

Implementasi Pengendalian Tegangan Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Skala Piko Menggunakan Cuk Converter Dengan Tuning Fuzzy Logic Control

Noer Soedjarwanto¹, Osea Zebua², Fadil Hamdani³, Muhammad Bani Adam⁴

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

Received: 07-07-2026
Accepted: 07-08-2026

Keywords:
Cuk Converter;
Fuzzy Logic Control;
Voltage Stability;
Pico-Scale Wind Power Plant.

Correspondent Email:
baniadam301@gmail.com

Abstrak. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala piko memiliki kelemahan yaitu fluktuasi kecepatan angin yang mempengaruhi stabilitas tegangan keluaran generator. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan perangkat Cuk Converter yang dikendalikan menggunakan metode Fuzzy Logic Control untuk mencapai stabilitas tegangan Set Point -12,4 V. Sistem kendali dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 yang memproses data masukan dari sensor berupa error dan delta error. Pengujian dilakukan dengan tegangan input 7 V sampai 15 V dengan beban 10 W sampai 40 W. Pada pengujian yang dilakukan, kendali fuzzy mendapatkan hasil yang baik dengan nilai rise time 1,8–2,66 s, settling time 2,31–2,96 s, dan overshoot yang rendah di 0%–1,61%, dengan error steady state sebesar 0,56%–1,21%. Sistem yang dirancang mampu menjaga stabilitas tegangan meskipun terdapat perubahan tegangan masukan dan perubahan beban yang dimiliki sistem

Abstract. Pico-scale Wind Power Plants have a weakness, its the wind speed fluctuations that affect the stability of the generator's output voltage. This study aims to design and implement a Cuk Converter device controlled using the Fuzzy Logic Control method to achieve voltage stability at a Set Point of -12.4 V. The control system is designed using an Arduino Mega 2560 microcontroller that processes input data from the sensor in the form of error and delta error. The testing was conducted with an input voltage ranging from 7 V to 15 V and loads ranging from 10 W to 40 W. In the tests conducted, the fuzzy control obtained good results with a rise time of 1.8–2.66 s, a settling time of 2.31–2.96 s, and a low overshoot of 0%–1.61%, along with a steady-state error of 0.56%–1.21%. The designed system is capable of maintaining voltage stability despite changes in the input voltage and load variations within the system.

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala piko merupakan solusi strategis untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah terpencil Indonesia. Namun, karakteristik kecepatan angin yang sangat fluktuatif menyebabkan tegangan keluaran generator tidak stabil. Kondisi ini dapat

menurunkan efisiensi konversi energi dan berisiko merusak perangkat beban.

Penelitian ini menguji penerapan Cuk Converter yang diintegrasikan dengan metode Fuzzy Logic Control (FLC) berbasis mikrokontroler Arduino Mega 2560. Cuk converter dipilih karena memiliki arus masukan dan keluaran yang kontinu sehingga mampu meminimalkan riak tegangan secara optimal.

FLC digunakan untuk menala *duty cycle* secara adaptif tanpa memerlukan pemodelan matematis sistem yang rumit. Kombinasi ini menjadi inovasi dalam menjaga stabilitas tegangan sistem.

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan mengevaluasi performa respon transient sistem (*rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *error steady state*). Sistem diuji secara dinamis untuk mempertahankan stabilitas tegangan keluaran pada *set point* -12,4 V di bawah kondisi fluktuasi tegangan masukan 7 V hingga 15 V serta variasi beban 10 W hingga 40 W.

2. TINJAUAN PUSTAKA

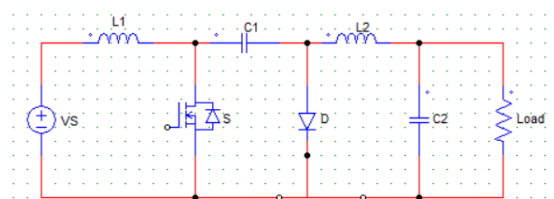
2.1. PLTB Skala Piko

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) skala piko merupakan sistem konversi energi angin menjadi energi listrik dalam kapasitas yang kecil yaitu di bawah 500 Wh. Salah satu kelemahan utama pada sistem PLTB skala piko adalah adanya fluktuasi kecepatan angin. Fluktuasi ini secara langsung memengaruhi stabilitas tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator DC. Karena itu, diperlukan sebuah sistem kontrol elektronik untuk menjaga agar tegangan keluaran tetap berada pada kondisi stabil sesuai dengan kebutuhan beban[1].

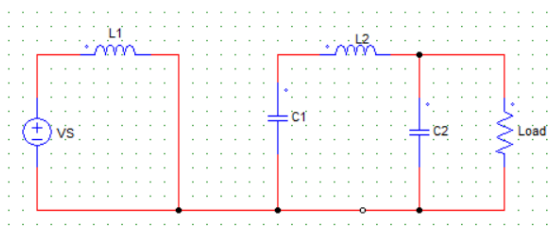
2.2. Cuk Converter

Cuk converter merupakan jenis konverter DC-DC yang mampu menaikkan maupun menurunkan tegangan DC dengan keluaran berpolaritas terbalik terhadap masukan. Prinsip kerjanya menggunakan dua induktor dan satu kapasitor kopling sebagai media transfer energi antara sisi input dan output. Saat saklar aktif, energi disimpan dalam induktor input dan kapasitor, ketika saklar mati, energi tersebut dilepaskan ke induktor output dan beban [2]. Keunggulan utama *Cuk converter* dibandingkan buck-boost converter terletak pada arus input dan output yang lebih halus serta *ripple* yang rendah, sehingga lebih efisien dan stabil saat digunakan, ditunjukkan pada gambar 1.

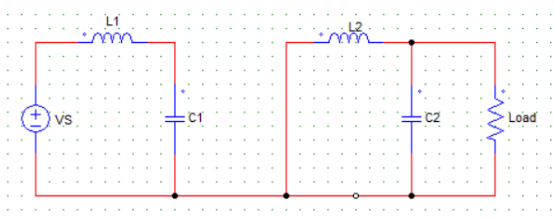
Lalu rangkaian ekuivalen cuk koverter pada mode ON dan mode OFF ditampilkan pada gambar 2. Dan gambar 3.



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen Cuk Converter



Gambar 2. Kondisi ON



Gambar 3. Kondisi OFF

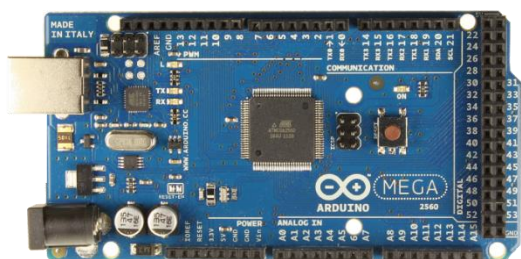
Pada saat saklar MOSFET dalam kondisi ON ($t = 0$), arus pada induktor $L1$ mulai meningkat karena terhubung langsung dengan sumber tegangan. Pada waktu yang sama, tegangan pada kapasitor $C1$ memberikan bias terbalik pada dioda D , sehingga dioda tersebut tidak menghantar arus. Dalam kondisi ini kapasitor $C1$ melepaskan energinya ke rangkaian yang terdiri dari $C1$ – $C2$ –beban– $L2$. Proses ini memungkinkan terjadinya transfer energi dari sisi input menuju sisi output melalui kapasitor [3].

Ketika saklar MOSFET berada dalam kondisi OFF ($t = t1$), arus dari sumber utama Vs mulai mengisi kapasitor $C1$. Pada saat yang sama energi yang sebelumnya tersimpan dalam induktor dilepaskan dan disalurkan menuju beban. Dalam proses ini kapasitor $C1$ berperan sebagai penghubung energi antara sumber dan beban, sehingga energi dapat berpindah secara efisien meskipun saklar telah tertutup [4].

2.3. Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 [5] merupakan mikrokontroler berbasis chip ATmega2560. *Board* ini memiliki 54 pin input/output digital (14 di antaranya mendukung PWM), 16 pin

analog, dan 4 port komunikasi serial (UART). Dilengkapi dengan osilator 16 MHz, koneksi USB, jack daya, serta tombol reset, papan ini dapat digunakan dengan menghubungkan ke komputer atau sumber daya eksternal. Mikrokontrolin ini cocok untuk berbagai aplikasi seperti robotika, sistem otomatisasi, dan proyek elektronika untuk proses pembelajaran. Fisik Arduino Mega 2560 ditampilkan pada gambar 4.



Gambar 4. Arduino Mega 2560

2.4 Kendali Logika Fuzzy

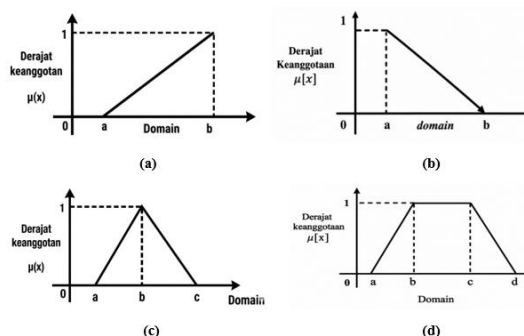
Logika Fuzzy (*Fuzzy Logic*) merupakan metode kontrol cerdas yang meniru penalaran manusia dengan bekerja pada rentang nilai antara 0 hingga 1, berbeda dari logika biner (0 atau 1). Keunggulan utama metode ini adalah kemudahan implementasinya pada sistem kendali otomatis karena tidak memerlukan pemodelan matematis yang kompleks. Hubungan pengambilan keputusan antara masukan dan keluaran dalam logika fuzzy digambarkan secara sederhana menggunakan basis aturan berbentuk *IF-THEN* [6]. Beberapa komponen *Fuzzy Logic* yang digunakan adalah:

2.4.1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam sistem inferensi fuzzy yang berfungsi mengonversi data tegas (*crisp*) berupa nilai numerik pasti menjadi bentuk variabel linguistik berdasarkan nilai derajat keanggotaannya. Proses transformasi ini memanfaatkan beberapa jenis fungsi keanggotaan untuk memetakan input secara akurat. Salah satu bentuk representasi dasar yang sering digunakan adalah fungsi linear. Pada representasi linear naik (Gambar 5.a), pemetaan himpunan dimulai pada nilai domain dengan derajat keanggotaan nol, kemudian bergerak naik menuju nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi [7].

Sebaliknya, fungsi linear turun (Gambar 5.b) bekerja dengan cara yang berlawanan, di mana garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, lalu bergerak menurun secara linear menuju derajat keanggotaan yang lebih rendah [8].

Pemetaan variabel fuzzy juga sering direpresentasikan menggunakan kurva geometris untuk mengakomodasi karakteristik data yang lebih spesifik. Salah satunya adalah kurva segitiga (Gambar 5.c), di mana hubungan antara input dan derajat keanggotaannya digambarkan melalui gabungan dua garis linear yang saling menyudut [9]. Nilai-nilai di sekitar titik puncak memiliki derajat keanggotaan maksimum bernilai satu, namun akan menurun cukup tajam ketika posisinya menjauh dari titik maksimum tersebut. Bentuk representasi lainnya adalah kurva trapesium (Gambar 5.d) yang dilengkapi dengan area datar di bagian atas. Area datar tersebut menunjukkan adanya rentang nilai yang secara kontinu memiliki derajat keanggotaan maksimum [10].



Gambar 5. (a) Representasi Linear Naik; (b) Representasi Linear Turun; (c) Kurva Segitiga; (d) Kurva Trapesium.

2.4.2. Rule Base

Sistem berbasis aturan (*rule-based system*) merupakan pendekatan dalam perancangan logika yang menggunakan seperangkat aturan *IF-THEN* untuk menentukan tindakan atau keputusan berdasarkan kondisi tertentu. *Rule base* berfungsi sebagai mekanisme pengendalian berbasis pengetahuan yang merepresentasikan logika pengambilan keputusan manusia dalam merespons fluktuasi kondisi sistem [11].

Struktur dasar dari *rule base* ini mengintegrasikan dua komponen utama secara

berkesinambungan, yaitu bagian *IF* (premis) yang menyatakan kondisi variabel sistem yang sedang diamati—seperti besarnya nilai *error* atau perubahan *error*—serta bagian *THEN* (konklusi) yang menentukan parameter respons atau aksi pengendalian spesifik yang harus dieksekusi guna menstabilkan serta meregulasi keluaran sistem.

2.4.3. Inferensi

Mekanisme inferensi merupakan tahapan komputasi dalam logika fuzzy yang bertugas mengevaluasi dan menggabungkan seluruh basis aturan (*rule base*) berformat *IF-THEN* untuk menghasilkan keputusan yang tepat. Pada tahap ini, masukan linguistik hasil fuzzifikasi dievaluasi menggunakan operator logika (seperti *AND* atau *OR*) guna memetakan kondisi sistem yang dinamis menjadi tindakan pengendalian yang adaptif. Proses ini memungkinkan sistem kontrol beroperasi secara fleksibel tanpa memerlukan perumusan matematis yang rumit [12]. Terdapat tiga metode inferensi yang sering digunakan dalam perancangan sistem kendali, yaitu:

a. Metode Mamdani

Metode ini sangat populer karena pendekatannya yang intuitif dan menyerupai pola pikir manusia. Pada inferensi Mamdani, bagian premis (*IF*) maupun konklusi (*THEN*) sama-sama direpresentasikan dalam bentuk himpunan fuzzy. Keputusan akhir dieksekusi melalui tahap komposisi aturan sebelum diproses lebih lanjut pada tahap defuzzifikasi untuk menghasilkan nilai yang tegas [13]

$$\mu_{A \text{ AND } B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (1)$$

$$\mu_{A \text{ OR } B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2)$$

b. Metode Tsukamoto

Karakteristik utama metode ini terletak pada penggunaan fungsi keanggotaan konsekuen yang bersifat monoton (selalu naik atau turun secara teratur). Setiap aturan akan menghasilkan keluaran nilai tegas (*crisp*) yang bergantung pada derajat kebenaran aturan tersebut (α -predikat atau *fire strength*). Hasil akhir keluaran sistem ditentukan menggunakan perhitungan rata-rata terbobot (*weighted average*) dari seluruh aturan yang aktif [14].

c. Metode Sugeno

Pendekatan ini memiliki perbedaan mendasar pada bagian konsekuennya, di mana keluarannya bukan berupa himpunan fuzzy, melainkan berbentuk konstanta (Sugeno orde nol) atau persamaan linear (Sugeno orde satu). Penggunaan keluaran bernilai tegas (*singleton*) ini mengurangi beban perhitungan matematis, sehingga metode Sugeno sangat optimal dan efisien saat diimplementasikan pada pemodelan sistem kontrol yang membutuhkan waktu komputasi cepat dan presisi tinggi.

$$z = f(x, y) \quad (2)$$

2.4.4. Defuzzifikasi

Tahap akhir dari sistem penyimpulan fuzzy yang berfungsi mentransformasikan nilai keluaran fuzzy hasil inferensi menjadi nilai tegas (*crisp output*) sebagai sinyal aksi kontrol fisik yang dapat dieksekusi oleh mikrokontroler. Pada inferensi Mamdani, defuzzifikasi dilakukan dengan menggunakan metode *Centroid* untuk mencari titik pusat geometri dari daerah area fuzzy hasil kombinasi aturan, sehingga diperoleh nilai keluaran yang halus dan presisi. Pada metode Tsukamoto dan Sugeno, proses defuzzifikasi berlangsung lebih sederhana dengan menerapkan perhitungan rata-rata terbobot (*weighted average*) berdasarkan nilai derajat kebenaran (*fire strength*) dari masing-masing aturan yang aktif [15].

$$Z = \frac{\int \mu(z) \cdot z dz}{\int \mu(z) dz} \quad (5)$$

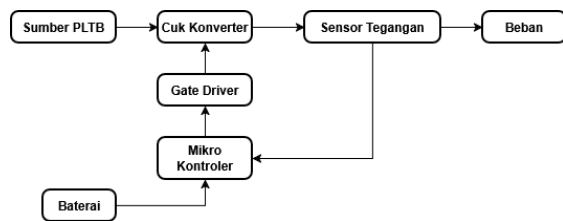
3. METODE PENELITIAN

3.1. Perancangan Sistem PLTB skala piko

Keseluruhan perancangan penelitian yaitu sumber energi yang digunakan adalah PLTB skala piko yang menghasilkan tegangan sebesar 7 V -15 V yang akan dinaikkan ataupun diturunkan menggunakan *Cuk converter* yang sesuai dengan tegangan referensi sebesar 12 V. Untuk menyesuaikan tegangan keluaran sesuai tegangan referensi yang diinginkan maka nilai *duty cycle* akan mengalami perubahan.

Pada perancangan ini dipasang sensor tegangan untuk mengetahui tegangan masukan dan tegangan keluaran dari *Cuk converter*. Data yang diperoleh ini akan diolah

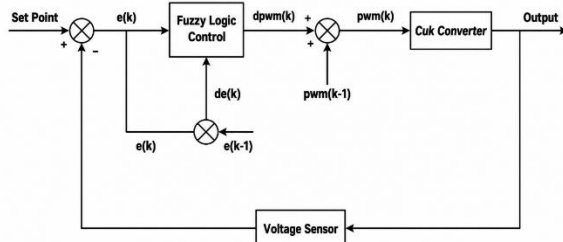
oleh Arduino Mega 2560 untuk memberikan respon perubahan *duty cycle* sesuai dengan data tegangan yang diperoleh agar menghasilkan tegangan referensi yang diinginkan. Kendali yang digunakan untuk mengontrol dan mengolah data tersebut menjadi nilai *duty cycle* yang diinginkan menggunakan metode *fuzzy logic control*. Diagram Sistem ditampilkan pada gambar 6.



Gambar 6. Diagram Sistem PLTB Skala Piko

3.2. Diagram Kontrol Sistem

Fuzzy logic controller pada sistem ini menggunakan dua variabel input, yaitu *error* dan *delta error*, serta menghasilkan satu variabel output, yaitu *delta PWM*, terdapat pada gambar 7.



Gambar 7. Diagram Kontrol Sistem

Persamaan nilai *Error* dan *Delta Error* adalah sebagai berikut :

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (6)$$

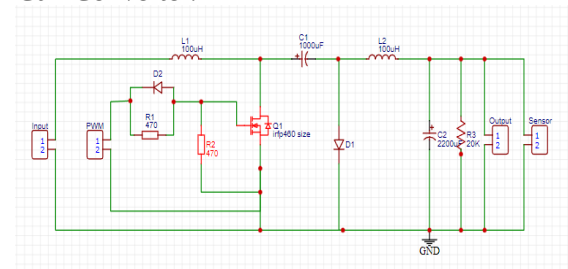
$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (7)$$

Nilai *delta PWM* ini digunakan dalam persamaan untuk menentukan besarnya PWM yang akan mengendalikan MOSFET pada Cuk Converter. Besaran PWM tersebut dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$pwm(k) = \Delta pwm(k) + pwm(k - 1) \quad (8)$$

3.3. Perancangan Cuk Converter

Gambar 8. Merupakan rancangan dari Cuk Converter.



Gambar 8. Rancangan Cuk Converter

Parameter yang di aplikasikan pada rangkaian ini ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter Cuk Converter

PARAMETER	NILAI
Tegangan Masukkan (Vin)	7 – 15 V
Tegangan Keluaran (Vout)	12 V
Daya Beban (Watt)	30 W
Arus Keluaran	2,5 A
Frekuensi Switching	30 KHz
Duty cycle	35 % - 75%
Ripple Tegangan	0,5 V

Perhitungan Induktor 1 (L1) dan Induktor 2 (L2) adalah:

$$L1 = \frac{Vin^2 \times Vout}{\Delta \times P \times Fs \times (Vout - Vin)} \quad (9)$$

$$L1 = \frac{6^2 \times 12}{0.5 \times 30 \times 50000 \times (12 - 6)}$$

$$L1 = 96 \mu H$$

$$L2 = \frac{Vin \times Vout^2}{\Delta \times P \times Fs \times (Vout + Vin)} \quad (10)$$

$$L2 = \frac{6 \times 12^2}{0.5 \times 30 \times 50000 \times (6 + 12)}$$

$$L2 = 64 \mu H$$

Menentukan Arus Puncak L1:

$$IL1_{peak} = Iout \times \frac{Vout + VD}{Vin(min)} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (11)$$

$$IL1_{peak} = 2,5 \times \frac{12 + 0,5}{6} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right)$$

$$IL1_{peak} = 6,25 A$$

Mementukan Arus Puncak L2:

$$IL2_{peak} = I_{out} \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right) \quad (12)$$

$$IL2_{peak} = 2,5 \times \left(1 + \frac{40\%}{2}\right)$$

$$IL2_{peak} = 3 \text{ A}$$

Dari perhitungan tersebut maka nilai L1 adalah $96 \mu H$ dan L2 adalah $64 \mu H$. Lalu perhitungan nilai kapasitor C1 dan C2 adalah:

$$C = \frac{V_{in} \times D_{max}}{F_s \times R \times \left(\frac{\Delta V}{V_{out}}\right)} \quad (13)$$

$$C = \frac{6 \times 0.75}{50000 \times 4.8 \times \left(\frac{0.5}{12}\right)}$$

$$C = 45 \mu F$$

Menentukan Komponen MOSFET dengan menghitung arus puncak

$$I_{Q_{peak}} = IL1_{peak} + IL2_{peak} \quad (14)$$

$$I_{Q_{peak}} = 6,25 + 3$$

$$I_{Q_{peak}} = 9,25 \text{ A}$$

Maka kita gunakan MOSFET jenis IRFP250N

Komponen yang digunakan pada rangkaian cuk converter ditampilkan pada tabel 2.

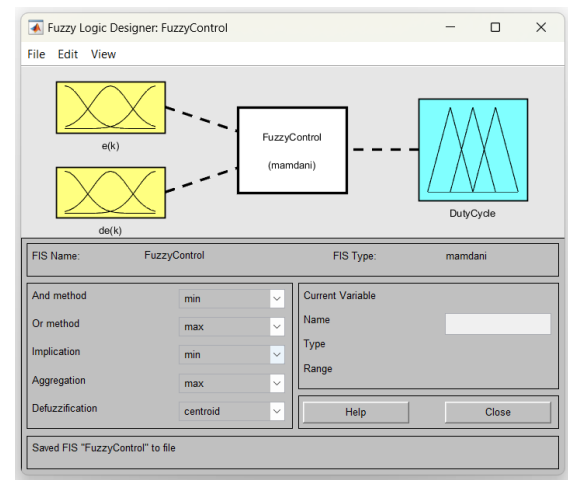
Tabel 2. Spesifikasi Rangkaian Cuk Converter

KOMPONEN	NILAI
Induktor (L1 & L2)	$96 \mu H$ & $64 \mu H$
Kapasitor	$45 \mu F$
MOSFET	IRFP250N
Dioda	MUR1560
Resistor	$4,8 \Omega$

3.4. Perancangan Fuzzy Logic Control

Dalam penelitian ini, sistem logika fuzzy dirancang menggunakan Mamdani *Fuzzy logic control* dengan metode defuzzifikasi centroid. Dua variabel input digunakan, yaitu *error* ($E(k)$) dan *delta error* (ΔE), sedangkan outputnya berupa *duty cycle* yang kemudian dikonversi menjadi sinyal PWM untuk melakukan switching pada MOSFET. Kedua input memiliki lima fungsi keanggotaan, yaitu NB (Negatif Besar), NS (Negatif Kecil), ZR (Nol), PS (Positif Kecil), dan PB (Positif

Besar). Rancangan logika fuzzy ditampilkan pada gambar 9.



Gambar 9. Rancangan Fuzzy Logic Pada Simulink

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Rancangan Sistem

Realisasi konstruksi mekanis PLTB skala piko secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 10. Struktur penyangga utama dibuat menggunakan rangka besi konfigurasi huruf 'H' berdimensi $85 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, serta ditopang rangka tambahan setinggi 50 cm yang dilengkapi *bearing* untuk meminimalisasi gaya gesek poros.



Gambar 10. PLTB Skala Piko

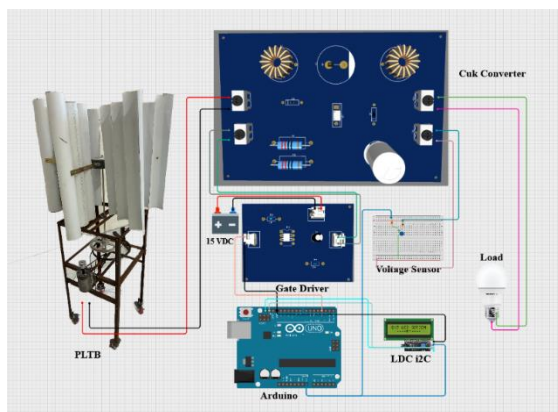
Pada bagian rotor, digunakan turbin empat sudu berbahan modifikasi pipa *Polyvinyl Chloride* (PVC) dengan dimensi $60 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ dan radius lengan jangkauan 30 cm . Poros turbin ini dikopel secara langsung (*direct drive*) dengan generator DC untuk mengonversi energi

mekanik menjadi energi listrik arus searah, di mana terminal keluarannya kemudian diintegrasikan secara elektrik menuju rangkaian *Cuk Converter*. Hasil Pengujian PLTB Skala Piko ditampilkan pada tabel 3.

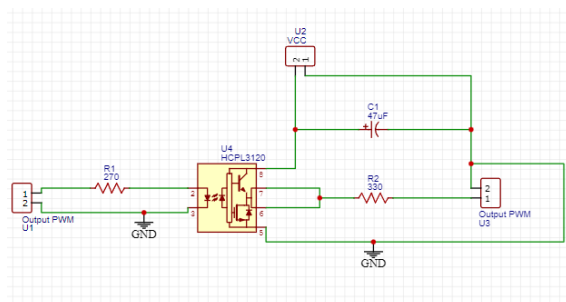
Tabel 3. Hasil Pengujian PLTB

Kec. Angin (m/s)	Putaran Generator DC (RPM)	Putaran Turbin (RPM)	Tegangan Generator (Vdc)
1,6	228,4	45,10	12,23
2,1	365,4	72,20	14,96
2,14	225,4	44,80	7,63
0,8	189,7	37,80	4,74
2,7	371	73,00	14,34
3,1	427,1	84,10	16,44
4,2	518,7	102,10	19,2

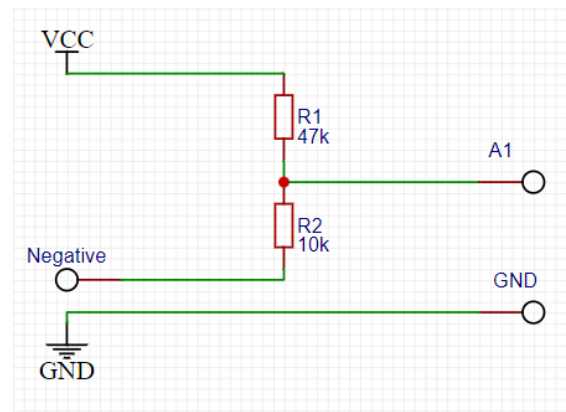
Gambar 11. menampilkan hasil rancangan dan realisasi keseluruhan sistem yang mana terdiri dari PLTB skala *Piko*, rangkaian *Cuk Converter*, rangkaian *gate driver* (Gambar 13.), sensor tegangan (Gambar 14.), mikrokontroler Arduino Uno, LCD i2c 16x3, dan rangkaian beban.



Gambar 11. Rangkaian Keseluruhan Sistem



Gambar 12. Rangkaian Gate Driver



Gambar 13. Rangkaian Sensor Tegangan

4.2. Hasil Rancangan Fuzzy Logic Control

Tabel 4. Fungsi Keanggotaan

Fungsi	Variabel	Fuzzy Set	Domain
Input	Error	NB	[-20, -20, -5, -3]
		NM	[-5, -3, -1]
		NS	[-2, -0,5, 0]
		Z	[-0,3, 0, 0,3]
		PS	[0, 0,5, 2]
		PM	[1, 3, 5]
	DeltaError	PB	[3, 5, 20, 20]
		NBd	[-10, -10, -2, -1]
		NSd	[-2, -1, 0]
		Zd	[-1, 0, 1]
Output	Output PWM	PSd	[0, 1, 2]
		PBd	[1, 2, 10, 10]
		VS	[0,4, 0,4, 0,47, 0,52]
		S	[0,47, 0,52, 0,57]
		M	[0,52, 0,57, 0,62]
		L	[0,57, 0,62, 0,67]
		VL	[0,62, 0,67, 0,72]
		VVL	[0,67, 0,72, 0,8, 0,8]

Pada rancangan ini memaparkan perancangan *Fuzzy Logic Control* (FLC) yang diterapkan pada sistem. Tahapan perancangan algoritma ini meliputi pendefinisian himpunan fuzzy, pembentukan fungsi keanggotaan

(*membership function*), *fuzzy* yang dirancang beroperasi menggunakan dua variabel masukan (*input*), yakni *error* dan *delta error*, untuk kemudian diolah menjadi satu variabel keluaran (*output*) berupa sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) ditampilkan pada Tabel 3.

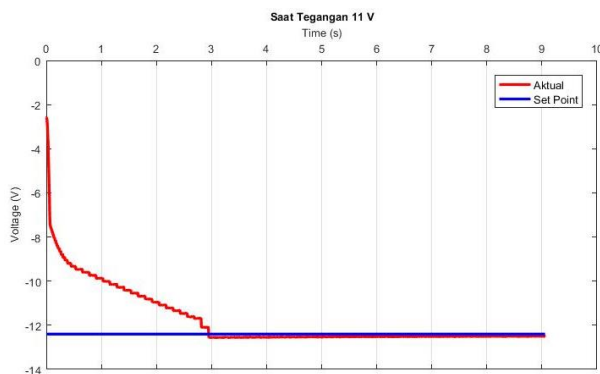
Untuk mengimplementasikan sistem *Fuzzy Logic Control* (FLC), diperlukan *rule base* yang berfungsi sebagai acuan pengambilan keputusan. Sistem ini merumuskan 35 aturan *fuzzy*, yang diperoleh dari kombinasi perkalian antara 7 himpunan pada variabel *error* dan 5 himpunan pada variabel *delta error*. Adapun matriks basis aturan yang diterapkan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rule Base

Error \ Δ Error	NBd	NSd	Zd	PSd	PBd
NB	VVL	VVL	VL	L	M
NM	VVL	VL	L	M	S
NS	VL	L	L	S	VS
Z	L	M	M	S	VS
PS	M	S	S	VS	VS
PM	S	VS	VS	VS	VS
PB	VS	VS	VS	VS	VS

4.3. Respon Sistem Terhadap Perubahan Tegangan

Pada pengujian ini menggunakan beban tetap yaitu lampu DC 12 V dengan daya 40 watt, dan tegangan input yang digunakan sebesar 11 V, 12 V dan 15 V. Gambar 14. Merupakan grafik respon sistem saat tegangan input sebesar 11 V, dan tabel 5. Merupakan parameter respon sistem yang dihasilkan oleh sistem.

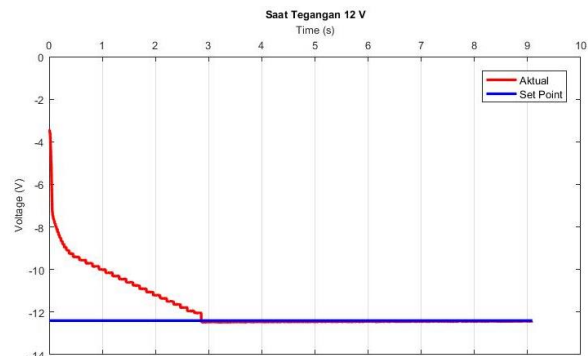


Gambar 14. Grafik Respon Sistem Saat Tegangan input 11V

Tabel 5. Parameter Respon Sistem Input 11 V

Rise Time	2,662 s
Settled Time	2,96 s
OverShoot	1,61%
Error	0,96%

Gambar 15. Merupakan grafik respon sistem saat tegangan input sebesar 12 V, dan tabel 6. Merupakan parameter respon sistem yang dihasilkan oleh sistem.

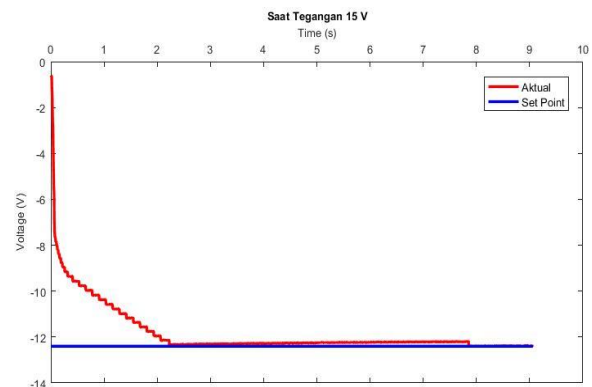


Gambar 15. Grafik Respon Sistem Saat Tegangan input 12V

Tabel 6. Parameter Respon Sistem Input 12 V

Rise Time	2,396 s
Settled Time	2,85 s
OverShoot	0.81%
Error	0,56%

Gambar 16. Merupakan grafik respon sistem saat tegangan input sebesar 15 V, dan tabel 7. Merupakan parameter respon sistem yang dihasilkan oleh sistem.



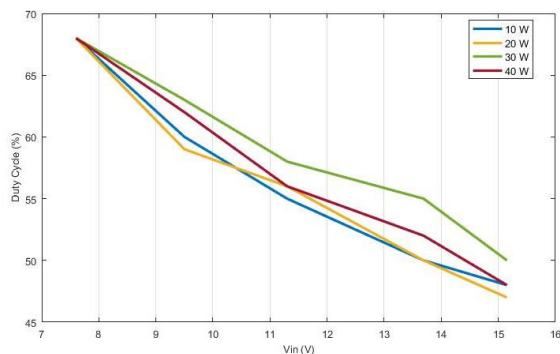
Gambar 16. Grafik Respon Sistem Saat Tegangan input 15V

Tabel 7. Parameter Respon Sistem Input 15 V

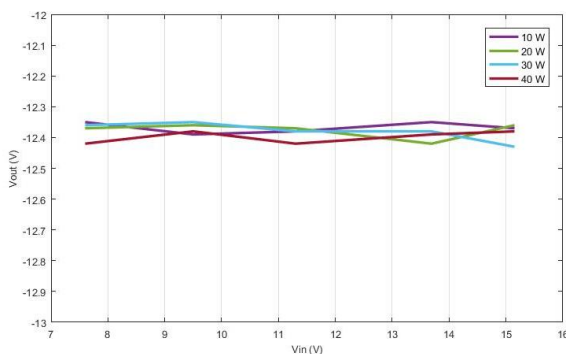
Rise Time	2,249 s
Settled Time	2,22 s
OverShoot	0,00%
Error	0,72%

4.4 Hasil Uji Keseluruhan Sistem

Analisis kinerja keseluruhan sistem dilakukan dengan mengamati respon *Cuk Converter* saat menyuplai beban lampu yang berbeda, yakni 10W, 20W, 30W, dan 40W. Pada Gambar 17. menampilkan grafik pola Respon Pada Sistem keseluruhan kendali *Fuzzy* terbukti berhasil menyesuaikan nilai *duty cycle* terhadap perubahan tegangan input. Saat tegangan input terendah di sekitar 7,3 V, *duty cycle* berada di titik tertinggi yaitu 68% untuk menaikkan tegangan. Sebaliknya, ketika tegangan input naik mencapai 15,1 V, *duty cycle* diturunkan hingga kisaran 47% sampai 50%.



Gambar 17. Grafik Respon Kendali Pada Sistem



Gambar 18. Grafik Stabilitas Tegangan Keluaran Pada Sistem

Pada gambar 18. dapat dilihat nilai tegangan output terbukti stabil pada semua beban lampu. Meskipun tegangan input

berubah-ubah dari 7,2 V sampai 15,1 V, posisi garis untuk beban 10W hingga 40W sejajar di rentang -12,35 V sampai -12,43 V. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem berhasil menjaga tegangan keluaran tetap stabil meskipun beban daya terus bertambah.

4.5 Efisiensi Cuk Converter

Efisiensi *Cuk Converter* saat menyuplai beban ringan 10 Watt terdapat pada Tabel 8. tercatat bernilai 53,68% hingga 67,43%. Penurunan efisiensi ini terjadi karena konverter memiliki rugi-rugi daya tetap. Komponen utamanya seperti MOSFET dan dioda tetap menyedot daya untuk melakukan *switching* meskipun beban yang dipasang sangat kecil. Menyebabkan daya yang terbuang di dalam konverter lebih besar ketimbang daya yang disalurkan ke beban.

Tabel 8. Efisiensi Saat Beban 10W

Vin (V)	Efisiensi (%)
7,60	-67,97
9,50	-73,96
11,30	-71,44
13,69	-65,77
15,15	-65,22
Rata - rata	-68,87

5. KESIMPULAN

- Pada penelitian yang dilakukan Alat *Cuk Converter* yang dirancang mampu menghasilkan tegangan keluaran sesuai target (*setpoint*) sebesar -12,4 V dari sumber tegangan masukan PLTB. Tegangan keluaran ini juga terbukti stabil saat digunakan untuk menyuplai beban lampu dengan variasi daya 10 Watt, 20 Watt, 30 Watt, hingga 40 Watt.
- Sistem kendali *Fuzzy Logic* terbukti mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran dengan cara menyesuaikan nilai *duty cycle* terhadap perubahan tegangan masukan. Berdasarkan data pengujian, saat input bernilai 7,38 V, sistem memberikan *duty cycle* 68%. Ketika input naik menjadi 11,02 V dan 15,18 V, sistem langsung menurunkan *duty cycle* menjadi 56% dan 46%. Cara kerja ini

berhasil menjaga tegangan keluaran tetap stabil di kisaran -12,4 V.

- c. Respon *Cuk Converter* yang dikendalikan oleh Fuzzy Logic ini sudah cukup baik dan cepat. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil (rise time) rata-rata hanya 2,45 detik. Selain itu, lonjakan tegangan awal (overshoot) sangat kecil dengan rata-rata 0,81%, sehingga tergolong aman untuk komponen elektronika daya. Tingkat kesalahannya (*steady-state error*) juga rendah dengan rata-rata 0,74%, yang berarti tegangan keluaran mendekati target dan tidak mengganggu kinerja sistem maupun beban.

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] H. Desrizal dan I. H. Rosma, "Analisis Ketersediaan Sistem Pembangkit Berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Angin (Pltb) Dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," vol. 5, 2018.
- [2] S. Verma, S. K. Singh, dan A. G. Rao, "Overview of control Techniques for DC-DC converters," vol. 2.
- [3] F. Farhan dan B. Sujanarko, "Pengaruh Frekuensi dan Duty Cycle pada Ripple Tegangan Buck Converter," vol. 9, no. 1, 2022.
- [4] M. R. Mahendra, A. A. Kurdianto, dan M. Jauhari, "rancang bangun boost converter untuk charging station kursi roda listrik dengan sumber solar panel," vol. 9, no. 2, 2022.
- [5] S. J. Parmar, M. S. Zala, I. S. Thaker, dan K. M. Solanki, "Design and Development of Stepper Motor Position Control using Arduino Mega 2560," vol. 3, no. 09.
- [6] T. B. G. Azmi, A. P. Susanto, A. N. Zakariya, dan D. O. Radianto, "Analisis Perbandingan Efisiensi Buck-Boost Converter Dengan Cuk Converter Pada Panel Surya," vol. 3, no. 2, 2024.
- [7] N. Soedjarwanto, O. Zebua, F. hamdani. "Desain Kendali Tegangan Keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro Menggunakan Konverter SEPIC dengan Tuning Fuzzy Logic Control". *Electrician* Vol. 19 No. 03, 2025.
- [8] E. Anggita, Denda Dewatama, dan Mila Fauziyah, "Pengimplementasian Tegangan Keluaran Panel Surya Dengan Topologi Zeta Konverter Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 25, no. 1, hlm. 92–102, Jun 2023, doi: 10.24912/tesla.v25i1.23307.
- [9] B. Briantara Putra Wiwaha, I. K. Wiryajati, dan I. N. Wahyu Satiawan, "Peningkatan Kinerja Konverter Buck Boost Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy," *Syntax Idea*, vol. 6, no. 9, hlm. 4027–4043, Sep 2024, doi: 10.46799/syntax-idea.v6i9.4486.
- [10] D. Gumilar, F. Hadary, dan A. Hartoyo, "Rancang Bangun Kontroler Untuk Pengisian Baterai Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Skala Mikro".
- [11] H. Ansyah, A. Triayudi, dan A. Rubhasy, "Decision Support System Using Fuzzy Logic Mamdani Method To Select New Students," vol. 4, no. 1, 2020.
- [12] Taufiq, dan A. H. Mohd Yatim, "Simulation and Implementation of Interleaved Boost DC-DC Converter for Fuel Cell Application," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 1, no. 2, hlm. 168–174, Okt 2011, doi: 10.11591/ijpeds.v1i2.126.
- [13] S. R. Chafle, U. B. Vaidya, dan Z. J. Khan, "Design Of Cuk Converter With Mppt Technique," vol. 1, no. 3.
- [14] F. Farhan dan B. Sujanarko, "Pengaruh Frekuensi dan Duty Cycle pada Ripple Tegangan Buck Converter," vol. 9, no. 1, 2022.
- [15] O. Ozgener, "A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 11–12, hlm. 1326–1337, Jul 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.08.014.