

REVIEW PERBANDINGAN TEKNIK MAXIMUM POWER POINT TRACKER (MPPT) UNTUK SISTEM PENGISIAN DAYA MENGGUNAKAN SEL SURYA (REVIEW COMPARISON MAXIMUM POWER POINT TRACKER (MPPT) TECHNIQUE FOR CHARGING SYSTEMS USING SOLAR CELLS)

Bayu Azmi¹, Jefri Abner H², Prasepvianto E B³, Hendrik Seputra⁴

^{1, 4} Departemen Fisika, Universitas Indonesia

Jl. Margonda Raya, Pondok Cina, Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16424

^{2, 3} Pusat Teknologi Penerbangan (LAPAN)

Jl. Raya LAPAN Rumpin Bogor Jawa Barat

¹e-mail: jefri.abner@lapan.go.id

Diterima: 20 Juli 2018; Direvisi: 15 Januari 2019; Disetujui: 7 Februari 2019

ABSTRACT

The solar energy has been considered as a prospect renewable energy source for electric power generation. Solar Photovoltaic system became a popular object to be developed by researcher. Its low efficiency energy conversion is one of disadvantage of this system. Photovoltaic modules have a single operating point where the voltage and current output results in maximum power output. In most solar photovoltaic power systems, a particular control algorithm, namely maximum power point tracker (MPPT) is used to take full advantage of the solar energy. There are three main MPPT methods, such as conventional method, artificial intelligence based method, and hybrid method. Every method has its advantages and also disadvantages. The conventional method has advantages such as low cost and simple implementation but also has disadvantages like cannot to adapt to environment condition. The artificial intelligence based method has faster power point tracking and environment condition correction as its advantages but also has disadvantages such as complex implementation and more expensive.

Keyword : *Solar energy, photovoltaic, MPPT, conventional, artificial intelligence*

ABSTRAK

Energi surya telah dianggap sebagai prospek sumber energi terbarukan untuk pembangkit tenaga listrik. Sistem fotovoltaik surya menjadi objek yang populer untuk dikembangkan oleh peneliti. Rendahnya efisiensi dalam konversi energi adalah salah satu kelemahan sistem ini. Modul fotovoltaik memiliki titik operasi tunggal di mana output tegangan dan arus menghasilkan output daya maksimum. Dalam kebanyakan sistem fotovoltaik, algoritma kontrol tertentu, yaitu *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) untuk memanfaatkan secara maksimal energi surya tersebut. Ada tiga metode utama pada MPPT yaitu metode konvensional, metode kecerdasan buatan, dan metode hibrid. Setiap metode memiliki kelebihan dan juga kekurangan. Metode konvensional memiliki kelebihan seperti biaya rendah dan implementasi yang sederhana tetapi juga memiliki kerugian seperti tidak dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan. Metode berdasarkan kecerdasan buatan memiliki *Power Point Tracking* yang lebih cepat dan koreksi terhadap kondisi lingkungan sebagai kelebihannya tetapi juga memiliki kerugian seperti penerapan yang lebih rumit dan biaya yang lebih mahal.

Kata kunci : *Energi surya, Photovoltaic, MPPT, Konvensional, kecerdasan buatan*

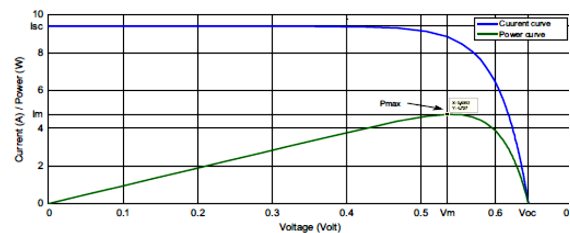
1 PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan kebutuhan industri. Penelitian dan pengembangan di bidang sumber energi terbarukan akan memberikan kontribusi yang cukup besar dalam memenuhi kebutuhan energi dewasa ini (Askarzadeh, 2013; Bayod-Rújula, Haro-Larrodé, & Martínez-Gracia, 2013; Merei, Berger, & Sauer, 2013). Sistem energi terbarukan terdiri atas sistem tenaga surya, tenaga angin, sel bahan bakar, turbin-mikro, dll. Energi terbarukan menjadi lebih populer dikarenakan ketersediaannya, keandalannya, yang yang paling penting ramah lingkungan.

Energi surya merupakan salah satu energi yang ketersediaannya melimpah khususnya di daerah tropis. Energi surya memiliki beberapa keunggulan seperti bebas polusi, umur panjang, perawatan yang mudah, dan tidak berbahaya bagi lingkungan (Abusorrah et al., 2013; Jung & Ahmed, 2012; Kaliamoorthy, Rajasekaran, & Gerald Christopher Raj, 2014). Dengan penurunan harga modul panel surya dan meningkatnya kekhawatiran akan emisi gas rumah kaca, tenaga surya menjadi sumber daya yang sangat penting pada skenario energi global (Ahmed & Salam, 2014). Secara teknologi, system panel surya relatif lebih mudah untuk di pasang, sangat aman, hampir tanpa perawatan, dan yang lebih penting, ramah lingkungan (Ahmed & Salam, 2014). Pada sistem panel surya, selain mengkonversi energi surya ke energi listrik, energi surya juga mengakibatkan kenaikan suhu pada sel surya dan ini akan mengurangi efisiensi sel tersebut (Baljit, Chan, & Sopian, 2016). Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengatasi faktor-faktor yang dapat mengurangi efisiensi sel tersebut (Moradi, Ali Ebadian, & Lin, 2013). Oleh karena itu, perlu dilakukan

pencarian titik daya maksimum dari sistem panel surya.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sebuah sistem panel surya memiliki karakteristik I-V (arus-tegangan) yang tidak linier dan karakteristik P-V (daya-tegangan) menunjukkan bahwa terdapat hanya satu titik (P_{max}) dimana sistem menghasilkan daya maksimum (Verma, Nema, Shandilya, & Dash, 2016). Dikarenakan MPP (*maximum power point*) selalu berubah bergantung pada tingkat iradiasi matahari, metode MPPT (*maximum power point tracker*) digunakan untuk mencari MPP dari sistem tersebut. Metode-metode MPPT dapat dikategorikan dalam banyak fitur seperti efisiensi surya, respon dinamik, kecepatan konvergen, kebutuhan sensor, biaya, kompleksitas, dll.



Gambar 1-1 : Karakteristik I-V dan P-V dari sel surya.

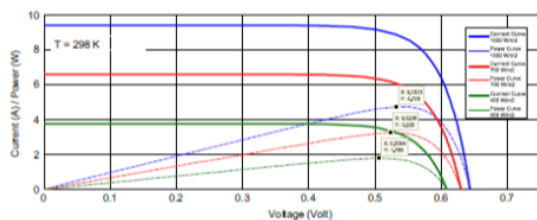
2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Permasalahan yang dihadapi dari penggunaan system panel surya adalah pengisian daya dan efisiensi yang sangat rendah, pengaruh kondisi dilingkungan sekitar, dan selain itu modul panel surya memiliki karakteristik P-V dan V-I yang tidak linear (Verma et al., 2016). Secara matematis untuk mengetahui karakteristik solar sel dapat menggunakan persamaan berikut (Li, Wen, Jiang, Hu, & Zhao, 2016).

$$I = I_{ph} - I_s \underbrace{\left\{ e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AKT}} - 1 \right\}}_{I_d} - \underbrace{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}}_{I_p} \quad (1)$$

Dimana I_{ph} adalah arus panel surya dalam satu solar sel, sedangkan I_s adalah arus balik saturasi dari diode, q muatan electron 1.602×10^{-19} C, A adalah faktor dioda ideal, K adalah konstanta Boltzmann 1.38×10^{-23} J/K, T (Kelvin) adalah temperatur dari p-n junction, V_{pv} dan I_{pv} adalah tegangan dan arus keluaran dari panel surya, R_p sama dengan hambatan pada panel surya, R_s sama dengan hambatan geser..

Pada gambar kurva dibawah menunjukkan bahwa karakteristik P-V dan I-V mempunyai kurva yang tidak linear, hal ini bergantung pada temperatur dan tingkat iradiasi matahari, tiap-tiap titik dari kurva tersebut mewaliki *maximum power point* (MPP) (Paz & Ordonez, 2014; Zakzouk, Elsharty, Abdelsalam, Helal, & Williams, 2016).



Gambar 2-1 : Karakteristik P-V dan I-V akibat pengaruh dari iradiasi matahari temperature.

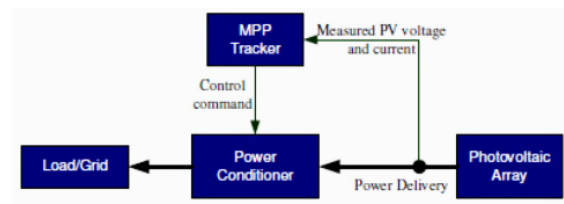
Selain karakteristik P-V dan I-V yang tidak linier, efisiensi system panel surya dipengaruhi oleh tiga faktor (Abu Eldahab, Saad, & Zekry, 2014; Harrag & Messalti, 2015; Piegari & Rizzo, 2010), yaitu:

- Efisiensi dari panel surya (9 – 17 %)
- Efisiensi dari inverter (95 – 98 %)
- Efisiensi dari algoritma pelacak titik daya maksimum (MPPT) (< 98%).

Oleh karena itu algoritma dan teknik MPPT diperlukan untuk dapat

mempertahankan titik kerja pada panel surya agar berada pada MPP.

Pengekstrasian daya maksimum pada sebuah system panel surya membutuhkan operasi pelacak tegangan atau arus secara terus menerus pada saat daya maksimum dihasilkan. Proses ini dilakukan dengan menggunakan daya converter elektronik melalui algoritma MPPT (Mahmoud & El-Saadany, 2016). Tipikal dari operasi MPPT pada sistem panel surya ditunjukkan dalam gambar diagram blok di bawah ini. Dimana *controller senses* dan *array* menilai daya output dari sistem panel surya dan penyesuaian daya *interface* dipelukan untuk mendapatkan kondisi operasioanal yang optimal. Daya kondisioner dapat berupa converter DC/DC atau inverter DC/AC (Xiao, Elnosh, Khadkikar, & Zeineldin, 2011).



Gambar 2-2 : Blok diagram dari topology MPPT pada system panel surya.

Dari berbagai literatur, teknik MPPT dibagi menjadi dua kelompok berdasarkan implementasinya, yaitu: *heuristic technique* dan *model based technique*. Teknik heuristic biasanya memiliki ide-ide dan implementasi yang sederhana, tetapi memerlukan beberapa iterasi sebelum menemukan MPP. Sedangkan teknik model basik adalah teknik mengeksploitasai baik generator, *converter*, atau model-model beban dan memiliki kecepatan pelacakan yang sangat cepat dengan penambahan kompleksitas biaya dan sensor (*Combining Model-Based and Heuristic Techniques*) (Mahmoud, Abdelwahed, & El-Saadany, 2016; Xiao et al., 2011) .

Beberapa teknik dari heuristic diantaranya adalah *perturb and observe (P&O) method*, *hill climbing technique*, *fuzzy control*, *power-voltage differentiation*, *online method*, dan *incremental conductance method* (Bidram, Davoudi, & Balog, 2012; Rahmann, Vittal, Ascui, & Haas, 2016; Xiao et al., 2011). Proses operasi dalam metode ini terdiri dari tiga langkah; 1). Mengganggu system panel surya, 2). Mengukur respon terhadap gangguan dan 3). Membuat koreksi umpan balik yang sesuai. Kelompok dalam teknik ini tidak memerlukan data parametrik dari generator PV, yang memiliki kompleksitas komputasi rendah tetapi menuntut sensor untuk mengukur tegangan dan arus dari generator PV. Kelemahan utama dari teknik ini adalah terkait dengan jumlah iterasi yang diperlukan untuk menemukan MPP (Hartmann, Vitorino, Correa, & Lima, 2013).

Model based MPPT, dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dari teknik *heuristic* dan meningkatkan dinamika pelacakan MPPT. *Model based* MPPT membutuhkan pengetahuan tentang system panel surya serta pengukuran iradiasi dan temperatur untuk menentukan MPP analitis. Secara keseluruhan, *model based* MPPT memberikan respon cepat terhadap perubahan radiasi matahari dibandingkan dengan teknik *heuristic*, selain itu tidak memungkinkan terjadinya lompatan tegangan dari system panel surya secara cepat atau besar (Fathabadi, 2016).

Selain pembagian MPPT menjadi dua kelompok menurut teknik implementasinya, MPPT juga dibagi kedalam tiga kelompok dalam metode aplikasinya, yaitu metode *online* atau *offline* dan metode *hybrid* (Ma et al., 2013). Metode *offline* tidak mengukur daya yang diekstrak oleh system panel

surya dan metode ini didasarkan atas karakteristik dari sistem panel surya dan iradiasi matahari, seperti hubungan arus pendek (Isc) dan tegangan rangkaian terbuka (Voc). Nilai-nilai ini digunakan untuk menghasilkan sinyal kontrol yang diperlukan untuk mengontrol (MPP) pada sistem panel surya. Namun, algoritma ini tidak dapat mendeteksi MPP secara akurat, terutama saat variasi perubahan cepat dari atmosfer. Yang termasuk ke dalam metode *online* adalah sebagai berikut *Perturb and Observe (P&O) method*, *Incremental Conductance method (IC)*, dan *Hill Climbing (HC)*. Sedangkan yang termasuk kedalam metode *hybrid* adalah *genetic algorithm neural network (GA-ANN)*, *optimization of a fuzzy logic controller* menggunakan *swarm optimization (PSO-FLC)*, dan *genetic algorithm-fuzzy logic controller (GA-FLC)* (Harrag & Messalti, 2015).

3 Metode MPPT

3.1 Metode MPPT Konvensional

Metode konvensional menggunakan data pengukuran sensor yang dipasang pada panel surya seperti: tegangan, arus, suhu dan radiasi matahari untuk mencapai titik maksimum. Metode konvensional lebih mudah diterapkan daripada metode lainnya (Bendib, Belmili, & Krim, 2015).

3.1.1 Constant voltage controller (CVC)

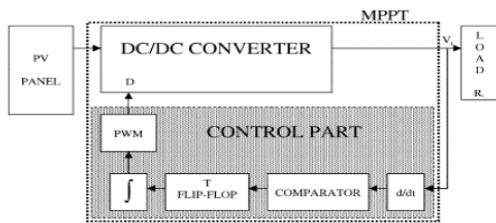
Metode CVC merupakan metode yang menjaga tegangan output dari panel surya agar bernilai tetap. Besarnya tegangan ditentukan dengan memastikan maksimum transfer daya pada beban yang terhubung dengan panel surya. Dalam metode ini hanya menggunakan sebuah sensor tegangan. Kelemahan dari metode CVC yaitu jika ada perubahan suhu, tegangan operasi panel surya keluar dari titik

maksimumnya (Kumar, Jain, & Palwalia, 2015; Kwan & Wu, 2016).

Metode CVC dapat ditambahkan suatu proportional-integral (PI) kontroler di dalamnya yang ditunjukkan pada persamaan berikut ini :

$$D = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3-1)$$

Blok diagram metode CVC ditunjukkan pada Gambar 3-1. Kp dan Ki merupakan nilai gain yang dapat diatur sesuai output yang diinginkan dari panel surya. Fungsi dari PI kontroler adalah untuk meminimalisir nilai error akibat terjadinya penambahan kesalahan dari sistem secara terus menerus. Sehingga didapatkan output yang lebih stabil terhadap waktu (Jusoh, Sutikno, Guan, & Mekhilef, 2014).



Gambar 3-1 : Blok diagram Metode CVC

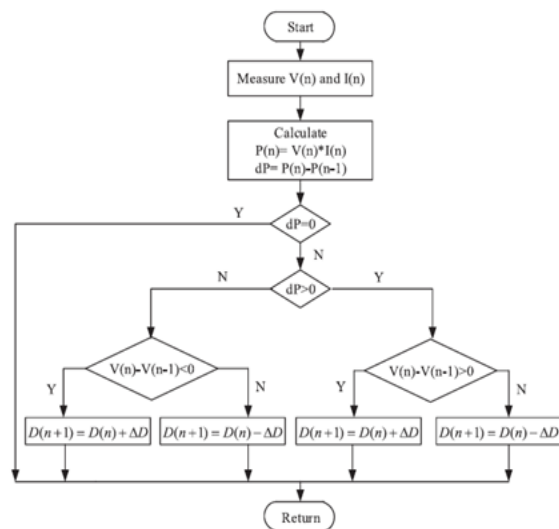
3.1.2 Perturb & Observe (P&O)

Metode P&O merupakan metode MPPT yang umum digunakan. Dalam metode ini, gangguan diterapkan pada tegangan referensi atau sinyal arus dari sistem panel surya (Kumar et al., 2015).

Dalam metode ini, tegangan dari panel surya dianggap sebagai sinyal referensi. Target dari metode ini adalah memaksa tegangan referensi dari panel surya sebagai VMPP. Hal ini dilakukan dengan menerapkan gangguan kecil dan konstan untuk tegangan panel surya. Setelah setiap gangguan variasi dalam output daya (dP) diukur. Sebuah dP positif menunjukkan bahwa daya output akan mendekati MPP. Oleh karena itu, gangguan dari tanda positif diterapkan pada tegangan panel surya di tahap

berikutnya. Di sisi lain, jika dP negatif diberikan tanda gangguan negatif. Langkah-langkah ini berulang kali dilakukan hingga MPP sistem tercapai di mana dP sama dengan nol.

P&O MPPT memiliki dua kelemahan. Pertama, sulitnya menentukan nilai gangguan yang ideal. Jika gangguan besar, kemungkinan algoritma untuk beresilasi disekitar MPP menjadi tinggi dan jika gangguan kecil, kecepatan konvergensi algoritma menjadi sangat rendah (Kwan & Wu, 2016). Kelemahan ini dapat diatasi dengan menggunakan ukuran gangguan variabel, yang menurun sebagai algoritma menyatu dengan MPP. Perubahan kondisi lingkungan juga mempengaruhi kinerja sistem dalam mencapai MPP.



Gambar 3-2 : Flowchart Metode P&O

3.1.3 Incremental Conductance (IC) method

Metode MPPT ini menargetkan kemiringan karakteristik I-V panel surya untuk melacak MPP dari sistem. Metode MPPT ini didasarkan pada kemiringan kurva daya dari sistem PV di MPP adalah nol, positif bila daya output kurang dari MPP dan negatif ketika daya output lebih besar dari MPP (Zakzouk et al., 2016).

Daya output maksimum dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$PMPP = VMPP IMPP \tag{3-2}$$

Hal ini dapat dievaluasi dengan membedakan daya *output* dari sistem panel surya terhadap tegangan dan menyamakannya dengan nol, seperti yang diungkapkan dalam persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} &= 0 \\ \frac{dI}{dV} \cong \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{-I_{MPP}}{V_{MPP}} \end{aligned} \tag{3-3}$$

Oleh karena itu, dengan mengevaluasi *derivative*, dapat diuji apakah sistem PV beroperasi pada MPP atau tidak. Tiga kondisi *derivative* ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP}{dV} = 0 \\ \frac{dP}{dV} > 0 \\ \frac{dP}{dV} < 0 \end{aligned} \right. \rightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ at MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ left of MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ right of MPP} \end{aligned} \right. \tag{3-4}$$

Dalam metode ini kecepatan pelacakan MPP dapat ditingkatkan dengan menyesuaikan kenaikan atau penurunan ukuran VSTEP tetapi menyebabkan sistem berosilasi disekitar MPP. Keuntungan dari metode ini adalah dapat berfungsi sebagai solusi yang efektif pada perubahan kondisi lingkungan yang cepat berubah-ubah. Kelemahan dari metode ini yaitu sistemnya yang lebih kompleks dari metode sebelumnya (Zakzouk et al., 2016).

3.2 Metode MPPT Berdasarkan Kecerdasan Buatan

Metode ini terbagi menjadi 3 yaitu: (*Fuzzy Logic Control (FLC) method; Artificial Neural Network (ANN) method; Incremental Conductance (IC) method.*

3.2.1 FUZZY LOGIC CONTROL (FLC) METHOD

Metode *Artificial controlling* sudah banyak digunakan pada aplikasi MPPT. Saat ini metode *fuzzy logic control* merupakan metode yang paling banyak digunakan.

Pada sistem MPPT untuk sel surya input dari *fuzzy controller* adalah *error*, E dan perubahan dari error, ΔE. Tetapi pemilihan error sepenuhnya bergantung pada pengetahuan pembuat sistem pada jenis aplikasi yang dikerjakan untuk sistem PV sel surya. Kebanyakan akan memilih slope dari kurva P-V, dP/dV sebagai persamaan *error* karena nilai nol didapat dari MPP (Jusoh et al., 2014).

$$E(k) = [P(k) - P(k-1)] / [V(k) - V(k-1)] \tag{3-5}$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \tag{3-6}$$

Tabel 3-1: TABEL ATURAN DASAR

ΔE \ E	ΔE				
	NB	NS	ZE	PS	PB
E					
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tabel 3-1 menunjukkan aturan dasar dari *boost converter*, dimana *output* nya adalah perubahan dari tegangan referensi. Variabel input seperti tegangan dan arus di beri label (NB: *Negative Big*, NS: *Negative Small*, ZO: *Zero*, PS: *Positive Small*, PB: *Positive Big*). Metode ini diambil dari konsep *hill-climbing*.

Keuntungan dari model FLC yaitu tidak memerlukan persamaan matematika dalam perancangan sistem, mampu bekerja dengan input yang tak terbatas, kemampuan dalam

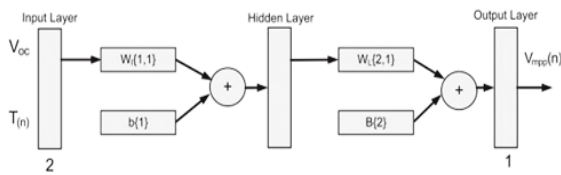
penanganan sistem yang nonlinear, proses cepat dan akurat.

Kelemahannya yaitu penentuan input dan output berdasarkan pengalaman dari pengamatan yang telah dilakukan sebelumnya.

3.2.2 Artificial Neural Network Method (ANN)

Metode ANN di terinspirasi dari sistem saraf pusat (otak) dan model komputasi ini mampu membuat mesin untuk belajar (*machine learning*) dan digambarkan sebagai neuron yang saling berhubungan dan membentuk jaringan yang menyerupai jaringan saraf biologis (Verma et al., 2016).

Blok diagram dari sistem ANN digambarkan pada Gambar 3-2.



Gambar 3-2 : Feed forward neural network approximator.

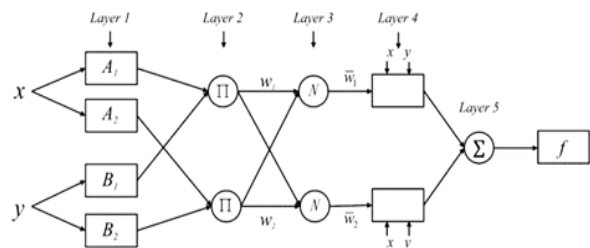
Pada gambar 3-1 terdapat 2 input yaitu tegangan referensi Voc(n) dan parameter waktu, (T(n)). Pada proses pembelajaran neuron w1 adalah *weights* dan b adalah *bias*.

Keuntungan dari metode ANN yaitu dapat menentukan MPP yang akurat tanpa membutuhkan informasi dari model parameter. Kerugiannya metode ANN memerlukan training yang lama agar menjadi sistem yang handal.

3.2.3 Adaptive Neuro Fuzzy Interference (ANFIS) Method

ANFIS dikenal sebagai metode pendekatan *hybrid neuro-fuzzy* untuk pemodelan sistem nonlinear kompleks yang menggabungkan *adaptive learning* dari ANN dengan *reasoning ability* dari

fuzzy interference system (FIS) (Ahmadi-Nedushan, 2012; Zhou, Wang, & Zhu, 2016). Karena kemampuan ANFIS untuk mewakili berbagai sistem dengan tingkat akurasi yang tinggi sistem ini juga sering disebut sebagai *universal approximator*. Tetapi sistem ini memiliki kekurangan yaitu kurang adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Arsitektur dari ANFIS terdiri dari 5 layer yang ditunjukkan oleh Gambar 3-2.



Gambar 3-2 : Skematik dari arsitektur ANFIS [15].

Layer 1 adalah *Fuzzy Layer*. Fungsi *node* di tunjukkan dengan persamaan (3-7).

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \tag{3-7}$$

Layer 2 adalah *Rule Layer*. Fungsi *node* ditunjukkan dengan persamaan (3-8).

$$O_i^2 = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \tag{3-8}$$

Layer 3 adalah *Normalization Layer*. Fungsi *node* ditunjukkan dengan persamaan (3-9).

$$\bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2) \quad i = 1, 2 \tag{3-9}$$

Layer 4 adalah *Defuzzification Layer*. Fungsi *node* ditunjukkan dengan persamaan (3-10).

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i \quad i = 1, 2 \quad (3-10)$$

Layer 5 adalah *single node*. Layer ini berfungsi sebagai penjumlahan dari semua signal masuk yang di tunjukkan dengan persamaan (3-11).

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (3-11)$$

Keuntungan dari ANFIS adalah memiliki akurasi yang bagus untuk mencapai MPP dan juga respon yang cepat terhadap perubahan lingkungan. Kerugian dari metode ini, sistemnya yang sangat kompleks dan juga memerlukan fitur controller yang berkemampuan tinggi.

4 PERBANDINGAN METODE MPPT

Pada metode konvensional, metode IC merupakan metode yang paling bagus

dari segi cepatnya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai MPP dan juga respon terhadap lingkungan.

Sedangkan metode berbasis *artificial intelligent*, metode ANFIS merupakan metode yang memiliki akurasi paling baik untuk mencapai MPP dan respon dengan cepat terhadap perubahan tegangan, tetapi membutuhkan *resource* yang tinggi untuk menjalankan sistem yang sangat kompleks.

Dari berbagai metode MPPT, metode konvensional memiliki kelebihan kemudahan dalam implementasinya, tetapi tidak bisa beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Sebaliknya metode berbasis *artificial intelligent* mempunyai sistem yang lebih kompleks tetapi bisa beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan. Berikut adalah perbandingan dari jenis metode konvensional dan juga metode AI.

Tabel 4-1: PERBANDINGAN DARI BERBAGAI METODE MPPT

No	Metode	Kategori	Metode Implementasi	Sensor	Perubahan Energi	Analog/Digital	Kecepatan Tracking	Adaptive
1	Constant voltage controlle (CVC)	Konvensional	Simpel	Tegangan	DC-DC	A,D	Low	No
2	Perturb & Observe (P&O)	Konvensional	Kompleks	Tegangan, Arus	DC-DC	D	Medium	No
3	Incremental Conductance (IC)	Konvensional	Kompleks	Tegangan, Arus	DC-DC	D	High	Yes
4	Fuzzy logic controller (FLC)	AI	Medium	Tegangan, Arus	DC-DC	D	Very High	Yes
5	Artificial neural network (ANN)	AI	Medium	Irradiasi, Temperatur	DC-DC	D	Very High	Yes
6	Adaptive Neuro Fuzzy Interference (ANFIS)	AI	Kompleks	Irradiasi, Temperatur	DC-DC	D	Very High	Yes

5 KESIMPULAN

Permasalahan dari system panel surya yang mempunyai karakteristik P-V dan I-V yang tidak linier dan efisiensi yang sangat rendah akibat pengaruh perubahan iradiasi matahari dan temperature lingkungan, sehingga diperlukan sebuah pelacak tegangan dan arus agar pengekstraksian daya yang dihasilkan tetap berada pada titik maksimum, yaitu *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

Metode MPPT dibagi menjadi dua, yaitu metode konvensional dan metode berbasis *artificial intelligent* (AI). Metode konvensional terdiri dari; *CVC method*, *P&O method*, *IC method*.

Dari beberapa metode konvensional tersebut metode IC atau *Incremental Conductance method* memiliki kelebihan, dalam hal kecepatan untuk mencapai MPP, dan juga dapat menyesuaikan perubahan lingkungan, tetapi memiliki implementasi yang lebih komplek daripada metode konvensional lainnya. Sedangkan metode berbasis *artificial intelligent* (AI) diantaranya adalah *FLC method*, *ANN method*, *ANFIS method*. Metode ANFIS adalah metode AI yang memiliki akurasi yang paling baik untuk mencapai MPP dan respon yang cepat terhadap fluktuasi daya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Dr. Drs. Cuk Imawan, M.Si selaku dosen mata kuliah seminar yang telah memberikan bimbingan dalam penulisan KTI ini, juga kepada rekan-rekan mahasiswa S-2 FMIPA UI angkatan 2015 yang telah membantu dalam mata kuliah seminar.

Tak lupa juga kepada Pusat Teknologi Penerbangan LAPAN atas fasilitas riset dan tim redaksi Jurnal Teknologi Dirgantara yang telah berkenan untuk memeriksa dan menerima KTI kami.

DAFTAR RUJUKAN

- Abu Eldahab, Y. E., Saad, N. H., & Zekry, A. (2014). Enhancing the maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 505-514. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.202>
- Abusorrah, A., Al-Hindawi, M. M., Al-Turki, Y., Mandal, K., Giaouris, D., Banerjee, S., . . . Papadopoulou, S. (2013). Stability of a boost converter fed from photovoltaic source. *Solar Energy*, 98, 458-471. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.001>
- Ahmadi-Nedushan, B. (2012). Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete using ANFIS and optimal nonlinear regression models. *Construction and Building Materials*, 36, 665-673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.002>
- Ahmed, J., & Salam, Z. (2014). A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability. *Applied Energy*, 119, 118-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.062>
- Askarzadeh, A. (2013). Developing a discrete harmony search algorithm for size optimization of wind-photovoltaic hybrid energy system. *Solar Energy*, 98, 190-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.008>
- Baljit, S. S. S., Chan, H.-Y., & Sopian, K. (2016). Review of building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems. *Journal of Cleaner Production*, 137, 677-689. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.150>

- Bayod-Rújula, Á. A., Haro-Larrode, M. E., & Martínez-Gracia, A. (2013). Sizing criteria of hybrid photovoltaic-wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid. *Solar Energy*, 98, 582-591. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.023>
- Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637-648. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.009>
- Bidram, A., Davoudi, A., & Balog, R. S. (2012). Control and Circuit Techniques to Mitigate Partial Shading Effects in Photovoltaic Arrays. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(4), 532-546. doi: [10.1109/JPHOTOV.2012.2202879](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2202879)
- Fathabadi, H. (2016). Novel fast dynamic MPPT (maximum power point tracking) technique with the capability of very high accurate power tracking. *Energy*, 94, 466-475. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.133>
- Harrag, A., & Messalti, S. (2015). Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1247-1260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.003>
- Hartmann, L. V., Vitorino, M. A., Correa, M. B. d. R., & Lima, A. M. N. (2013). Combining Model-Based and Heuristic Techniques for Fast Tracking the Maximum-Power Point of Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(6), 2875-2885. doi: [10.1109/TPEL.2012.2204408](https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2204408)
- Jung, J.-H., & Ahmed, S. (2012). Real-time simulation model development of single crystalline photovoltaic panels using fast computation methods. *Solar Energy*, 86(6), 1826-1837. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.003>
- Jusoh, A., Sutikno, T., Guan, T. K., & Mekhilef, S. (2014). A Review on Favourable Maximum Power Point Tracking Systems in Solar Energy Application. *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, 12. doi: <http://dx.doi.org/10.12928/telkomnika.v12i1.2>
- Kaliamoorthy, M., Rajasekaran, V., & Gerald Christopher Raj, I. (2014). Single-phase fifteen-level grid-connected inverter for photovoltaic system with evolutionary programming based MPPT algorithm. *Solar Energy*, 105, 314-329. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.031>
- Kumar, P., Jain, G., & Palwalia, D. K. (2015, 12-14 Aug. 2015). *Genetic algorithm based maximum power tracking in solar power generation*. Paper presented at the 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE).
- Kwan, T. H., & Wu, X. (2016). Maximum power point tracking using a variable antecedent fuzzy logic controller. *Solar Energy*, 137, 189-200. doi: [10.1016/j.solener.2016.08.008](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.008)
- Li, X., Wen, H., Jiang, L., Hu, Y., & Zhao, C. (2016). An Improved Beta Method With Autoscaling Factor for Photovoltaic System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5), 4281-4291. doi: [10.1109/TIA.2016.2584584](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2584584)
- Ma, J., L. Man, K., Zhang, N., Guan, S.-U., Wong, P. W. H., G. Lim, E., . . . U. Lei, C. (2013). *Improving Power-Conversion Efficiency via a Hybrid MPPT Approach for Photovoltaic Systems* (Vol. 19).
- Mahmoud, Y., Abdelwahed, M., & El-Saadany, E. F. (2016). An Enhanced MPPT Method Combining Model-Based and

- Heuristic Techniques. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(2), 576-585. doi: 10.1109/TSTE.2015.2504504
- Mahmoud, Y., & El-Saadany, E. F. (2016). Fast Power-Peaks Estimator for Partially Shaded PV Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(1), 206-217. doi: 10.1109/TEC.2015.2464334
- Merei, G., Berger, C., & Sauer, D. U. (2013). Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, 97, 460-473. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.016>
- Moradi, K., Ali Ebadian, M., & Lin, C.-X. (2013). A review of PV/T technologies: Effects of control parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 483-500. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.044>
- Paz, F., & Ordonez, M. (2014). Zero Oscillation and Irradiance Slope Tracking for Photovoltaic MPPT. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6138-6147. doi: 10.1109/TIE.2014.2311414
- Piegari, L., & Rizzo, R. (2010). Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. *IET Renewable Power Generation*, 4(4), 317-328. doi: 10.1049/iet-rpg.2009.0006
- Rahmann, C., Vittal, V., Ascui, J., & Haas, J. (2016). Mitigation Control Against Partial Shading Effects in Large-Scale PV Power Plants. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1), 173-180. doi: 10.1109/TSTE.2015.2484261
- Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018-1034. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.068>
- Xiao, W., Elnosh, A., Khadkikar, V., & Zeineldin, H. (2011, 7-10 Nov. 2011). *Overview of maximum power point tracking technologies for photovoltaic power systems*. Paper presented at the IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Zakzouk, N. E., Elsaharty, M. A., Abdelsalam, A. K., Helal, A. A., & Williams, B. W. (2016). Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique. *IET Renewable Power Generation*, 10(4), 561-574. doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0203
- Zhou, Q., Wang, F., & Zhu, F. (2016). Estimation of compressive strength of hollow concrete masonry prisms using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Construction and Building Materials*, 125, 417-426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.064>

