

**IMPLEMENTASI DAN PERBANDINGAN ALGORITMA MPPT PADA PROTOTIPE THERMOELECTRIC GENERATOR BERBASIS PANAS BIOMASSA****Abdana Nurrizaldi Alfatah<sup>1</sup>, Ibrohim<sup>2</sup>, Arif Widodo<sup>3</sup>, Tri Rijanto<sup>4</sup>**

S1 Teknik Elektro Universitas Negeri Surabaya

Alamat e-mail: [abdananurrizaldi.22022@mhs.unesa.ac.id](mailto:abdananurrizaldi.22022@mhs.unesa.ac.id)**Abstract (English)**

Utilizing rice husk biomass waste as a heat source for a Thermoelectric Generator (TEG) offers the potential to generate electrical energy; however, combustion temperature fluctuations can result in suboptimal power output. This study aims to compare the performance of three Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms: Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InC), and Fractional Open Circuit Voltage (FOCV) against a system without MPPT. The results indicate that FOCV achieved the highest power Increase at 42.39%, followed by InC at 17.02% and P&O at 10.5%. The P&O algorithm demonstrated the fastest response time (31 seconds), while InC exhibited the best stability, showing the smallest oscillation at 0.15 mW. The implementation of MPPT was proven to enhance both the efficiency and stability of the TEG's power output.

**Article History***Submitted: 13 Juni 2026**Accepted: 16 Juli 2026**Published: 17 Juli 2026***Key Words**

Biomass, thermoelectric generator, maximum power point tracking.

**Abstrak (Indonesia)**

Pemanfaatan limbah biomassa sekam padi sebagai sumber panas untuk Thermoelectric Generator (TEG) berpotensi menghasilkan energi listrik, namun fluktuasi suhu pembakaran menyebabkan keluaran daya kurang optimal. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja tiga algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT), yaitu Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InC), dan Fractional Open Circuit Voltage (FOCV), terhadap sistem tanpa MPPT. Hasil menunjukkan bahwa FOCV menghasilkan peningkatan daya tertinggi sebesar 42,39%, diikuti InC sebesar 17,02% dan P&O sebesar 10,5%. Algoritma P&O memiliki waktu pelacakan tercepat (31 detik), sedangkan InC menunjukkan stabilitas terbaik dengan osilasi terkecil sebesar 0,15 mW. Implementasi MPPT terbukti meningkatkan efisiensi dan stabilitas keluaran daya TEG.

**Sejarah Artikel***Submitted: 13 Juni 2026**Accepted: 16 Juli 2026**Published: 17 Juli 2026***Kata Kunci**

Biomassa, thermoelectric generator, maximum power point tracking

**PENDAHULUAN**

Indonesia sebagai negara agraris memiliki potensi biomassa yang sangat besar dari sektor pertanian. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS), total produksi padi nasional pada tahun 2024 diperkirakan mencapai 52,66 juta ton Gabah Kering Giling (GKG). Dari jumlah produksi tersebut, terdapat potensi limbah biomassa berupa sekam padi yang sangat melimpah, diperkirakan mencapai lebih dari 10,5 juta ton per tahun. Potensi sebesar ini menjadikan sekam padi sebagai sumber daya energi terbarukan yang strategis, namun pemanfaatannya hingga kini belum optimal dan seringkali masih dianggap sebagai limbah.

Pemanfaatan energi terbarukan dari limbah biomassa menjadi salah satu solusi strategis untuk mengatasi krisis energi dan isu lingkungan. Di Indonesia, limbah pertanian seperti sekam padi dan batang jagung tersedia dalam jumlah melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian telah menunjukkan bahwa limbah biomassa ini dapat diolah menjadi sumber energi panas yang efektif, misalnya melalui briket sekam padi yang digunakan untuk membangkitkan panas pada kompor (Suliono et al., 2019) atau melalui pembakaran langsung batang jagung (Safitri Madi et al., 2025). Potensi energi panas dari biomassa ini membuka peluang untuk dikonversi menjadi energi listrik menggunakan teknologi yang tepat.

Salah satu teknologi konversi yang menjanjikan adalah Generator Termoelektrik (TEG). Teknologi ini bekerja berdasarkan efek Seebeck, di mana modul TEG dapat menghasilkan tegangan listrik secara langsung ketika terdapat perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) di kedua sisinya. Besar daya listrik yang dihasilkan oleh Generator Termoelektrik (TEG) berbanding lurus dengan perbedaan suhu yang diterima. Hal ini berarti, semakin tinggi perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin, semakin besar pula energi listrik yang dapat dikonversi (Lapananda et al., 2024). Hal ini sejalan dengan implementasi pada sistem konversi yang menggunakan panas dari pembakaran limbah batang jagung, yang membuktikan kelayakan penggunaan limbah pertanian sebagai sumber panas untuk TEG (Safitri Madi et al., 2025).

Meskipun demikian, terdapat tantangan dalam aplikasi TEG berbasis pembakaran biomassa. Proses pembakaran yang tidak selalu stabil menyebabkan fluktuasi suhu pada sisi panas TEG. Fluktuasi ini mengakibatkan daya keluaran listrik menjadi tidak stabil dan seringkali tidak beroperasi pada titik efisiensi tertingginya. Setiap sumber energi DC, termasuk TEG, memiliki satu titik operasi unik yang disebut Titik Daya Maksimum (Maximum Power Point - MPP), di mana ia dapat menyalurkan daya terbesar ke beban. Untuk memastikan energi yang dipanen selalu maksimal, sistem perlu secara aktif melacak dan mempertahankan operasinya pada titik MPP tersebut.

Untuk mengatasi permasalahan ini, diperlukan implementasi sistem pelacakan cerdas yang dikenal sebagai Maximum Power Point Tracking (MPPT). Fungsi utama MPPT adalah secara otomatis menyesuaikan parameter kelistrikan sistem agar transfer daya dari sumber ke beban selalu maksimal (Cahyo & Aji, 2021). Berbagai algoritma MPPT telah dikembangkan, seperti Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InC) dan Fractional Open Circuit (FOCV), yang masing-masing memiliki keunggulan dan kelemahan dalam menangani perubahan karakteristik sumber energi (Anwar, 2017). Pada sumber panas biomassa yang cenderung tidak stabil, penggunaan satu jenis algoritma MPPT saja belum tentu memberikan respons pelacakan daya yang terbaik.

Di sisi lain, TEG menghasilkan tegangan yang relatif kecil dan berubah-ubah, sehingga diperlukan rangkaian power conditioning berupa boost converter yang mampu menaikkan tegangan untuk menyesuaikan kebutuhan beban. Integrasi antara konverter dan MPPT menjadi kunci untuk memaksimalkan daya yang dapat diperoleh dari TEG berbasis biomassa.

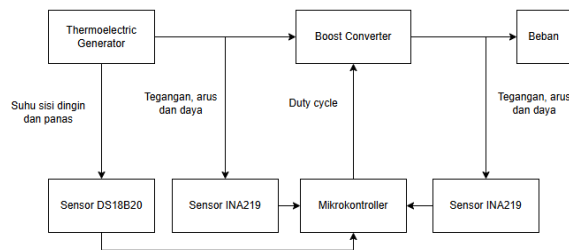
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berfokus pada implementasi dan perbandingan algoritma MPPT pada prototipe Thermoelectric Generator berbasis panas biomassa. Evaluasi ini dilakukan melalui pengujian beberapa algoritma MPPT secara langsung pada sistem yang dirancang untuk memperoleh metode yang paling efektif dalam menstabilkan dan memaksimalkan daya keluaran TEG pada kondisi pembakaran biomassa yang dinamis.

## METODE PENELITIAN

### A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji efektivitas penerapan beberapa algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) terhadap kinerja sistem prototipe Thermoelectric Generator (TEG) yang memanfaatkan sumber panas dari pembakaran biomassa.

## B. Perancangan Sistem

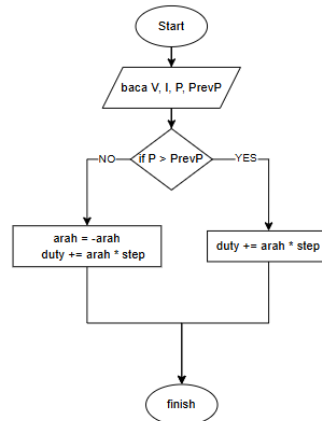


Gambar 1. Diagram blok penelitian

Berdasarkan diagram blok, Thermoelectric Generator (TEG) menghasilkan tegangan DC dari perbedaan suhu. Sensor INA219 mengukur tegangan, arus, dan daya, sedangkan sensor DS18B20 mengukur suhu pada kedua sisi TEG. Data sensor diproses oleh mikrokontroler untuk menghasilkan sinyal duty cycle yang mengendalikan boost converter sehingga tegangan keluaran sesuai dengan kebutuhan beban. Sensor INA219 pada sisi keluaran digunakan untuk mengukur daya yang diterima beban.

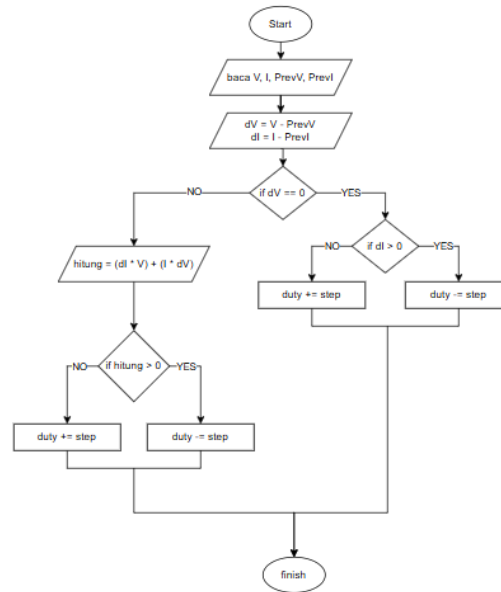
## C. Perancangan Algoritma MPPT

Rancangan flowchart untuk ketiga algoritma MPPT ditunjukkan pada gambar berikut.



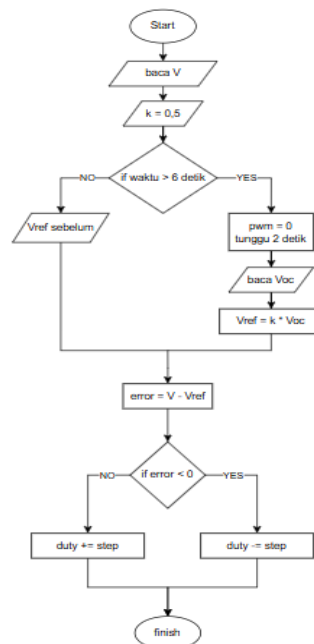
Gambar 2. Flowchart rancangan algoritma P&O

Algoritma P&O bekerja dengan membandingkan daya saat ini dan sebelumnya, di mana arah perubahan duty cycle akan dipertahankan jika daya naik dan dibalik jika daya turun.



Gambar 3. Flowchart rancangan algoritma INC

Algoritma Incremental Conductance (InC) mengevaluasi perubahan tegangan ( $dV$ ) dan arus ( $dI$ ) secara berkala untuk menentukan arah penyesuaian duty cycle. Jika tidak ada perubahan tegangan ( $dV = 0$ ), penyesuaian duty cycle bergantung pada nilai  $dI$ , sedangkan jika ada perubahan, penyesuaian didasarkan pada hasil perhitungan konduktansi  $(dI * V) + (I * dV)$ .



Gambar 3. Flowchart algoritma FOCV

Algoritma Fractional Open Circuit Voltage (FOCV) secara berkala memutus beban setiap 6 detik untuk mengukur tegangan open-circuit dan menetapkan tegangan referensi ( $V_{ref} = 0,5 \times V_{oc}$ ). Nilai error dari selisih tegangan aktual dengan  $V_{ref}$  tersebut kemudian digunakan sebagai acuan untuk menaikkan atau menurunkan duty cycle menuju titik daya optimal.

**D. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data**

Pengumpulan data dilakukan secara eksperimental melalui pengukuran parameter kelistrikan dan termal secara real-time. Pengujian ini membandingkan empat skenario (tanpa MPPT, algoritma P&O, InC, dan FOCV) menggunakan dua jenis pembebanan: beban resistif untuk karakterisasi kurva daya dan aki VRLA untuk uji aplikasi nyata. Instrumen utama yang digunakan adalah Arduino Nano, sensor INA219, dan sensor suhu DS18B20.

Analisis data dilakukan secara kuantitatif untuk mengevaluasi dan membandingkan performa setiap algoritma. Kinerja sistem diukur melalui perhitungan daya keluaran dan tingkat efisiensi konverter. Selain itu, performa pelacakan algoritma MPPT dievaluasi berdasarkan kecepatan waktu respons, tingkat stabilitas (deviasi osilasi) saat mencapai titik daya maksimum, serta persentase peningkatan kinerja sistem yang menggunakan MPPT dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT.

**HASIL DAN PEMBAHASAN****A. Hasil Pengujian Karakteristik TEG**

Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik modul Thermoelectric Generator (TEG) berdasarkan hubungan  $\Delta T$  terhadap tegangan, arus, dan daya. Pengujian tanpa beban dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai tegangan sirkuit terbuka yang mampu dihasilkan oleh susunan 9 modul TEG seri pada setiap tingkat perubahan selisih suhu.

Tabel 1. Pengujian tegangan sirkuit terbuka

| $T_H$<br>(C) | $T_C$<br>(C) | $\Delta T$ | $V_{OC}$<br>(volt) |
|--------------|--------------|------------|--------------------|
| 27,31        | 26,75        | 0,56       | 0,36               |
| 28,62        | 26,75        | 1,87       | 1,82               |
| 30,81        | 26,69        | 4,12       | 2,92               |
| 34,63        | 27,31        | 7,32       | 4,47               |
| 35,19        | 26,56        | 8,63       | 4,68               |
| 35,56        | 25,81        | 9,75       | 4,87               |
| 36,38        | 25,19        | 11,2       | 5,07               |
| 42,19        | 29,56        | 12,6       | 5,40               |
| 44,5         | 29,5         | 15         | 5,87               |
| 46,88        | 29,5         | 17,4       | 6,13               |
| 48,88        | 29,5         | 19,4       | 6,35               |
| 50,69        | 29,62        | 21,1       | 6,62               |
| 52,25        | 29,69        | 22,6       | 6,85               |
| 54,06        | 29,87        | 24,2       | 7,01               |
| 55,75        | 30,06        | 25,7       | 7,25               |

Pada tabel di atas menunjukkan tren linear naik yang nilai  $V_{oc}$  nya meningkat dari 0,36 V (pada  $\Delta T = 0,56^\circ\text{C}$ ) hingga mencapai puncaknya di angka 7,25 V (pada  $\Delta T 25,69^\circ\text{C}$ ). Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memvariasikan nilai hambatan beban pada kondisi selisih suhu ( $\Delta T$ ) yang dijaga relatif konstan.



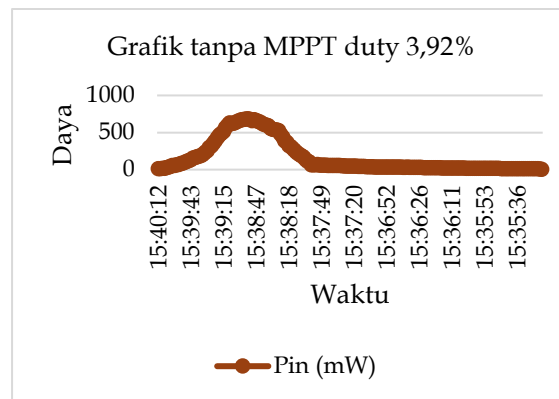
Tabel 2. Pengujian variasi beban

| $T_H$<br>(C) | $T_C$<br>(C) | $\Delta T$ | Beban<br>(ohm) | V<br>(volt) | I<br>(mA) | P<br>(mW) |
|--------------|--------------|------------|----------------|-------------|-----------|-----------|
| 52,46        | 33,2         | 19,3       | 0,5            | 0,08        | 127,6     | 10,2      |
| 53,25        | 33,7         | 19,5       | 1              | 0,12        | 126,9     | 15,2      |
| 54,19        | 34,3         | 19,9       | 5              | 0,456       | 115       | 52,4      |
| 54,98        | 34,8         | 20,2       | 10             | 1,12        | 96,2      | 107,7     |
| 56,72        | 35,9         | 20,8       | 22             | 1,64        | 79,7      | 130,7     |
| 57,51        | 36,4         | 21,1       | 100            | 3,088       | 41,3      | 127,5     |
| 58,3         | 36,9         | 21,4       | 220            | 3,764       | 23,3      | 87,7      |
| 59,25        | 37,5         | 21,8       | 1000           | 4,428       | 6,4       | 28,3      |

Berdasarkan hasil pengujian, daya keluaran TEG dipengaruhi oleh nilai hambatan beban. Daya maksimum sebesar 130,7 mW diperoleh pada beban 22  $\Omega$ , sedangkan pada beban yang lebih kecil atau lebih besar, daya keluaran menurun.

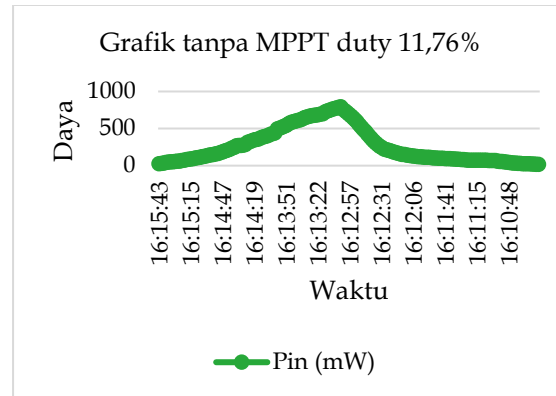
#### B. Hasil Pengujian Sistem tanpa MPPT

Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban resistor sebesar 80 ohm pada nilai duty cycle 3,92% dan 11,76%.



Gambar 4. Grafik duty 3,92%

Berdasarkan grafik di atas, daya keluaran tanpa MPPT pada duty cycle 3,92% mengalami kenaikan hingga mencapai puncak sebesar 686,08 mW, kemudian menurun secara bertahap dan cenderung stabil pada nilai yang lebih rendah. Berdasarkan Tabel, daya rata-rata yang dihasilkan sebesar 161,07 mW dengan arus rata-rata 40 mA dan tegangan rata-rata 2,6 V.

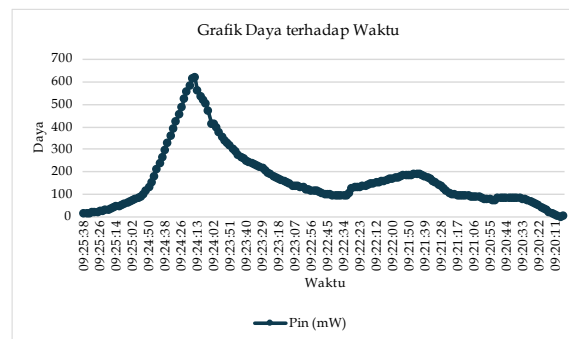


Gambar 5. Grafik duty 11,76%

Berdasarkan grafik di atas, daya keluaran tanpa MPPT pada duty cycle 11,76% juga meningkat hingga mencapai puncak sebesar 793,81 mW, kemudian menurun dan stabil seiring waktu. Berdasarkan Tabel, daya rata-rata yang dihasilkan sebesar 264,84 mW dengan arus rata-rata 63,51 mA dan tegangan rata-rata 3,37 V.

### C. Hasil Pengujian Algoritma P&O

Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban resistor sebesar 80 ohm. Berdasarkan data pengujian,  $\Delta T$  tertinggi sebesar 56,8 °C dengan  $\Delta T$  rata-rata 27,7 °C. Pada pengujian ini diperoleh daya puncak sebesar 617,9 mW dan daya rata-rata sebesar 166,06 mW.



Gambar 6. Grafik pengujian menggunakan algoritma P&amp;O

Grafik menunjukkan bahwa daya keluaran TEG berubah secara dinamis selama pengujian, dengan nilai maksimum terjadi pada awal pengujian dan kemudian menurun seiring berkurangnya perbedaan suhu pada modul TEG. Di bawah ini merupakan cuplikan data hasil pengujian algoritma P&O.

Tabel 3. Cuplikan data pengujian algoritma P&amp;O

| Waktu    | Duty | $\Delta T$ | Pin (mW) |
|----------|------|------------|----------|
| ...      | ...  | ...        | ...      |
| 09:20:46 | 9    | 21,3       | 84,8     |
| 09:20:44 | 9    | 21,2       | 84,1     |
| 09:20:42 | 9    | 21,4       | 84,7     |
| 09:20:40 | 9    | 21,4       | 84,5     |
| 09:20:38 | 9    | 21,3       | 84,6     |
| 09:20:37 | 9    | 21,2       | 83,9     |

| Waktu    | Duty | $\Delta T$ | Pin (mW) |
|----------|------|------------|----------|
| ...      | ...  | ...        | ...      |
| 09:20:08 | 20   | 4,1        | 2        |
| 09:20:06 | 20   | 4,4        | 2,4      |

Berdasarkan tabel cuplikan data di atas, algoritma P&O memiliki waktu respon transien selama 31 detik. Selama proses pelacakan, duty cycle berubah dari 20% menjadi 9%, sehingga Pin meningkat dari 2,4 mW menjadi 83,9 mW. Pada kondisi MPP, algoritma menghasilkan error rata-rata 0,29 mW, yang menunjukkan kemampuan mempertahankan titik daya maksimum dengan fluktuasi yang kecil. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memvariasikan nilai hambatan beban.

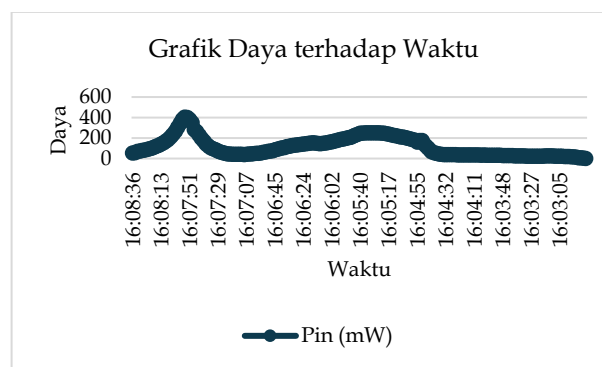
Tabel 4. Pengujian variasi beban algoritma P&amp;O

| $T_H$ (C) | $T_C$ (C) | $\Delta T$ | Beban (ohm) | V (volt) | I (mA) | P (mW) |
|-----------|-----------|------------|-------------|----------|--------|--------|
| 55,95     | 37,3      | 18,7       | 0,5         | 0,556    | 108,7  | 60,4   |
| 56,4      | 37,6      | 18,8       | 1           | 0,372    | 107,6  | 40     |
| 57,75     | 38,5      | 19,3       | 5           | 0,384    | 10     | 38,4   |
| 58,65     | 39,1      | 19,6       | 10          | 0,544    | 96,2   | 52,3   |
| 60,3      | 40,2      | 20,1       | 22          | 1,3      | 86     | 111,8  |
| 60,9      | 40,6      | 20,3       | 100         | 2,74     | 49,2   | 134,8  |
| 61,35     | 40,9      | 20,5       | 220         | 3,608    | 34,2   | 123,4  |
| 61,8      | 41,2      | 20,6       | 1000        | 4,352    | 18,6   | 80,9   |

Berdasarkan tabel di atas, algoritma P&O menunjukkan karakteristik pelacakan yang paling agresif. Proses pencocokan impedansinya berhasil menembus puncak daya sebesar 134,8 mW pada hambatan 100 ohm. Selain itu, algoritma ini terbukti sangat andal dalam menangani fluktuasi beban besar, di mana P&O mampu menahan transfer energi di angka 80,9 mW saat diuji pada hambatan ekstrem 1000 ohm.

#### D. Hasil Pengujian Algoritma InC

Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban resistor sebesar 80 ohm. Berdasarkan data pengujian,  $\Delta T$  tertinggi sebesar 42,26°C dengan  $\Delta T$  rata-rata 20,56 °C. Pada pengujian ini diperoleh daya puncak sebesar 403,9 mW dan daya rata-rata sebesar 111,97 mW.



Gambar 7. Grafik pengujian menggunakan algoritma InC



Grafik di atas menunjukkan bahwa daya keluaran TEG berfluktuasi selama pengujian. Daya meningkat hingga mencapai nilai maksimum, kemudian menurun secara bertahap hingga akhir pengujian. Di bawah ini merupakan cuplikan data hasil pengujian algoritma InC.

Tabel 5. Cuplikan data pengujian algoritma InC

| Waktu           | Duty | $\Delta T$ | Pin (mW) |
|-----------------|------|------------|----------|
| ...             | ...  | ...        | ...      |
| <b>16:03:31</b> | 20   | 20,6       | 22,5     |
| <b>16:03:28</b> | 20   | 20,6       | 22,4     |
| <b>16:03:27</b> | 20   | 20,8       | 22,7     |
| <b>16:03:25</b> | 20   | 20,7       | 22,6     |
| <b>16:03:23</b> | 20   | 20,4       | 22,3     |
| <b>16:03:21</b> | 20   | 20,8       | 22,8     |
| ...             | ...  | ...        | ...      |
| ...             | ...  | ...        | ...      |
| <b>16:02:45</b> | 20   | 4,1        | 2,8      |
| <b>16:02:43</b> | 20   | 4,4        | 1,1      |

Berdasarkan tabel cuplikan data di atas, algoritma InC memiliki waktu respon transien selama 38 detik. Selama proses pelacakan, duty cycle diatur pada 20%, sehingga Pin meningkat dari 1,1 mW menjadi 22,5 mW. Pada kondisi MPP, algoritma menghasilkan error rata-rata sebesar 0,15 mW, yang menunjukkan kemampuan mempertahankan titik daya maksimum dengan fluktuasi yang kecil. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memvariasikan nilai hambatan beban.

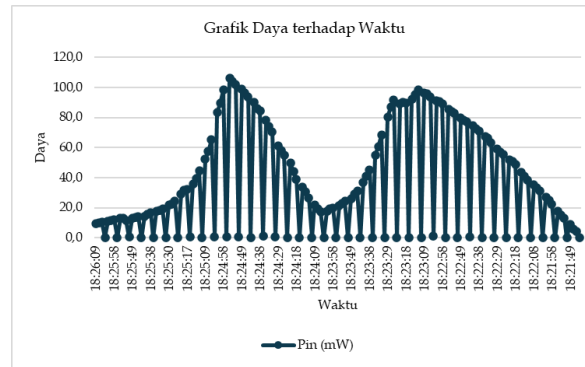
Tabel 6. Pengujian variasi beban algoritma InC

| $T_H$<br>(C) | $T_C$<br>(C) | $\Delta T$ | Beban<br>(ohm) | V<br>(volt) | I<br>(mA) | P<br>(mW) |
|--------------|--------------|------------|----------------|-------------|-----------|-----------|
| <b>50,1</b>  | 33,4         | 16,7       | 0,5            | 0,56        | 66,8      | 37,4      |
| <b>50,85</b> | 33,9         | 17         | 1              | 0,572       | 62,6      | 35,8      |
| <b>51,3</b>  | 34,2         | 17,1       | 5              | 0,664       | 57,4      | 38,1      |
| <b>52,2</b>  | 34,8         | 17,4       | 10             | 0,736       | 54,9      | 40,4      |
| <b>55,65</b> | 37,1         | 18,6       | 22             | 1,348       | 46,1      | 62,1      |
| <b>56,85</b> | 37,9         | 19         | 100            | 1,376       | 47        | 64,7      |
| <b>57,45</b> | 38,3         | 19,2       | 220            | 2,336       | 24,8      | 57,9      |
| <b>58,05</b> | 38,7         | 19,4       | 1000           | 2,712       | 18,1      | 49,1      |

Algoritma InC mencatatkan puncak daya sebesar 64,7 mW. Meskipun puncaknya tidak setinggi P&O, InC menghasilkan kurva karakteristik daya yang lebih landai dan stabil. Keunggulan sistem ini terlihat jelas pada rentang beban yang sangat rendah (1 ohm), di mana InC terbukti mampu menyelamatkan daya hingga dua kali lipat lebih besar dibandingkan sistem tanpa MPPT.

#### E. Hasil Pengujian Algoritma FOCV

Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban resistor sebesar 80 ohm. Berdasarkan data pengujian,  $\Delta T$  tertinggi sebesar  $17,52^\circ\text{C}$  dengan daya keluaran sebesar 83,3 mW dan  $\Delta T$  rata-rata pengujian  $12,13^\circ\text{C}$ . Pada pengujian ini diperoleh daya puncak sebesar 106,1 mW dan daya rata-rata sebesar 37,6 mW.



Gambar 8. Grafik pengujian menggunakan algoritma FOCV

Grafik di atas menunjukkan bahwa daya keluaran TEG berfluktuasi selama pengujian. Penurunan daya secara periodik terjadi akibat proses sampling tegangan open-circuit ( $V_{oc}$ ), sedangkan setelah sampling selesai daya kembali meningkat hingga titik operasi berikutnya. Di bawah ini merupakan cuplikan data hasil pengujian algoritma FOCV.

Tabel 7. Cuplikan data pengujian algoritma FOCV

| Waktu    | Duty | $\Delta T$ | Pin (mW) |
|----------|------|------------|----------|
| ...      | ...  | ...        | ...      |
| ...      | ...  | ...        | ...      |
| 18:22:02 | 50   | 9,62       | 36,3     |
| 18:22:00 | 47   | 9,88       | 32,6     |
| 18:21:58 | 44   | 9,78       | 29,5     |
| 18:21:56 | 0    | 9,58       | 0        |
| 18:21:56 | 40   | 9,67       | 23,8     |
| 18:21:54 | 37   | 9,46       | 20,9     |
| 18:21:52 | 33   | 9,41       | 17,8     |
| 18:21:49 | 0    | 9,22       | 0        |
| ...      | ...  | ...        | ...      |

Berdasarkan tabel cuplikan data di atas, algoritma FOCV memiliki waktu respons sekitar 6–7 detik setelah proses sampling tegangan open-circuit ( $V_{oc}$ ). Setelah sampling, sistem kembali beroperasi pada tegangan VMPP yang telah ditentukan. Namun, proses sampling  $V_{oc}$  menyebabkan penurunan daya sesaat akibat pemutusan aliran daya ke beban secara berkala. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan memvariasikan nilai hambatan beban.

Tabel 8. Pengujian variasi beban algoritma FOCV

| $T_H$<br>(C) | $T_C$<br>(C) | $\Delta T$ | Beban<br>(ohm) | V<br>(volt) | I<br>(mA) | P<br>(mW) |
|--------------|--------------|------------|----------------|-------------|-----------|-----------|
| 46,2         | 30,8         | 15,4       | 0,5            | 0,516       | 70,1      | 36,2      |
| 46,95        | 31,3         | 15,65      | 1              | 0,552       | 67,8      | 37,4      |
| 47,85        | 31,9         | 15,95      | 5              | 0,548       | 66,8      | 36,6      |
| 48,6         | 32,4         | 16,2       | 10             | 0,568       | 70,4      | 40        |
| 50,25        | 33,5         | 16,75      | 22             | 1,404       | 52,2      | 73,3      |

| $T_H$<br>(C) | $T_C$<br>(C) | $\Delta T$ | Beban<br>(ohm) | V<br>(volt) | I<br>(mA) | P<br>(mW) |
|--------------|--------------|------------|----------------|-------------|-----------|-----------|
| 51,15        | 34,1         | 17,05      | 100            | 2,452       | 27        | 66,2      |
| 51,9         | 34,6         | 17,3       | 220            | 2,884       | 17,2      | 49,6      |
| 52,8         | 35,2         | 17,6       | 1000           | 3,444       | 5         | 17,2      |

Kinerja algoritma FOCV menunjukkan tren kestabilan pelacakan yang serupa dengan InC, dengan perolehan titik puncak daya mencapai 73,3 mW. Algoritma ini juga secara konsisten menstabilkan transfer energi pada beban rendah.

#### F. Hasil Pengujian Charging

Pengujian pengisian aki VRLA menggunakan kondisi duty cycle statis dilakukan selama 5 menit dengan mengunci nilai duty cycle konverter secara konstan pada angka 3,92% dan 11,76% tanpa adanya algoritma MPPT.

Tabel 9. Pengujian *charging* menggunakan duty 3,92%  
**Duty cycle 3,92%**

| Waktu<br>(s) | $V_{in}$<br>(V) | $I_{in}$<br>(mA) | $P_{in}$<br>(mW) | $V_{aki}$<br>(V) | $I_{aki}$<br>(mA) | $P_{aki}$<br>(mW) |
|--------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 0            | 1,03            | 0,8              | 0,82             | 11,89            | 0                 | 0                 |
| 1            | 2,51            | 1                | 2,51             | 11,89            | 0,1               | 1                 |
| 2            | 4,14            | 0,8              | 3,31             | 11,89            | 0,3               | 4                 |
| 3            | 2,79            | 0,4              | 1,12             | 11,89            | 0,3               | 6                 |
| 4            | 3,7             | 0,7              | 2,59             | 11,89            | 0,3               | 4                 |
| 5            | 4,75            | 1,3              | 6,18             | 11,9             | 0,1               | 1                 |

Berdasarkan hasil pengujian tanpa MPPT (duty cycle 3,92%), tegangan beban meningkat dari 11,89 V menjadi 11,90 V selama 5 menit. Arus pengisian berkisar 0,1–0,3 mA, sedangkan daya mencapai nilai maksimum 6 mW pada menit ke-3.

Tabel 10. Pengujian *charging* menggunakan duty 11,76%  
**Duty cycle 11,76%**

| Waktu<br>(s) | $V_{in}$<br>(V) | $I_{in}$<br>(mA) | $P_{in}$<br>(mW) | $V_{aki}$<br>(V) | $I_{aki}$<br>(mA) | $P_{aki}$<br>(mW) |
|--------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 0            | 0,57            | 0,3              | 0,17             | 11,89            | 0,3               | 4                 |
| 1            | 4,54            | 5,6              | 25,4             | 11,9             | 1,4               | 10                |
| 2            | 5,36            | 7,5              | 40,17            | 11,9             | 1,8               | 21                |
| 3            | 3,66            | 4,1              | 15,05            | 11,9             | 0,3               | 4                 |
| 4            | 3,2             | 3,6              | 12,95            | 11,91            | 0,5               | 6                 |

|   |      |     |      |       |     |   |
|---|------|-----|------|-------|-----|---|
| 5 | 1,68 | 1,6 | 4,03 | 11,91 | 0,5 | 4 |
|---|------|-----|------|-------|-----|---|

Pada pengujian tanpa MPPT dengan duty cycle 11,76%, tegangan meningkat dari 11,89 V menjadi 11,91 V selama 5 menit. Arus mencapai 1,8 mA, sedangkan daya maksimum sebesar 21 mW diperoleh pada menit ke-2.

Hasil pengujian pengisian aki VRLA menggunakan algoritma Perturb and Observe dilakukan dengan durasi yang sama yaitu 5 menit.

Tabel 11. Pengujian charging menggunakan algoritma P&O

| Waktu (m) | Duty (%) | Vin (V) | Iin (mA) | Pin (mW) | Vaki (V) | Iaki (mA) | Paki (mW) |
|-----------|----------|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0         | 42       | 1,44    | 12,3     | 17,76    | 11,92    | 0,7       | 8,34      |
| 1         | 59       | 1,71    | 28,7     | 49,02    | 11,94    | 2,2       | 26,27     |
| 2         | 39       | 3,38    | 34,4     | 116,27   | 11,98    | 7         | 83,86     |
| 3         | 60       | 2,92    | 60,7     | 177      | 12,03    | 11        | 132,33    |
| 4         | 65       | 2,35    | 59,3     | 139,24   | 12,02    | 8,5       | 102,17    |
| 5         | 66       | 1,74    | 36,5     | 63,66    | 12       | 3,8       | 45,60     |

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan algoritma P&O, tegangan aki meningkat dari 11,92 V menjadi 12,00 V selama 5 menit. Duty cycle berubah secara dinamis pada rentang 39%–66%, dengan arus maksimum 11 mA dan daya maksimum 132,33 mW pada menit ke-3.

Hasil pengujian pengisian aki VRLA menggunakan algoritma Incremental Conductance dilakukan dengan durasi yang sama yaitu 5 menit.

Tabel 12. Pengujian charging menggunakan algoritma InC

| Waktu (m) | Duty (%) | Vin (V) | Iin (mA) | Pin (mW) | Vaki (V) | Iaki (mA) | Paki (mW) |
|-----------|----------|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0         | 25       | 1,808   | 6,4      | 11,6     | 9,84     | 0,6       | 5,9       |
| 1         | 25       | 4,708   | 24,3     | 114,41   | 10,016   | 8,7       | 87,1      |
| 2         | 25       | 4,72    | 24,4     | 115,21   | 10,028   | 9,1       | 91,3      |
| 3         | 25       | 4,708   | 24,3     | 114,41   | 10,016   | 8,7       | 87,1      |
| 4         | 31       | 3,32    | 21,1     | 70,1     | 9,968    | 5,2       | 51,8      |
| 5         | 32       | 1,536   | 8,2      | 12,6     | 9,884    | 0,6       | 5,9       |

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan algoritma INC, tegangan aki meningkat dari 9,84 V menjadi 9,884 V selama 5 menit. Duty cycle berubah secara dinamis pada rentang 25%–32%, dengan arus maksimum 9,1 mA dan daya maksimum 91,3 mW pada menit ke-2.

Hasil pengujian pengisian aki VRLA menggunakan algoritma Fractional Open Circuit Voltage dilakukan dengan durasi yang sama yaitu 5 menit.

Tabel 13. Pengujian charging menggunakan algoritma FOCV

| Waktu (m) | Duty (%) | V <sub>in</sub> (V) | I <sub>in</sub> (mA) | P <sub>in</sub> (mW) | V <sub>aki</sub> (V) | I <sub>aki</sub> (mA) | P <sub>aki</sub> (mW) |
|-----------|----------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0         | 0        | 2,752               | 0,1                  | 0,3                  | 9,732                | 0,4                   | 3,9                   |
|           | 67       | 1,524               | 37,5                 | 57,2                 | 9,888                | 4,4                   | 43,5                  |
| 1         | 0        | 3,096               | 0                    | 0                    | 9,8                  | 0,3                   | 2,9                   |
|           | 66       | 1,528               | 35,2                 | 53,8                 | 9,848                | 3,5                   | 34,5                  |
| 2         | 0        | 4,872               | 0                    | 0                    | 9,892                | 0,3                   | 3                     |
|           | 69       | 2,416               | 68,8                 | 166                  | 10,016               | 12,7                  | 127                   |
| 3         | 0        | 3,172               | 0,4                  | 1,3                  | 9,888                | 0,2                   | 2                     |
|           | 59       | 1,572               | 30,5                 | 47,9                 | 9,92                 | 3,2                   | 31,7                  |
| 4         | 0        | 3,188               | 0,2                  | 0,6                  | 9,892                | 0,3                   | 3                     |
|           | 59       | 1,572               | 30,5                 | 47,9                 | 9,92                 | 3,2                   | 31,7                  |
| 5         | 0        | 3,564               | 0                    | 0                    | 9,928                | 0,4                   | 4                     |
|           | 59       | 1,816               | 36,3                 | 65,9                 | 9,952                | 4,9                   | 48,8                  |

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan algoritma FOCV, tegangan aki meningkat dari 9,732 V menjadi 9,928 V selama 5 menit. Duty cycle berubah secara dinamis pada rentang 59%–69%, dengan arus tertinggi 12,7 mA dan daya tertinggi 127 mW pada menit ke-2.

### G. Perbandingan kinerja sistem

Perbandingan kinerja dilakukan pada kondisi  $\Delta T$  yang setara, yaitu 12 °C, untuk mengurangi pengaruh variasi suhu selama pengujian. Pada kondisi tersebut, sistem tanpa MPPT menghasilkan daya sebesar 27,6 mW, sedangkan algoritma P&O, INC, dan FOCV menghasilkan daya masing-masing sebesar 30,5 mW, 32,3 mW, dan 39,3 mW. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh algoritma MPPT mampu meningkatkan ekstraksi daya dibandingkan sistem tanpa MPPT. Selain itu, FOCV memberikan peningkatan daya terbesar, INC memiliki stabilitas pelacakan terbaik, sedangkan P&O unggul dalam kecepatan mencapai titik daya maksimum.

## PENUTUP

### A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, implementasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) mampu meningkatkan ekstraksi daya Thermoelectric Generator (TEG) berbasis biomassa sekam padi sehingga menghasilkan kinerja yang lebih baik dibandingkan sistem tanpa MPPT. Pada kondisi  $\Delta T$  yang setara, algoritma P&O, INC, dan FOCV meningkatkan daya keluaran masing-masing sebesar 10,5%, 17,02%, dan 42,39%. Dari ketiga algoritma tersebut, P&O memiliki waktu respons tercepat (31 detik), InC menunjukkan stabilitas terbaik (error 0,15 mW), sedangkan FOCV memberikan peningkatan daya tertinggi meskipun mengalami penurunan daya sesaat akibat proses sampling tegangan open-circuit.

### B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan meningkatkan kestabilan pembakaran biomassa dengan penambahan blower serta perawatan rutin pada penghantar panas agar perpindahan kalor ke modul TEG lebih optimal. Selain itu, algoritma MPPT hibrida dapat dikembangkan untuk



meningkatkan kinerja pelacakan daya, serta sistem pendingin sisi dingin TEG perlu ditingkatkan agar selisih suhu ( $\Delta T$ ) tetap tinggi sehingga daya keluaran dapat lebih optimal.

## REFERENSI

- Anwar, M. C. (2017). IMPLEMENTASI DC/DC TIPE SEPIC PADA GENERATOR TERMOELEKTRIK MENGGUNAKAN KONTROL MPPT. Universitas Jember.
- Cahyo, I., & Aji, W. (2021). Rancang Bangun Sistem Pompa Air Tenaga Surya Skala Rumah Tangga menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan Metode Algoritma Perturb and Observe untuk Memaksimalkan Daya. *Jurnal Teknik Elektro*, 10, 629–638.
- Lapananda, N. F., Arbie, A., Yunus, M., Latief, M. F., Kurniasari, S., & Meidji, I. U. (2024). The Effect of Temperature Differences on the TEG-Based Conversion of Thermal Energy into Electrical Energy. *Thermal Energy into Electrical Energy. Journal of Science and Science Education*, 5(2), 186–190. <https://doi.org/10.29303/jossed.v5i2.9170>
- Safitri Madi, N., Arbie, A., Fachrul Latief, M., (2025). Konversi Energi Termal Hasil Pembakaran Limbah Batang Jagung (*Zea mays*) Menjadi Energi Listrik Menggunakan Sistem TEG (Conversion of Thermal Energy from Corn Stalk (*Zea mays*) Waste Combustion into Electrical Energy Using a TEG System). In *Research Review Jurnal Ilmiah Multidisiplin* (Vol. 4, Issue 1).
- Suliono, Haris, E., Rachmatullah, & Al Gifaris, A. R. (2019). PEMANFAATAN BRIKET SEKAM PADI SEBAGAI PENGHASIL PANAS PADA KOMPOR GENERATOR TERMOELEKTRIK UNTUK PENERANGAN PEDAGANG KAKI LIMA.