ANALISIS PENGARUH *FUZZY LOGIC CONTROLLER* PADA PENELUSURAN TITIK DAYA MAKSIMUM UNTUK SISTEM KONVERSI ENERGI BERBASIS *PHOTOVOLTAIC*

ANALYSIS OF FUZZY LOGIC CONTROLLER ON MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) FOR ENERGY CONVERSION SYSTEM BASED ON PHOTOVOLTAIC

Fachri Devanika[1], Dudi Darmawan[2], Reza Fauzi Iskandar[3]

[1,2,3]Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
[1]fachri.devanika@gmail.com, [2]dudiddw@gmail.com, [3]rezafauzii@gmail.com

Abstrak

Energi surya merupakan salah satu energi alternatif yang potensial di Indonesia. Sistem *photovoltaic* digunakan untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. Namun, efisiensi dari *photovoltaic* ini masih relatif rendah. Efisiensi maksimum dicapai ketika sistem *photovoltaic* bekerja pada *Maximum Power Point* (MPP), dimana MPP ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan, seperti suhu dan radiasi. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan sistem yang dapat membuat sistem *photovoltaic* bekerja pada efisiensi maksimumnya. Pada penelitian ini, sistem MPPT menggunakan rangkaian *buck-boost converter* untuk menggeser titik kerja dari sistem *photovoltaic* dan metode *fuzzy* sebagai algoritma MPPT yang digunakan untuk mencari MPP. Bentuk rancangan *membership function* yang berbeda-beda, seperti segitiga, trapesium, gaussian dan *generalized bell* dibandingkan dan dilihat pengaruhnya terhadap performa atau respon MPPT dalam mencari titik kerja maksimumnya. Perangkat lunak Matlab-Simulink® digunakan untuk melihat pengaruh dari bentuk rancangan *membership function* terhadap performa atau respon dari MPPT dalam mencari titik kerja maksimum. Dari hasil simulasi sistem MPPT yang dirancang telah berhasil mencari titik kerja maksimum dari sistem *photovoltaic*, mampu merespon perubahan kondisi lingkungan dan mencari titik kerja maksimum yang baru. Bentuk rancangan *membership function* mempengaruhi rasio osilasi pada titik kerja maksimum, dimana *membership function generalized bell* memberikan rasio osilasi paling kecil dibandingkan dengan *membership function* lainnya, dengan rasio osilasi sebesar 2.00%.

Kata kunci: sistem *photovoltaic*, MPPT, *fuzzy logic controller*, Matlab-Simulink®.

Abstract

Solar energy is a potential alternate energy source in Indonesia. A photovoltaic system used for convert solar energy to electrical energy. However, the efficiency from photovoltaic is relative low. Maximum efficiency is achived when photovoltaic system works at it is Maximum Power Point (MPP), where MPP is depends on environmental condition, such as temperature and radiation. Maximum Power Point Tracking (MPPT) is a system that works in order to make photovoltaic system works at it is maximum efficiency. This research, MPPT system uses buck-boost converter in order to move operating point of photovoltaic and fuzzy method as the MPPT algorithm uses to search MPP. Different types of membership functions, such as triangular, trapezoidal, gaussian and generalized bell compared and see its effect on performance or response of MPPT in order to find maximum power point. Matlab-Simulink® software used to see the effect of membership function on performance or response of MPPT in order to find maximum power point. From simulation result, MPPT system has successfully search the maximum power point, even environmental condition changed, MPPT can search the new maximum power point. The shape of membership function effect the oscillation ratio at the maximum power point, where generalized bell gives smallest oscillation compared to the other membership functions, with oscillation ratio of 2.00%.

Keywords: *photovoltaic system*, MPPT, *fuzzy logic controller*, Matlab-Simulink®.

1. Pendahuluan

Sistem *photovoltaic* merupakan sumber energi terbarukan yang memanfaatkan energi surya dan mengkonversinya menjadi energi listrik arus searah (DC). Sumber energi terbarukan yang berasal dari sistem *photovoltaic* merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan, hal ini dikarenakan sistem *photovoltaic* merupakan sumber energi yang bersih, tidak terbatas jumlahnya, tidak menimbulkan kebisingan, bebas polusi serta lebih ramah lingkungan [1] [2]. Meskipun demikian, sistem *photovoltaic* juga memiliki beberapa kekurangan seperti memiliki biaya pembuatan yang sangat tinggi dan efisiensi konversi energi dari

sistem *photovoltaic* masih relatif rendah. Selain itu sistem *photovoltaic* memiliki karakteristik tegangan dan arus (V-I) yang tidak linier tergantung pada suhu dan tingkat radiasi matahari, hal ini menyebabkan *Maximum Power Point* (MPP) atau titik dimana sistem *photovoltaic* bekerja pada efisiensi maksimumnya berubah sesuai dengan perubahan suhu dan tingkat radiasi matahari [3]. Agar sistem *photovoltaic* selalu bekerja pada efisiensi maksimumnya maka diperlukan suatu algoritma yang berguna untuk mencari titik kerja maksimum (MPP) dan memaksa sistem *photovoltaic* bekerja pada titik kerja maksimum atau mendekati titik kerja maksimumnya.

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan algoritma yang berfungsi untuk mencari titik kerja maksimum dari suatu sistem *photovoltaic*. Sebuah DC-DC converter dibutuhkan untuk menerapkan algoritma MPPT. Algoritma MPPT ini akan mengendalikan DC-DC converter sehingga titik kerja dari sistem *photovoltaic* akan bergeser menuju titik kerja maksimumnya. Hingga saat ini sudah banyak metode MPPT yang telah dikembangkan dan di implementasikan, seperti *hill-climbing/P&O, incremental conductance, fractional open voltage, fractional short circuit, neural network, fuzzy logic, RCC, current sweep*, dll [4].

Pada penelitian ini digunakan metode *fuzzy logic* untuk mencari *Maximum Power Point* (MPP) dari suatu sistem *photovoltaic*. Metode *fuzzy logic* digunakan pada *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) karena MPPT metode *fuzzy* logic ini memiliki beberapa kelebihan, diantaranya adalah dapat dengan cepat menemukan titik kerja maksimum (MPP) pada suatu sistem *photovoltaic* dan meminimalkan fluktuasi daya keluaran pada titik kerja maksimum [2] [4] [5] [6]. Namun efektivitas dalam mencari titik kerja maksimum (MPP) dari MPPT metode *fuzzy logic* ini sangat bergantung pada pengetahuan dalam merancang fungsi keanggotaan dan memilih aturan dasar yang tepat [4].

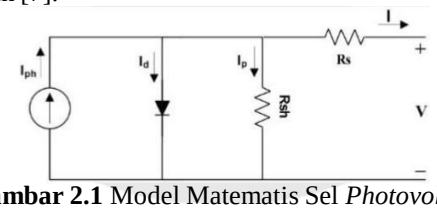
Rumusan masalah yang dibahas pada penelitian ini diantaranya adalah bagaimana merancang algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode *fuzzy logic* pada sistem *photovoltaic* agar bekerja pada titik kerja maksimumnya, bagaimana pengaruh dari rancangan *membership function* pada *fuzzy logic* terhadap performa atau respon *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dalam mencari titik kerja maksimum dari suatu sistem *photovoltaic*. Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah merancang algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode *fuzzy logic* pada sistem *photovoltaic* agar bekerja pada titik kerja maksimumnya. Mengetahui pengaruh dari rancangan *membership function* pada *fuzzy logic* terhadap performa atau respon *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dalam mencari titik kerja maksimum dari suatu sistem *photovoltaic*.

2. Dasar Teori /Material dan Metodologi/perancangan

2.1 Sistem *Photovoltaic*

Sistem *photovoltaic* merupakan suatu sistem yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik arus searah (DC) atau yang lebih dikenal dengan konversi energi *photovoltaic*. Hal ini dikarenakan *photovoltaic* terbuat dari bahan semikonduktor yang apabila terkena sinar matahari akan menghasilkan arus listrik.

Sel *photovoltaic* dapat dimodelkan dengan rangkaian listrik yang terdiri dari arus *photocurrent*, dioda, resistansi parallel dan seri. Rangkaian ekuivalen dari sel *photovoltaic* ditunjukan oleh gambar 2.1. Sumber arus Iph merupakan *photocurrent* atau sumber arus yang dihasilkan dari konversi energi oleh sel *photovoltaic*. Hambatan seri, Rs merupakan hambatan internal terhadap aliran arus, hal ini dikarenakan resistivitas yang dimiliki oleh material. Hambatan shunt, Rsh, merupakan resistansi parallel karena kebocoran arus pada persimpangan atau batasan sel. Biasanya nilai Rs sangat kecil dan nilai Rsh sangat besar, oleh karena itu Rs dan Rsh dapat diabaikan untuk menyederhanakan perhitungan [7].



Gambar 2.1 Model Matematis Sel *Photovoltaic*

Dengan menerapkan hukum Kirchoff, Jumlah arus yang dihasilkan suatu sel *photovoltaic* diperoleh dari persamaan [8]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a}\right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Dimana Iph bergantung pada radiasi dan suhu sesuai dengan persamaan berikut [8]:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} \left(I_{ph,STC} + K_i \Delta T \right) \quad (2.2)$$

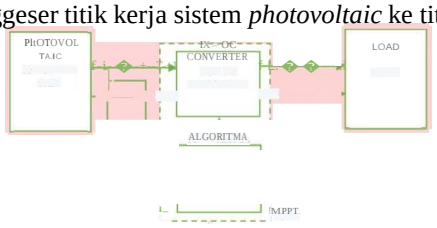
Data parameter yang terdapat pada persamaan matematis sistem *photovoltaic*, diperoleh dari data karakteristik yang diberikan modul *photovoltaic* produksi Solar Power Mart SPM100-M. Tabel 1 menunjukan data karaktersitik dari Solar Power Mart SPM100-M.

Tabel 1 Data karakteristik SPM100-M

	100Vp
	18.75V
	5.35A
	22.53V
	5.70A
	17%
	15.10%
	DC 1,000V (TUV) / DC 600V (UL)
	3%
	10A
	-0.45%/°C
	-0.35%/°C
	0.05%/°C
	47°C

2.2 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan suatu algoritma atau metode yang digunakan untuk mencari titik kerja maksimum dari suatu sistem *photovoltaic* untuk menghasilkan daya maksimum. Algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) ini biasanya diterapkan pada DC-DC *converter* (*buck*, *boost* atau lainnya) yang digunakan untuk menggeser titik kerja sistem *photovoltaic* ke titik kerja maksimumnya [3].



Gambar 2.2 *Photovoltaic* dengan MPPT

Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan metode *fuzzy logic* telah popular dalam beberapa dekade terakhir. Hal ini dikarenakan metode *fuzzy logic* memiliki beberapa keuntungan, seperti *robust*, perfoma yang lebih baik, sesuai untuk sistem *non-linier*, desain yang sederhana dan tidak membutuhkan sebuah model matematika yang akurat dalam perancangannya, tetapi harus memiliki pengetahuan lengkap mengenai kelakuan atau cara kerja dari sisitem *photovoltaic* [3] [4]. Pada metode *fuzzy logic*, penelusuran MPP berdasarkan pengukuran arus dan tegangan keluaran atau daya keluaran sistem *photovoltaic* secara langsung.

Masukan ke MPPT metode *fuzzy logic* biasanya adalah *error* (*e*) dan perubahan *error* (Δ*e*). Dimana untuk menghitung *e* dan Δ*e* digunakan pendekatan sebagai berikut [4]:

$$e(n) = \frac{dP}{dV} = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \tag{2.4}$$

$$\Delta e = e(n) - e(n-1) \tag{2.5}$$

Masukan *error* (*e*) akan menunjukan titik kerja dari sistem *photovoltaic* berada disebelah kiri atau kanan dari titik kerja maksimum (MPP) pada kurva karakteristik daya dan tegangan (P-V), sementara masukan perubahan *error* (Δ*e*) menunjukkan perpindahan dari titik kerja sistem *photovoltaic*. Sedangkan untuk keluaran dari MPPT metode *fuzzy logic* adalah koreksi *duty ratio* (ΔD). Dimana koreksi *duty ratio* ini akan berubah-ubah berdasarkan masukan *error* (*e*) dan perubahan *error* (Δ*e*), dengan tujuan untuk menggeser titik kerja sistem *photovoltaic* menuju titik kerja maksimumnya, dimana *error* (*e*) sama dengan nol [5].

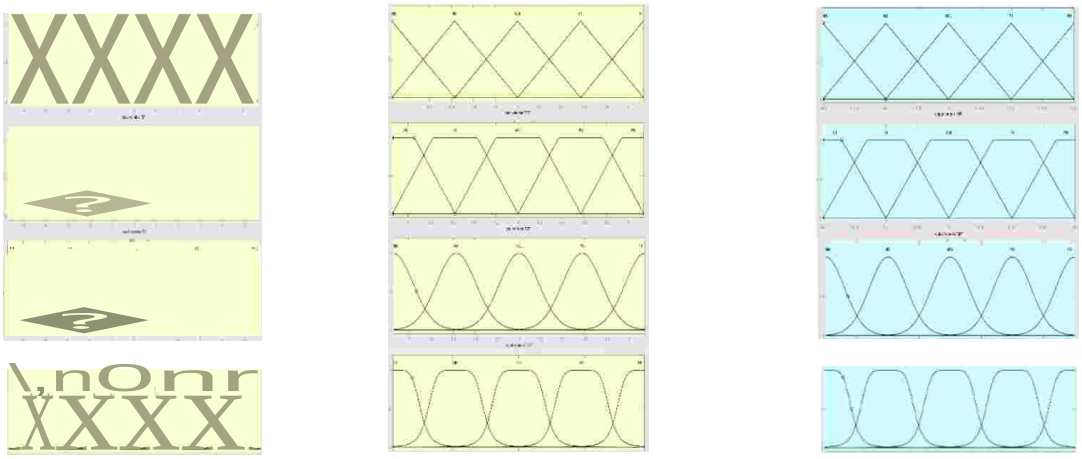
Gambar 2.3 Kurva karakteristik P-V

2.3 *Fuzzy Logic Controller* (FLC)

Fuzzy logic digunakan sebagai algoritma MPPT untuk mencari titik kerja maksimum. Suatu sistem berbasis aturan *fuzzy* terdiri dari tiga komponen utama yang meliputi *fuzzification*, *inference* dan *defuzzification*. Pada penelitian ini digunakan model *fuzzy* mamdani (*min-max*) untuk mencari titik kerja maksimum dari sistem *photovoltaic*.

- *Fuzzification*

  Pada proses *fuzzification* nilai masukan yang bersifat pasti (*crisp input*) dikonversi menjadi masukan *fuzzy* yang berupa nilai linguistik dan dikelompokan pada *membership function*-nya masing-masing [9]. Pada penelitian ini dirancang empat bentuk *membership function* dan akan dilihat pengaruhnya terhadap respon MPPT dalam mencari titik kerja maksimumnya. Gambar 2.4 menunjukan rancangan dari masing-masing *membership function*.



Gambar 2.4 Rancangan *membership function*

- *Inference*

  Proses inferensi adalah proses pengaplikasian masukan *fuzzy* kedalam *rule base* yang telah dibuat untuk menentukan keluaran dari *fuzzy* [9]. Pada proses inferensi digunakan model mamdani (*min-max*) untuk mendapatkan nilai keluaran *fuzzy*. Tabel 2 berikut menunjukan rancangan dari *rule base* yang digunakan MPPT untuk mencari titik kerja maksimum dari sistem *photovoltaic*. Dimana pada *rule* yang berwarna biru adalah *rule* yang menunjukan titik kerja dari sistem *photovoltaic* berada disebelah kiri dari titik kerja maksimum (MPP) pada diagram P-V, sedangkan *rule* yang berwana hijau menunjukan titik kerja sistem *photovoltaic* berada disebelah kanan MPP dan *rule* yang berwarna merah menunjukan titik kerja sistem *photovoltaic* berada sangat dekat MPP.

Tabel 2 *Rule base*

Rule Base		e				
		NB	NS	NOL	PS	PB
Δe	NB	NOL	PS	PS	NOL	NB
	NS	PB	PS	NOL	NOL	NB
	NOL	PB	PS	NOL	NS	NB
	PS	PB	NOL	NOL	NS	NB
	PB	PB	NOL	NS	NS	NOL

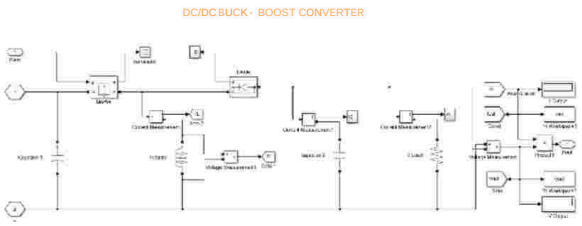
- *Defuzifucation*

  Proses *defuzification* merupakan proses pengubahan *fuzzy output* menjadi *crisp value*. Metode *defuzification* yang umum digunakan pada model *fuzzy* mamdani adalah *center of gravity* (COG). Metode *defuzification* COG menghitung nilai *crisp* dengan persamaan sebagai berikut [9]:

$$y^* = \frac{\sum y\, \mu_R(y)}{\sum \mu_R(y)} \qquad (2.6)$$

2.4 DC-DC *Converter*

DC-DC *converter* merupakan rangkaian elektronika daya yang mengubah suatu nilai tegangan dc ke nilai tegangan yang lainnya. DC-DC *converter* ini merupakan *switching converter* dimana transistor yang berfungsi sebagai saklar elektronik [10]. Pada penelitian ini digunakan DC-DC *converter* jenis *buck-boost converter* yang digunakan untuk menggeser titik kerja maksimum, gambar 2.5 Menunjukan model *buck-boost converter*.



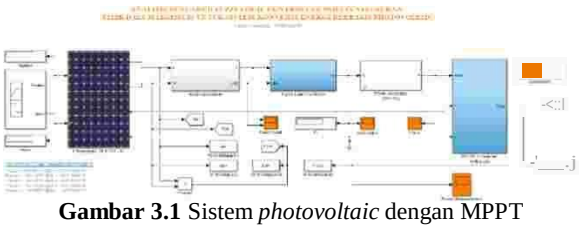
Gambar 2.5 Model *buck-boost converter*

Buck-boost converter merupakan DC-DC *converter* dengan tegangan keluaran dapat lebih besar, lebih kecil dan sama dengan tegangan masukannya, dengan persamaan sebagai berikut [10]:

$$V_o = -V_i * \left(\frac{D}{1-D}\right) \qquad (2.7)$$

Dimana tegangan keluaran dari *buck-boost converter* ini akan bergantung dari nilai keluaran *fuzzy logic controller* yang berfungsi sebagai algoritma MPPT untuk mencari titik kerja maksimum dari sistem *photovoltaic*.

3. Pembahasan

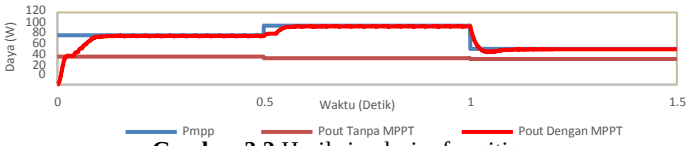


Gambar 3.1 Sistem *photovoltaic* dengan MPPT

Gambar 3.1 menunjukan keseluruhan dari sistem *photovoltaic* dengan MPPT yang telah dibuat di Matlab-Simulink®. Pada simulasi ini nilai radiasi dan suhu dibuat berubah-ubah, baik meningkat maupun menurun. Pada waktu simulasi 0<t<0.49 radiasi dan suhu yang diterima sistem *photovoltaic* adalah 800 W/m^2 dan 25 ^{o}C, ketika waktu simulasi 0.5<t<0.99 radiasi dan suhu meningkat menjadi 1000W/m^2 dan 32°C dan ketika waktu simulasi 1<t<1.5 radiasi dan suhu turun menjadi 600W/m^2 dan 27°C. Pada simulasi ini beban yang terhubung pada keluaran *buck-boost converter* adalah 10 Ohm.

3.1 Simulasi MPPT dengan *Membership Function* Segitiga

Gambar 3.2 menunjukan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan *membership function* segitiga.



Gambar 3.2 Hasil simulasi mf segitiga

Pada grafik yang terdapat pada gambar 3.2 terlihat bahwa perubahan kondisi lingkungan dapat direspon dengan baik oleh MPPT dengan *membership function* segitiga. Tabel 3 menunjukan kualitas dari MPPT *membership function* segitiga.

Tabel 3 Kualitas MPPT *membership function* segitiga

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.109	98.43%	0.315	0.0315	1.8	2.23%
0.5-0.99	0.071	98.70%	0.322	0.0319	2	2.07%
1-1.50	0.102	98.61%	0.204	0.021	1	1.70%
Rata-Rata	0.094	98.58%	0.2803333	0.028133	1.6	2.00%

3.2 Simulasi MPPT dengan *Membership Function* Trapesium

Gambar 3.3 menunjukan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan *membership function* trapesium.

Gambar 3.3 Hasil simulasi mf trapesium

Pada grafik yang terdapat pada gambar 3.3 terlihat bahwa perubahan kondisi lingkungan dapat direspon dengan baik oleh MPPT dengan *membership function* trapesium. Tabel 4 menunjukan kualitas dari MPPT *membership function* trapesium.

Tabel 4 Kualitas MPPT *membership function* trapesium

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-4.99	0.109	98.44%	0.3	0.029	1.67	2.06%
0.5-0.99	0.071	98.71%	0.332	0.0325	2	2.07%
1-1.50	0.102	98.61%	0.3	0.022	1.25	2.13%
Rata-rata	0.094	98.59%	0.3106667	0.0278333	1.64	2.09%

3.3 Simulasi MPPT dengan *Membership Function* Gaussian

Gambar 3.4 menunjukan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan *membership function* gaussian.

Gambar 3.4 Hasil simulasi mf gaussian

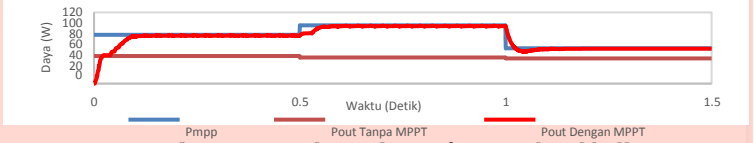
Pada grafik yang terdapat pada gambar 3.4 terlihat bahwa perubahan kondisi lingkungan dapat direspon dengan baik oleh MPPT dengan *membership function* gaussian. Tabel 5 menunjukan kualitas dari MPPT *membership function* gaussian.

Tabel 5 Kualitas MPPT *membership function* gaussian

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.112	98.42%	0.2838	0.028	1.6	1.98%
0.5-0.99	0.073	98.69%	0.245	0.024	1.505	1.55%
1-1.50	0.104	98.62%	0.163	0.0165	0.75	1.28%
Rata-Rata	0.096333333	98.58%	0.2306	0.0228333	1.285	1.60%

3.4 Simulasi MPPT dengan *Membership Function Generalized Bell*

Gambar 3.5 menunjukan hasil dari simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan *membership function generalized bell*.



Gambar 3.5 Hasil simulasi mf *generalized bell*

Pada grafik yang terdapat pada gambar 3.5 terlihat bahwa perubahan kondisi lingkungan dapat direspon dengan baik oleh MPPT dengan *membership function generalized bell*. Tabel 6 menunjukan kualitas dari MPPT *membership function generalized bell*.

Tabel 6 Kualitas MPPT *membership function generalized bell*

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.112	98.39%	0.26	0.026	1.5	1.86%
0.5-0.99	0.073	98.71%	0.265	0.025	1.6	1.65%
1-1.50	0.104	98.63%	0.03	0.001	0.09	0.15%
Rata-Rata	0.096333333	98.57%	0.185	0.0173333	1.063	1.22%

3.5 Simulasi MPPT Dengan Beban 3.2 Ohm

Jika sistem *photovoltaic* terhubung langsung dengan beban yang memiliki resistansi 3.2 ohm dan mendapat radiasi 1000 W/m^2 dan suhu 25 ^{o}C maka sistem *photovoltaic* akan menghasilkan daya sebesar 100 W. Pada simulasi ini akan dilihat kualitas dari MPPT dengan menggunakan *membership function* segitiga, trapesium, gaussian dan *generalized bell* dengan beban yang memiliki resistansi 3.2 Ohm. Berikut merupakan kualitas MPPT untuk setiap *membership function*.

- Simulasi MPPT Dengan Membership Function Segitiga

  Tabel 7 dibawah ini menunjukan kualitas dari MPPT *membership function* segitiga pada beban 3.2 Ohm.

Tabel 7 Kualitas MPPT *membership function* segitiga

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.046	98.90%	0.31	0.095	3.099	3.81%
0.5-0.99	0.041	99.17%	0.36	0.1	3.54	3.64%
1-1.50	0.078	99.16%	0.071	0.051	1.1	1.86%
Rata-Rata	0.055	99.07%	0.247	0.082	2.5796667	3.11%

- Simulasi MPPT Dengan Membership Function Trapesium

  Tabel 8 dibawah ini menunjukan kualitas dari MPPT *membership function* trapesium pada beban 3.2 Ohm.

Tabel 8 Kualitas MPPT *membership function* trapesium

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.046	98.91%	0.3	0.096	3.064	3.77%
0.5-0.99	0.041	99.18%	0.363	0.11	3.65	3.75%
1-1.50	0.078	99.15%	0.075	0.053	1.15	1.95%
Rata-Rata	0.055	99.08%	0.246	0.0863333	2.6213333	3.16%

- Simulasi MPPT Dengan Membership Function Gaussian

  Tabel 9 dibawah ini menunjukan kualitas dari MPPT *membership function* gaussian pada beban 3.2 Ohm.

Tabel 9 Kualitas MPPT *membership function* gaussian

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.048	98.89%	0.29	0.093	2.95	3.63%
0.5-0.99	0.045	99.06%	0.32	0.11	3.2	3.29%
1-1.50	0.078	99.18%	0.07	0.05	1	1.69%
Rata-Rata	0.057	99.04%	0.2266667	0.0843333	2.4666667	2.87%

- Simulasi MPPT Dengan Membership Function Generalized Bell
  Tabel 10 dibawah ini menunjukan kualitas dari MPPT *membership function generalized bell* pada beban 3.2 Ohm.

Tabel 10 Kualitas MPPT *membership function generalized bell*

Waktu Simulasi (detik)	Waktu Penelusuran (detik)	Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Osilasi Vout Pada MPP (V)	Osilasi Iout Pada MPP (A)	Osilasi Pout Pada MPP (W)	Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")
0-0.49	0.046	98.88%	0.278	0.091	2.8	3.45%
0.5-0.99	0.044	99.07%	0.31	0.11	3.1	3.19%
1-1.50	0.078	99.14%	0.07	0.05	1	1.69%
Rata-Rata	0.056	99.03%	0.2193333	0.0836667	2.3666667	2.78%

3.6 Pengaruh Bentuk *Membership Function*

Dari sub-bab 3.1 sampai 3.5 telah diketahui hasil simulasi dari berbagai macam bentuk *membership function*, kualitas dari masing-masing MPPT dengan bentuk *membership function* segitiga, trapesium, gaussian dan *generalized bell* telah diketahui dan dibahas, tabel 11, 12, 13 menunjukan nilai rata-rata kualitas MPPT dari setiap simulasi yang dilakukan**.**

Tabel 11 Nilai rata-rata waktu penelusuran setiap simulasi

Kualitas MPPT	Simulasi	Membership Function			
		Segitiga	Trapesium	Gaussian	Generalized Bell
Waktu Penelusuran (Detik)	Beban 10 Ω	0.094	0.094	0.0963333	0.0963333
	Beban 3.2 Ω	0.055	0.055	0.057	0.056
Rata-Rata		0.0745	0.0745	0.0766	0.0761

Tabel 12 Nilai rata-rata rasio daya setiap simulai

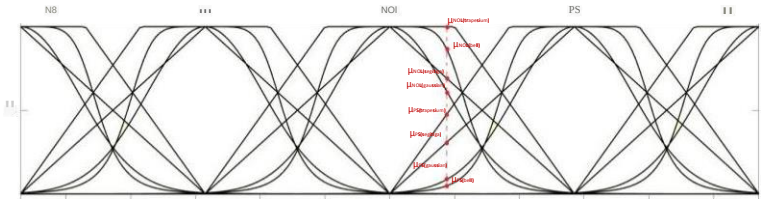
Kualitas MPPT	Simulasi	Membership Function			
		Segitiga	Trapesium	Gaussian	Generalized Bell
Rasio Daya (Pout Simulasi/ Pmpp)	Beban 10 Ω	98.58%	98.59%	98.58%	98.57%
	Beban 3.2 Ω	99.07%	99.08%	99.04%	99.03%
Rata-Rata		98.825%	98.835%	98.81%	98.8%

Tabel 13 Nilai rata-rata rasio osilasi setiap simulasi

Kualitas MPPT	Simulasi	Membership Function			
		Segitiga	Trapesium	Gaussian	Generalized Bell
Rasio Osilasi (Osilasi Pout/Pout Rata")	Beban 10 Ω	2.00%	2.09%	1.60%	1.22%
	Beban 3.2 Ω	3.11%	3.16%	2.87%	2.78%
Rata-Rata		2.555%	2.625%	2.235%	2.00%

Dapat dilihat bahwa perbedaan bentuk dari rancangan *membership function* hanya berpengaruh pada rasio osilasi daya yang terjadi pada titik kerja maksimum. Dimana bentuk *membership function generalized bell* mengahasilkan rasio osilasi yang paling kecil dengan nilai 2.00%, sehingga MPPT dengan bentuk *membership function generalized bell* memiliki kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan MPPT dengan bentuk *membership function* segitiga, trapesium dan gaussian.

Jika dilihat pada setiap bentuk *membership function* yang telah dirancang, maka pemetaan nilai *crisp* kedalam derajat keanggotaan akan berbeda-beda untuk setiap *membership function*. Gambar 3.6 menunjukan perbedaan pemetaan derajat keanggotaan untuk setiap *membership function*. Dimana pada *membership function* trapesium akan memberikan nilai derajat keanggotaan yang paling besar untuk *fuzzy set* NOL dan gaussian memberikan nilai derajat keanggotaan yang paling kecil untuk *fuzzy set* NOL. Sedangkan untuk *fuzzy set* PS *membership function* trapesium akan memberikan nilai derajat keanggotaan yang paling besar dan *membership function generalized bell* akan memberikan nilai derajat keanggotaan yang paling kecil. Hal ini akan mempengaruhi luasnya daerah abu-abu yang dihasilkan pada *membership function* keluaran, Dimana semakin tinggi derajat keanggotaan akan menyebabkan semakin tingginya daerah abu-abu yang dihasilkan pada *membership function* keluaran. Hal ini akan mengakibatkan luas daerah abu-abu pada *membership function* keluaran dan *Center of Gravity* (COG) untuk setiap bentuk *membership function* keluaran berbeda. Semakin luas daerah abu-abu pada *membership function* keluaran maka akan membuat nilai keluaran dari *fuzzy logic controller* yang berupa koreksi *duty ratio* (ΔD) menjadi semakin besar.



Gambar 3.6 Perbandingan derajat keanggotan

Membership function trapesium akan menghasilkan daerah abu-abu yang lebih luas dan *membership function generalized bell* menghasilkan daerah abu-abu yang lebih sempit. Jika dilihat pada *rule* yang berwarna merah pada tabel 2, semakin besar nilai koreksi *duty ratio* (ΔD) maka akan membuat osilasi pada titik kerja maksimum semakin

besar dan menyebabkan semakin besarnya nilai rasio osilasi. Tabel 14 menunjukan nilai koreksi *duty ratio* (ΔD) keluaran *fuzzy* pada *rule* yang berwarna merah pada tabel 2 untuk setiap *membership function*. Pada tabel 14 dapat dilihat pada saat titik kerja sangat dekat dengan titik kerja maksimum *membership function generalized bell* memberikan keluaran yang paling kecil daripada *membership function* lainnya, sehingga menyebabkan osilasi daya pada titik kerja maksimum menjadi lebih kecil dari *membership function* lainnya.

Tabel 14 Keluaran setiap *membership function*

INPUT		OUTPUT (ΔD)			
E	ΔE	MF SEGITIGA	MF TRAPESIUM	MF GAUSSIAN	MF BELL
-0.3	-1.14	0.01	0.01	0.00987	0.00985
-0.3	-0.5	0.0014	0.0016	0.000274	0.000124
0.3	0.1	- 0.00142	- 0.0016	-0.000282	- 0.000124
0.3	0.5	- 0.0014	- 0.0016	- 0.000274	- 0.000124
0.3	1.14	- 0.01	- 0.01	- 0.00987	- 0.00985

4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada Matlab-Simulink® diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang digunakan pada sistem MPPT telah disimulasikan dan terbukti mampu mencari titik kerja maksimum (MPP) dari sistem *photovoltaic* dan menggeser titik kerja sistem *photovoltaic* menuju titik kerja maksimum.
2. *Membership function generalized bell* menghasilkan nilai rasio osilasi yang lebih kecil daripada *membership function* segitiga, trapesium dan gaussian yaitu sebesar 2.00%.
3. Perbedaan bentuk rancangan *membership function* tidak terlalu berpengaruh pada waktu penelusuran dan rasio daya dari MPPT dimana setiap bentuk rancangan *membership function* menghasilkan nilai sebesar:
   - Rasio daya dan waktu penelusuran *membership function* segitiga adalah sebesar 98.825% dan 0.0745 detik
   - Rasio daya dan waktu penelusuran *membership function* trapesium adalah sebesar 98.835% dan 0.0745 detik
   - Rasio daya dan waktu penelusuran *membership function* gaussian adalah sebesar 98.81% dan 0.0766 detik
   - Rasio daya dan waktu penelusuran *membership function generalized bell* adalah sebesar 98.8% dan 0.0761 detik
4. Rasio osilasi yang kecil menyebabkan MPPT metode *fuzzy logic* dengan menggunakan *membership function generalized bell* memiliki kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan *membership function* lainnya.

Daftar Pustaka:

[1] S. R. Nandurkar and M. Rajeev, "Modeling Simulation & Design of Photovoltaic Array with MPPT Control Techniques," *International Journal of Applied Power Engineering*, vol. 3, pp. 41-50, 2014.

[2] H. Bounechba, A. Bouzid, K. Nabti and H. Benalla, "Comparison of perturb & observe and fuzzy logic in maximum power point tracker for PV systems," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 677-684, 2014.

[3] O. C. Noureddine, M. Abdelkader, B. Mohamed-Seghir and B. Linda, "Robust Controller to Extract the Maximum Power of a Photovoltaic System," *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 7, pp. 117-122, 2014.

[4] P. L. Chapman and T. Esram, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 22, pp. 439-449, 2007.

[5] B. Bendib, F. Krim, H. Belmili, M. F. Almi and S. Boulouma, "Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 383-392, 2014.

[6] C. B. Salah and M. Ouali, "Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 43-50, 2011.

[7] S. Kulshrestha and M. Bhaskar, "Solar cell power generation modeling," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 1087-1093, 2015.

[8] H. Bellia, R. Youcef and M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB," *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 3, pp. 53-61, 2014.

[9] Suyanto, Soft Computing, Bandung: Informatika Bandung, 2008.

[10] D. W. Hart, Power Electronics, New York: McGraw-Hill, 2011.