua lembar kaca yang memiliki permukaan transparan dan konduktif. Modul LCD yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 5.b.

2.4. Fuzzy Logic Control

Logika Fuzzy, atau logika kabur adalah sistem logika yang digunakan untuk memodelkan penalaran pada kondisi yang mengandung ketidakpastian. Pada logika tegas (*crisp logic*), hanya dikenal dua nilai, yaitu benar atau salah (1 atau 0). Sedangkan pada logika fuzzy, terdapat nilai-nilai di antara benar dan salah yang merepresentasikan derajat kebenaran dalam rentang 0 hingga 1.

Sistem fuzzy atau *Fuzzy Logic Control* (FLC), merupakan implementasi dari konsep logika fuzzy untuk melakukan pengendalian suatu proses. FLC berbasis konsep himpunan fuzzy yang memetakan domain input ke domain output. Himpunan fuzzy memiliki rentang nilai keluaran yang disebut derajat keanggotaan (*degree of membership*). FLC memiliki tiga tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, mekanisme inferensi dan defuzzifikasi. [22]

Fuzzifikasi merupakan tahap pertama dalam proses perhitungan fuzzy, yaitu mengubah masukan

yang bernilai pasti (*crisp input*) menjadi fuzzy input yang berupa derajat keanggotaan. Tahap ini menentukan sejauh mana nilai masukan menjadi anggota dari setiap himpunan fuzzy yang relevan. Fungsi keanggotaan memetakan nilai masukan ke dalam rentang 0 hingga 1, yang merepresentasikan tingkat keanggotaannya. Bentuk fungsi keanggotaan ini dapat ditentukan melalui persamaan garis atau kurva yang merepresentasikan himpunan fuzzy. Beberapa bentuk fungsi keanggotaan yang umum digunakan antara lain fungsi linier naik, fungsi segitiga, dan fungsi linier turun.

Tahap inferensi berfungsi untuk memproses *fuzzy input* berdasarkan aturan *IF-THEN* yang telah ditentukan dalam basis aturan (*rule base*). Setiap aturan akan dievaluasi untuk menentukan keluaran fuzzy sementara. Mekanisme inferensi dapat dilakukan menggunakan beberapa metode, seperti metode Mamdani atau Sugeno. Pada metode Mamdani, hasil keluaran berupa himpunan fuzzy, sedangkan metode Sugeno menghasilkan keluaran berupa fungsi atau nilai konstan.

Prinsip dasar metode Mamdani yaitu dengan menggunakan operasi *MIN-MAX* untuk memperoleh keluaran *fuzzy* berdasarkan aturan yang dinyatakan dalam bentuk linguistic *IF-THEN*. Metode ini termasuk dalam kategori *fuzzy relational model*, di mana setiap aturan mencakup pernyataan fuzzy baik pada bagian awal (*anteseden*) maupun bagian akhir (*konsekuensi*). Fungsi keanggotaan *fuzzy* dalam metode Mamdani merupakan hasil dari aturan-aturan yang disusun selama proses pemodelan [23]. Contoh bentuk aturan dalam model Mamdani adalah

IF x is A AND y is B, THEN z is C

dimana *x* dan *y* adalah variabel input, serta *z* adalah variabel output. A, B, dan C adalah himpunan fuzzy atau fungsi keanggotaan yang mewakili masing-masing variabel tersebut.

Defuzzifikasi adalah proses pengubahan keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*) berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Defuzzifikasi berfungsi sebagai penghubung antara keluaran fuzzy dan kebutuhan aplikasi di dunia nyata. Salah satu bentuk metode defuzzifikasi adalah Metode Centroid (*Composite Moment*). Pada metode Centroid, solusi nilai tegas (*crisp*) diperoleh dengan cara mengambil pada titik pusat massa (*center of gravity*) pada daerah fuzzy. Nilai *crisp* ditentukan pada titik pusat z^* dari daerah fuzzy yang pada domain kontinu dirumuskan dengan persamaan 5 dan pada domain diskrit dirumuskan pada persamaan 6. Parameter z^* merupakan nilai keluaran *crisp*, $\mu(z)$ merupakan fungsi keanggotaan fuzzy, dan n adalah jumlah elemen diskrit. [24].

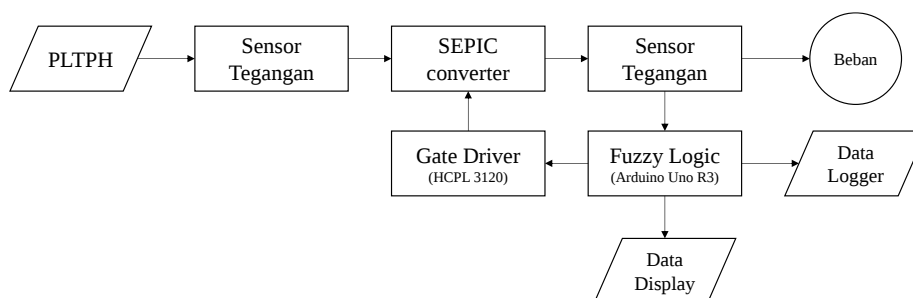
$$z^* = \frac{\int_z z\mu(z)dz}{\int_z \mu(z)dz} \quad (5)$$

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j\mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (6)$$

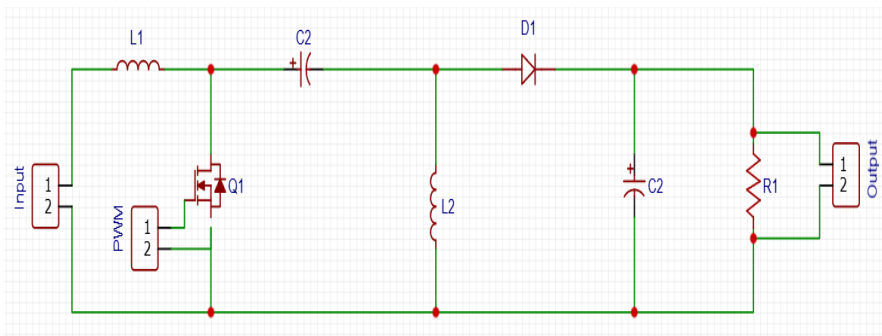
3. METODE PENELITIAN

3.1. Perancangan Rangkaian

Implementasi konverter SEPIC dan FLC pada penelitian ini dilakukan sesuai dengan skema yang ditunjukkan pada Gambar 6. PLTPH sebagai sumber tegangan DC utama menghasilkan tegangan sebesar 8 sampai 24 volt. Tegangan tersebut akan dinaikkan atau diturunkan menggunakan konverter SEPIC agar sesuai dengan tegangan referensi yang telah ditentukan, yaitu sebesar 12 volt. Untuk menyesuaikan tegangan keluaran agar sesuai dengan tegangan referensi, nilai *duty cycle* akan diubah secara dinamis. Pada penelitian ini, dipasang dua sensor tegangan yang digunakan untuk mengukur tegangan masukan dan tegangan



Gambar 6. Skema integrasi konverter SEPIC dan FLC



Gambar 7. Rangkaian konverter SEPIC

Tabel 1. Parameter Rangkaian

PARAMETER	NILAI
Tegangan Masukan (V_{in})	8 – 24 V
Tegangan Keluaran (V_{out})	12 V
Arus Output	2.5 A
Frekuensi Switching (f_{sw})	60 kHz
Duty Cycle ($D_{T_{max}}$)	33% - 60%
Voltage Drop (VD)	0.5 V

keluaran dari konverter SEPIC yang dipasang di sisi masukan dan sisi keluaran konverter SEPIC. Data tegangan keluaran dibaca oleh mikrokontroler untuk mengatur duty cycle agar tegangan keluaran sesuai dengan tegangan referensi sebesar 12 volt. Proses ini berlangsung secara berulang hingga tegangan yang dihasilkan mencapai nilai yang diinginkan. Pengendalian berbasis Fuzzy Logic digunakan untuk mengatur duty cycle secara cepat sehingga tegangan keluaran segera mencapai nilai setpoint.

Rangkaian konverter SEPIC tersusun atas komponen induktor (L), mosfet (Q), dioda (D), kapasitor (C), dan resistor (R), seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dengan nilai parameter ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan parameter awal tersebut, dapat diperoleh nilai dari masing-masing komponen penyusun konverter SEPIC. Nilai induktor dapat diperoleh dengan persamaan 7,

$$L_1 = L_2 = \frac{V_{in(min)}}{\Delta I_L (f_{sw})} D_{T_{max}} \quad (7)$$

dimana ΔI_L adalah *ripple* arus induktor dalam ampere. Dengan tegangan masukan 8 volt dan frekuensi *switching* 60 kHz nilai induktor L_1 dan L_2 adalah 53,3 μH . Arus puncak pada induktor L_1 dan L_2 dapat dihitung dengan persamaan 8 dan 9,

$$I_{L_1 \text{ peak}} = \frac{I_{out}(V_{out} + VD)}{V_{in(min)}} \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (8)$$

$$I_{L_2 \text{ peak}} = I_{out} \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (9)$$

Dengan tegangan keluaran 12 V, tegangan drop 0.5 V, tegangan masukan minimum 8 V dan arus output 2.5 A, dapat diperoleh arus puncak pada induktor 1 ($I_{L_1 \text{ peak}}$) adalah 4.68 A dan arus puncak pada induktor 2 ($I_{L_2 \text{ peak}}$) adalah 3 A.

Arus puncak pada MOSFET dalam rangkaian converter SEPIC ditentukan oleh penjumlahan arus kedua induktor yang mengalir secara bersamaan saat MOSFET berada pada kondisi ON. Induktor L_1 menerima energi dari sumber masukan dan induktor L_2 terhubung seri melalui kapasitor kopling untuk menyuplai beban. Arus yang melewati MOSFET pada mode *Continuous Conduction Mode*, di mana arus induktor bersifat kontinu, dapat diperoleh dengan persamaan 10 berikut,

$$I_{Q \text{ peak}} \approx I_{L_1 \text{ peak}} + I_{L_2 \text{ peak}} \quad (10)$$

Parameter $I_{Q \text{ peak}}$ merupakan arus puncak yang harus dioperasikan oleh MOSFET pada konverter SEPIC, yaitu sebesar 7.68 A saat nilai $I_{L_1 \text{ peak}}$ dan $I_{L_2 \text{ peak}}$ secara berturut-turut adalah 4.68 A dan 3 A.

Arus RMS dapat ditentukan dengan pendekatan persamaan 11,

$$I_Q^{rms} = I_{out} \sqrt{\frac{(V_{out} + V_{in(min)} + VD) \times (V_{out} + VD)}{V_{in(min)}^2}} \quad (11)$$

Dengan Arus output 2.5 A, tegangan keluaran 12 V, tegangan masukan minimal 8 V, dan Tegangan Drop 0.5 V, dapat diperoleh nilai Arus RMS, $I_Q^{rms} \approx 5$ A. Nilai Arus RMS ini sesuai untuk penggunaan jenis MOSFET IRFP460.

Penentuan komponen dioda harus memperhatikan tegangan balik maksimum yang mampu menahan tegangan pada saat *reverse bias* dan dapat mengurangi tegangan *drop* dan *power losses*. Sehingga dioda yang digunakan adalah dioda MUR1560 yang memiliki tegangan *blocking* DC sebesar 600 volt dan arus *forward* maksimal sebesar 30 A.

Penentuan nilai dari kapasitor C_2 dapat diperoleh dengan persamaan 12 berikut,

$$C_2 = \frac{I_{out} \times D_{T_{max}}}{V_{ripple} \times 0.5 \times f_{sw}} \quad (12)$$

dimana tegangan *ripple* (V_{ripple}) diasumsikan sebesar 2% dari tegangan keluaran, yaitu sebesar 0.24 V. Sehingga,

$$C_2 \geq \frac{2,5 \text{ A} \times 60\%}{0.24 \text{ V} \times 0.5 \times 60 \text{ kHz}}$$

yaitu $C_2 \geq 208,33 \mu\text{F}$. Berdasarkan pendekatan perhitungan tersebut, pada penelitian ini digunakan kapasitor dengan nilai $330\mu\text{F}/35\text{V}$ karena kemudahan ketersediaanya di pasaran.

Arus pada kapasitor C_1 dapat diperoleh dengan persamaan 13,

$$I_{C_1} = I_{out} \times \sqrt{\frac{V_{out} + VD}{V_{in(min)}}} \quad (13)$$

dengan nilai arus output 2.5 A, tegangan output 12 V, tegangan drop 0.5 V, dan tegangan masukan minimum 8 V, diperoleh nilai $I_{C_1} = 3.12 \text{ A}$.

Ripple tegangan pada kapasitor kopling (ΔV_{C_s}) dapat dihitung dengan persamaan 14 berikut,

$$\Delta V_{C_s} = \frac{I_{out} \times D_{T_{max}}}{C_s \times f_{sw}} \quad (14)$$

Berdasarkan nilai parameter pada tabel 1, dengan nilai kapasitansi kopling C_s sebesar $100 \mu\text{F}$, dapat diperoleh nilai $\Delta V_{C_s} = 0.25 \text{ V}$. Nilai C_1 dapat diperoleh dengan persamaan 15,

$$C_1 = \frac{I_{C_s} \times D_{T_{max}}}{\Delta V_{C_s} \times f_{sw}} \quad (15)$$

yaitu $C_1 \geq 123,33 \mu\text{F}$ sehingga komponen kapasitor C_1 yang dipilih adalah $220\mu\text{F}/35\text{V}$. Pemilihan ini dilakukan dengan pertimbangan ketersediaan kapasitor di pasaran. Dari kedua kapasitor digunakan *rating* 35V yang bertujuan

untuk mencegah tegangan lebih saat proses pengisian muatan pada kapasitor.

Resistansi resistor dapat dihitung dengan persamaan 16, sehingga dapat diperoleh nilai resistansi $R = 4,8 \Omega$

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (16)$$

Gambar 8 menunjukkan rangkaian *gate driver* menggunakan IC *Optocoupler* HCPL-3120, resistor dan kapasitor. Kapasitor yang digunakan adalah *Mylar* 10nF. Nilai resistor input LED HCPL-3120 dapat diperoleh menggunakan persamaan 17,

$$R = \frac{V_{sumber} - V_{LED}}{I_{LED}} \quad (17)$$

Berdasarkan *datasheet* HCPL3120, nilai V_{sumber} , tegangan maju LED (V_{LED}), dan arus LED (I_{LED}) secara berturut-turut adalah 5V, 0.8 V dan 0.016 A. Sehingga diperoleh nilai resistansi $R \approx 262 \Omega$. Pada implementasinya, digunakan nilai resistor standar terdekat, yaitu $R = 270 \Omega$. Dengan pemilihan resistor ini, arus LED menjadi

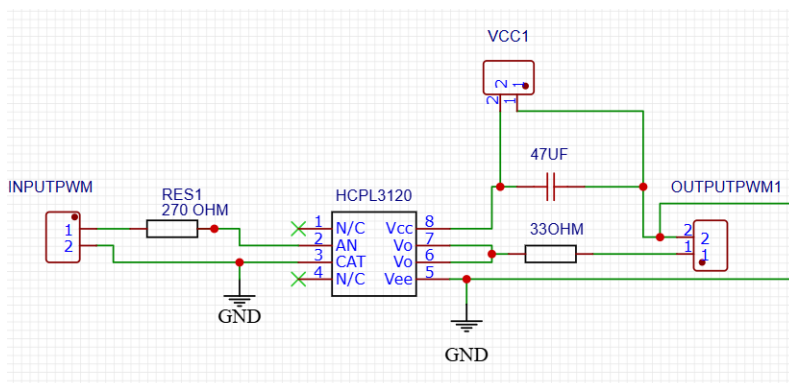
$$I_{LED} = \frac{(5 \text{ V} - 0.8 \text{ V})}{270 \Omega} \approx 15.6 \text{ mA}$$

Nilai tersebut mendekati 16 mA dan dapat diaplikasikan untuk input optocoupler.

3.2. Perancangan Fuzzy Logic Control

Implementasi *fuzzy logic control* dilakukan dengan penentuan range nilai *set point* serta rentang nilai variable aktual. Desain system FLC dibuat dan dimodelkan dengan menggunakan Matlab.

Pada tahap fuzzifikasi, dilakukan pembuatan himpunan keanggotaan. Set Point yang ditentukan sebesar 12 Volt dan digunakan untuk membuat membership function serta perhitungan error dan delta error. Error adalah selisih tegangan terukur



Gambar 8. Rangkaian Penguat Sinyal (Gate Driver)

Tabel 2. Spesifikasi komponen penyusun konverter SEPIC

Komponen	Nilai
Induktor	$L_1 = L_2 = 53,3 \mu\text{H}$
MOSFET	IRFP250N
Dioda	SR5200
Kapasitor	$C_1 = 220\mu\text{F}/35\text{V}$ $C_2 = 330\mu\text{F}/35\text{V}$
Resistor	4.8Ω

dari sensor tegangan dengan tegangan referensi. Keanggotaan pada membership function error dibagi menjadi 7 yaitu NB (Negatif Big), NM (Negatif Medium), NS (Negatif Small), ZE (Zero), PS (Positif Small), PM (Positif Medium), dan PB (Positif Big). Nilai delta error dihitung dari selisih nilai error saat ini dengan nilai error sebelumnya. Keanggotaan pada membership function delta error dibagi menjadi 7 yaitu NBd (Negatif Big delta), NMd (Negatif Medium delta), NSd (Negatif Small delta), ZEd (Zero delta), PSd (Positif Small delta), PMd (Positif Medium delta), dan PBd (Positif Big delta). Keanggotaan pada membership function PWM dibagi menjadi 7, yaitu VS (Very Small), S (Small), MS (Medium Small), M (Medium), MB (Medium Big), B (Big), dan VB (Very Big).

Pada tahap Inferensi, dilakukan pemetaan nilai derajat keanggotaan dari masing masing error dan delta error kedalam tabel yang berisi basis aturan yang dipilih (rule base) dan melakukan pemilihan nilai dari derajat keanggotaan. Pada tahap

defuzzyfikasi, dilakukan konversi hasil keluaran dari proses inferensi (yang diekspresikan dalam bentuk himpunan fuzzy) menjadi nilai crisp yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Perancangan Prototipe PLTPH dan konverter SEPIC

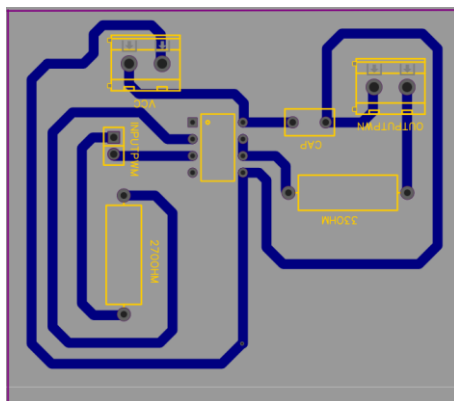
Prototipe PLTPH direalisasikan menggunakan konstruksi rangka berukuran 75 cm (tinggi), 50 cm (panjang), dan 50 cm (lebar), seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Turbin ditempatkan pada ketinggian 30 cm dari permukaan air. Sebagai generator digunakan motor DC yang berfungsi menghasilkan energi listrik melalui putaran rotor dengan keluaran tegangan 0–24 VDC. Jenis turbin yang digunakan adalah turbin Pelton 12 bilah dengan diameter 8 inchi. Pada ujung poros turbin dipasang pulley berdiameter 6 inchi, sementara pada poros generator digunakan pulley berdiameter 3 inchi. Kedua pulley dihubungkan melalui V-belt



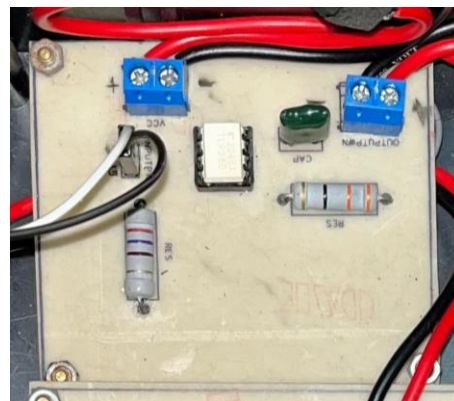
Gambar 9. Prototipe PLTPH



Gambar 10. Pengujian prototipe di lapangan

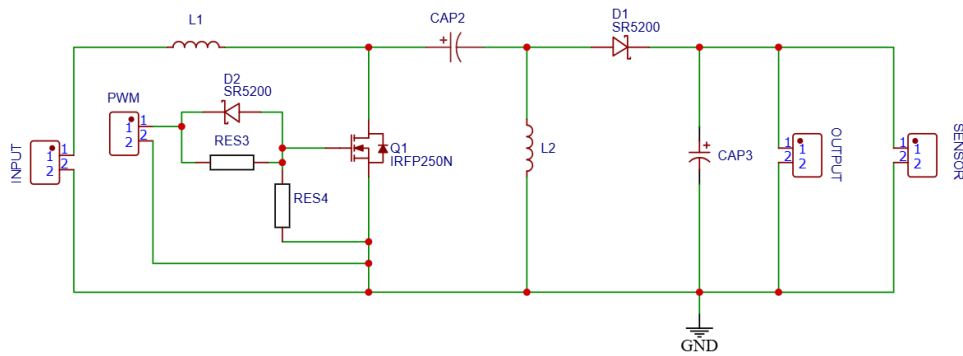


(a)

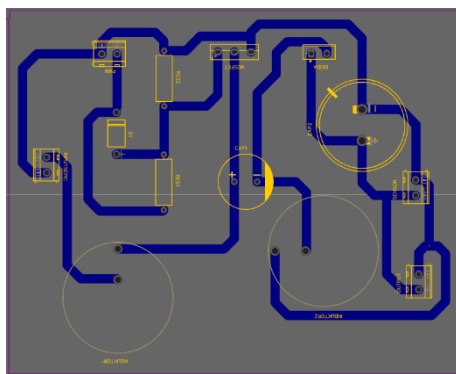


(b)

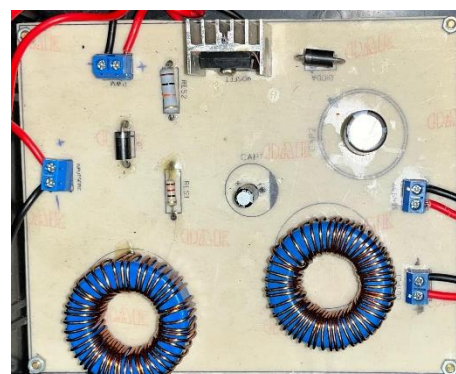
Gambar 11. Desain rangkaian *gate driver* (a) Layout PCB, dan (b) Realisasi Rangkaian



(a) Rangkaian konverter SEPIC



(b) Layout PCB SEPIC Konverter



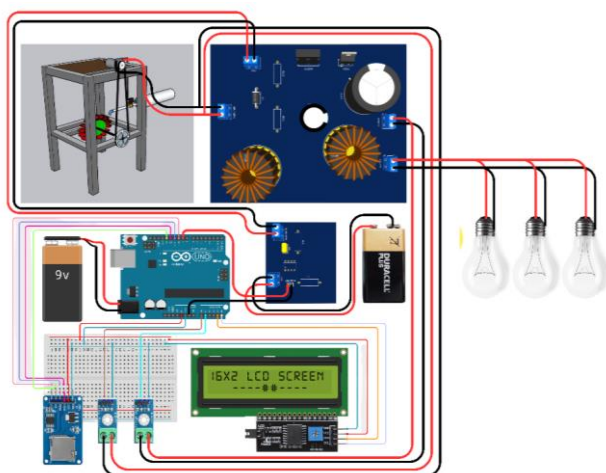
(c) Realisasi SEPIC Konverter

Gambar 12. Hasil desain rangkaian konverter SEPIC

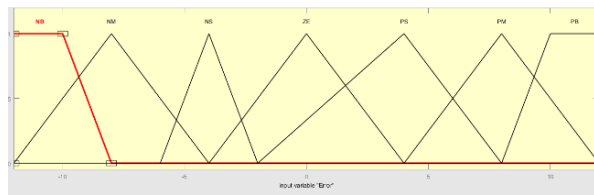
berdiameter 36 cm. Pengujian protipe PLTPH yang telah dilengkapi dengan konverter SEPIC dilakukan pada aliran sungai kecil, di desa Gisting Permai, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung, Indonesia. Pengujian alat dilakukan selama dua bulan, seperti ditunjukkan pada Gambar 10.

Komponen *Gate driver*, pada Gambar 11, merupakan pengendali pensaklaran MOSFET. Perancangan PCB dilakukan menggunakan aplikasi EasyEDA. Layout dan realisasi PCB *gate driver* ditunjukkan pada Gambar 11. Rangkaian *gate driver* terdiri dari resistor input sebesar 270 ohm, resistor output sebesar 33 ohm, kapasitor mylar berkapasitas 10 nF, dan Optocoupler HCPL-3120. Rangkaian *gate driver* ini dilengkapi dengan terminal VCC sebagai input daya, terminal output yang terhubung ke rangkaian SEPIC Konverter, dan pin input yang berasal dari mikrokontroler board Arduino.

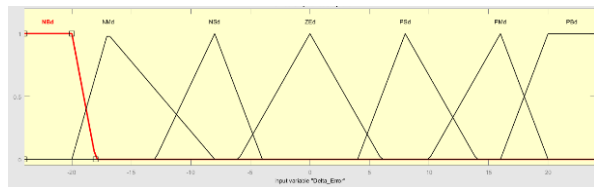
Pada penelitian ini, rangkaian konverter SEPIC dirancang berdasarkan parameter pada Tabel 1. Tegangan masukan berkisar antara 8 hingga 24 volt, dengan tegangan keluaran 12 volt dan arus keluaran 2.4 Ampere. Frekuensi switching adalah 60 kHz, dengan *duty cycle* berkisar antara 33% hingga 60% dan Voltage drop 0.5 volt. Berdasarkan parameter tersebut, rangkaian konverter SEPIC yang diimplementasikan pada penelitian ini di desain seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Wiring



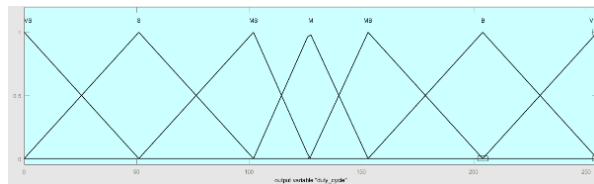
Gambar 13. Diagram pengkabelan prototipe



Gambar 14. Membership Function Error



Gambar 15. Membership Function Delta Error



Gambar 16. Membership Function PWM

prototipe PLTPH terintegrasi konverter SEPIC ditunjukkan pada Gambar 13.

4.2. Hasil perancangan Fuzzy Logic Control

Perancangan Fuzzy Logic Control dilakukan dengan penentuan himpunan fuzzy, fungsi keanggotaan, dan penentuan *rules* yang akan diterapkan. Fungsi keanggotaan, seperti ditunjukkan pada Tabel 3, memiliki dua input yaitu input error dan delta error, serta satu output yaitu output PWM.

Grafik untuk membership function error, delta error, dan PWM secara berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16. Flowchart program diawali dengan pembacaan sensor tegangan output. Nilai error dan delta error dihitung dari selisih tegangan output dengan setpoint. Hasil perhitungan tersebut diproses oleh fuzzy untuk menghasilkan output yang akan menambah atau mengurangi nilai PWM, dengan batas 0 sampai 255. Rule FLC yang diimplementasikan ditunjukkan pada Table 4. Pengujian PLTPH dilakukan untuk mengetahui nilai awal dari parameter tegangan output, debit air, dan putaran generator dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 5.

Pengujian konverter SEPIC dilakukan dengan memberikan variasi *duty cycle* 30%,50%, dan

60%.. Pengujian ini dilakukan pada rangkaian converter *SEPIC* yang dihubungkan dengan beban lampu DC 12 volt. Secara teoritis, nilai tegangan keluaran (V_{out}) dapat diperoleh dari *Duty Cycle* (D) dan Tegangan Masukan (V_{in}) dengan persamaan 18,

$$V_{out} = \frac{D}{(1 - D)} \times V_{in} \quad (18)$$

Hasil pengujian dengan *Duty Cycle* 30%, seperti ditunjukkan pada Gambar 16, diperoleh saat tegangan input 14.76 volt menghasilkan tegangan output 6.21 volt. Perhitungan dengan persamaan 18 diperoleh tegangan output 6.31 volt, perbandingan dengan hasil pengukuran diperoleh error sebesar 1.58% yang masih dalam toleransi dari komponen. Pada *Duty Cycle* 50%, dengan tegangan input 10.11 volt diperoleh tegangan output sebesar 10.31 volt. Perhitungan teoritis menghasilkan tegangan output sebesar 10.11 volt, sehingga error yang diperoleh sebesar 1,97%. Pengujian dengan *duty cycle* 60% dengan tegangan input 6.14 volt menghasilkan tegangan output sebesar 9.23 volt. Perhitungan teoritis menghasilkan tegangan output 9.21 volt, dengan error sebesar 0,21%.

Tabel. 3 Fungsi Keanggotaan

Fungsi	Variable	Fuzzy Set	Domain
Input	Error	NB	[-12 -12 -10 -8]
		NM	[-12 -8 -4]
		NS	[-6 -4 -2]
		ZE	[-2 0 2]
		PS	[-2 4 8]
		PM	[4 8 12]
		PB	[8 10 12 12]
	Δ Error	NBd	[-24 -24 -20 -18]
		NMd	[-20 -17 -8]
		NSd	[-13 -8 -4]
		ZEd	[-6 0 6]
		PSd	[4 8 14]
		PMd	[10 16 20]
		PBd	[16 20 24 24]
Output	PWM	VS	[0 0 0 51]
		S	[0 51 102]
		MS	[51 102 127]
		M	[102 127 153]
		MB	[127 153 204]
		B	[153 204 255]
		VB	[204 255 255 255]

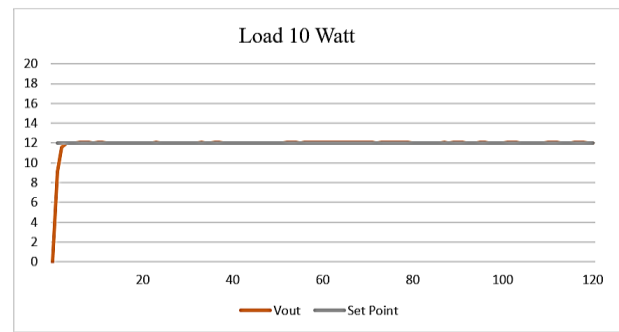
Tabel. 4 Tabel Rule Fuzzy Logic Control

Error \ Δ Error	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VS	VS	S	MS	M	MB	B
NM	VS	M	MS	M	M	MB	B
NS	S	MS	MS	M	M	B	VB
ZE	MS	MB	M	MB	MS	MB	B
PS	M	MB	M	MS	M	B	VB
PM	MB	MB	B	M	B	VB	VB
PB	B	B	VB	MB	M	VS	VB

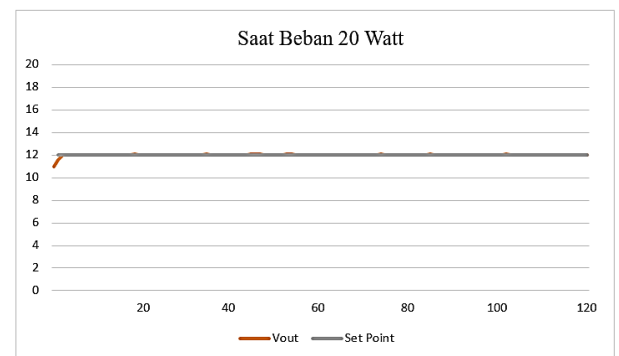
Tabel. 5 Hasil Pengujian PLTPH

Sudut buka Katup (°)	Putaran Generator (RPM)	Tegangan Generator (VDC)	Debit Air (L/m)
0	0	0	0
10	0	0	0
20	0	0	0
30	673	6.21	9.8
40	815	7.52	10.4
50	1038	9.57	11.1
60	1291	11.91	12.4
70	1559	14.33	13.2
80	1967	18.15	14.7
90	2146	19.80	15.3

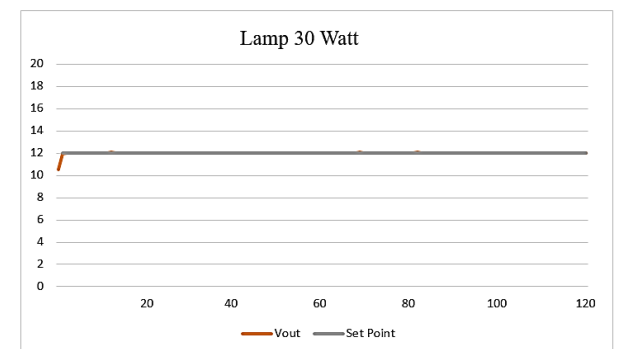
Berdasarkan hasil pengujian diperoleh karakteristik respon sistem pada berbagai kondisi beban seperti ditunjukkan pada Gambar 17. Saat tanpa beban, rise time tercatat selama 1,5420 detik, dihitung berdasarkan waktu yang dibutuhkan tegangan output naik dari 10% (1.2 V) hingga 90% (10.8 V) dari nilai setpoint 12V. Settling time 1.9153 detik berdampak pada kecepatan sistem mencapai kestabilan dalam batas toleransi $\pm 5\%$ (11,4V–12,6V). Sistem mengalami overshoot sebesar 0,66%, dan error steady state yang sangat rendah yaitu 0,0166%, dengan rata-rata output 11,998V. Saat beban ditingkatkan menjadi 20 Watt, settling time berkurang menjadi 1.6885 detik, overshoot menurun menjadi 0.583%, dan error steady state tetap rendah pada 0.0158%, menandakan bahwa sistem tetap stabil meskipun beban bertambah. Pada beban 30 Watt, kinerja sistem tetap menunjukkan kemampuan sistem mempertahankan kestabilan output dimana settling time diperoleh 1.6204 detik, overshoot 0.50%, dan error steady state hanya 0.0116%.



(a). Respon Saat Beban 10 Watt



(b). Respon Saat Beban 20 Watt



(c). Respon Saat Beban 30 Watt

Gambar 17. Respon sistem pada berbagai beban

Tabel. 6 Hasil Kinerja PLTPH

Beban (Watt)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Error Steady State (%)
10	1,542	1,9153	0,66	0,0166
20	-	1,6885	0,538	0,0158
30	-	1,6204	0,50	0,0116
Rata-	1,542	1,7414	0,583	0,0146

Hasil pengujian kinerja PLTPH dengan variasi beban 10 W, 20 W, dan 30 W ditunjukkan pada Tabel 6. Pada beban 10 W, rise time 1.542 detik dan settling time 1.9153 detik, overshoot 0,66% dan error steady state 0.0166%. Peningkatan beban menjadi 20 W dan 30 W, settling time berkurang

masing-masing menjadi 1.6885 detik dan 1.6204 detik. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar beban, sistem dapat mencapai kondisi stabil lebih cepat. Overshoot menurun dari 0.66% pada 10 W menjadi 0.538% pada 20 W, dan 0.50% pada 30 W mengindikasikan sistem tetap stabil terhadap perubahan beban. Error steady state menurun dari 0.0166% menjadi 0.0116% pada beban 30 W. Rata-rata error steady state sebesar 0.0146% menunjukkan error yang dihasilkan relatif kecil. Sistem kendali yang diterapkan pada PLTPH mampu menjaga kestabilan tegangan output dengan respon cepat, overshoot rendah, dan error steady state kecil meskipun terjadi variasi beban.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menstabilkan tegangan keluaran PLTPH pada setpoint 12 volt dengan menggunakan konverter SEPIC yang dikendalikan oleh Fuzzy Logic Control. Kinerja sistem menghasilkan rise time 1.542 detik dan rata-rata settling time 1.7414 detik. Overshoot 0.583% dan error steady state rata-rata 0.0146%. Tegangan keluaran dapat dipertahankan dengan deviasi rendah terhadap setpoint. Pengendalian Fuzzy Logic Control berhasil menjaga kestabilan tegangan keluaran. Hal ini dibuktikan dengan terjadinya tegangan turun hingga 10.95 V pada beban 20 W dan 10.55 V pada beban 30 W, namun dapat kembali ke setpoint dalam waktu masing-masing 1.6885 detik dan 1.6204 detik. Pengembangan sistem pada penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan menerapkan SEPIC sinkron, yaitu mengganti dioda penyearah di bagian output dengan MOSFET yang dikendalikan sebagai *synchronous rectifier*. Rekayasa ini diharapkan dapat menurunkan rugi daya akibat tegangan forward pada dioda, sehingga dapat meningkatkan efisiensi konversi energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lampung atas dukungan pendanaan penelitian melalui hibah penelitian DIPA BLU 2025 dengan Nomor Kontrak 662/UN26.21/PN/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Pratama, O. Melfazen, and B. M. Basuki, "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Picohydro Dengan Daya 72 W Berbasis Kendali Proportional Integral Derivative (PID) pada Konverter DC-DC Di Desa Purwoharjo Kecamatan Ampelgading Kabupaten Malang," pp. 1–7, 2020.
- [2] K. M. Rais, I. Purnama, and K. B. Adam, "Perancangan Kendali Satu Siklus Pada Konverter Daya DC/DC," *eProceedings*, vol. 8, no. 6, pp. 11431–11439, 2021.
- [3] Rahma Nur Amalia, Wijaya Kusuma, and Hikmah Ariq Yuniq, "Desain Dan Analisa Closed Loop Boost Converter Terintegrasi Solar Pv Berbasis Fuzzy Logic Controller," *J. Inform. dan Rekayasa Elektron.*, vol. 6, no. 1, pp. 130–139, 2023, doi: 10.36595/jire.v6i1.849.
- [4] A. Hafis, *Rancang Bangun Buck-Boost Converter Dengan Fuzzy Logic Controller Untuk Sistem Panel Surya*. 2021.
- [5] Y. I. Nakhoda, I. B. Sulistiawati, A. Soetedjo, and J. T. Elektro, "Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Piko hidro," *Apl. Dan Inov. Ipteks SOLIDITAS*, vol. 5068, pp. 99–109, 2018.
- [6] M. Oudda and A. Hazzab, "Photovoltaic system with SEPIC converter controlled by the fuzzy logic," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 7, no. 4, pp. 1283–1293, 2016, doi: 10.11591/ijpeds.v7i4.pp1283-1293.
- [7] N. Y. Goshwe, G. A. Igwe, and D. T. Kureve, "Fuzzy Logic Control for harvesting maximum power from PV solar based SEPIC Converter," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 8, no. 12, pp. 8–13, 2018, doi: 10.29322/ijsrp.8.12.2018.p84108.
- [8] S. J. Chiang, H. J. Shieh, and M. C. Chen, "Modeling and control of PV charger system with SEPIC converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4344–4353, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2005144.
- [9] C. L. Corzo, R. A. Núñez, J. I. Flórez, P. A. Rodríguez, and K. J. Plata, "SEPIC - MPPT controller with photovoltaic energy for groundwater extraction," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1154, no. 1, p. 012042, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1154/1/012042.
- [10] T. M. Syahputra, M. Syukri, and I. D. Sara, "Rancang Bangun Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Piko Hydro dengan menggunakan Turbin Ulir," *KITEKTRO J. Online Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 16–22, 2017.
- [11] Basori, Wismanto Setyadi, and R. Ferdiana, "Analisis Unjuk Kerja Turbin Air Pada Pusat Listrik Tenaga Air (Plta) Dengan Kapasitas 70 Mw," *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 3, no. 3, pp. 131–134, 2016, doi: 10.21009/jkem.3.3.3.
- [12] J. Jamaaluddin, I. Anshory, I. Sulistiyowati, and A. Ahfas, *Buku Ajar Pengantar Teknik Tenaga Listrik*. 2022. doi: 10.21070/2022/978-623-464-054-0.
- [13] U. N. Cendana, "MOTOR-MOTOR LISTRIK," March, 2018.
- [14] T. Sutikno and H. Satrian Purnama, *KONVERTER DC-DC Prinsip & Aplikasi*, vol. 1. 2020.

- [15] F. Musahiroh, "Desain Dan Implementasi Buck Converter Pada Sistem Power Supply Untuk Mesin Cuci Dengan Menggunakan Panel Surya," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 11, no. 1, pp. 8–14, 2023, doi: 10.32487/jtt.v11i1.1506.
- [16] I. Irkham, I. Setiawan, and A. Nugroho, "Perancangan Boost Converter Sebagai Suplai Inverter Menggunakan Dspic30F4011 Dengan Metode Kontrol Proportional Integral," *Transient*, vol. 7, no. 3, p. 737, 2019, doi: 10.14710/transient.7.3.737-744.
- [17] R. Engineering, "Analyzing the Sepic Converter," no. November, 2006.
- [18] F. B. Lubis and A. Yanie, "Implementasi Pulse Width Modulation (PWM) Pada Penyaluran Limbah Cair Pupuk Kelapa Sawit Berbasis Arduino," *JET (Journal Electr. Technol.)*, vol. 7, no. 2, pp. 39–46, 2022, doi: 10.30743/jet.v7i2.5394.
- [19] C. R. Harahap and E. Komalasari, "Pengendalian Motor Brushless Direct current Dengan Frekuensi Tinggi Pulse Width Modulation Dengan Metode Back-Electromotive Force Menggunakan Microcontroller", *Electrician : Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 17, no. 2, pp. 128-133, May 2023.
- [20] P. Handoko, "Sistem Kendali Perangkat Elektronika Monolitik Berbasis Arduino Uno R3," no. November, pp. 1–2, 2017.
- [21] Y. E. Putra, S. R. Sulistiyanti, and M. Komarudin, "Sistem Akuisisi Data Pemantauan Suhu dan Kadar Keasaman (pH) Lingkungan Perairan dengan Menggunakan Unmanned Surface Vehicle", *Electrician : Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 12, no. 3, pp. 84-96, Sep. 2018.
- [22] S. C. Ndukwe, R. Kannan, and H. T. Wei, "Design and experimentation of a simple fuzzy pi-based ac chopper electronic load controller for pico hydropower system," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e35248, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e35248.
- [23] Yudha Febrian, "Implementasi Fuzzy Logic dengan sistem Visual Camera pada Robot Jetbot sebagai Line Follower ", *Electrician : Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 17, no. 3, pp. 287-291, Sep. 2023.
- [24] Fernando Wibisono and Tamaji, "Simulasi Analisis Kualitas Daya Menggunakan Logika Fuzzy Untuk Meningkatkan Efisiensi Sistem Tenaga Listrik", *Electrician : Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 17, no. 3, pp. 309-316, Sep. 2023.