

Improvisasi Metode Biseksi pada Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan Menggunakan Algoritma Incremental Conductance

Muhammad Nizar Habibi^{a,*}, Novie Ayub Windarko^a, Moh. Zaenal Efendi^a, Rachma Prilian Eviningsih^a, Luki Septya Mahendra^a, Sony Junianto^b

^aDepartemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Kampus PENS, Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111

^bDepartemen Teknik Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Kampus PENS, Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111

*E-mail: nizar@pens.ac.id

Abstract

The solar energy potential reaches 207.8 GWp in Indonesia, providing numerous opportunities to harness renewable energy. One approach is utilizing solar panels; however, these panels have a low energy conversion rate. Maximum Power Point Tracking (MPPT) is a technique that can maximize the performance of solar panels to consistently generate maximum power. Bisection MPPT is implemented in the system due to its ease of implementation, but it performs less effectively under low irradiance. The Incremental Conductance algorithm is a suitable choice for improving Bisection MPPT. Apart from being easy to implement, the Incremental Conductance algorithm is not dependent on the characteristics of the solar panel. It also features Variable Step Size to eliminate ripple when reaching the maximum power of the solar panel. Incremental Conductance MPPT can enhance Bisection MPPT with a maximum increase of 17,483 Watts. The Bisection-Incremental Conductance MPPT algorithm takes 2.122 seconds to reach the maximum power of the solar panel, generating 1.89×10^6 Ws of energy for 0.4 seconds. It yields the highest value compared to Bisection MPPT and Incremental Conductance MPPT.

Kata kunci: *Maximum Power Point Tracking, Bisection, Incremental Conductance*

Abstrak

Potensi energi surya mencapai 207,8 GWp di Indonesia, sehingga banyak kesempatan untuk bisa memanfaatkan ketersediaan energi terbarukan tersebut. Salah satu cara adalah menggunakan panel surya, akan tetapi panel surya memiliki tingkat konversi energi yang rendah. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan teknik yang bisa memaksimalkan performa panel surya untuk selalu bisa menghasilkan daya maksimal dari panel surya. MPPT Biseksi diimplementasikan pada sistem karena sangat mudah dalam implementasi tetapi pada iradiasi rendah performa MPPT kurang bagus. Algoritma *Incremental Conductance* merupakan pilihan algoritma yang tepat untuk bisa digunakan memperbaiki MPPT Biseksi. Selain mudah dalam implementasi, algoritma *Incremental Conductance* juga tidak tergantung pada karakteristik dari panel surya. Algoritma *Incremental Conductance* juga dilengkapi dengan *Variable Step Size* yang digunakan untuk menghilangkan *ripple* ketika sudah mencapai daya maksimal dari panel surya. MPPT *Incremental Conductance* bisa memperbaiki MPPT Biseksi dengan kenaikan tertinggi sebesar 17.483 Watt. Algoritma MPPT Biseksi-*Incremental Conductance* memerlukan waktu selama 2.122 detik untuk mencapai daya maksimal panel surya dan bisa menghasilkan energi sebesar 1.89×10^6 Ws selama 0.4 detik dan menghasilkan nilai tertinggi jika dibandingkan dengan MPPT Biseksi dan MPPT *Incremental Conductance*.

Kata kunci: *Maximum Power Point Tracking, Biseksi, Incremental Conductance*

1. Pendahuluan

Energi surya merupakan energi yang bersifat energi terbarukan, sehingga selalu tersedia di alam, memiliki kapasitas yang besar, dan sangat cepat memperbarui kapasitas energinya. 207,8 GWp merupakan potensi energi surya di Indonesia [1], dengan potensi sebesar itu maka sangat besar sekali kesempatan untuk memanfaatkan energi surya. Panel surya merupakan salah satu peralatan yang bisa digunakan memanfaatkan energi surya. Kinerja dari panel surya sangat bergantung dari seberapa besar intensitas cahaya matahari dan suhu yang diterima oleh panel surya [2]. Efektifitas konversi energi yang dihasilkan merupakan salah satu kelemahan dari panel, sehingga dibutuhkan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk meningkatkan efektifitas konversi energi dari panel surya [3].

Metode MPPT tidak hanya bisa meningkatkan daya yang dihasilkan oleh panel surya dan meningkatkan energi yang dihasilkan ke beban, tetapi juga dapat meingkatkan masa operasi dari panel surya [4]. Pada umumnya, MPPT

diimplementasikan di konverter daya dengan pengaturan nilai *duty cycle* untuk menghasilkan daya terbesar panel surya [5]. Nilai *duty cycle* diatur mulai dari nilai terkecil sampai terbesar dengan range tertentu untuk mendapatkan daya maksimal dari panel surya yang disebut dengan *tracking*. Nilai *tracking* yang didapatkan adalah nilai tegangan dan arus yang hasil dari keduanya adalah dikalkulasi menjadi nilai daya dari panel surya. Hubungan tegangan dan arus pada panel surya bersifat nonlinear, sehingga tidak mudah untuk mengimplementasikan MPPT pada sistem [6].

Pada saat ini, banyak peneliti yang mengembangkan metode MPPT untuk *tracking Maximum Power Point* (MPP) pada panel surya. Ada empat kategori klasifikasi dari MPPT berdasarkan jenis metode *tracking*, yaitu Metode Klasik, Metode Kendali Cerdas, Metode Optimasi, dan Metode *Hybrid* atau Gabungan [7]. Metode Klasik diantaranya adalah *Perturb and Observe* (P&O) [8], *Incremental Conductance* (InC) [9], *Look-Up Table-Based MPPT* (LTB MPPT) [10], Metode Kendali Cerdas seperti *Artificial Neural Network* (ANN) [11], *Fuzzy Logic Controller* (FLC) [12], Metode Optimasi seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) [13], *Differential Evolution* (DE) [14], *GreyWolf Optimization* (GWO) [15] dan Metode *Hybrid* seperti *Seagull Optimizer and Modified Perturb and Observe* [16], *Particle Swarm Optimization-Perturb and Observe* (PSO-P&O) [17]. Metode MPPT Klasik merupakan metode yang sangat sederhana dalam implementasi sehingga mudah dalam penerapan. Metode klasik juga berada pada kemampuan terbaik ketika kondisi iradiasi matahari stabil dan konstan [18]. Tetapi metode klasik akan memunculkan osilasi yang tinggi pada daerah MPP sehingga menghasilkan performa yang kurang bagus. Metode MPPT Kendali Cerdas dan Optimasi merupakan metode MPPT yang memiliki kemampuan lebih baik dari Metode Klasik tetapi dalam penerapannya akan sulit karena kompleksitas susunan algoritma [19].

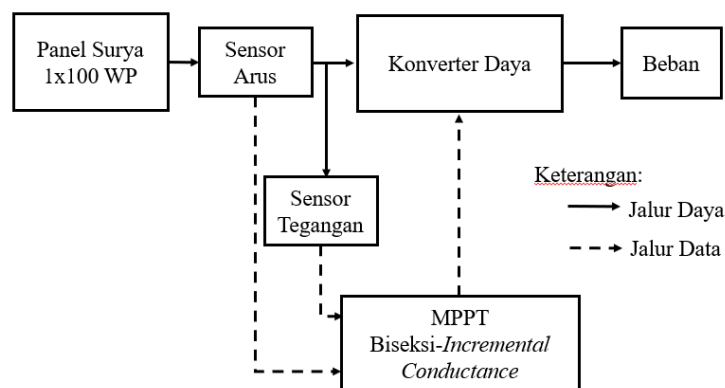
Metode Biseksi merupakan salah satu Metode Klasik yang bisa diaplikasikan untuk MPPT [20]. Metode Biseksi menerapkan *Bisection Search Theorem* (BST) tanpa memerlukan komputasi turunan, sehingga untuk implementasi lebih mudah. Akan tetapi dalam penerapan MPPT Biseksi terdapat kendala, MPPT Biseksi tidak bisa mendapatkan daya maksimum dari panel surya ketika iradiasi rendah. Sering kali MPPT Biseksi tidak tepat dalam menentukan daya maksimum dari panel surya ketika iradiasi turun. Sehingga diperlukan algoritma tambahan atau *hybrid* untuk bisa memperbaiki performa dari MPPT Biseksi. Algoritma *Incremental Conductance* merupakan pilihan tepat untuk bisa memperbaiki performa dari Biseksi MPPT. Algoritma *Incremental Conductance* dapat mencari daya maksimal dari panel surya berdasarkan data dari tegangan dan arus dari panel surya serta tidak perlu memperhatikan karakteristik dari panel surya sehingga lebih mudah untuk diimplementasi pada sistem [21].

Pada penelitian ini dirancang sistem MPPT yang dapat memperbaiki MPPT Biseksi dengan menggunakan Algoritma *Incremental Conductance* sehingga MPPT bisa bekerja disemua nilai iradiasi matahari. Pada saat awal sistem bekerja, MPPT Biseksi akan mencari nilai daya maksimum dari panel surya. Kemudian Algoritma *Incremental Conductance* bekerja untuk memperbaiki hasil pencapaian daya maksimum dari MPPT Biseksi apabila masih belum mencapai nilai maksimal dari panel surya. Pada Algoritma *Incremental Conductance* akan dilengkapi dengan *Variable Step Size* yang digunakan untuk menghilangkan *ripple steady state* ketika MPPT sudah mencapai daya maksimal dari panel surya.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1. Desain Sistem

Sistem MPPT menggunakan satu panel surya dengan kapasitas 100 WP dilengkapi dengan sensor arus dan sensor tegangan yang digunakan untuk membaca nilai arus dan tegangan dari panel surya.

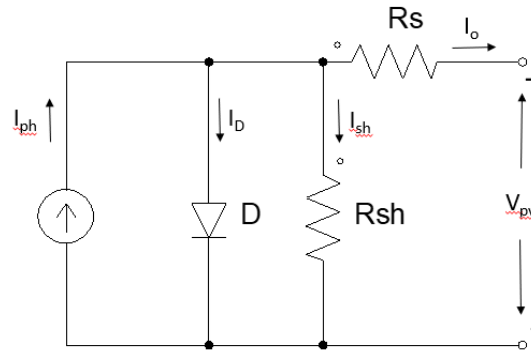


Gambar 1. Desain Sistem MPPT

Hasil pembacaan nilai arus dan tegangan kemudian dikalkulasi untuk mendapatkan nilai daya dari panel surya. Nilai daya juga digunakan untuk umpan balik dari algoritma dalam mencapai daya maksimal dari panel surya dengan melakukan perubahan nilai *duty cycle* pada konverter daya. Gambar desain sistem ditunjukkan pada Gambar 1.

2.2. Panel Surya

Panel Surya merupakan komponen utama dari sistem MPPT, karena tujuan utama dari MPPT adalah untuk meningkatkan efisiensi konversi energi dari panel surya. Gambar 2 merupakan rangkaian ekivalen dari panel surya. Berdasarkan Gambar 2, maka persamaan arus yang bisa dihasilkan oleh panel surya ditunjukkan pada Persamaan (1). I_{pv} dan V_{pv} merupakan arus dan tegangan yang dihasilkan oleh panel surya, I_s merupakan arus jenuh serta I_{ph} merupakan arus yang dihasilkan oleh panel surya ketika terkena iradiasi matahari. n merupakan faktor kualitas diode, R_{sh} dan R_s merupakan nilai resistor paralel dan seri pada panel surya.



Gambar 2. Rangkaian Ekivalen Panel Surya

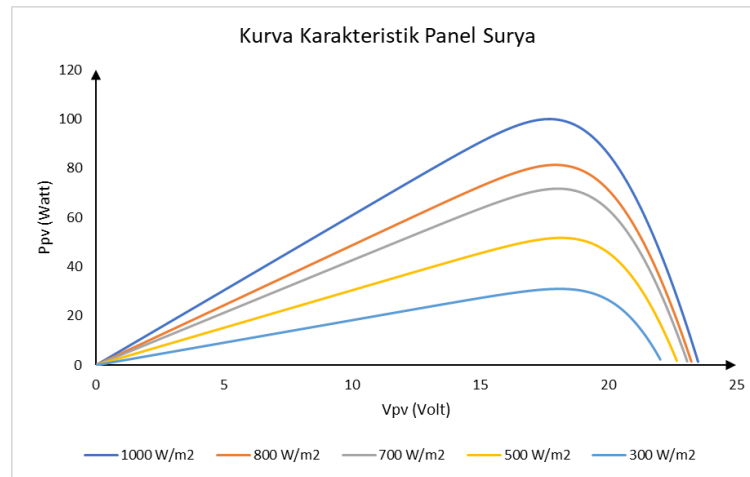
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n N_s V_i}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Arus I_{ph} sepenuhnya tergantung pada iradiasi matahari dan dapat dihitung nilainya menggunakan Persamaan (2). I_{sc} merupakan nilai arus hubung singkat dari panel surya, k_i merupakan koefisien suhu arus hubung singkat, G merupakan nilai iradiasi matahari, serta T_r merupakan suhu sel surya. Tabel 1 menunjukkan datasheet panel surya yang digunakan untuk sistem MPPT. Gambar 3 menunjukkan kurva karakteristik panel surya dengan beberapa nilai iradiasi matahari dengan menggunakan data panel surya sesuai dengan Tabel 1.

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} (I_{sc} + k_i (T - T_r)) \quad (2)$$

Tabel 1. Datasheet Panel Surya

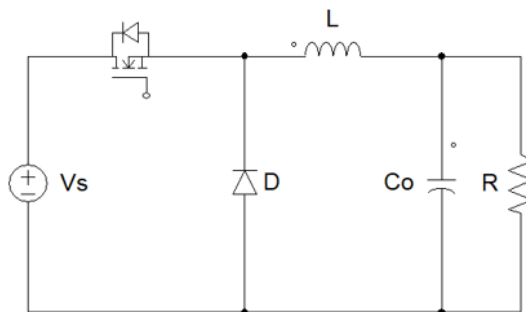
POLYCRYSTALLINE		
Maximum Power	Pmax	100 W
Maximum Power Voltage	Vmp	17.6 V
Maximum Power Current	Imp	5.69 A
Open Circuit Voltage	Voc	22.6 V
Short Circuit Current	Isc	6.09 A
Standard Test Condition: Temp = 25 °C ; Irradiance = 1000 W/m ²		



Gambar 3. Kurva Karakteristik (P-V) Panel Surya

2.3. Konverter Daya

Konverter daya pada sistem MPPT digunakan untuk mencari daya maksimal yang bisa dihasilkan oleh panel surya pada iradiasi matahari tertentu. Proses pencarian daya maksimal dari panel surya dilakukan dengan mengubah-ubah nilai *duty cycle* pada konverter daya. Jenis konverter yang digunakan pada sistem MPPT menggunakan tipe *Buck Converter*. Gambar 4 menunjukkan rangkaian dari *Buck Converter*.



Gambar 4. Rangkaian *Buck Converter*

$$V_o = V_s \cdot D \tag{3}$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{4}$$

$$C_o = \frac{1-D}{8L(\Delta V_o / V_o) f^2} \tag{5}$$

Tabel 2. Parameter Konverter Daya

Parameter	Nilai
Induktor	244.21 μ H
Kapasitor	20.98 μ F
Resistor	31 Ω
Frekuensi	40 kHz

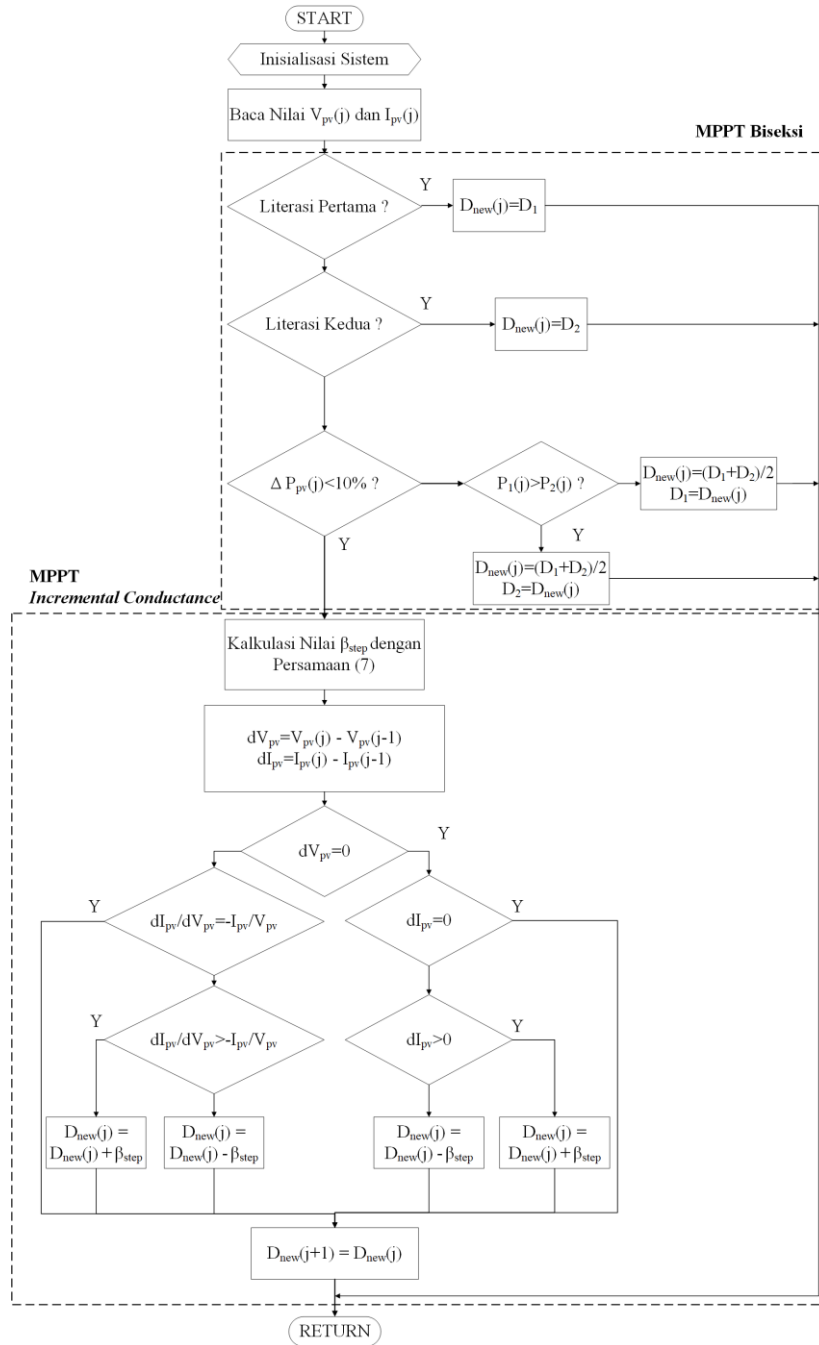
Nilai parameter pertama dalam mendesain *Buck Converter* adalah dengan mencari nilai *duty cycle* desain yang didapatkan dengan menggunakan Persamaan (3). Setelah didapatkan nilai *duty cycle* desain, maka tahap selanjutnya

adalah mencari nilai induktor dengan menggunakan Persamaan (4). f merupakan frekuensi *switching* dengan nilai 40k Hz. Nilai kapasitor output dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5). $\Delta V_o/V_o$ merupakan nilai *ripple* tegangan output. Pada sistem MPPT digunakan beberapa parameter sesuai pada Tabel 2.

2.4. Algoritma MPPT Biseksi-Incremental Conductance

Metode Biseksi merupakan metode pencarian setengah interval pada area data pencarian [22]. Pada sistem MPPT, area data pencarian adalah range nilai *duty cycle*. Ada dua titik *duty cycle* yang diambil oleh Metode Biseksi, kemudian diolah oleh Metode Biseksi dengan menghasilkan *duty cycle* yang baru dengan menggunakan persamaan (6).

$$D_{new} = \frac{D_1 + D_2}{2} \tag{6}$$



Gambar 5. Flowchart MPPT

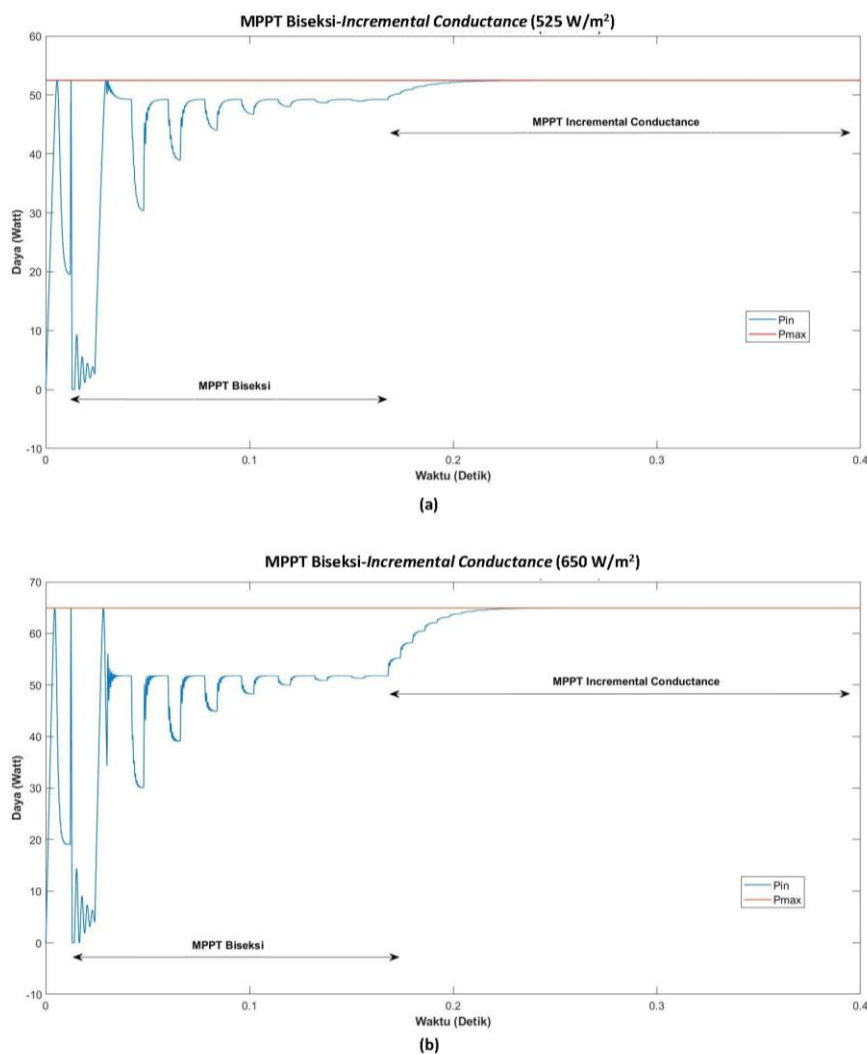
D_{new} merupakan nilai *duty cycle* baru, D_1 merupakan nilai *duty cycle* pada titik pertama dan D_2 merupakan nilai *duty cycle* pada titik kedua. Perubahan nilai *duty cycle* berdasarkan nilai daya yang dihasilkan oleh panel surya. Nilai P_1 yang dihasilkan oleh D_1 akan dibandingkan dengan nilai P_2 yang dihasilkan oleh D_2 , apabila nilai P_1 lebih besar dari pada P_2 maka nilai D_2 akan digantikan oleh D_{new} , apabila nilai P_2 lebih besar dari pada P_1 maka nilai D_1 akan digantikan oleh D_{new} . Gambar 5 merupakan *Flowchart* MPPT Biseksi-Incremental Conductance. MPPT Biseksi akan bekerja pertama kali untuk mendapatkan daya maksimal dari panel surya, kemudian ketika ada perbedaan daya panel surya baru yang dihasilkan daripada daya panel surya lama kurang dari 10% maka MPPT akan berpindah pada MPPT Incremental Conductance. MPPT Incremental Conductance akan mengoreksi nilai daya yang dihasilkan oleh MPPT Biseksi untuk menghasilkan daya maksimal dari panel surya yang sebenarnya.

MPPT Incremental Conductance dilengkapi dengan persamaan *variable step-size* yang digunakan untuk mengurangi osilasi saat kondisi *steady*. Persamaan *variabel step-size* menggunakan Persamaan (7). N merupakan nilai konstanta dari *variabel step-size*, dan tanda \pm merupakan penyesuaian kondisi kerja dari Algoritma Incremental Conductance.

$$\beta_{step} = \pm \frac{N}{I_{pv}} \left| \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \right| \quad (7)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem dilakukan dengan mengubah nilai iradiasi matahari untuk melihat respon algoritma dari MPPT Biseksi-Incremental Conductance.



Gambar 6. Hasil Pengujian MPPT (a) Iradiasi 525 W/m² (b) Iradiasi 650 W/m²

Daya yang dihasilkan oleh panel surya akan diolah terlebih dahulu oleh MPPT Biseksi, kemudian MPPT *Incremental Conductance* akan memperbaiki hasil MPPT yang dihasilkan oleh MPPT Biseksi, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar 6 terdiri dari dua jenis percobaan dengan nilai iradiasi yang berbeda. Gambar 6a merupakan hasil dari pengujian algoritma pada nilai iradiasi 525 W/m² dan Gambar 6b merupakan pengujian pada nilai iradiasi 650 W/m². Pada pengujian ada dua jenis garis, garis merah merupakan nilai daya maksimum yang tersedia serta garis biru merupakan nilai *tracking* MPPT dari algoritma. Sehingga bisa dikaitkan bahwa *tracking* pada garis biru, pada akhirnya harus bisa mencapai nilai yang mendekati dengan garis merah.

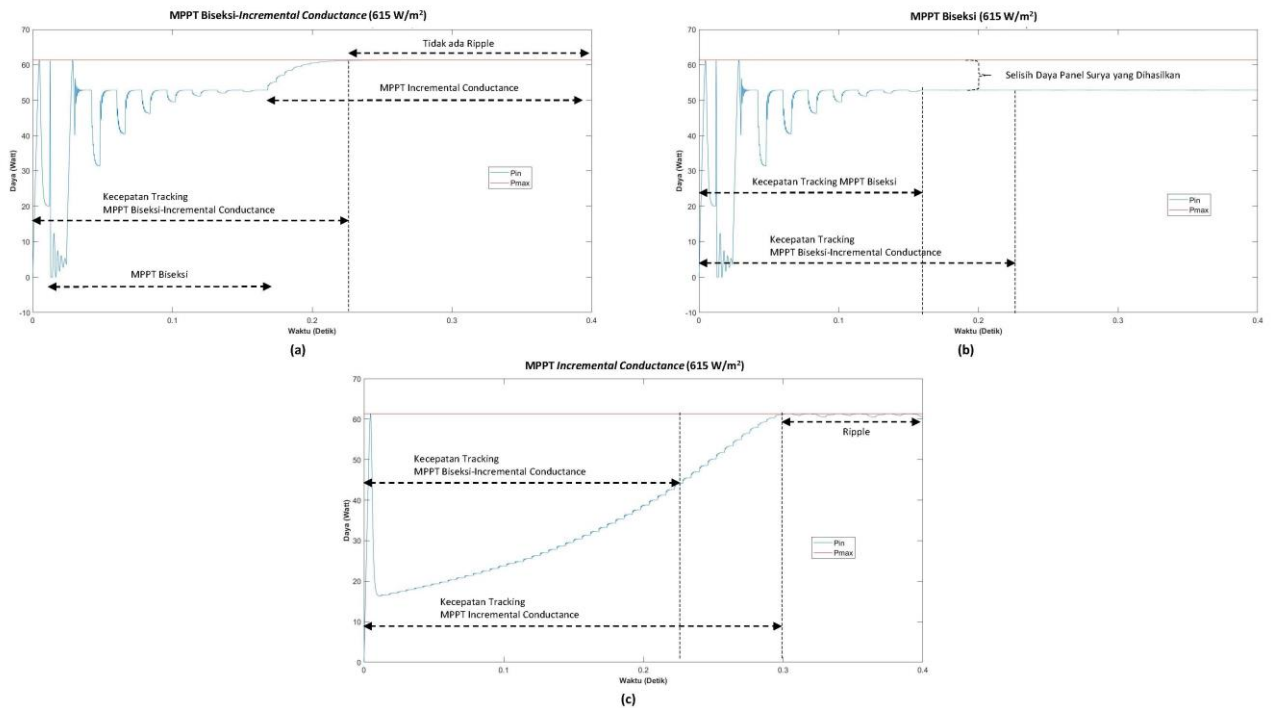
Pada awal pengujian MPPT Biseksi melakukan *tracking* untuk mencari nilai daya maksimum dari panel surya, tetapi karena kurang maksimal maka ada beberapa kondisi iradiasi, MPPT Biseksi tidak bisa mencapai daya maksimal dari panel surya. Kemudian setelah MPPT Biseksi sudah selesai melaksanakan tugasnya, MPPT *Incremental Conductance* melakukan penyempurnaan hasil *tracking* dari MPPT Biseksi. MPPT *Incremental Conductance* bisa mencapai nilai daya maksimum dari panel surya. Tabel 3 merupakan hasil pengujian dengan berbagai nilai iradiasi matahari. Pengujian dengan berbagai nilai iradiasi matahari dilakukan untuk melihat karakteristik dari algoritma pada berbagai kondisi iradiasi matahari. Pengujian dilakukan sebanyak tujuh kali pada interval nilai iradiasi 750 W/m² sampai 486 W/m². Pada pengujian dilakukan pengamatan pada nilai daya maksimal yang bisa dihasilkan oleh panel surya, hal ini digunakan sebagai pembangian nilai yg dihasilkan oleh MPPT. Kemudian data yg diamati adalah daya yang dihasilkan oleh masing-masing algoritma, baik MPPT Biseksi maupun MPPT *Incremental Conductance*. Kedua MPPT tersebut diamati untuk melihat seberapa besar kenaikan daya yang dihasilkan oleh MPPT *Incremental Conductance*.

Tabel 3. Hasil Pengujian Algoritma MPPT

Iradiasi Matahari (W/m ²)	Daya Maksimal (Watt)	Tracking MPPT Biseksi (Watt)	Tracking MPPT <i>Incremental Conductance</i> (Watt)	Kenaikan Daya (Watt)
750	74.633	56.788	74.631	17.843
712	71.058	55.98	71.056	15.076
683	68.059	55.002	68.058	13.056
650	64.687	53.86	64.684	10.824
567	56.932	51.555	56.92	5.365
525	52.475	49.235	52.46	3.225
486	48.511	46.984	48.504	1.52

Kenaikan daya terbesar terjadi pada iradiasi 750 W/m² dengan kenaikan sebesar 17.843 Watt. Nilai tersebut didapatkan dari selisih hasil *tracking* MPPT dari *Incremental Conductance* dan Biseksi. Daya yang dihasilkan oleh MPPT Biseksi paling besar adalah 56.788 Watt dan yang terkecil adalah 46.984 Watt. Hal ini terjadi karena pada MPPT Biseksi tidak menemukan nilai *duty cycle* yang sesuai untuk bisa mencapai daya maksimal dari panel surya. Nilai *duty cycle* yang diolah oleh MPPT Biseksi terbatas pada range interval yang sudah ditentukan, sehingga masih kurang fleksibel untuk bisa mencapai nilai *duty cycle* pada daya maksimal dari panel surya.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian dengan menggunakan tiga jenis algoritma MPPT yang berbeda. MPPT yang diajukan pada penelitian ini adalah MPPT Biseksi-*Incremental Conductance*, sehingga untuk algoritma pembandingan adalah MPPT Biseksi dan MPPT *Incremental Conductance*. Pengujian dilakukan pada satu nilai iradiasi matahari yaitu pada iradiasi 615 W/m². Pada Gambar 7a merupakan pengujian MPPT menggunakan Biseksi-*Incremental Conductance*, pada grafik *tracking* menunjukkan bahwa MPPT *Incremental Conductance* dapat memperbaiki nilai daya yang dihasilkan oleh MPPT Biseksi dan pada saat kondisi *steady* tidak ada *ripple*, hal ini dikarenakan pada MPPT *Incremental Conductance* sudah dilengkapi dengan *Variabel Step Size*. Gambar 7b merupakan *tracking* MPPT algoritma Biseksi dengan menghasilkan nilai daya yg tidak bisa mencapai daya maksimal dari panel surya, tetapi MPPT Biseksi memiliki kecepatan yang lebih cepat jika di dibandingkan dengan MPPT Biseksi-*Incremental Conductance*. Hal ini dikarenakan susunan kerja dari MPPT *Incremental Conductance* berada dipaling akhir atau setelah MPPT Biseksi bekerja pada algoritma MPPT Biseksi-*Incremental Conductance*. Gambar 7c merupakan *tracking* MPPT *Incremental Conductance*, bentuk *tracking* yang dihasilkan berbeda dengan kedua algoritma MPPT yang lainnya. Hal tersebut dikarenakan cara kerja dari MPPT *Incremental Conductance* yang berdasarkan perubahan daya dan tegangan sebelumnya.



Gambar 7. Perbandingan MPPT (a) Biseksi-Incremental Conductance (b) Biseksi (c) Incremental Conductance

Pada kondisi *steady state* juga mengalami *ripple* hal ini merupakan sifat dasar dari MPPT *Incremental Conductance* yang tidak akan diam meskipun sudah berada pada kondisi *steady state*. Jika di bandingkan dengan MPPT Biseksi-Incremental Conductance dalam hal kecepatan *tracking*, MPPT *Incremental Conductance* memiliki waktu yang lebih lama, hal ini dikarenakan penambahan nilai *tracking* dari algoritma. Semakin kecil nilai penambahannya maka akan semakin lama proses *tracking* tetapi *ripple* yang dihasilkan juga menjadi lebih kecil. Tabel 4 merupakan data pengujian dari ketiga algoritma MPPT.

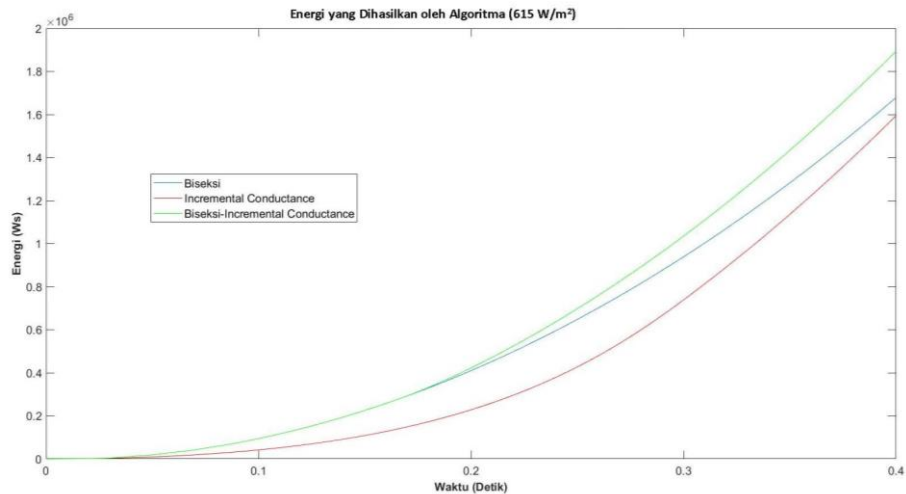
Tabel 4. Data Perbandingan MPPT

Algoritma MPPT	Daya Maksimal (Watt)	Tracking Daya (Watt)	Kecepatan Tracking (s)	Ripple saat Steady
Biseksi-Incremental Conductance	61.35	61.35	2.122	Tidak
Biseksi	61.351	52.877	1.593	Tidak
Incremental Conductance	61.35	61.35	3.009	Ya

Pengujian selanjutnya adalah pengujian untuk mengetahui besaran energi yang dihasilkan oleh masing-masing algoritma MPPT. Pengujian tetap pada nilai iradiasi 615 W/m^2 dan membandingkan tiga metode MPPT yaitu MPPT Biseksi-Incremental Conductance, MPPT Biseksi, serta MPPT *Incremental Conductance*. Tabel 5 merupakan nilai perbandingan data energi yang dihasilkan oleh masing-masing algoritma. Nilai Energi tertinggi yang dihasilkan pada MPPT Biseksi-Incremental Conductance sebesar $1.89 \times 10^6 \text{ Ws}$, nilai tertinggi kedua pada MPPT Biseksi sebesar $1.67 \times 10^6 \text{ Ws}$ dan yg terendah pada MPPT *Incremental Conductance* dengan nilai $1.59 \times 10^6 \text{ Ws}$. Nilai energi didapatkan dari pengujian algoritma selama 0.4 detik. Gambar 8 merupakan grafik perbedaan energi yang dihasilkan oleh masing-masing algoritma.

Tabel 5. Nilai Energi yang Dihasilkan oleh Algoritma

Algoritma MPPT	Energi (Ws) $\times 10^6$
Biseksi-Incremental Conductance	1.89
Biseksi	1.67
Incremental Conductance	1.59



Gambar 8. Energi yang Dihasilkan oleh Algoritma

4. Kesimpulan

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan suatu teknik untuk bisa memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya, sehingga konversi energi yang dihasilkan oleh panel surya akan selalu maksimal. MPPT Biseksi merupakan salah satu teknik MPPT yang sederhana dalam implementasi, akan tetapi dalam berbagai kondisi iradiasi MPPT Biseksi tidak bisa mendapatkan daya maksimal dari panel surya. Sehingga dalam penelitian ini dilakukan pengujian perbaikan MPPT Biseksi dengan menggunakan MPPT *Incremental Conductance*. Hasil menunjukkan bahwa MPPT *Incremental Conductance* bisa memperbaiki hasil MPPT Biseksi untuk bisa mencapai daya maksimal dari panel surya dengan kenaikan nilai tertinggi sebesar 17.843 Watt. MPPT Biseksi-*Incremental Conductance* memerlukan waktu selama 2.122 detik untuk bisa mencapai daya maksimal dari panel surya dan tidak ada *ripple* pada kondisi *steady* karena pada MPPT sudah dilengkapi *Variable Step Size*. Energi yang dihasilkan oleh algoritma juga besar, mencapai 1.89×10^6 Ws, lebih besar jika dibandingkan MPPT Biseksi dan MPPT *Incremental Conductance*.

Daftar Pustaka

- [1] Afif, F., Martin, A., 2022, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," 6: 43-52.
- [2] Putri, S.W., Marausna, G., Prasetyo, E.E., 2022, "ANALISIS PENGARUH INTENSITAS CAHAYA MATAHARI TERHADAP DAYA KELUARAN PADA PANEL SURYA," 8: 29-37.
- [3] Peng, B.R., Ho, K.C., Liu, Y.H., 2017, "A novel and fast MPPT method suitable for both fast changing and partially shaded conditions," 65: 3240 – 3251.
- [4] Motahhir, S., Ghzizal, A.E., Sebti, S., Derouich, A., 2018, "Modeling of Photovoltaic System with Modified Incremental Conductance Algorithm for Fast Changes of Irradiance," 2018: 1-13.
- [5] Li, L., Wang, H., Chen, X., Bukhari, A.A.S., Cao, W., Chai, L., Li, B., 2019, "High Efficiency Solar Power Generation with Improved Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM) Overmodulation Algorithms," 12: 1-18.
- [6] Sahu, H.S., Kumar, S., Nayak, S.K., 2018, "Maximum Power Point Estimation of a PV Array by Using Improve Bisection Method," IEEE, Bangkok.
- [7] Katche, M.L., Makokha, A.B., Zachary, S.O., Adaramola, M.S., 2023, "A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems," 16: 1-23.
- [8] Azmi, B., Abner, J.H., Prasepvianto, E.B., Saputra, H., 2018, "REVIEW PERBANDINGAN TEKNIK MAXIMUM POWER POINT TRACKER (MPPT) UNTUK SISTEM PENGISIAN DAYA MENGGUNAKAN SEL SURYA," 16: 111-122.
- [9] Raharja, L.P.S., Eviningsih, R.P., Ferdiansyah, I., Yanaratri, D.S., 2020, "Penggunaan Daya Panel Surya Dengan MPPT Bisection Pada Proses Charging Baterai," 9: 24-33.
- [10] Yue, X., Geng, D., Chen, Q., Zheng, Y., Gao, G., Xu, L., 2021, "2-D lookup table based MPPT: Another choice of improving the generating capacity of a wave power system," 179: 625-640.
- [11] Habibi, M.N., Jati, M.S.W., Windarko, N.A., Tjahjono, A., 2020, "Maximum Power Point Tracking Menggunakan Algoritma Artificial Neural Network Berbasis Arus Hubung Singkat Panel Surya," 16: 57-64.
- [12] Yilmaz, U., Kircay, A., Borekci, S., 2018, "PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller," 81: 994-1001.
- [13] Hayder, W., Ogliari, E., Dolara, A., Abid, A., Hamed, M.B., Sbita, L., 2020, "Improved PSO: A Comparative Study in MPPT Algorithm for PV System Control under Partial Shading Conditions," 13: 1-22.

- [14] Firmanza, A.P., Habibi, M.N., Windarko, N.A., Yanaratri, D.S., 2020, "Differential Evolution-based MPPT with Dual Mutation for PV Array under Partial Shading Condition," IEEE: Malang.
- [15] Tjahjono, A., Anggriawan, D.O., Habibi, M.N., Prasetyono, E., 2020, "Modified Grey Wolf Optimization for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System under Partial Shading Conditions," 12: 94-104.
- [16] Windarko, N.A., Sholikhah, E.N., Habibi, M.N., Prasetyono, E., Sumantri, B., Efendi, M.Z., Mokhlis, H., 2022, "Hybrid photovoltaic maximum power point tracking of Seagull optimizer and modified perturb and observe for complex partial shading," 12: 4571-4585.
- [17] Bolipo, R.B., Mikkili, S., Bonthagorla, P.K., 2020, "Hybrid, Optimization, Intelligent and Classical PV MPPT Techniques: Review," 7: 9-33.
- [18] Ahmed, J., Salam, Z., 2018, "An Enhanced Adaptive P&O MPPT for Fast and Efficient Tracking Under Varying Environmental Conditions," 9: 1487-1496.
- [19] Shang, L., Guo, H., Zhu, W., 2020, "An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm," 5: 1-18.
- [20] Buoazza, F., Mohamed, M., Bouziane, B., Abdelhak, D., 2018, "Photovoltaic Generator modeling based on Look Up Table approach and implementation on STM32F407 board of the Perturb&Observe algorithm based MPPT," IEEE: Medea.
- [21] Habibi, M.N., Prakoso, D.N., Windarko, N.A., Tjahjono, A., 2020, "Perbaikan MPPT Incremental Conductance menggunakan ANN pada Berbayang Sebagian dengan Hubungan Paralel," 8: 546-560.
- [22] Kumaresan, A., Kandasamy, N.K., Tafti, H.D., 2020, "Binary Search and Sectional Theory-Based Maximum Power Point Tracking Algorithms for Solar Photovoltaic Systems," IEEE: Singapore