

Penggunaan Algoritma Logika Fuzzy Mamdani dalam Perancangan Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Asy-Syifa Ainina Amalia¹, Happy Aprillia², Andhika Giyantara³

Department of Technology Industrial and Process, Electrical Engineering, Kalimantan Institute of Technology^{1,2,3}

asyisyifa.ainina11@gmail.com¹, happy.aprillia@lecturer.itk.ac.id^{2*}, dhika@lecturer.itk.ac.id³

Article Info

Article history:

Received March 2022

Revised August 2022

Accepted August 2022

Published August 2022

Keyword:

Mamdani
artificial intelligent
partial shading

ABSTRACT

Harnessing the solar power, PT PLN (Company) targets to construct renewable energy power plants at 23% energy mixture. However, the efficiency of solar panel output is still relatively low. Therefore, Maximum Power Point Tracking (MPPT) is used to maximize solar panel power output that will be stored into batteries to optimize the energy use. As the sunlight is varied according to weather condition, an algorithm can be used to control performance of the MPPT to increase its performance. In this study, the algorithm that been used was Fuzzy Logic Mamdani since it has the advantage of producing an accurate decision. The study also used a buck converter that served to lower the voltage generated by solar panels to match battery specification. In this research, the results obtained under normal conditions will be compared using irradiation and temperature data in Samarinda City and partial shading conditions. System design and testing are done using Matlab R2018b Simulink. It is concluded that the MPPT based on Fuzzy Logic provides higher output and more powerful to stabilize the flow of output even in the slightest irradiation value conditions, if compared with the MPPT without artificial intelligence. The proposed design is able to achieve efficiency of 94.50% and 94.88% than conventional design without Fuzzy Logic algorithm in partial shading and Samarinda's case, respectively.

Kata Kunci:

Mamdani
Sugeno
partial shading

ABSTRAK

Pemanfaatan energi baru dan terbarukan yang ada di Indonesia memiliki potensi yang sangat besar. Oleh karena itu, PT PLN (Persero) menargetkan pembangunan pembangkit listrik energi baru dan terbarukan sebesar 23%. Sinar matahari sebagai salah satu jenis energi terbarukan yang dapat diproses menjadi energi listrik dengan memanfaatkan panel surya, namun saat ini efisiensi keluaran panel surya masih relatif rendah. Oleh karena itu, digunakan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk memaksimalkan keluaran daya panel surya yang akan disimpan ke dalam baterai. Pada sebuah MPPT dapat digunakan sebuah algoritma untuk mengontrol kinerja MPPT tersebut agar bekerja lebih maksimal. Pada penelitian ini, algoritma yang digunakan adalah Algoritma Logika Fuzzy dengan membandingkan metode Mamdani dan Sugeno. Logika Fuzzy Mamdani memiliki kelebihan yaitu menghasilkan hasil keputusan yang lebih akurat. Pada Logika Fuzzy Sugeno memiliki kelebihan yaitu menggunakan perhitungan matematika sederhana dalam perancangannya. Selain itu, pada penelitian ini digunakan juga *buck converter* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan yang dihasilkan panel surya agar sesuai dengan spesifikasi baterai. Pada penelitian ini akan dibandingkan hasil yang diperoleh pada saat keadaan normal

menggunakan data iradiasi dan suhu Kota Samarinda dan kondisi *partial shading*. Perancangan dan pengujian sistem dilakukan dengan menggunakan Matlab R2018b *Simulink*. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa hasil simulasi menggunakan metode Mamdani memiliki hasil yang sama dengan metode Sugeno. Selain itu, MPPT berbasis Logika Fuzzy mampu menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi dan lebih mampu menstabilkan arus keluaran walaupun pada kondisi nilai iradiasi yang sangat kecil sekalipun, jika dibandingkan dengan MPPT tanpa kendali *Artificial Intelligence* (AI).

1. PENDAHULUAN

Listrik merupakan salah satu sumber energi utama yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari, baik untuk kebutuhan rumah tangga, instansi pemerintah maupun industri. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2019-2028 menyebutkan bahwa saat ini di Indonesia memiliki target untuk pembangunan pembangkit listrik energi baru dan terbarukan sebesar 23% (RUPTL PLN, 2019). Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik yaitu energi surya (Hamonangan, 2019).

Panel surya memiliki banyak kekurangan dalam aplikasi konvensional terutama dalam hal efisiensi keluaran yang relatif rendah, yang disebabkan oleh perbedaan karakteristik antara panel surya dengan bebannya. Faktor utama yang mempengaruhi jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya yaitu iradiasi matahari dan suhu pengoperasian panel surya. Inilah yang menyebabkan energi menjadi non-linier (Aprian, 2010).

Terdapat permasalahan lain yaitu ketika modul panel surya menerima iradiasi matahari yang bervariasi karena perubahan cuaca atau kondisi lingkungan setempat, akan muncul bayangan parsial (*partial shading*), sehingga panel surya tertutup oleh bayangan. Situasi ini akan mengakibatkan penurunan daya keluaran panel surya (Achmad, 2016). Dari permasalahan tersebut, diperlukan suatu teknologi yang dapat memaksimalkan penggunaan panel surya tersebut untuk mengkonversi energi matahari (Aprian, 2010). Penyesuaian ini biasanya menggunakan konverter yang dikontrol algoritma yang disebut *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) (Suryoatmojo, 2017). Bagian utama dari MPPT adalah rangkaian konverter DC-DC dan algoritma pengontrol (Hamonangan, 2019).

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan control Logika Fuzzy Mamdani sebagai algoritma pengontrol. Logika Fuzzy Mamdani lebih dapat meningkatkan performa MPPT panel surya dengan respon waktu yang cepat daripada metode *Perturb & Observe* (P&O) (Ovalle, dkk, 2012). *Inference system* Mamdani memiliki *fuzzy set* untuk memodelkan *rule fuzzy* (Mamdani & Assilian, 1999). *Metode* Logika Fuzzy diintegrasikan untuk menentukan efisiensi sistem yang lebih tinggi agar dapat diterapkan pada sistem panel surya.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Pemodelan *Buck Converter*

Tahap pertama dalam penelitian ini yaitu mengumpulkan data parameter panel surya dan baterai. Spesifikasi dari panel surya dan baterai sangat mempengaruhi kinerja sistem. Pada penelitian ini, spesifikasi panel surya yang digunakan terlampir pada Tabel 1, sedangkan untuk spesifikasi baterai terlampir pada Tabel 2. Gambaran system secara keseluruhan terdapat pada Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya

Spesifikasi	Nilai dan Satuan
Merk	Suntech
Model	STP060D-12/MEA
Daya maksimum	60 Watt ($\pm 5\%$)
Tegangan rangkaian terbuka	21,8 V

Arus hubung singkat	3,13 A
Tegangan pada daya maksimum	17,4 V
Arus pada daya maksimum	2,93 A
Fuse seri maksimum	10 A
Koefisien temperatur V_{OC}	-0.36099% /°C
Koefisien temperatur I_{SC}	0.102% /°C

Tabel 2. Spesifikasi Baterai

Spesifikasi	Nilai dan Satuan
Merk	Drypower
Model	12SB30C
Jenis	Lead-Acid
Tegangan	12 V
Kapasitas cas	30 Ah
State of charge (SOC)	30%

Tabel 3. Parameter Awal Buck Converter

Spesifikasi	Nilai dan Satuan
Tegangan <i>input</i> maksimum	17,4 V
Tegangan <i>output</i>	12 V
Daya <i>input</i>	50,982 W
Frekuensi <i>switching</i>	10 kHz
Arus riak	0,1%
Tegangan riak	0.00005%

$$D = \frac{V_o}{V_i} = \frac{12}{17,4} = 0,689 = 68,9\%$$

$$I_o = \frac{P}{V_o} = \frac{50,982}{12} = 4,25 \text{ A}$$

$$\Delta i_L = 0,1\% \times I_o = 0,1\% \times 4,25 = 4,25 \text{ mA}$$

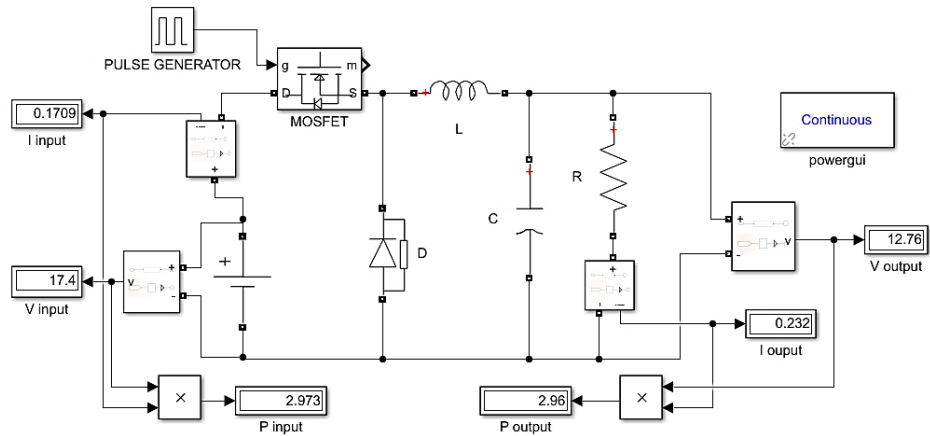
$$\Delta V_o = 0,00005\% \times V_o = 0,00005\% \times 12 = 6 \mu\text{V}$$

$$L = \frac{V_o(1-D)}{\Delta i_L \cdot f_{sw}} = \frac{12(1-0,689)}{4,25\text{m} \times 10\text{k}} = 87,8 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f_{sw}^2} = \frac{1-0,689}{8 \times 87,8\text{m} \times \left(\frac{6\mu}{12} \right) \times (10\text{k})^2} = 8860 \mu\text{F}$$

Tabel 4. Parameter Buck Converter

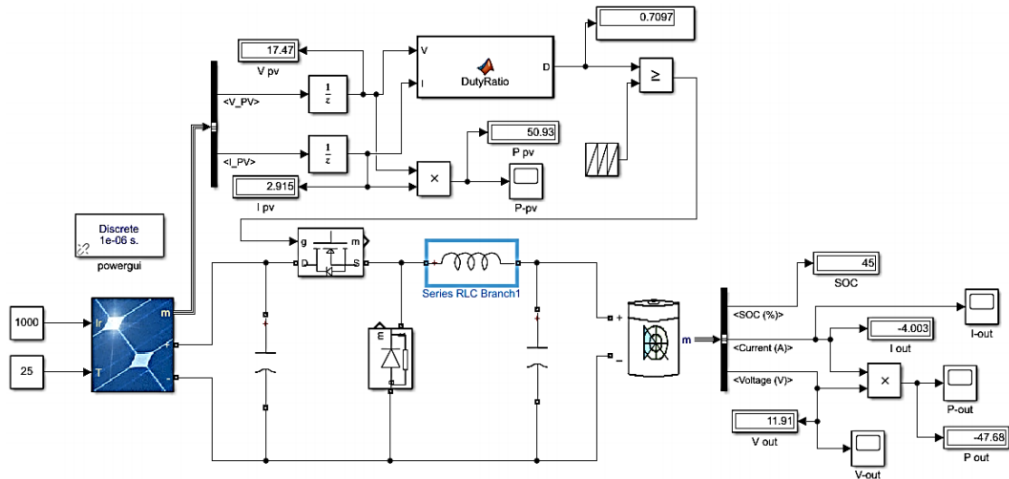
Spesifikasi	Nilai dan Satuan
Duty Cycle	68,9%
Arus rangkaian	4,25 A
Induktor	87,8 mH
Kapasitor	8860 μF
Resistor	55 Ω



Gambar 2 Perancangan sistem MPPT tanpa kendali AI

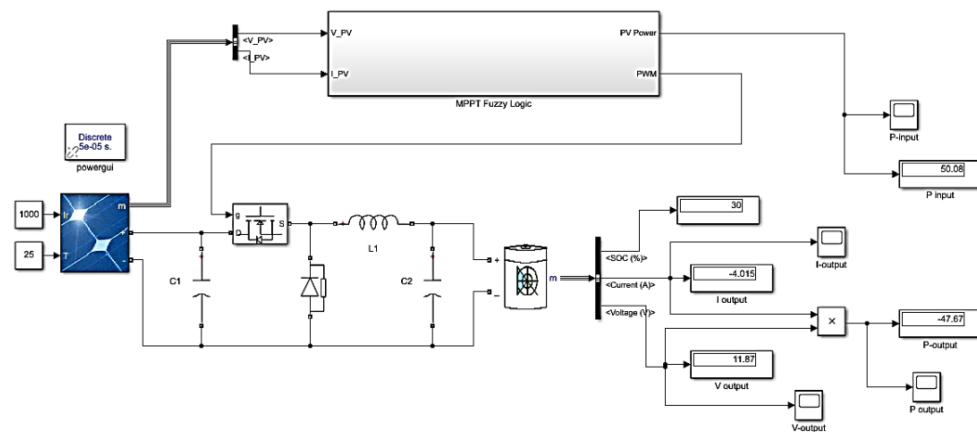
2.2. Perancangan Sistem MPPT

Pada penelitian ini, dilakukan perancangan sistem MPPT tanpa kendali AI menggunakan software Matlab R2018b Simulink yang ditunjukkan pada Gambar 2.

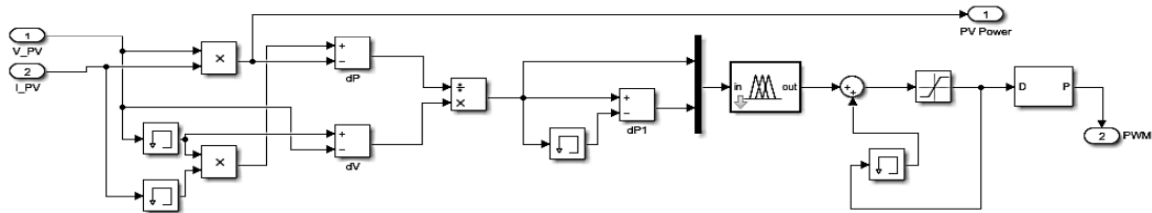


Gambar 2. Perancangan sistem MPPT tanpa kendali AI

Perancangan sistem MPPT dengan Algoritma Logika Fuzzy Mamdani memiliki bentuk rangkaian dan block parameter Fuzzy Logic Controller (FLC) yang ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 7.



Gambar 3. Perancangan sistem MPPT Logika Fuzzy



Gambar 4. Perancangan subsistem MPPT Logika Fuzzy

2.3. Pemodelan Logika Fuzzy

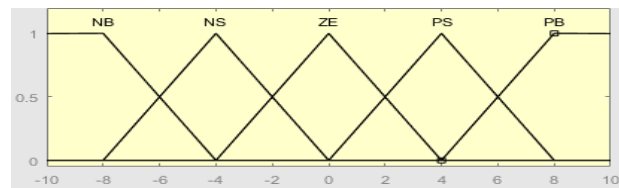
Pemodelan logika fuzzy didesain tanpa harus mengetahui model spesifik sistem melainkan hanya terdiri dari input, fase proses dan output. Inferensi Mamdani dapat digunakan dengan mudah karena dapat digunakan untuk sistem *multiple input single output* dan *multiple input multiple output*. Output crisp dari fuzzy ditentukan melalui defuzzifikasi *center of gravity* dengan karakteristik dari fungsi keanggotaan (*membership function*) (Doudou dkk., 2019). Pada penelitian ini kontrol fuzzy memiliki 2 masukan dan 1 keluaran. 2 masukan terdiri dari nilai *error* (E) dan perubahan *error* (dE) yang dihitung antara selisih perhitungan daya dan selisih pembacaan tegangan sebagai selisih nilai sebelum dan nilai saat ini sesuai dengan persamaan 1 dan 2 (Selman, 2016). Keluaran dari sistem ini adalah *duty cycle*. *Duty cycle* beroperasi melalui PWM yang menghasilkan bentuk gelombang untuk mengontrol saklar konverter DC ke DC. Defuzzifikasi pada metode Mamdani dilakukan untuk mengubah keluaran dari proses kendali fuzzy menjadi suatu rentang nilai himpunan fuzzy. Keluaran dari metode Mamdani direpresentasikan pada Gambar 7.

$$E = \left(\frac{P_{in}(k) - P_{in}(k - 1)}{V_{in}(k) - V_{in}(k - 1)} \right) \tag{1}$$

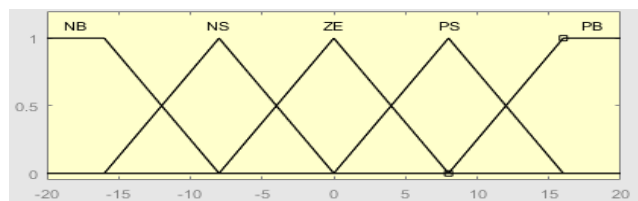
$$dE = E(k) - E(k - 1) \tag{2}$$

Tabel 5. Rule Base Fuzzy (Arulmurugan, 2013)

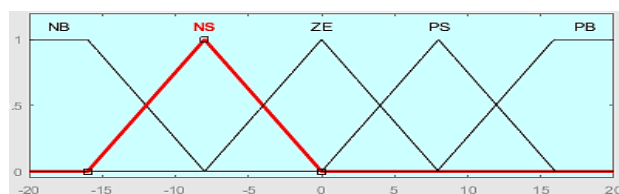
	dE	NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	NB	NS	ZE	PS	PB
	NS	NS	NS	NS	ZE	ZE
	ZE	ZE	ZE	ZE	PS	PS
	PS	ZE	ZE	PS	PS	PS
	PB	ZE	PS	PB	PB	PB



Gambar 5. Fungsi keanggotaan *error* (Fannakh, 2019)



Gambar 6. Fungsi keanggotaan *delta error* (Fannakh, 2019)



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan Keluaran Mamdani

2.4. Pengujian Sistem

Sistem yang telah dirancang kemudian diuji dengan 4 jenis pengujian. Pengujian pertama yaitu analisis pengaruh perubahan iradiasi pada sistem. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan nilai iradiasi matahari yaitu sebesar 200, 400, 600, 800, dan 1000 W/m² dengan suhu konstan 25 °C. Pengujian kedua yaitu analisis pengaruh perubahan suhu pada sistem. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan nilai suhu yaitu sebesar 25 °C, 27 °C, 29 °C, dan 30 °C dengan nilai iradiasi matahari konstan 1000 W/m².

Pada pengujian ketiga, diperlukan parameter masukan dari panel surya berupa data iradiasi matahari dan suhu di Kota Samarinda. Masukan berupa iradiasi dan suhu tersebut kemudian diubah oleh panel surya menjadi tegangan dan daya listrik. Data iradiasi matahari dan suhu ditampilkan pada Tabel 7. Data ini bersumber dari aplikasi android *Clear Sky Calculator* dengan tingkat akurasi sebesar $\pm 3\%$. Selain itu, dilakukan juga pengujian keempat yaitu pada kondisi *partial shading* dengan asumsi panel surya tertutup oleh benda asing sehingga cahaya matahari yang dapat ditangkap hanya sebesar 25%, 50%, dan 75%.

Tabel 7. Data iradiasi matahari dan suhu Kota Samarinda

Waktu	Iradiasi matahari (W/m ²)	Suhu (°C)
7 AM	77	28,0
8 AM	115	29,2
9 AM	543	29,0
10 AM	534	29,6
11 AM	812	29,8
12 AM	861	30,8
1 PM	840	29,8
2 PM	662	31,8
3 PM	551	29,8
4 PM	379	29,8
5 PM	190	27,6

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Buck Converter kondisi Duty Cycle Konstan

Hasil pengujian buck converter dan hasil perhitungan efisiensinya ditampilkan pada Tabel 8. Dari hasil pengujian tersebut dapat dilihat bahwa buck converter dapat bekerja secara optimal walaupun tegangannya diturunkan hingga 12 Volt. Hal ini dibuktikan berdasarkan nilai efisiensi buck converter rata-rata sebesar 99,56%.

Tabel 8. Hasil Pengujian *Buck Converter Duty Cycle* 68,9%

D (%)	V_i (V)	I_i (A)	P_i (W)	V_o (V)	I_o (A)	P_o (W)	Efisiensi (%)
68,9	17	0,17	2,84	12,47	0,23	2,83	99,54%
68,9	16	0,16	2,51	11,73	0,21	2,50	99,56%
68,9	15	0,15	2,21	11,00	0,20	2,20	99,55%
68,9	14	0,14	1,92	10,27	0,19	1,92	99,58%
68,9	13	0,13	1,66	9,532	0,17	1,65	99,58%
68,9	12	0,12	1,41	8,799	0,16	1,41	99,58%

3.2. Analisis Pengaruh Perubahan Iradiasi pada Sistem

Setelah dilakukan pengujian variasi iradiasi pada MPPT tanpa kendali AI pada Tabel 9, diperoleh data implementasi fuzzy Mamdani pada MPPT yang ditunjukkan pada Tabel 10. Hasil simulasi dari kedua sistem menunjukkan bahwa semakin besar nilai iradiasi matahari, maka semakin besar pula nilai arus yang masuk ke dalam baterai. Sementara itu, tegangan baterai terus meningkat dipengaruhi kondisi karakteristik dari baterai karena pada saat mengecras, baterai mengalami kenaikan tegangan. Daya yang dihasilkan mengalami kenaikan yang cukup tinggi karena baik tegangan maupun arus meningkat. Perbedaan utama dari ketiga sistem ini yaitu MPPT tanpa kendali AI membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai kondisi steady state (stabil), sedangkan MPPT Mamdani memerlukan settling time yang lebih lama untuk menstabilkan keluaran sistem. Hal ini disebabkan karena dalam pencarian titik daya maksimum saat menggunakan Logika Fuzzy menggunakan banyak (step) langkah agar menghasilkan output yang lebih akurat. Hal ini menyebabkan MPPT Mamdani memiliki keunggulan karena nilai efisiensi yang lebih besar. Selain itu, MPPT Mamdani mampu menstabilkan daya pada kondisi iradiasi yang rendah, sedangkan MPPT tanpa kendali AI tidak mampu walaupun telah membutuhkan waktu simulasi yang lama.

Tabel 9. Pengujian MPPT tanpa kendali AI Perubahan Iradiasi dengan Suhu Konstan 25 °C

Iradiasi	Daya Panel Surya	Daya Baterai	Tegangan Baterai	Arus Baterai	Efisiensi
200 W/m ²	8,061 W	7,212 W	11,87 V	0,586 A	89,47%
400 W/m ²	20,56 W	18,67 W	11,88 V	1,528 A	90,81%
600 W/m ²	30,99 W	28,55 W	11,89 V	2,419 A	92,12%
800 W/m ²	41,10 W	38,27 W	11,90 V	3,225 A	93,11%
1000	50,94 W	47,56 W	11,92 V	4,005 A	93,36%

Tabel 10. Pengujian MPPT Fuzzy Mamdani Perubahan Iradiasi dengan Suhu Konstan 25 °C

Iradiasi	Daya Panel Surya	Daya Baterai	Tegangan Baterai	Arus Baterai	Efisiensi
200 W/m ²	10,17 W	9,423 W	11,76 V	0,840 A	92,65%
400 W/m ²	20,27 W	19,02 W	11,78 V	1,640 A	93,83%
600 W/m ²	30,10 W	28,78 W	11,82 V	2,535 A	95,61%
800 W/m ²	40,16 W	38,04 W	11,87 V	3,273 A	94,72%
1000 W/m ²	50,12 W	48,23 W	11,92 V	4,055 A	96,22%

3.3. Analisis Pengaruh Perubahan Suhu pada Sistem

Setelah dilakukan pengujian variasi suhu pada MPPT tanpa kendali AI, diperoleh data yang ditunjukkan pada Tabel 11. Kemudian, untuk data MPPT Fuzzy Mamdani ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 11. Pengujian MPPT tanpa kendali AI Perubahan Suhu dengan Iradiasi Konstan 1000 W/m²

Suhu	Daya Panel Surya	Daya Baterai	Tegangan Baterai	Arus Baterai	Efisiensi
25 °C	50,93 W	47,55 W	11,60 V	4,100 A	93,36%
27 °C	50,52 W	47,18 W	11,61 V	4,073 A	93,38%
29 °C	50,10 W	46,92 W	11,61 V	4,039 A	93,65%
30 °C	49,90 W	46,76 W	11,62 V	4,018 A	93,71%

Tabel 12. Pengujian MPPT Fuzzy Mamdani Perubahan Suhu dengan Iradiasi Konstan 1000 W/m²

Suhu	Daya Panel Surya	Daya Baterai	Tegangan Baterai	Arus Baterai	Efisiensi
25 °C	49,73 W	47,40 W	11,82 V	4,067 A	95,31%
27 °C	49,88 W	47,69 W	11,86 V	4,008 A	95,61%

29 °C	49,78 W	47,65 W	11,92 V	3,997 A	95,72%
30 °C	49,68 W	47,60 W	11,96 V	3,973 A	95,81%

Hasil simulasi dari percobaan sistem menunjukkan bahwa semakin besar nilai suhu, maka semakin kecil nilai arus yang masuk ke dalam baterai. Hal ini disebabkan karena adanya koefisien temperatur V_{OC} pada panel surya sebesar $-0.36099\%/^{\circ}\text{C}$. Hal ini menjelaskan bahwa pada saat panel surya sudah mencapai suhu maksimum yaitu 25°C , maka setiap terjadi kenaikan suhu sebesar 1°C maka akan mengurangi arusnya sebesar 0.36099% . Hal ini disebabkan suhu panel surya telah melebihi batas maksimum sehingga panel surya menjadi panas dan tidak dapat bekerja secara maksimal yang akhirnya menyebabkan rugi-rugi (*loses*). Sementara itu, tegangan baterai terus meningkat dipengaruhi kondisi karakteristik dari baterai karena pada saat mengecas, baterai akan terus mengalami kenaikan tegangan. Penurunan nilai arus menyebabkan daya yang dihasilkan juga semakin menurun. Meskipun nilai arus dan daya keluaran menurun, namun selisihnya sangat kecil sehingga dapat dikatakan sistem ini cukup stabil, yang menandakan bahwa perubahan suhu dengan variasi $25\text{-}30^{\circ}\text{C}$ tidak memiliki pengaruh yang besar terhadap sistem. Perbedaan utama dari ketiga sistem ini yaitu MPPT tanpa kendali AI membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai kondisi *steady state* (stabil), sedangkan MPPT Mamdani memerlukan *settling time* yang lebih lama untuk menstabilkan keluaran sistem. Hal ini disebabkan karena dalam pencarian titik daya maksimum saat menggunakan Logika Fuzzy menggunakan banyak (*step*) langkah agar menghasilkan *output* yang lebih akurat. Hal ini menyebabkan MPPT Mamdani memiliki keunggulan karena nilai efisiensi yang lebih besar.

3.4. Analisis Pengaruh Perubahan Iradiasi dan Perubahan Suhu pada Sistem

Setelah dilakukan pengujian variasi iradiasi dan suhu pada MPPT tanpa kendali AI, diperoleh data yang ditunjukkan pada Tabel 13. Kemudian, untuk data MPPT Fuzzy Mamdani ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 13. Pengujian MPPT tanpa kendali AI Data Iradiasi dan Suhu Samarinda

Pukul	Iradiasi (W/m^2)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Daya Panel Surya (W)	Daya Baterai (W)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Efisiensi (%)
07.00	77,29	28,0	3,60	3,00	11,86	0,25	83,33
08.00	115,17	29,2	5,00	4,80	11,87	0,36	96,00
09.00	543,48	29,0	27,61	25,50	11,88	2,15	92,35
10.00	533,67	29,6	27,03	25,05	11,88	2,10	92,67
11.00	811,85	29,8	40,88	38,20	11,89	3,22	93,44
12.00	860,89	30,8	43,09	40,33	11,89	3,40	93,59
13.00	840,30	29,8	42,25	39,47	11,90	3,32	93,42
14.00	661,53	31,8	33,21	30,95	11,90	2,60	93,19
15.00	550,61	29,8	27,92	25,79	11,90	2,17	92,37
16.00	379,32	29,8	19,00	17,00	11,91	1,40	89,00
17.00	189,65	27,6	8,00	7,00	11,91	0,70	87,50

Tabel 14. Pengujian MPPT Fuzzy Mamdani Data Iradiasi dan Suhu Samarinda

Pukul	Iradiasi (W/m^2)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Daya Panel Surya (W)	Daya Baterai (W)	Tegangan Baterai (V)	Arus Baterai (A)	Efisiensi (%)
07.00	77,29	28,0	3,716	3,41	18,87	0,460	91,77
08.00	115,17	29,2	5,60	5,11	18,88	0,509	91,25
09.00	543,48	29,0	27,39	25,85	18,89	2,193	94,37
10.00	533,67	29,6	26,50	25,39	18,89	2,176	95,81
11.00	811,85	29,8	40,36	38,88	18,92	3,284	96,33
12.00	860,89	30,8	42,82	41,19	18,95	3,459	96,19
13.00	840,30	29,8	41,93	40,26	18,97	3,372	96,02

14.00	661,53	31,8	33,03	31,45	18,99	2,664	95,21
15.00	550,61	29,8	27,63	26,58	12,00	2,203	96,20
16.00	379,32	29,8	19,09	18,01	12,00	1,550	94,34
17.00	189,65	27,6	9,529	9,168	12,01	0,720	96,21

Hasil simulasi dari sistem menunjukkan bahwa semakin besar nilai iradiasi matahari, maka semakin besar pula nilai arus yang masuk ke dalam baterai. Hal ini membuktikan bahwa nilai iradiasi sangat berpengaruh terhadap keluaran sistem sedangkan untuk suhunya tidak berpengaruh besar terhadap keluaran sistem. Sementara itu, tegangan baterai terus meningkat dipengaruhi kondisi karakteristik dari baterai karena pada saat mengecap, baterai mengalami kenaikan tegangan. Daya yang dihasilkan mengalami kenaikan yang cukup tinggi karena baik tegangan maupun arus meningkat. Perbedaan utama dari ketiga sistem ini yaitu MPPT tanpa kendali AI membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai kondisi *steady state* (stabil), sedangkan MPPT Mamdani memerlukan *settling time* yang lebih lama untuk menstabilkan keluaran sistem. Hal ini disebabkan karena dalam pencarian titik daya maksimum saat menggunakan Logika Fuzzy menggunakan banyak (*step*) langkah agar menghasilkan *output* yang lebih akurat. Hal ini menyebabkan MPPT Mamdani memiliki keunggulan karena nilai efisiensi yang lebih besar. Selain itu, MPPT Mamdani mampu menstabilkan daya pada kondisi iradiasi yang rendah, sedangkan MPPT tanpa kendali AI tidak mampu walaupun telah membutuhkan waktu simulasi yang lama. Namun, ketika terdapat perubahan iradiasi yang sangat besar dalam waktu singkat, sistem MPPT Fuzzy mengalami lonjakan arus sehingga menyebabkan membutuhkan *settling time* yang lebih lama untuk menstabilkan sistem.

3.5. Analisis Pengaruh Partial Shading pada Sistem

Setelah dilakukan pengujian *partial shading* pada MPPT tanpa kendali AI, diperoleh data yang ditunjukkan pada Tabel 15. Kemudian, untuk data MPPT Fuzzy Mamdani ditunjukkan pada Tabel 16.

Tabel 15. Pengujian MPPT tanpa kendali AI Kondisi *Partial Shading*

Iradiasi	Daya Panel Surya	Daya Baterai	Tegangan Baterai	Arus Baterai	Efisiensi
215,22 W/m ²	8,69 W	7,117 W	11,57 V	0,666 A	81,89%
430,45 W/m ²	21,67 W	19,47 W	11,58 V	1,708 A	89,85%
645,67 W/m ²	32,54 W	30,26 W	11,59 V	2,614 A	92,99%
860,89 W/m ²	43,09 W	40,29 W	11,60 V	3,475 A	93,50%

Tabel 16. Pengujian MPPT Fuzzy Mamdani Kondisi *Partial Shading*

Iradiasi	Daya Panel Surya	Daya Baterai	Tegangan Baterai	Arus Baterai	Efisiensi
215,22 W/m ²	10,48 W	9,258 W	11,76 V	0,9 A	88,34%
430,45 W/m ²	21,40 W	20,67 W	11,79 V	1,7 A	96,59%
645,67 W/m ²	31,97 W	31,06 W	11,83 V	2,9 A	97,15%
860,89 W/m ²	42,72 W	40,98 W	11,88 V	3,4 A	95,92%

Hasil simulasi dari sistem menunjukkan bahwa semakin besar nilai iradiasi matahari, maka semakin besar pula nilai arus yang masuk ke dalam baterai. Sementara itu, tegangan baterai terus meningkat dipengaruhi kondisi karakteristik dari baterai karena pada saat mengecap, baterai mengalami kenaikan tegangan. Daya yang dihasilkan mengalami kenaikan yang cukup tinggi karena baik tegangan maupun arus meningkat. Perbedaan utama dari ketiga sistem ini yaitu MPPT tanpa kendali AI membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk mencapai kondisi *steady state* (stabil), sedangkan MPPT Mamdani memerlukan *settling time* yang lebih lama untuk menstabilkan keluaran sistem. Hal ini disebabkan karena dalam pencarian titik daya maksimum saat menggunakan Logika Fuzzy menggunakan banyak (*step*) langkah agar menghasilkan *output* yang lebih akurat dan mampu mendapat nilai efisiensi yang lebih besar. Selain itu, MPPT Mamdani mampu menstabilkan daya

pada kondisi iradiasi yang rendah, sedangkan MPPT tanpa kendali AI tidak mampu walaupun telah membutuhkan waktu simulasi yang lama.

3.6. Analisis Perbandingan Sistem

Berdasarkan pengujian-pengujian yang telah dilakukan, dilakukan perbandingan terhadap ketiga sistem. Salah satu perbandingan yang paling utama yaitu efisiensi sistem. Nilai efisiensi daya rata-rata dari setiap pengujian dilampirkan pada Tabel 17. Pada pengujian MPPT tanpa kendali AI, dapat diamati bahwa hasil yang diperoleh yaitu memiliki efisiensi yang cukup tinggi, namun sistem ini kurang mampu menstabilkan arus pada saat kondisi iradiasi matahari rendah. Namun sistem ini hanya mampu menstabilkan arus dan daya jika iradiasinya tinggi. Hal ini menyebabkan daya keluaran juga menjadi tidak stabil dengan *ripple* sangat tinggi. Lain halnya ketika pengujian dengan memvariasikan suhu, dapat diamati bahwa sistem mampu menstabilkan arus dan daya dengan sangat baik karena hasil grafik yang hampir konstan dan cenderung mengalami penurunan. Hal ini disebabkan penurunan kinerja panel surya karena suhu masukan melebihi nilai suhu maksimum pada *nameplate* panel surya. Ketika dilakukan pengujian dengan data iradiasi dan suhu Kota Samarinda, yaitu menghasilkan arus dan daya yang tidak stabil dengan *ripple* tinggi ketika iradiasi rendah. Hal ini dapat disimpulkan bahwa iradiasi matahari merupakan hal utama yang mempengaruhi keluaran sistem ini.

Tabel 17. Efisiensi Rata-Rata dari Setiap Pengujian

Jenis Pengujian	MPPT tanpa Kendali AI	MPPT Logika Fuzzy Mamdani	MPPT Logika Fuzzy Sugeno
Variasi Iradasi, Suhu Konstan	91,78%	94,61%	94,61%
Variasi Suhu, Iradiasi Konstan	93,53%	95,61%	95,61%
Data Iradiasi dan Suhu <i>Real</i>	91,53%	94,88%	94,88%
<i>Partial Shading</i> , Suhu Konstan	89,56%	94,50%	94,50%

Pada pengujian MPPT berbasis Logika Fuzzy Mamdani, dapat diamati bahwa hasil yang diperoleh memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan MPPT tanpa kendali AI. Meskipun demikian, sistem ini memiliki kelebihan yaitu lebih mampu menstabilkan arus dan daya walaupun pada kondisi iradiasi yang sangat rendah. Namun, sistem ini memiliki waktu yang lebih lama dalam menstabilkan arus jika dibandingkan dengan MPPT tanpa kendali AI.

Dari pengujian MPPT berbasis Logika Fuzzy Mamdani, dapat diamati bahwa sistem ini memiliki kelemahan yaitu membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama dalam menstabilkan sistem yaitu pada saat terjadi lonjakan iradiasi yang sangat tinggi dalam waktu singkat. Berdasarkan analisis tersebut, sistem ini dinilai kurang cocok untuk kondisi *partial shading*, karena pada kondisi tersebut memungkinkan perubahan iradiasi yang sangat tinggi dalam waktu singkat. Lain halnya, ketika untuk sistem ini digunakan untuk keperluan sehari-hari di dunia nyata yang tidak mengalami lonjakan iradiasi sangat tinggi dalam waktu singkat, sistem ini mampu dengan menstabilkan daya. Meskipun sistem MPPT Logika Fuzzy Mamdani membutuhkan waktu yang lama dalam menstabilkan arus, namun hasil keluaran dayanya lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem MPPT tanpa kendali AI.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian-pengujian yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pada kondisi pengujian *partial shading*, MPPT berbasis Logika Fuzzy memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi yaitu sebesar 94,50% jika dibandingkan dengan MPPT tanpa kendali yang hanya 89,56%.
2. Pada kondisi perubahan iradiasi dan perubahan suhu dengan menggunakan data Kota Samarinda, MPPT berbasis Logika Fuzzy memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi yaitu sebesar 94,88% jika dibandingkan dengan MPPT tanpa kendali yang hanya 91,53%.

REFERENSI

- [1] Achmad, A. (2016) 'Desain MPPT Pada Solar Cell Kondisi Partial Shading Berbasis Perturb and Observe (P & O)', 6.
- [2] Alfanz, R., Sumaedi, R. and Suhendar (2015) 'Analisis Sistem Fotovoltaik Menggunakan Respon Dinamika Induksi pada Lilitan Kawat Tembaga', *Setrum*, 4(1), pp. 6–11.
- [3] Aprian, F. (ITS) (2010) 'Perancangan Stand Alone Pv System Dengan Maximum Power Point Tracker (Mppt) Menggunakan Metode Modified Hill Climbing', *Proceeding Seminar Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI - ITS*, pp. 1–8.
- [4] Arulmurugan (2013) 'Intelligent fuzzy MPPT controller using analysis of DC to DC novel buck converter for photovoltaic energy system applications', doi: 10.1109/ICPRIME.2013.6496477.
- [5] Ovalle, Andres A., Chamorro, H. R., dan Ramos G. (2012). 'Improvements to MPPT for PV generation based on Mamdani and Takagi-Sugeno fuzzy techniques', 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA). Uruguay. pp. 1-6.
- [6] Dalimunthe, E. R. and Kurniawan, F. (2019) 'Pengaruh Penggunaan Perturb & Observe pada MPPT terhadap Daya Keluaran Sel Surya', 1(1), pp. 53–64.
- [7] Doudou N. Luta et al. (2018) 'Comparing fuzzy rule-based MPPT techniques for fuel cell stack applications', *Energy Procedia* (156). Nagoya. pp. 177–182.
- [8] Fannakh (2019) 'Hardware implementation of the fuzzy logic MPPT in an Arduino card using a Simulink support package for PV application', *IET Renewable Power Generation*, 13(3), pp. 510–518. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5667.
- [9] Hamid, R. M. et al. (2016) 'Rancang Bangun Charger Baterai Untuk Kebutuhan', 4(2), pp. 130–136.
- [10] Hamonangan, J. A. (2019) 'Review Perbandingan Teknik Maximum Power Point Tracker (MPPT) untuk Sistem Pengisian Daya menggunakan Sel Surya', *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 16(2), p. 111. doi: 10.30536/j.jtd.2018.v16.a2998.
- [11] Nulhaqim, S. A., Heryadi, R. D., Pancasilawan, R., Ferdiansyah, M. (2015), "Peranan Perguruan Tinggi dalam Meningkatkan Kualitas Pendidikan Indonesia untuk Menghadapi ASEAN Community 2015", *Social Work*.
- [12] Kusumadewi, S., Purnomo, H. (2010). *Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan*. Yogyakarta: Graha Ilmu 33-34.
- [13] Mamdani, E., dan Assilian, S. (1999), 'An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller', *Int. J. Hum. Comput. Stud.* 51. Pp. 135–147.
- [14] PLN (Persero) (2019) 'Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2019-2028', pp. 2019–2028.
- [15] Suryoatmojo, H. et al. (2017) 'Desain MPPT Berbasis Kontrol Logika Fuzzy Untuk Aplikasi Pesawat Terbang Tanpa Awak Bertenaga Surya', 01, pp. 40–48.