



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)*

Nur Safitri Madi¹, Asri Arbie², Muh Fachrul Latief³

^{1,2,3}Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo
wakidenicha@gmail.com¹, asriarbie@yahoo.com², muh.fachrul@ung.ac.id³

Article Info

Article history:

Received: 25 Februari 2025

Revised: 25 Maret 2025

Accepted: 26 Maret 2025

Keywords:

Biomass

Thermoelectric

Corn Stalk

Renewable Energy

Thermoelectric Generator (TEG)

Kata kunci:

Biomassa

Termoelektrik

Batang Jagung

Energi Terbarukan

Thermoelectric Generator (TEG)

Abstract

The increasing demand for electricity, environmental pollution, and global warming are major challenges today. One potential solution is the utilization of biomass as an alternative energy source. This study explores the conversion of agricultural waste, specifically corn stalks, into electrical energy using a Thermoelectric Generator (TEG) on a small scale. An experimental method was employed with series and Paralel configurations to analyze system efficiency. The results indicate that after 90 minutes, the maximum power output during supercapacitor charging was 0.684 W for the series configuration and 0.301 W for the Paralel configuration. Without supercapacitor charging, the power output was 0.4118 W for the series and 0.175 W for the Paralel configuration. In terms of converted energy, the series configuration produced 33.7 Wh, while the Paralel configuration generated 35.75 Wh. These findings suggest that although the series configuration is more efficient in generating peak power, the Paralel configuration yields a higher total energy conversion. This study provides insights into biomass utilization as a sustainable energy source in Gorontalo.

Abstrak

Peningkatan konsumsi listrik, polusi lingkungan, dan pemanasan global merupakan tantangan utama saat ini. Salah satu solusi potensial adalah pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif. Penelitian ini mengeksplorasi konversi limbah pertanian, khususnya batang jagung, menjadi energi listrik menggunakan Thermoelectric Generator (TEG) dalam skala kecil. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan konfigurasi rangkaian seri dan paralel untuk menganalisis efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dalam waktu 90 menit, daya maksimum yang dihasilkan saat pengisian superkapasitor adalah 0,684 W untuk konfigurasi seri dan 0,301 W untuk paralel. Tanpa pengisian superkapasitor, daya yang dihasilkan adalah 0,4118 W untuk seri dan 0,175 W untuk paralel. Dari segi energi yang dikonversi, konfigurasi seri menghasilkan 33,7 Wh, sedangkan paralel menghasilkan 35,75 Wh. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun konfigurasi seri lebih optimal dalam menghasilkan daya puncak, konfigurasi paralel lebih unggul dalam total energi yang dikonversi. Studi ini memberikan wawasan tentang pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi berkelanjutan di Gorontalo.

Corresponding Author:

Nur Safitri Madi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Gorontalo
wakidenicha@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi listrik, pencemaran lingkungan, dan pemanasan global merupakan tantangan utama yang dihadapi dunia saat ini (Hakim et al., 2024). Krisis energi yang semakin parah serta degradasi lingkungan akibat eksploitasi sumber daya energi fosil menuntut pengembangan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Karmal et al., 2022). Salah satu potensi sumber energi terbarukan yang dapat dikembangkan di Gorontalo adalah biomassa yang berasal dari limbah pertanian (Mu'jizat et al., 2023; Katili & Retnowati, 2024). Biomassa memiliki kandungan energi yang berasal dari komponen organik seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Suryani et al., 2020; Holiza et al., 2024). Namun, perbandingan kandungan energi biomassa relatif lebih kecil dibandingkan dengan bahan bakar fosil, sehingga diperlukan teknologi konversi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi penggunaannya (Khaidir, 2016).

Salah satu teknologi yang berpotensi mengoptimalkan pemanfaatan energi panas dari biomassa adalah termoelektrik generator (TEG) (Berek, 2023). Teknologi ini memungkinkan konversi langsung energi panas menjadi energi listrik melalui efek Seebeck, di mana perbedaan temperatur antara dua sisi material termoelektrik menghasilkan arus listrik (Rimbawati et al., 2022). TEG telah digunakan dalam berbagai aplikasi industri untuk memanfaatkan limbah panas menjadi energi listrik (Fahriani et al., 2022), termasuk dalam sistem pembangkit listrik skala kecil yang bersifat ramah lingkungan, aman, dan memiliki umur pakai yang panjang. Oleh karena itu, penerapan sistem TEG dalam memanfaatkan limbah biomassa, khususnya batang jagung, dapat menjadi solusi inovatif dalam memenuhi kebutuhan energi alternatif bagi masyarakat.

Jagung (*Zea mays*) merupakan salah satu tanaman pangan utama di dunia, selain beras dan gandum. Di Indonesia, limbah batang jagung sering kali terbuang tanpa pemanfaatan yang optimal (Abdussamad et al., 2024), padahal batangnya mengandung komponen yang berpotensi digunakan sebagai bahan bakar biomassa (Hidayat et al., 2022). Batang jagung memiliki kadar holoselulosa sebesar 70,88%, alfa-selulosa 38,83%, lignin 19,95%, dan pektin 1,42% (Afriyanti et al., 2021), dengan nilai kalor mencapai 4370 kkal/kg (Widodo et al., 2007). Dengan karakteristik ini, batang jagung dapat menjadi sumber energi alternatif yang cukup potensial jika dikonversi menggunakan teknologi yang tepat.

Konsep termoelektrik generator pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johann Seebeck, pada tahun 1821. Seebeck menemukan bahwa jika dua jenis logam yang berbeda dihubungkan dalam satu rangkaian tertutup dan diberikan perbedaan suhu pada kedua ujungnya, maka akan muncul arus listrik akibat gradien temperatur tersebut. Fenomena ini dikenal sebagai efek Seebeck, yang kemudian diterapkan dalam teknologi termoelektrik modern. Dalam sistem TEG, perbedaan suhu antara sisi panas (hot side) dan sisi dingin (cold side) menciptakan perbedaan potensial listrik yang dapat dikonversi menjadi arus searah (DC). Sebaliknya, jika sistem dialiri arus listrik, maka efek sebaliknya, yang dikenal sebagai efek Peltier, akan terjadi, di mana satu sisi akan menyerap panas (menjadi dingin) dan sisi lainnya akan melepaskan panas (Yildiz & Coogler, 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem konversi energi dari limbah batang jagung menjadi energi listrik menggunakan teknologi TEG. Secara spesifik, penelitian ini akan mengevaluasi efisiensi konversi energi panas dari pembakaran batang jagung menjadi energi listrik, menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja TEG dalam sistem biomassa, serta mengkaji potensi implementasi sistem ini dalam skala rumah tangga sebagai solusi energi alternatif.

Implikasi dari penelitian ini mencakup aspek teknologi, ekonomi, dan lingkungan. Dari sisi teknologi, penelitian ini dapat berkontribusi pada pengembangan sistem pembangkit listrik berbasis biomassa yang lebih efisien dan terjangkau. Dari sisi ekonomi, pemanfaatan limbah batang jagung sebagai sumber energi dapat mengurangi ketergantungan masyarakat terhadap listrik konvensional, terutama di daerah pedesaan dengan akses listrik terbatas. Dari sisi lingkungan, sistem ini dapat membantu mengurangi emisi karbon dengan menggantikan bahan bakar fosil serta mengurangi limbah pertanian yang selama ini tidak dimanfaatkan secara optimal.

Urgensi penelitian ini didasarkan pada meningkatnya kebutuhan energi serta ancaman krisis energi di masa mendatang. Pengembangan teknologi yang memanfaatkan sumber daya lokal seperti biomassa dari limbah pertanian sangat penting untuk meningkatkan ketahanan energi nasional. Dengan memanfaatkan

limbah batang jagung sebagai bahan bakar biomassa, penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi energi yang lebih berkelanjutan tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular dengan mengoptimalkan pemanfaatan limbah pertanian.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam bidang teknologi energi terbarukan, khususnya dalam pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi listrik. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan sistem pembangkit listrik skala kecil yang dapat diterapkan di berbagai daerah, terutama di wilayah yang belum sepenuhnya terjangkau oleh jaringan listrik nasional.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret 2024 di Laboratorium Fisika Universitas Negeri Gorontalo.

2.2 Alat dan Bahan

Tabel 1. Alat dan Bahan dalam Penelitian

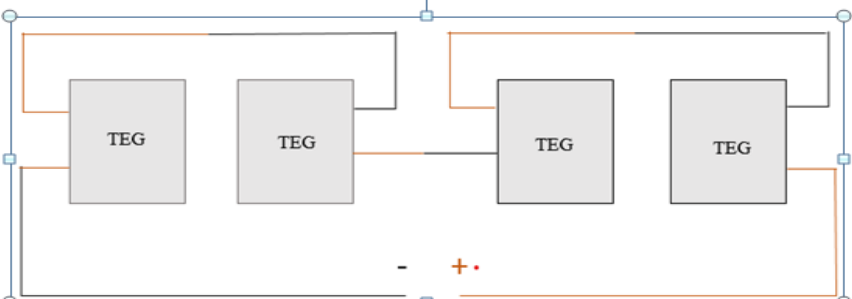
No	Nama	Fungsi
1	TEGSP-1848-27145	Mengkonversi energi panas menjadi energi listrik
2	Multimeter digital	Mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan
3	Kompore biomassa	Tempat membakar biomassa
4	Stopwatch	Mengukur waktu
5	Termometer infrared	Mengukur temperatur sisi panas TEG dan sisi dingin heatsink
6	Heatsink	Mengatasi panas yang terjadi pada saat komponen elektronika bekerja
7	Superkapasitor 500F	Menyimpan muatan yang dihasilkan
8	Limbah batang jagung	Bahan bakar

2.3 Variabel Penelitian

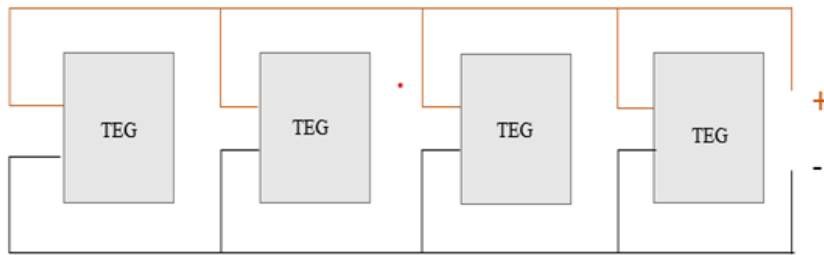
Variabel bebas adalah variabel yang nilainya mempengaruhi variabel lainnya, yaitu variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian ini yaitu waktu. Waktu merupakan durasi pengukuran selama pengambilan data yaitu setiap 3 menit dari mulainya pembakaran hingga proses pendinginan. Waktu juga digunakan untuk suhu serta hasil luaran arus dan tegangan. Adapun variabel terikat adalah variabel yang tergantung pada variabel bebas. Pada penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah tegangan dan kuat arus yang dihasilkan pada sistem konfigurasi TEG.

2.4 Pengambilan Data

Pada penelitian ini proses pengambilan data dengan cara pengambilan secara pengukuran langsung. Adapun data yang akan dikumpulkan pada proses pengukuran berlangsung yaitu tegangan dan arus kemudian data primer yang telah dikumpulkan tersebut diolah untuk mendapatkan daya listrik yang dihasilkan. Pada penelitian ini TEG akan dirangkai dengan konfigurasi seri dan paralel dengan jumlah tertentu dan menyesuaikan dengan posisi peletakan. Adapun skema rancangan susunan konfigurasi TEG sebagai berikut.



Gambar 1. Konfigurasi seri TEG

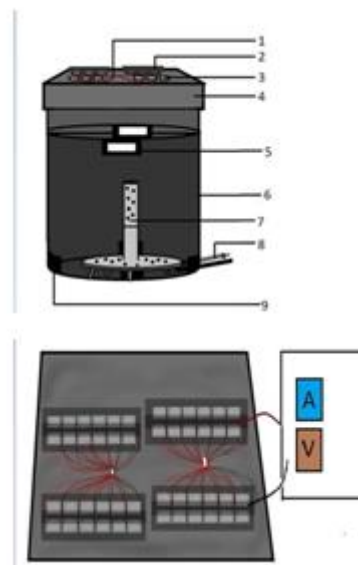


Gambar 2. Konfigurasi paralel TEG

Dalam pengambilan data ini pertama melakukan proses preparasi dengan menyiapkan kompor biomassa sebagai alat pembakaran yang terbuat dari plat serta didesain dengan wadah pada kompor tersebut. Lalu, menyiapkan wadah sebagai penghantar panas dari penggunaan bahan bakar yang berisi air 30 liter serta penutup wadah. Menyiapkan 48 keping TEG yang dirangkai seri dan paralel. Setelah itu, menyiapkan multimeter digital untuk pengukuran arus dan tegangan yang dipasang di salah satu ujung pada TEG. Lalu, termometer digital sebagai alat pengukur suhu pada rangkaian sistem TEG. Superkapasitor sebagai penyimpanan arus dan tegangan di salah satu ujung-ujung TEG, serta *heatsink* sebagai pendingin dan timbangan duduk untuk mengukur massa bahan bakar.

Selanjutnya pada proses persiapan bahan bakar dilakukan dengan cara menjemur batang jagung. Sebelum dijemur batang jagung diukur kadar airnya menggunakan *moisture* meter kemudian dijemur sampai kadar airnya berkurang hingga 6,1%. Setelah itu ditimbang sebanyak 10 kg, lalu membakar batang jagung dengan menggunakan kompor dan melakukan pengambilan data.

Pada proses pengambilan data pengukuran berlangsung setelah eceng gondok tersebut dibakar, setiap selang waktu 3 menit mengukur arus, tegangan, temperatur panas dan temperatur dingin untuk rangkaian seri setelah itu melakukan proses tersebut untuk rangkaian paralel. Adapun skema rancangan alat sebagai berikut:



Gambar 3. Rancangan Alat

Keterangan:

1. Terminal TEG kutub positif dan kutub negatif
2. Heatsink sebagai media pendingin
3. TEG
4. Medium tempat menaruh air
5. Jendela atas sebagai tempat memasukkan bahan bakar
6. Dinding kompo
7. Tempat masuk dan keluarnya udara
8. Tempat saluran udara
9. Jendela sebagai tempat mengeluarkan abu sisa pembakaran

2.5 Analisis Data

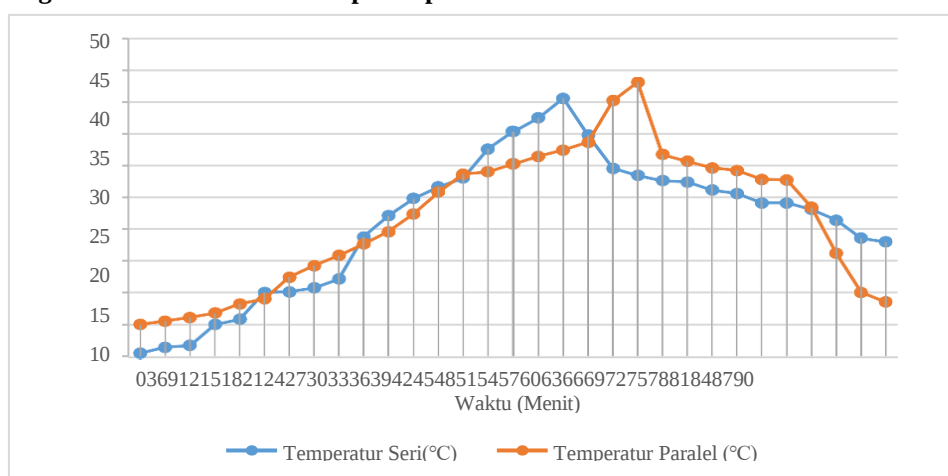
Pada penelitian ini, data yang didapat dari hasil sistem TEG dengan konfigurasi seri dan paralel dan dianalisis dengan menggunakan program *Microsoft Excel*. Hasil pengukuran tegangan output generator nilai daya didapat dari hasil perhitungan tegangan dan arus tegangan menggunakan rumus daya listrik.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini memanfaatkan sumber panas dari hasil pembakaran limbah batang jagung dengan massa 10 kg yang dibakar menggunakan kompor biomassa. Hasil rancangan alat ini menggunakan 48 keping TEG yang berukuran 40 mm × 40 mm × 3,4 mm. Sisi panas TEG ditempelkan pada bagian atas pelat dan sisi dingin ditempelkan pada 4 buah heatsink yang berukuran 30 cm × 12 cm × 3 cm dengan ketebalan 2,45 mm, heatsink berfungsi sebagai media pendingin dari TEG.

Penelitian ini dilakukan sebanyak 4 kali pengukuran, yaitu 2 untuk pengukuran konfigurasi seri dan Paralel yang menggunakan pengisian superkapasitor, dan 2 untuk pengukuran konfigurasi seri dan paralel tanpa pengisian superkapasitor. Pengukuran ini dilakukan untuk melihat perbedaan besar daya yang dihasilkan oleh pengukuran pada pengisian superkapasitor dan tanpa superkapasitor. Selain itu, superkapasitor juga digunakan untuk menyimpan muatan yang dihasilkan oleh termoelektrik generator.

3.1 Hubungan antara Waktu Terhadap Temperature



Gambar 4. Grafik Hubungan antara Waktu Terhadap Temperature

Hubungan antara waktu pembakaran dan perbedaan suhu (ΔT) menunjukkan bahwa semakin lama waktu pembakaran, maka ΔT cenderung meningkat hingga mencapai puncaknya sebelum akhirnya menurun ketika pembakaran dihentikan. Pada menit ke-0, perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin masih relatif kecil karena sistem belum mencapai kondisi stabil. Pada tahap awal ini, energi panas yang dihasilkan dari pembakaran masih dalam proses transfer ke permukaan termoelektrik generator (TEG), sehingga belum terjadi perbedaan suhu yang signifikan antara kedua sisi.

Seiring berjalannya waktu, energi panas yang dihasilkan dari pembakaran limbah batang jagung terus bertambah dan ditransfer ke sisi panas TEG, sementara sisi dingin tetap berada pada suhu yang lebih rendah karena adanya pendinginan pasif atau sistem pendingin tambahan. Akumulasi panas ini menyebabkan gradien suhu antara sisi panas dan sisi dingin semakin besar, sehingga nilai ΔT meningkat.

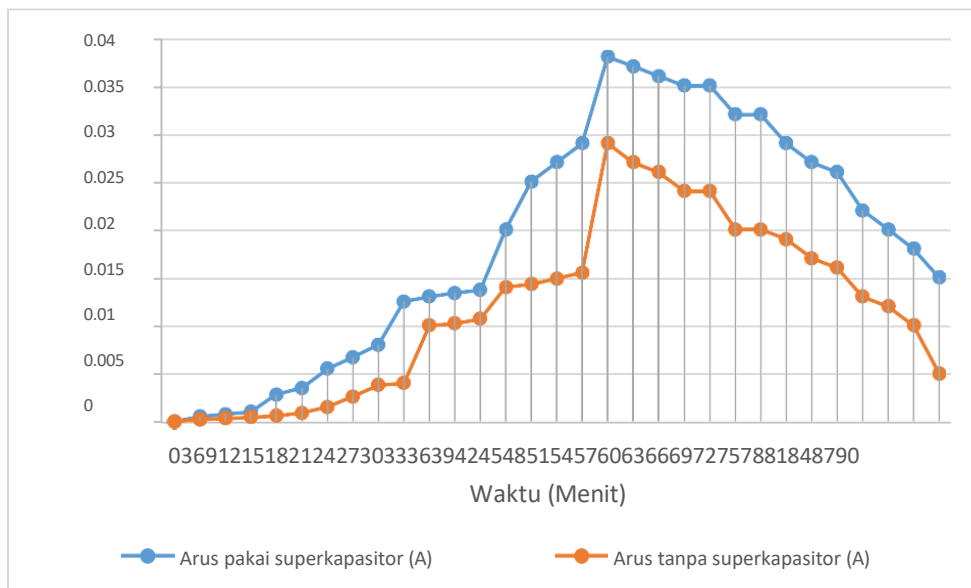
Pada konfigurasi seri, ΔT mencapai puncaknya pada menit ke-51 dengan nilai 40,4°C. Ini menunjukkan bahwa pada saat tersebut, sistem telah mencapai kondisi optimal dalam mentransfer panas dari pembakaran ke TEG dalam konfigurasi seri, sebelum akhirnya mengalami penurunan akibat penurunan intensitas pembakaran atau peningkatan pelepasan panas ke lingkungan.

Sementara itu, pada konfigurasi paralel, ΔT terus meningkat hingga mencapai puncaknya pada menit ke-60 dengan nilai 42,9°C. Perbedaan waktu pencapaian puncak antara konfigurasi seri dan paralel ini dapat disebabkan oleh perbedaan distribusi panas dalam sistem, di mana konfigurasi paralel memungkinkan penyebaran panas yang lebih merata dan mempertahankan kenaikan suhu lebih lama dibandingkan dengan konfigurasi seri.

Ketika pembakaran dihentikan, sumber energi panas berkurang secara bertahap, menyebabkan suhu pada sisi panas mulai menurun. Akibatnya, perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin (ΔT) juga mengalami penurunan. Penurunan ini terjadi karena panas yang tersimpan dalam sistem mulai dilepaskan ke lingkungan, dan tidak ada lagi suplai panas dari proses pembakaran untuk mempertahankan gradien suhu yang tinggi.

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa ΔT sangat bergantung pada durasi pembakaran serta konfigurasi rangkaian TEG yang digunakan. Konfigurasi paralel mampu mencapai ΔT yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi seri, yang menunjukkan bahwa desain sistem TEG dapat mempengaruhi efektivitas konversi energi termal menjadi energi listrik.

3.2 Hubungan antara Waktu Terhadap Kuat Arus Konfigurasi Seri



Gambar 5. Grafik Hubungan antara Waktu Terhadap Kuat Arus Konfigurasi Seri

Pada menit ke-0, sistem belum menghasilkan arus listrik baik pada konfigurasi seri yang menggunakan superkapasitor maupun yang tanpa superkapasitor. Hal ini terjadi karena pada awal pembakaran, perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin dari termoelektrik generator (TEG) masih sangat kecil sehingga belum cukup untuk menghasilkan tegangan dan arus listrik yang signifikan. Selain itu, pada tahap awal ini, sistem masih dalam proses penyesuaian suhu di mana panas dari pembakaran batang jagung mulai mengalir dan terdistribusi ke permukaan TEG.

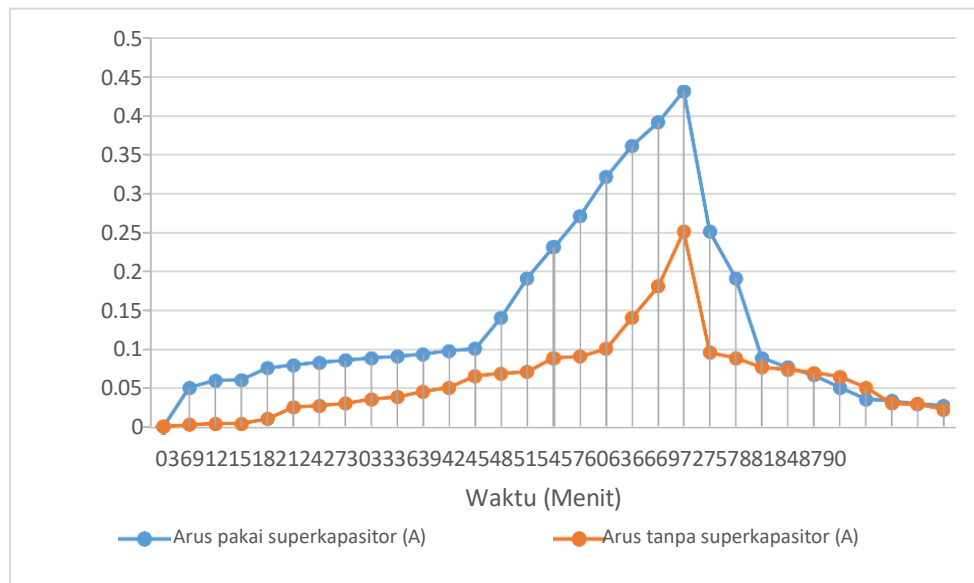
Seiring dengan bertambahnya waktu, pembakaran semakin stabil, menyebabkan suhu di sisi panas TEG meningkat lebih signifikan dibandingkan sisi dinginnya. Akibatnya, gradien suhu (ΔT) semakin besar, sehingga mulai terbentuk tegangan termoelektrik berdasarkan efek Seebeck. Pada menit ke-3, arus listrik mulai terdeteksi dengan nilai 0,005 A untuk konfigurasi yang menggunakan superkapasitor dan 0,0002 A untuk konfigurasi tanpa superkapasitor. Perbedaan ini menunjukkan bahwa superkapasitor membantu menstabilkan dan meningkatkan perolehan arus listrik lebih cepat dibandingkan sistem tanpa superkapasitor, yang memiliki respons lebih lambat dalam menghasilkan arus.

Arus listrik kemudian terus meningkat seiring dengan meningkatnya suhu akibat proses pembakaran yang berkelanjutan. Peningkatan suhu ini memperbesar perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin TEG, sehingga meningkatkan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sistem. Pada konfigurasi dengan superkapasitor, energi listrik yang dihasilkan tidak hanya langsung dikonsumsi tetapi juga disimpan dalam superkapasitor, yang kemudian dapat melepaskan energi tersebut secara lebih stabil dan efisien.

Pada menit ke-51, sistem mencapai puncak arus listrik, yaitu sebesar 0,038 A untuk konfigurasi dengan superkapasitor dan 0,029 A untuk konfigurasi tanpa superkapasitor. Nilai arus yang lebih tinggi pada sistem dengan superkapasitor menunjukkan bahwa penggunaan superkapasitor tidak hanya membantu menampung energi yang dihasilkan oleh TEG tetapi juga memperkuat output arus listriknya. Di sisi lain, sistem tanpa superkapasitor mengalami puncak arus yang lebih rendah karena energi listrik langsung dialirkan ke beban tanpa adanya penyimpanan sementara yang dapat membantu menstabilkan keluaran daya.

Setelah mencapai titik puncak, arus listrik kemungkinan akan mulai menurun ketika proses pembakaran mulai melemah, menyebabkan suhu di sisi panas TEG berangsur-angsur turun. Hal ini mengakibatkan penurunan gradien suhu (ΔT), yang secara langsung berpengaruh terhadap tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sistem. Dengan demikian, dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan superkapasitor dalam sistem konversi energi termoelektrik dapat meningkatkan efisiensi dan kestabilan arus listrik yang dihasilkan, menjadikannya solusi yang lebih optimal dalam pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi listrik.

3.3 Hubungan antara Waktu Terhadap Kuat Arus Konfigurasi Paralel



Gambar 6. Grafik Hubungan antara Waktu Terhadap Kuat Arus Konfigurasi Paralel

Pada menit ke-0, sistem belum menghasilkan arus listrik baik pada konfigurasi yang menggunakan superkapasitor maupun yang tanpa superkapasitor. Hal ini disebabkan oleh suhu awal yang masih rendah, sehingga belum terbentuk perbedaan suhu (ΔT) yang cukup besar antara sisi panas dan sisi dingin dari termoelektrik generator (TEG). Seiring waktu, pembakaran semakin stabil, menyebabkan suhu meningkat dan gradien suhu pada TEG semakin besar, sehingga mulai terjadi konversi energi panas menjadi energi listrik melalui efek Seebeck.

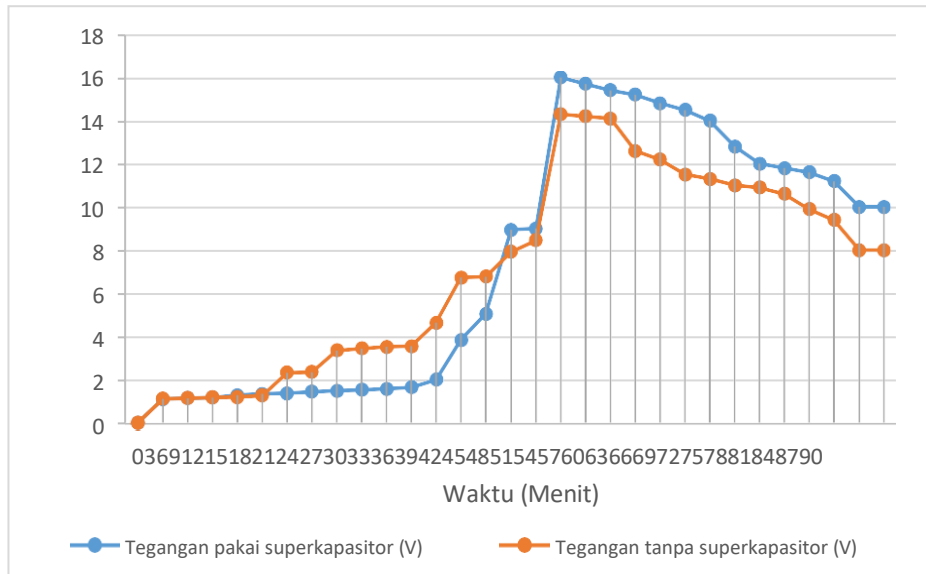
Pada menit ke-3, arus mulai terbentuk dengan nilai sebesar 0,05 A untuk konfigurasi yang menggunakan superkapasitor dan 0,0025 A untuk konfigurasi tanpa superkapasitor. Nilai arus yang lebih tinggi pada sistem dengan superkapasitor menunjukkan bahwa superkapasitor membantu dalam menstabilkan serta meningkatkan efisiensi perolehan energi listrik. Sebaliknya, sistem tanpa superkapasitor menunjukkan arus yang jauh lebih kecil, karena energi listrik langsung dialirkan ke beban tanpa adanya penyimpanan sementara yang dapat memperkuat output arus.

Seiring berjalannya waktu, suhu terus meningkat dan menyebabkan arus listrik terus naik. Pada menit ke-60, sistem mencapai puncak arus listrik dengan nilai 0,43 A pada konfigurasi yang menggunakan superkapasitor dan 0,25 A pada konfigurasi tanpa superkapasitor. Peningkatan ini menunjukkan bahwa superkapasitor mampu menyimpan energi yang dihasilkan oleh TEG dan melepaskannya secara lebih stabil, sehingga menghasilkan arus yang lebih besar dibandingkan dengan sistem tanpa superkapasitor.

Namun, setelah mencapai titik puncak, arus listrik mulai mengalami penurunan. Pada menit ke-63, arus pada konfigurasi dengan superkapasitor turun menjadi 0,25 A, sementara pada konfigurasi tanpa superkapasitor turun menjadi 0,095 A. Penurunan ini disebabkan oleh melemahnya pembakaran, yang mengakibatkan turunnya suhu pada sisi panas TEG dan berkurangnya perbedaan suhu (ΔT) antara kedua sisi. Akibatnya, efek Seebeck yang dihasilkan semakin kecil, sehingga arus listrik yang dihasilkan oleh sistem juga berkurang.

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan superkapasitor dalam sistem konversi energi termoelektrik tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga membantu dalam mempertahankan arus listrik yang lebih tinggi dalam jangka waktu yang lebih lama. Hal ini menjadikannya solusi yang lebih optimal dalam pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber energi listrik yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

3.4 Hubungan antara Waktu terhadap Tegangan Konfigurasi Seri



Gambar 7. Grafik Hubungan antara Waktu Terhadap Tegangan Konfigurasi Seri

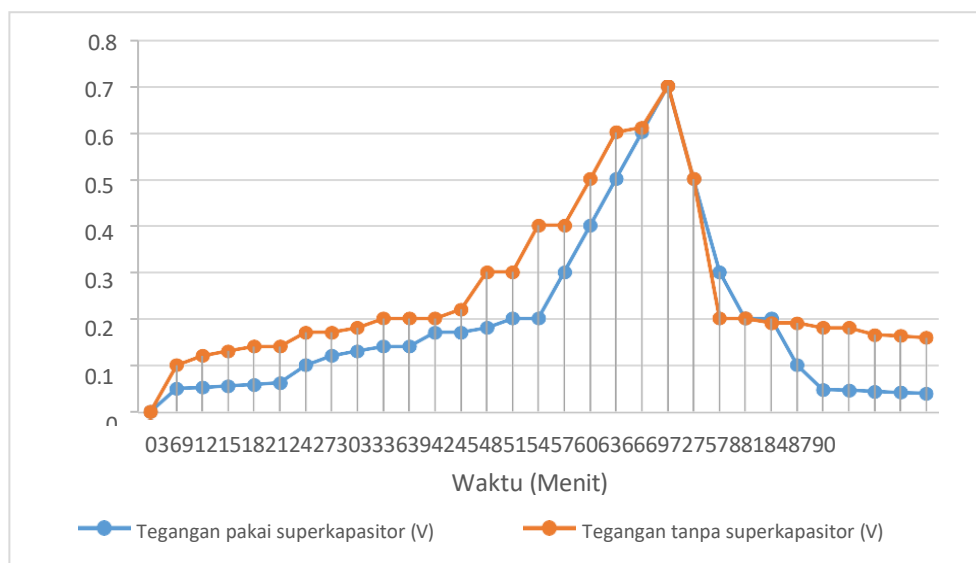
Gambar 7 menunjukkan hubungan antara waktu pembakaran dan tegangan yang dihasilkan dalam konfigurasi seri. Pada menit ke-0, belum ada tegangan yang terbentuk baik untuk sistem dengan superkapasitor maupun tanpa superkapasitor. Hal ini dikarenakan suhu awal masih rendah sehingga efek termoelektrik belum terjadi secara signifikan.

Pada menit ke-3, tegangan mulai meningkat dengan nilai 1,1 V untuk sistem dengan superkapasitor dan 1,11 V untuk sistem tanpa superkapasitor. Nilai tegangan yang hampir sama pada tahap awal ini menunjukkan bahwa perbedaan kapasitas penyimpanan energi antara kedua sistem belum terlihat signifikan.

Seiring dengan bertambahnya waktu, suhu pembakaran semakin meningkat, sehingga perbedaan suhu antara kedua sisi termoelektrik generator (TEG) semakin besar, menghasilkan tegangan yang lebih tinggi. Pada menit ke-51, tegangan mencapai puncaknya sebesar 16 V untuk sistem dengan superkapasitor dan 14,3 V untuk sistem tanpa superkapasitor. Perbedaan ini menunjukkan bahwa superkapasitor berperan dalam meningkatkan tegangan keluaran dengan menyimpan dan melepaskan energi secara lebih stabil.

Namun, setelah menit ke-51, tegangan mulai mengalami penurunan. Pada menit ke-54, tegangan menurun menjadi 15,7 V untuk sistem dengan superkapasitor dan 14,2 V untuk sistem tanpa superkapasitor. Penurunan ini terjadi akibat berkurangnya daya pembakaran yang menyebabkan turunnya perbedaan suhu, sehingga konversi energi oleh TEG menjadi lebih rendah.

3.5 Hubungan Antara Waktu Terhadap Tegangan Konfigurasi Paralel



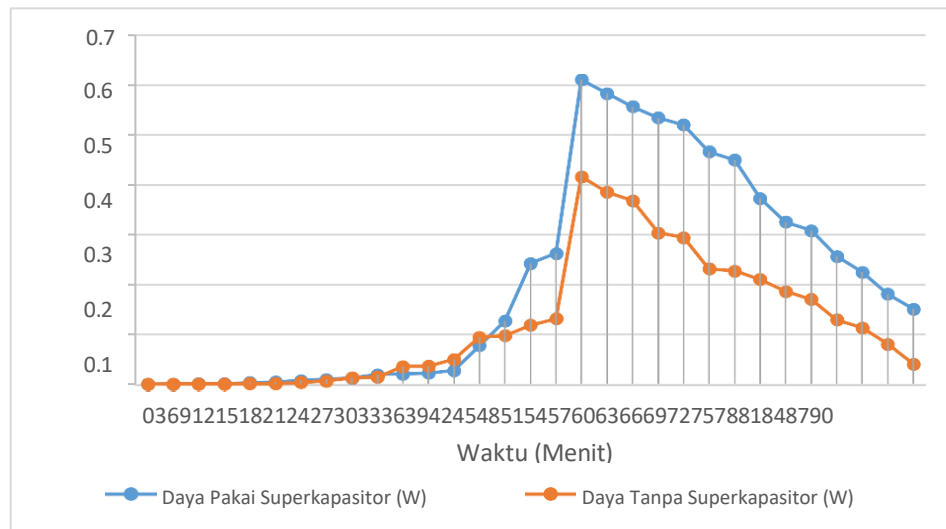
Gambar 8. Grafik Hubungan antara Waktu terhadap Tegangan Konfigurasi Paralel

Gambar 8 menggambarkan hubungan antara waktu dan tegangan pada konfigurasi paralel. Pada menit ke-0, tidak ada tegangan yang terbentuk karena belum terjadi perbedaan suhu yang signifikan. Pada menit ke-3, tegangan mulai meningkat dengan nilai 0,05 V untuk kedua sistem, baik dengan maupun tanpa superkapasitor. Peningkatan yang sama menunjukkan bahwa peran superkapasitor pada tahap awal masih belum terlalu terlihat.

Seiring dengan meningkatnya suhu pembakaran, tegangan terus bertambah hingga mencapai nilai puncak pada menit ke-60, yaitu 0,7 V untuk kedua sistem. Tidak adanya perbedaan tegangan antara sistem dengan dan tanpa superkapasitor pada konfigurasi paralel menunjukkan bahwa dalam konfigurasi ini, superkapasitor tidak berperan signifikan dalam meningkatkan tegangan.

Setelah mencapai puncaknya, tegangan mulai menurun akibat penurunan suhu pembakaran. Pada menit ke-63, tegangan turun menjadi 0,5 V untuk kedua sistem. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun superkapasitor berfungsi sebagai penyimpan energi, dalam konfigurasi paralel, pengaruhnya terhadap peningkatan tegangan tidak sebesar pada konfigurasi seri.

3.6 Hubungan antara Waktu terhadap Daya Konfigurasi Seri



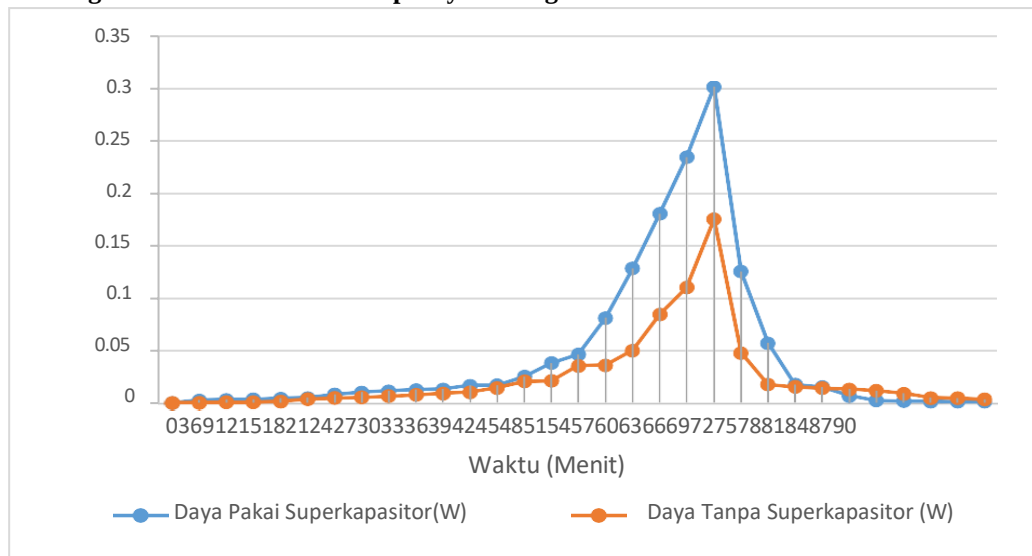
Gambar 9. Grafik Hubungan antara Waktu terhadap Daya Konfigurasi Seri

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara waktu dan daya pada konfigurasi seri. Pada menit ke-3, daya mulai meningkat sebesar 0,00055 W untuk sistem dengan superkapasitor dan 0,000222 W untuk sistem tanpa superkapasitor. Perbedaan ini menunjukkan bahwa superkapasitor membantu meningkatkan daya keluaran sejak tahap awal dengan menyimpan dan melepaskan energi secara efisien.

Seiring waktu, daya terus meningkat hingga mencapai puncak pada menit ke-51 dengan nilai 0,608 W untuk sistem dengan superkapasitor dan 0,4147 W untuk sistem tanpa superkapasitor. Peningkatan ini sejalan dengan peningkatan tegangan yang terjadi sebelumnya, menunjukkan bahwa superkapasitor membantu dalam optimalisasi penyimpanan dan pelepasan daya.

Namun, setelah menit ke-51, daya mulai mengalami penurunan. Pada menit ke-54, daya turun menjadi 0,5809 W untuk sistem dengan superkapasitor dan 0,3834 W untuk sistem tanpa superkapasitor. Penurunan ini terjadi akibat berkurangnya daya pembakaran yang menyebabkan penurunan perbedaan suhu pada TEG, sehingga efisiensi konversi energi berkurang.

3.7 Hubungan antara Waktu terhadap Daya Konfigurasi Paralel



Gambar 10. Grafik Hubungan antara Waktu terhadap Daya Konfigurasi Paralel

Gambar 10 menggambarkan hubungan antara waktu dan daya pada konfigurasi paralel. Pada menit ke-3, daya mulai meningkat sebesar 0,0025 W untuk sistem dengan superkapasitor dan 0,00025 W untuk sistem tanpa superkapasitor. Peningkatan yang lebih besar pada sistem dengan superkapasitor menunjukkan bahwa kapasitor ini membantu dalam menstabilkan daya sejak tahap awal.

Pada menit ke-60, daya mencapai puncaknya dengan nilai 0,301 W untuk sistem dengan superkapasitor dan 0,175 W untuk sistem tanpa superkapasitor. Perbedaan ini menunjukkan bahwa dalam konfigurasi paralel, superkapasitor tetap berperan dalam meningkatkan daya keluaran meskipun tidak sebesar pada konfigurasi seri.

Setelah mencapai puncaknya, daya mulai menurun akibat penurunan suhu pembakaran. Pada menit ke-63, daya turun menjadi 0,125 W untuk sistem dengan superkapasitor dan 0,0475 W untuk sistem tanpa superkapasitor. Penurunan daya yang lebih lambat pada sistem dengan superkapasitor menunjukkan bahwa penyimpanan energi dalam kapasitor membantu dalam mempertahankan daya lebih lama dibandingkan dengan sistem tanpa superkapasitor.

3.8 Energi yang Dikonversi

Tabel 2. Perbandingan Energi yang Dikonversi pada Konfigurasi Seri dan Paralel

Konfigurasi	Q (Joule)	E (Watt-hour)
Seri	181800	33,7
Paralel	193050	35,75

Pada penelitian ini, terdapat hubungan langsung antara perbedaan temperatur (ΔT) dengan arus dan tegangan yang dihasilkan oleh modul termoelektrik. Semakin besar perbedaan temperatur antara sisi panas (pelat atas penutup belanga) dan sisi dingin (heatsink), semakin besar pula tegangan dan arus yang dihasilkan. Fenomena ini sesuai dengan prinsip efek Seebeck, di mana tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur.

Temperatur pada heatsink (sisi dingin) mengalami perubahan akibat pengaruh lingkungan sekitar, seperti kecepatan angin dan suhu udara. Heatsink akan beradaptasi dengan temperatur lingkungan secara bertahap, yang menyebabkan fluktuasi pada ΔT . Sementara itu, temperatur pada pelat atas (sisi panas) berubah sesuai dengan jumlah panas yang diterima dari pembakaran batang jagung. Pelat ini menyerap panas secara bertahap, menyebabkan peningkatan temperatur yang berkontribusi pada peningkatan tegangan dan arus yang dihasilkan.

Berdasarkan data hasil pengukuran, semakin lama waktu pembakaran berlangsung, semakin besar nilai ΔT yang diperoleh. Hal ini menyebabkan tegangan dan kuat arus meningkat secara bertahap. Ketika pembakaran dihentikan, nilai ΔT akan menurun seiring dengan pelepasan panas, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan tegangan dan arus keluaran dari modul termoelektrik.

Besaran arus yang dihasilkan juga berkorelasi langsung dengan tegangan yang dihasilkan. Jika tegangan meningkat akibat kenaikan ΔT , arus juga akan meningkat. Sebaliknya, jika tegangan mengalami

penurunan karena berkurangnya ΔT , arus yang dihasilkan juga akan menurun. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas konversi energi dalam sistem termoelektrik sangat bergantung pada kemampuan mempertahankan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin.

Dari Tabel 2, terlihat bahwa konfigurasi paralel menghasilkan energi yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi seri. Konfigurasi seri menghasilkan energi sebesar 33,7 Wh, sedangkan konfigurasi paralel mencapai 35,75 Wh. Hal ini menunjukkan bahwa dalam skenario pemanfaatan energi termoelektrik, konfigurasi paralel lebih efektif dalam konversi daya dibandingkan konfigurasi seri. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh distribusi arus dan impedansi dalam masing-masing konfigurasi, yang memengaruhi efisiensi transfer energi listrik.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan modul termoelektrik dapat menjadi solusi alternatif dalam konversi energi panas menjadi energi listrik. Pemilihan konfigurasi yang optimal sangat bergantung pada kebutuhan daya keluaran serta stabilitas perbedaan temperatur yang dapat dipertahankan dalam sistem.

4 KESIMPULAN DAN SARAN/REKOMENDASI

4.1 Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri lebih optimal dibandingkan konfigurasi paralel, karena menghasilkan daya yang lebih besar. Semakin lama waktu pembakaran, semakin besar perbedaan temperatur (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin, yang berbanding lurus dengan kenaikan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan. Namun, ketika pembakaran dihentikan, ΔT mulai menurun, menyebabkan tegangan dan arus yang dihasilkan juga menurun. Dari segi energi yang dikonversi, konfigurasi paralel memiliki nilai energi lebih tinggi sebesar 35,75 Wh, dibandingkan dengan konfigurasi seri yang menghasilkan 33,7 Wh.

4.2 Saran/Rekomendasi

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi material heatsink dengan konduktivitas termal yang lebih baik untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, sehingga daya yang dihasilkan lebih optimal. Selain itu, pengujian pada berbagai kondisi lingkungan, seperti kecepatan angin dan kelembaban, dapat dilakukan untuk memahami pengaruhnya terhadap stabilitas tegangan dan arus yang dihasilkan. Penggunaan superkapasitor dengan kapasitas lebih besar juga dapat dievaluasi untuk melihat dampaknya terhadap penyimpanan dan pelepasan energi dalam sistem termoelektrik.

REFERENSI

- Abdussamad, S., Tamrin, M. M., Rusmulyadi, R., Dunggio, S., & Abdussamad, J. (2024). Pendidikan dan Kesadaran Masyarakat tentang Manfaat Briket dari Limbah Tongkol Jagung: Strategi Pengabdian Masyarakat. *Empiris Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 2(1), 19-31.
- Afriyanti, A., Asmoro, N. W., Widyastuti, R., & Arifin, M. (2020). Karakteristik Edible Film Selulosa Batang Jagung (Zea mays) dengan Penambahan Sorbitol. *Jurnal Ilmu Pangan dan Hasil Pertanian*, 4(2), 129-135. <https://doi.org/10.26877/jiphp.v4i2.7106>
- Berek, N. C. (2023). Pengembangan Termoelektrik Generator (TEG) Dengan Menggunakan Panas Hasil Pembakaran Sebagai Pembangkit Listrik Rumah Pada Daerah Tak Terjangkau.
- Hakim, M. D., Khamid, M. H. R., & Kamal, U. (2024). Penerapan Hukum Lingkungan dalam Menghadapi Krisis Perubahan Iklim Global. *Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik*, 1(3), 236-240.
- Hidayat, W., Haryanto, A., Ibrahim, G. A., Hasanudin, U., Prayoga, S., Saputra, B., ... & Tambunan, K. G. A. (2022). Pemanfaatan Limbah Biomassa Jagung Untuk Produksi Biochar di Desa Bangunsari, Pesawaran. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (JPKM) TABIKPUN*, 3(1), 45-52.
- Holiza, S. A., Bahri, S., & Heltina, D. (2024). Sintesis Selulosa Biomassa Proses Pirolisis Dengan Bantuan Katalis Menjadi Bio-Oil. *CASTLE Proceedings*, 4, 214-221.
- Fahriani, V. P., Sahril, M., Setiawan, R., & Pertiwi, S. R. (2022). Uji Eksperimen Konfigurasi Lup pada Termoelektrik Generator Tipe TEG SP1848-27145 SA untuk Alat Penerangan Jalan. *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, 10(2), 98-108.
- Karmal, F., Hiendro, A., & Wicaksono, R. A. Kompor Biomassa-Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Energi Listrik Untuk Penerangan. *JTRAIN: Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, 3(2), 01-08.
- Katili, A. S., & Retnowati, Y. (2024). Pemberdayaan Masyarakat Melalui Program Terampil Wirausaha Melalui Pembuatan Briket Berbahan Dasar Limbah Pertanian Kabupaten Gorontalo. *MOPOONUWA: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 21-27.
- Khaidir, K. (2016). Pengolahan Limbah Pertanian Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Agrium*, 13(2), 63-68.

- Mu'jizat, P., Dunggio, S., Sakir, S., & Zohrahayaty, Z. (2023). Pengembangan Usaha Briket Dari Tongkol Jagung Di Desa Butu Kecamatan Tilong Kabila Kabupaten Bonebolango Provinsi Gorontalo. *Empiris Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 1(2), 15-20.
- Rimbawati, R., Prandika, B., & Cholish, C. (2022). Rancang Bangun Sistem Konversi Energi Panas Api Menjadi Energi Listrik Sebagai Alat Charger Baterai Menggunakan Termoelektrik. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 6(1), 1-8.
- Suryani, R., Rizal, W. A., Pratiwi, D., & Prasetyo, D. J. (2020). Karakteristik dan aktivitas antibakteri asap cair dari biomassa kayu putih (*Melaleuca leucadendra*) dan kayu jati (*Tectona grandis*). *Jurnal Teknologi Pertanian*, 21(2), 106-117.
- Widodo, T. W., Asari, A., Ana, N., & Elita, R. (2007). Bio Energi Berbasis Jagung dan Pemanfaatan Limbahnya. *Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian Serpong Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian Tromol Pos*, 2.
- Yildiz, F., & Coogler, K. L. (2014, June). Low-power energy harvesting with a thermoelectric generator through an air conditioning condenser. In *2014 ASEE Annual Conference & Exposition* (pp. 24-877).