

KONFIGURASI TERMOELEKTRIK GENERATOR SEBAGAI PENGUBAH ENERGI PANAS LIMBAH TONGKOL JAGUNG MENJADI ENERGI LISTRIK

Metalika Goma, Asri Arbie*, Meilan Demulawa, Dewa Gede Eka Setiawan, Muhammad Yunus, A. Indra Wulan Sari Ramadani

Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia

*Corresponding author: asriarbie@yahoo.com

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui rancangan konfigurasi generator termoelektrik untuk menghasilkan listrik dengan menggunakan sisi panas sumber panas kompor biomassa dan sisi dingin konduktor heatsink. Penelitian ini menggunakan termoelektrik tipe TEG SP1848-27145 dengan menggunakan besi sebagai penerima panas dan heatsink sebagai media pendingin. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan konfigurasi seri dan paralel. Jumlah TEG yang digunakan sebanyak 48 TEG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada konfigurasi seri menggunakan superkapasitor arus listrik maksimum sebesar 0,053 mA, tegangan maksimum sebesar 1,29 mV, untuk konfigurasi seri tanpa superkapasitor arus listrik maksimum sebesar 1,9 mA dan tegangan maksimum sebesar 1,09 mV. Nilai daya listrik yang diperoleh dari konfigurasi seri menggunakan superkapasitor dan tanpa superkapasitor adalah 0,06519 mW dan 1,71 mW. Sedangkan untuk hasil konfigurasi paralel menggunakan superkapasitor diperoleh arus maksimum sebesar 6,5 mA, tegangan maksimum sebesar 0,6 mV, sedangkan hasil konfigurasi paralel tanpa superkapasitor diperoleh arus listrik maksimum sebesar 1,5 mA dan tegangan maksimum sebesar 0,9 mV. Nilai daya listrik pada konfigurasi paralel menggunakan superkapasitor dan tanpa kapasitor diperoleh masing-masing sebesar 2,915 mW dan 1,2 mW.

Kata Kunci: TEG, konfigurasi seri dan paralel, tenaga listrik

Abstract: This research aims to determine a thermoelectric generator configuration design to produce electricity using the hot side of the biomass stove heat source and the cold side of the heatsink conductor. This research uses a thermoelectric type TEG SP1848-27145 using iron as a heat receiver and a heatsink as a cooling medium. This research uses experimental methods with series and parallel configurations. The number of TEGs used was 48 TEGs. The research results show that in the series configuration using supercapacitors the maximum electric current is 0.053 mA, the maximum voltage is 1.29 mV, for the series configuration without supercapacitors the maximum electric current is 1.9 mA while the maximum voltage is 1.09 mV. The electrical power value obtained from the series configuration using supercapacitors and without supercapacitors is 0.06519 mW and 1.71 mW. As for the results from the parallel configuration using supercapacitors, the maximum current was 6.5 mA, the maximum voltage was 0.6 mV, while the results from the parallel configuration without supercapacitors obtained a maximum electric current of 1.5 mA and a maximum voltage of 0.9 mV. The electrical power values in the parallel configuration using supercapacitors and without capacitors were obtained at 2,915 mW and 1.2 mW respectively

Keywords: TEG, series and parallel configuration, electric power.

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi di Indonesia semakin banyak dan berkembang seiring dengan pesatnya peningkatan pembangunan di bidang teknologi, industri, dan informasi. Dengan tingginya konsumsi energi di Indonesia dan semakin berkurangnya cadangan energi fosil, maka

Indonesia sudah saatnya untuk secara serius mengembangkan energi alternatif terbarukan (renewable energy). Berbagai bentuk energi terbarukan yang sedang dikembangkan saat ini diantaranya energi yang berasal dari angin, uap, biomassa, suara dan sebagainya (Nawawi, Ma and Arsyi, 2019).

Program untuk mengembangkan energi alternatif contohnya energi yang berasal dari panas bumi, sel matahari (*solar cell*), angin, OTEC (*ocean thermal energy conversion*) perlu diperhatikan lebih serius baik dari masyarakat, akademisi, dunia industri sampai pada pemerintahan. Selain itu perlu pula diperhatikan pada konservasi energi atau penghematan energi, karena dengan melakukan penghematan energi dan meningkatkan efisiensi termal akan berakibat pada sistem energi yang dapat memperpanjang persediaan bahan bakar fosil. Efisiensi pada pembangkit listrik tenaga uap dan gas atau sistem termal lainnya berkisar pada angka 30–40%, sehingga walaupun telah dibuat beberapa teknologi yang digunakan dengan memanfaatkan panas buang tersebut, contohnya sistem combine cycle, namun limbah panas yang dihasilkan pada lingkungan masih cukup besar (Putra et al., 2009).

Kebutuhan energi alternatif lain sedang dikembangkan salah satunya dengan mengkonversi biomassa menjadi energi listrik dengan teknik pembakaran menggunakan udara yang terbatas atau gasifikasi. Energi dari biomassa dapat diperoleh dengan pembakaran secara langsung, dapat juga dengan pirolisis (tanpa adanya oksigen) atau gasifikasi (dengan oksigen terbatas) untuk menghasilkan bahan bakar cair atau bahan bakar gas. Pemanfaatan biomassa sekam padi dengan cara membakar secara langsung tidak efisien. Salah satu yang dilakukan untuk mengkonversi biomassa sekam padi menjadi energi adalah dengan proses pembakaran menggunakan udara yang terbatas. Teknologi yang lain yang digunakan dalam proses mengubah energi panas menjadi energi listrik langsung dapat menggunakan termoelektrik generator yang sumber energinya dapat memanfaatkan limbah panas, dimana perkembangannya dapat menjadi salah satu teknologi yang baik sebagai alternatif sumber energi alternatif di masa depan (Andrapica, Mainil and Aziz, 2017).

Provinsi Gorontalo yang dikenal sebagai penghasil jagung di Indonesia, hasil utama jagung adalah biji jagung yang digunakan terutama untuk makanan manusia dan ternak. Hasil survei bahwa limbah tongkol jagung di Gorontalo belum dimanfaatkan. Limbah tongkol jagung tersebut hanya menimbulkan masalah serius bagi lingkungan, terutama karena pembakaran limbah akan menimbulkan polusi yang hebat dan juga membahayakan lingkungan. Padahal energi yang terkandung dalam limbah organik padat dapat dimanfaatkan melalui pembakaran langsung atau dengan terlebih dahulu, mengkonversikannya dalam bentuk lain yang bernilai ekonomis, yang lebih efisien dan efektif penggunaannya, diantaranya pembakaran langsung (biomassa) melalui proses gasifikasi, sebagai alternatif bahan bakar.

Mengamati kondisi potensi produksi limbah tongkol jagung tersebut, maka perlu dilakukan analisa untuk mengetahui pemanfaatan energi yang dihasilkan, jika limbah tongkol tersebut akan digunakan sebagai bahan baku dari pembuatan bahan bakar Biomassa. Untuk mengetahui potensi energi yang dihasilkan dapat dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata produksi limbah tongkol, Perhitungan energi yang dihasilkan dapat memberikan informasi tentang kandungan energi dalam limbah tongkol jagung tersebut, melalui pemanfaatan bahan baku limbah yang akan berguna untuk keperluan masyarakat Gorontalo (Haluti and Hantoro, 2015). Adapun alasan pemilihan tongkol jagung sebagai bahan bakar biomassa karena Tongkol jagung memiliki kandungan kadar unsur karbon yang cukup tinggi yaitu 43,42% dan hidrogen 6,32% dengan nilai kalornya berkisar antara 14,7 – 18,9 MJ/Kg. Tongkol jagung sangat berpotensi dijadikan sebagai bahan baku pembuatan arang aktif, karena dalam tongkol jagung tersusun oleh selulosa (41%), hemiselulosa (36%), lignin (6%), dan senyawa lain. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan karbon pada tongkol jagung yang cukup tinggi. Arang yang berasal dari tongkol jagung diaktivasi secara fisik dan kimia. Aktivasi secara kimia dengan menambahkan larutan asam dan basa agar dapat memperbesar permukaan pori-pori arang aktif (Meilianti, 2020).

Meningkatnya penggunaan limbah biomassa ditargetkan Pemerintah pada tahun 2025 dapat dicapai dengan memanfaatkan limbah biomassa sebagai sumber energi alternatif. Pemanfaatan limbah biomassa yang digunakan diharapkan dapat menjadi sumber energi alternatif yang dapat direalisasikan pada daerah-daerah yang berpotensi memberikan kontribusi terhadap produk-produk limbah biomassa (Apollo and Musa, 2017). Limbah biomassa akan dimanfaatkan sebagai bahan bakar kompor penghasil energi listrik. Kompor biomassa adalah salah satu teknologi energi terbarukan yang dikembangkan menggunakan bahan bakar limbah biomassa yang sangat banyak ditemui di sekitar kita.

Penggunaan kompor biomassa yang memanfaatkan panas buangan memiliki potensi, sehingga dapat digunakan untuk sumber energi listrik alternatif. Panas buangan yang dihasilkan pada kompor dapat diubah menjadi energi listrik dengan komponen termoelektrik generator. Salah satu sumber energi alternatif baru yang potensial untuk menghasilkan energi listrik alternatif adalah termoelektrik generator (TEG) (Masid *et al.*, 2018). Generator ini kemudian dipasangkan pada kompor biomassa untuk dimanfaatkan panas buangannya dan kemudian diubah menjadi energi listrik (Salsabila, Suwandi and Ajiwiguna, 2019). Material termoelektrik yaitu cukup diletakkan sedemikian rupa dalam kompor untuk mendapatkan limbah panasnya dan menghubungkan antara sumber sisi panas dan sisi dingin dengan dibantu dengan kipas, dimana mekanisme ini dapat menghasilkan sejumlah arus listrik (Khalid, Syukri and Gapy, 2016). Termoelektrik merupakan alat yang memiliki prinsip fisika dalam kerjanya untuk mengubah energi listrik menjadi energi panas, namun memiliki fungsi lain yang dapat dimanfaatkan pada termoelektrik yang jarang diketahui masyarakat yaitu kebalikannya dengan mengubah energi panas menjadi energi listrik (Huda, 2020)

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini, terdiri dari 4 tahapan, yaitu : pertama, studi literature, kedua Rangkaian Termoelektrik Generator, Kedua Perancangan Alat serta terakhir dilakukan Pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian data yang di peroleh berupa kuat arus listrik pada pembakaran biomassa (tongkol jagung) dengan media pembakaran kompor besi menggunakan rancangan termoelektrik generator dengan variasi waktu atau lama pembakaran. Adapun pola hubungan pengaruh lama pembakaran terhadap kuat arus listrik.

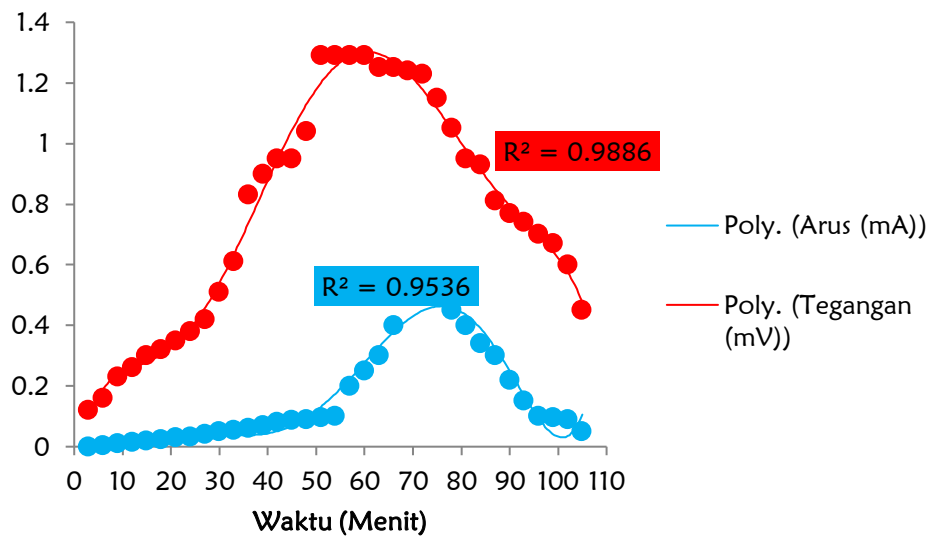
Konfigurasi Seri

Dalam perancangan konfigurasi seri, dilakukan pengumpulan data yang meliputi kuat arus dan tegangan listrik. Data ini dikumpulkan dalam dua kondisi: dengan menggunakan superkapasitor dan tanpa menggunakan superkapasitor. Pengumpulan data dilakukan secara teliti dan sistematis untuk memastikan akurasi dan reliabilitas hasil yang diperoleh. Superkapasitor, sebagai salah satu komponen utama, diuji untuk mengamati pengaruhnya terhadap performa rangkaian listrik dalam hal kuat arus dan tegangan yang dihasilkan.

Tujuan utama pengumpulan data ini adalah untuk membandingkan dua set data yang diperoleh: satu set data dikumpulkan saat rangkaian beroperasi tanpa beban, dan set lainnya dikumpulkan saat rangkaian beroperasi dengan beban berupa superkapasitor. Dengan perbandingan ini, peneliti dapat mengidentifikasi sejauh mana penggunaan superkapasitor mempengaruhi karakteristik listrik dari rangkaian. Hasil analisis diharapkan memberikan wawasan mendalam mengenai manfaat dan potensi penggunaan superkapasitor dalam aplikasi praktis, serta membantu dalam pengembangan lebih lanjut konfigurasi rangkaian yang lebih efisien dan efektif.

Berdasarkan Gambar 1. dapat dilihat bahwa konfigurasi seri menggunakan superkapasitor dengan variasi waktu 3 menit dalam setiap pengukuran grafik tersebut memperlihatkan hubungan antara waktu terhadap arus dan tegangan. Semakin lama waktu pembakaran menyebabkan arus dan tegangan semakin meningkat. Arus tertinggi di peroleh pada menit 72 yakni sebesar 0,53 mA, sedangkan tegangan paling tinggi terjadi pada menit 51 sebesar 1,29V.

Kemudian terjadi penurunan suhu pada menit ke-60 menyebabkan arus dan tegangan juga menurun. Ini menyatakan bahwa semakin besar perbedaan suhu maka, hasil luaran berupa arus dan tegangan juga semakin baik.

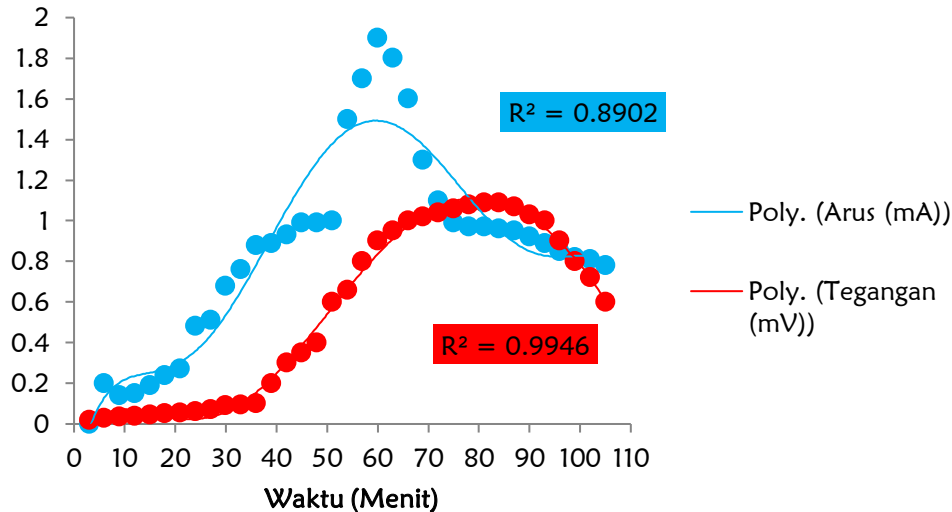


Gambar 1. Pola Hubungan Antara Waktu Terhadap Kuat Arus Listrik Dan Tegangan Yang Dihasilkan Oleh Konfigurasi Seri Menggunakan Superkapasitor

Arus listrik yang dihasilkan pada rangkaian seri lebih kecil dibandingkan dengan tegangan hal ini disebabkan karena pada konsep dasar dari rangkaian seri yang mana dalam rangkaian seri komponen-komponen listrik dihubungkan secara berurutan sehingga arus yang mengalir melalui setiap komponen adalah sama. Ini berarti arus total yang mengalir dalam rangkaian tidak terbagi, melainkan tetap konstan di setiap titik dalam rangkaian. Sebaliknya, tegangan dalam rangkaian seri didistribusikan di seluruh komponen, sehingga setiap komponen menerima bagian dari tegangan total yang disuplai oleh sumber. Sedangkan jika mengacu pada hukum Ohm yang mengatakan Dalam rangkaian seri, tegangan total yang diberikan oleh sumber adalah jumlah dari tegangan jatuh pada setiap komponen individu. Karena arus tetap konstan di seluruh rangkaian, tegangan pada setiap komponen tergantung pada nilai resistansi masing-masing.

Penelitian oleh Xiao *et al.*, (2023) menganalisis pengaruh konfigurasi rangkaian seri dan paralel pada kinerja TEG yang digunakan untuk memanfaatkan panas buang dari industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rangkaian seri meningkatkan tegangan output, sedangkan rangkaian paralel meningkatkan arus output. Kombinasi optimum antara konfigurasi seri dan paralel dapat menghasilkan output daya maksimum. Selanjutnya Studi oleh Hamid Elsheikh *et al.*, (2014) dalam jurnal " *Renewable and Sustainable Energy Reviews*" menyelidiki kinerja TEG dengan rangkaian seri yang digunakan untuk memanfaatkan panas dari pembakaran biomassa. Mereka menemukan bahwa rangkaian seri dapat meningkatkan tegangan output secara signifikan, tetapi arus output relatif rendah. Untuk meningkatkan arus output, mereka merekomendasikan kombinasi rangkaian seri dan paralel.

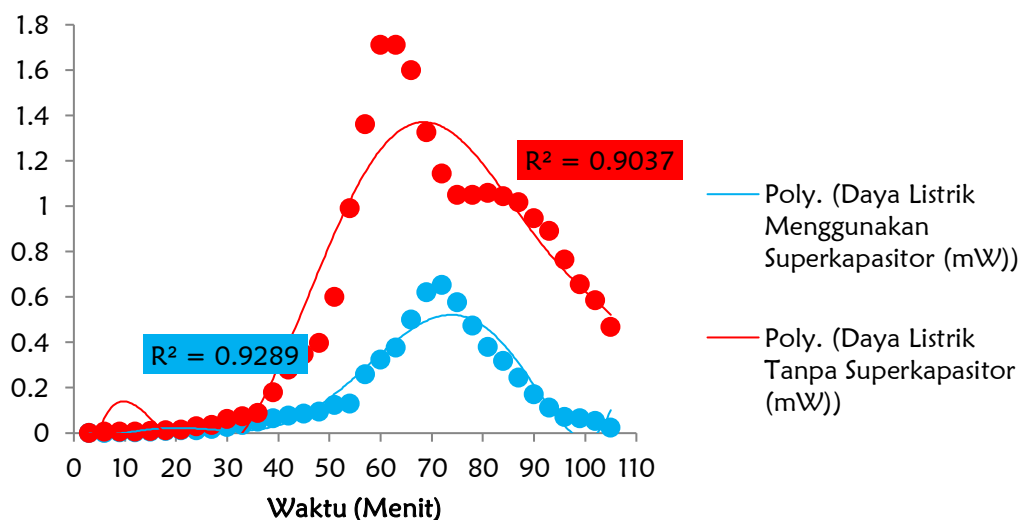
Berdasarkan Gambar 2. dapat dilihat bahwa konfigurasi seri tanpa menggunakan superkapasitor dengan variasi waktu 3 menit dalam setiap pengukuran grafik tersebut memperlihatkan hubungan antara waktu terhadap arus dan tegangan. Semakin lama waktu pembakaran menyebabkan arus dan tegangan semakin meningkat. Arus tertinggi di peroleh pada menit 60 yakni sebesar 1.9mA, sedangkan tegangan paling tinggi terjadi pada menit 81 sebesar 1,09V. Kemudian terjadi penurunan suhu pada menit ke-60 menyebabkan arus dan tegangan juga menurun. Ini menyatakan bahwa semakin besar perbedaan suhu maka, hasil luaran berupa arus dan tegangan juga semakin baik.



Gambar 2. Pola hubungan antara waktu terhadap kuat arus listrik dan tegangan yang dihasilkan oleh konfigurasi seri tanpa superkapasitor

Arus listrik yang dihasilkan dalam rangkaian seri lebih kecil dibandingkan dengan tegangan. Hal ini disebabkan oleh prinsip dasar rangkaian seri, di mana komponen listrik dihubungkan secara berurutan sehingga arus yang mengalir melalui setiap komponen adalah sama. Ini berarti arus total yang mengalir dalam rangkaian tidak terbagi, melainkan tetap konstan di setiap titik dalam rangkaian. Sebaliknya, tegangan dalam rangkaian seri dibagi di antara komponen-komponen, sehingga setiap komponen menerima bagian dari tegangan total yang disuplai oleh sumber. Menurut hukum Ohm, tegangan total yang diberikan oleh sumber dalam rangkaian seri adalah jumlah dari tegangan jatuh pada setiap komponen individu. Karena arus tetap konstan di seluruh rangkaian, tegangan pada setiap komponen bergantung pada nilai resistansinya.

Penelitian oleh Ishaq *et al.*, (2020) dalam jurnal "*Journal of Cleaner Production*" menganalisis kinerja TEG seri yang terintegrasi dengan sistem pembakaran biomassa. Mereka menggunakan tongkol jagung sebagai bahan bakar biomassa dan mengkonfigurasi TEG dalam rangkaian seri untuk meningkatkan tegangan output. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini dapat menghasilkan energi listrik yang cukup untuk aplikasi skala kecil.



Gambar 3. Hasil Output daya pada konfigurasi seri menggunakan superkapasitor dan tanpa superkapasitor

Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat perbandingan hasil daya listrik dari pembakaran tongkol jagung dengan konfigurasi seri menggunakan superkapasitor dan konfigurasi seri tanpa superkapasitor dengan variasi waktu yang digunakan 3 menit setiap kali pengukuran. Untuk konfigurasi seri menggunakan superkapasitor daya listrik yang di hasilkan paling tinggi berada pada menit 72 yakni 0,6519 mW sedangkan untuk konfigurasi seri tanpa superkapasitor berada pada menit 60 yakni 0,171 mW. hal ini menunjukkan bahwa penggunaan superkapasitor dapat mempengaruhi hasil luaran berupa daya listrik.

Tenaga listrik tanpa superkapasitor umumnya lebih besar daripada menggunakan superkapasitor karena perbedaan dalam kapasitas dan kemampuan penyimpanan energi oleh keduanya. Superkapasitor, meskipun dapat menyimpan dan melepaskan energi dengan efisiensi tinggi, memiliki kapasitas yang relatif rendah dibandingkan dengan baterai atau sumber daya listrik konvensional lainnya. Kapasitas yang terbatas ini mengakibatkan superkapasitor hanya dapat menyimpan jumlah energi yang terbatas dalam volume tertentu.

Sebaliknya, sistem tenaga listrik tanpa superkapasitor sering kali menggunakan baterai atau sumber daya listrik lain yang memiliki kapasitas lebih besar. Meskipun baterai mungkin tidak secepat superkapasitor dalam melepaskan energi, kapasitas yang lebih besar memungkinkan penyimpanan energi yang signifikan. Dalam aplikasi di mana kebutuhan akan tenaga listrik tinggi berlangsung dalam waktu yang lebih lama, seperti pada kendaraan listrik atau sistem penyimpanan energi besar, kapasitas yang lebih besar dari sumber daya listrik tanpa superkapasitor mendukung kinerja yang lebih stabil dan berkelanjutan.

Salah satu keuntungan utama sistem daya listrik tanpa superkapasitor adalah potensi peningkatan kepadatan energi. Superkapasitor, meskipun mampu menghasilkan kepadatan daya yang tinggi, biasanya memiliki kepadatan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan teknologi penyimpanan energi lainnya, seperti baterai (Wang and Xia, 2013). Dengan mengeksplorasi pendekatan alternatif yang tidak bergantung pada superkapasitor, para peneliti mungkin dapat mengembangkan sistem dengan kemampuan penyimpanan energi keseluruhan yang lebih tinggi.

Penelitian oleh (Shittu *et al.*, 2019) dalam jurnal " *Renewable and Sustainable Energy Reviews*" mengembangkan sebuah perangkat penyimpan energi mikro-superkapasitor berbasis elektroda logam oksida yang tidak menggunakan superkapasitor konvensional. Perangkat ini mampu mencapai densitas daya hingga 1,6 MW/kg, lebih tinggi daripada superkapasitor komersial.

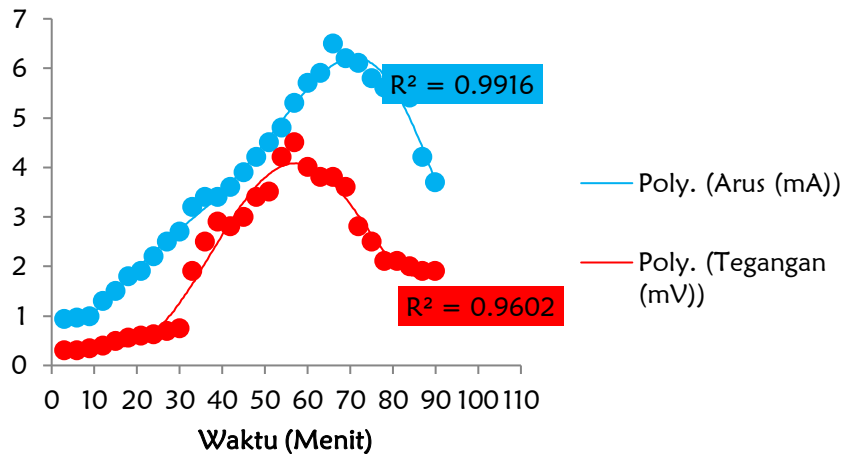
Konfigurasi Pararel

Berdasarkan hasil penelitian data yang di peroleh berupa kuat arus listrik pada pembakaran biomassa (tongkol jagung) dengan media pembakaran kompor besi menggunakan rancangan termoelektrik generator dengan variasi waktu atau lama pembakaran. Adapun pola hubungan pengaruh lama pembakaran terhadap kuat arus listrik dan tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa konfigurasi pararel tanpa menggunakan superkapasitor dengan variasi waktu 3 menit dalam setiap pengukuran grafik tersebut memperlihatkan hubungan antara waktu terhadap arus dan tegangan. Semakin lama waktu pembakaran menyebabkan arus dan tegangan semakin meningkat. Arus tertinggi di peroleh pada menit 48 yakni sebesar 1.5 mAh, sedangkan tegangan paling tinggi terjadi pada menit 51 sebesar 0.9 mV. Kemudian terjadi penurunan suhu pada menit ke-60 menyebabkan arus dan tegangan juga menurun. Ini menyatakan bahwa semakin besar perbedaan suhu maka, hasil luaran berupa arus dan tegangan juga semakin baik.

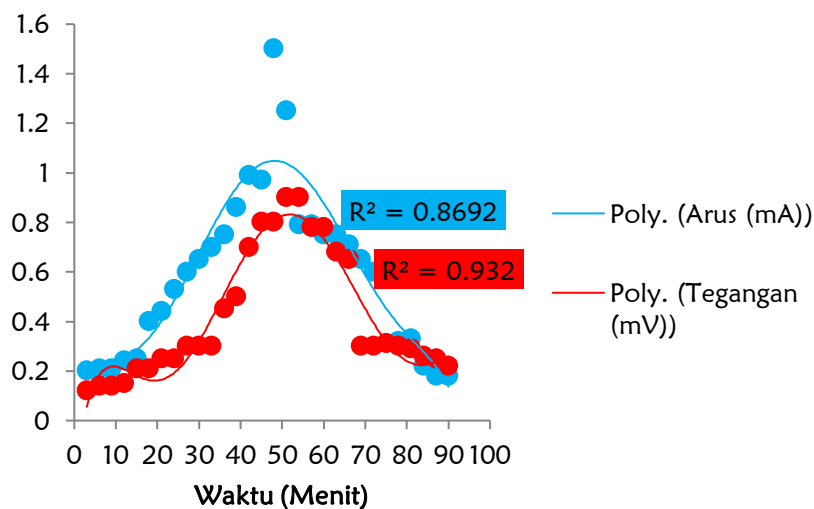
Arus yang lebih besar daripada tegangan pada rangkaian paralel disebabkan oleh prinsip dasar hukum Kirchhoff untuk arus dan tegangan. Dalam rangkaian paralel, setiap komponen atau cabang memiliki potensial tegangan yang sama di kedua ujungnya, karena mereka terhubung secara langsung dengan sumber tegangan yang sama. Ketika lebih banyak komponen atau beban dihubungkan secara paralel, total resistansi rangkaian menurun, yang mengakibatkan peningkatan

arus total. Ini terjadi karena hukum Ohm menyatakan bahwa arus yang mengalir melalui suatu resistor (atau komponen lainnya) berbanding terbalik dengan resistansinya, dengan tegangan yang diberikan konstan. Dengan demikian, dalam rangkaian paralel di mana resistansi total menurun, arus yang mengalir melalui setiap cabang individu akan meningkat proporsional terhadap resistansi masing-masing. Oleh karena itu, pada rangkaian paralel, arus cenderung lebih besar daripada tegangan, karena distribusi arus terjadi sesuai dengan nilai resistansi masing-masing cabang.



Gambar 4. Pola Hubungan Antara Waktu Terhadap Arus Dan Tegangan Listrik Yang Dihasilkan Oleh Konfigurasi Paralel Menggunakan Superkapasitor

Rezania and Rosendahl, (2012) melakukan penelitian di jurnal "*Energy Conversion and Management*" yang menghasilkan model matematis untuk mengkaji arus dan tegangan dalam rangkaian paralel TEG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus listrik lebih responsif terhadap perubahan beban pada resistansi yang rendah. Mereka juga menemukan bahwa peningkatan jumlah modul TEG yang dihubungkan secara paralel dapat meningkatkan arus listrik yang dapat dihasilkan pada tegangan yang tetap.



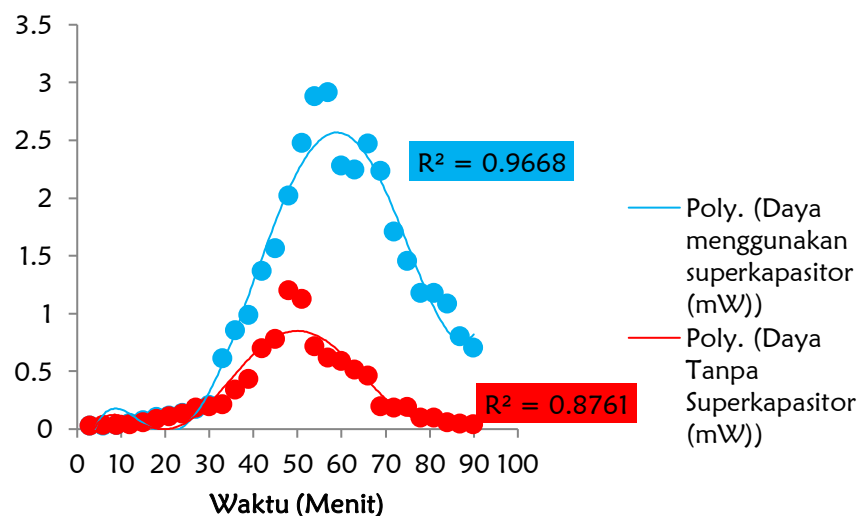
Gambar 5. Pola Hubungan Antara Waktu Terhadap Arus Dan Tegangan Listrik Yang Dihasilkan Oleh Konfigurasi Paralel Tanpa Superkapasitor

Gambar 5 menunjukkan bahwa konfigurasi paralel tanpa superkapasitor dengan variasi waktu 3 menit setiap kali pengukuran. Dari hasil percobaan diperoleh arus terendah yang diperoleh yaitu di menit ketiga dimana pada waktu tersebut arus yang dihasilkan hanya 0,2 mA.

sedangkan arus tertinggi yang diperoleh yaitu pada menit 78 yakni diperoleh arus sebesar 1.5 mA. Sedangkan tegangan terendah yang diperoleh yaitu di menit ketiga dimana pada waktu tersebut tegangan yang dihasilkan hanya 0,03 mV. Sedangkan tegangan tertinggi yang diperoleh yaitu pada menit ke-54 yakni diperoleh tegangan sebesar 0,6 mV. Kemudian terjadi penurunan suhu pada menit ke-60 menyebabkan arus dan tegangan juga menurun. Ini menyatakan bahwa semakin besar perbedaan suhu maka, hasil luaran berupa arus dan tegangan juga semakin baik.

Arus yang lebih besar dibandingkan dengan tegangan dalam rangkaian paralel disebabkan oleh hukum Kirchhoff yang mengatur prinsip arus dan tegangan. Dalam rangkaian paralel, setiap komponen atau cabang mempertahankan potensi tegangan yang sama di ujung-ujungnya karena terhubung langsung ke sumber tegangan yang sama. Ketika lebih banyak komponen atau beban dihubungkan secara paralel, resistansi total rangkaian menurun, sehingga menghasilkan peningkatan arus total. Hal ini terjadi karena hukum Ohm menyatakan bahwa arus yang mengalir melalui resistor (atau komponen lain) berbanding terbalik dengan resistansinya, dengan tegangan yang diberikan tetap konstan. Oleh karena itu, dalam rangkaian paralel di mana resistansi total menurun, arus yang mengalir melalui setiap cabang individu meningkat secara proporsional dengan resistansi masing-masing. Akibatnya, dalam rangkaian paralel, arus cenderung lebih besar daripada tegangan karena distribusi arus sesuai dengan nilai resistansi setiap cabang.

Rezania and Rosendahl, (2012) melakukan penelitian di jurnal "*Energy Conversion and Management*" yang menghasilkan model matematis untuk mengkaji arus dan tegangan dalam rangkaian paralel TEG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus listrik lebih responsif terhadap perubahan beban pada resistansi yang rendah. Mereka juga menemukan bahwa peningkatan jumlah modul TEG yang dihubungkan secara paralel dapat meningkatkan arus listrik yang dapat dihasilkan pada tegangan yang tetap.



Gambar 6. Hasil Output Daya Pada Konfigurasi Paralel Menggunakan Superkapasitor Dan Tanpa Superkapasitor

Gambar 6. Merupakan nilai daya yang dihasilkan dari konfigurasi paralel menggunakan superkapasitor dengan variasi waktu yang digunakan yaitu 3 menit setiap kali pengukuran. Dimana diperoleh daya terendah yang diperoleh yaitu di menit ketiga dimana pada waktu tersebut daya yang dihasilkan hanya 0,0279 mW. Sedangkan daya tertinggi yang diperoleh yaitu pada menit 66 yakni diperoleh tegangan sebesar 2.915 mW. Sedangkan untuk konfigurasi paralel tanpa superkapasitor diperoleh daya terendah yang diperoleh yaitu di menit ke-3 dimana pada waktu tersebut daya yang dihasilkan hanya 0,024 mW. Sedangkan daya tertinggi yang diperoleh yaitu pada menit 48 yakni diperoleh tegangan sebesar 1,125 mW.

Tenaga listrik tanpa superkapasitor umumnya memiliki kapasitas yang lebih besar daripada menggunakan superkapasitor, disebabkan oleh perbedaan dalam kemampuan penyimpanan energi. Superkapasitor, meskipun efisien dalam menyimpan dan melepaskan energi, seringkali memiliki kapasitas yang terbatas dibandingkan dengan baterai atau sumber daya listrik konvensional lainnya. Kapasitas yang rendah ini membuat superkapasitor hanya cocok untuk penyimpanan energi yang terbatas dalam volume yang diberikan. Sebaliknya, sistem tenaga listrik tanpa superkapasitor biasanya menggunakan baterai atau sumber daya listrik lain yang memiliki kapasitas lebih besar. Meskipun mungkin tidak secepat superkapasitor dalam melepaskan energi, kapasitas yang lebih besar ini memungkinkan penyimpanan energi yang signifikan, mendukung kinerja yang stabil dan berkelanjutan dalam aplikasi seperti kendaraan listrik atau sistem penyimpanan energi besar.

Salah satu keuntungan utama sistem daya listrik tanpa superkapasitor adalah potensi peningkatan kepadatan energi. Superkapasitor, meskipun dapat menghasilkan kepadatan daya yang tinggi, umumnya memiliki kepadatan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan teknologi penyimpanan energi lainnya, seperti baterai (Manaf, Bistamam and Azam, 2013). Dengan mencari pendekatan alternatif yang tidak bergantung pada superkapasitor, para peneliti dapat mengembangkan sistem dengan kemampuan penyimpanan energi yang lebih tinggi secara keseluruhan. Sebagai contoh, penelitian oleh Shittu *et al.*, (2019) di jurnal " *Renewable and Sustainable Energy Reviews*" mengeksplorasi mikro-superkapasitor berbasis elektroda logam oksida, yang mampu mencapai densitas daya hingga 1,6 MW/kg, melebihi kinerja superkapasitor komersial konvensional.

Energi listrik dalam penelitian ini diperoleh dengan menggunakan rumus $P = V \times I \times t$, dimana diperoleh persentase rata-rata energi yang dihasilkan yaitu sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil energi konfigurasi seri dan konfigurasi paralel

Konfigurasi	Energi (J)	
	Menggunakan Superkapasitor	Tanpa Superkapasitor
Seri	0.00119	0.04433
Pararel	0.0673	0.01577

Berdasarkan tabel 1. Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan yang signifikan energi yang dihasilkan dari konfigurasi seri dan konfigurasi paralel baik yang menggunakan superkapasitor dan tanpa superkapasitor. Dimana energi yang diperoleh pada konfigurasi seri menggunakan superkapasitor sebesar 0.00119Joule sedangkan tanpa superkapasitor sebesar 0.0433 Joule. Adapun untuk hasil energi listrik yang dihasilkan pada konfigurasi paralel menggunakan superkapasitor sebesar 0.0673 Joule sedangkan tanpa superkapasitor sebesar 0.01577 Joule.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa konfigurasi paralel cenderung menghasilkan energi listrik yang lebih tinggi daripada konfigurasi seri, baik dengan atau tanpa penggunaan superkapasitor. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam cara komponen-komponen sistem berinteraksi dan mengalirkan energi dalam kedua konfigurasi tersebut. Selain itu, penggunaan superkapasitor juga memiliki dampak yang signifikan terhadap jumlah energi listrik yang dihasilkan. Dalam kedua konfigurasi, penggunaan superkapasitor menghasilkan energi yang jauh lebih tinggi daripada tanpa superkapasitor. Ini menunjukkan bahwa superkapasitor dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem dalam menghasilkan energi listrik. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan (Nurhasmia, Subagiada and Natalisanto, 2021) yang mengatakan Penggunaan superkapasitor memiliki dampak yang signifikan karena memiliki permukaan elektroda yang luas dan bahan dielektrik yang tipis, sehingga dapat mencapai kapasitansi yang jauh lebih tinggi daripada tanpa penggunaan superkapasitor. Oleh karena itu, superkapasitor menjadi solusi yang sangat efektif sebagai perangkat penyimpan energi. Ketika tidak menggunakan superkapasitor, nilai keluaran diperoleh langsung dari terminal TEG. Akibatnya, keluaran yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan

dengan penggunaan superkapasitor. Perbedaan suhu memiliki dampak yang signifikan terhadap output yang dihasilkan oleh TEG.

Dari semua hasil data yang diperoleh menegaskan bahwa untuk nilai maksimum dari arus, tegangan dan daya dari rangkaian seri dan paralel baik menggunakan superkapasitor dan tanpa superkapasitor ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai maksimum arus, tegangan dan daya yang dihasilkan

Besaran	Nilai Maksimum			
	Menggunakan Super kapasitor		Tanpa Superkapasitor	
	Seri	Pararel	Seri	Pararel
Arus	0.053 (mA)	6.5 (mA)	1.9 (mA)	1.5 (mA)
Tegangan	1.29 (mV)	0.6 (mV)	1.09 (mV)	0.9 (mV)
Daya	0.06519 (mW)	2.915 (mW)	1.71 (mW)	1.2 (mW)

Analisis dari data yang disajikan dalam tabel menunjukkan pengaruh signifikan dari penggunaan super kapasitor dalam sistem. Pertama-tama, terdapat peningkatan drastis dalam arus seri ketika menggunakan super kapasitor, meningkat hingga 36 kali lipat dari kondisi tanpa super kapasitor. Begitu pula dengan arus paralel, yang mengalami penurunan sebesar 55% ketika super kapasitor digunakan. Fenomena serupa terlihat dalam tegangan seri dan paralel, meskipun perubahan tegangan tidak sebesar perubahan arus. Tegangan seri mengalami penurunan sebesar 15% dengan penggunaan super kapasitor, sementara tegangan paralel meningkat sebesar 50%. Selain itu, terdapat perubahan yang signifikan dalam daya seri dan paralel. Daya seri meningkat hingga 26 kali lipat dengan super kapasitor, sementara daya paralel mengalami penurunan sebesar 59%.

Dalam rangkaian keseluruhan, penggunaan super kapasitor secara efektif memengaruhi kinerja arus, tegangan, dan daya dalam sistem. Hal ini menunjukkan bahwa super kapasitor memiliki potensi untuk meningkatkan kinerja sistem dalam beberapa aspek tertentu. Namun, penting untuk dicatat bahwa meskipun penggunaan super kapasitor dapat memberikan keuntungan dalam beberapa aspek, seperti peningkatan arus dan daya seri, itu juga dapat mengurangi kinerja dalam aspek lainnya, seperti arus paralel dan daya paralel. Oleh karena itu, implementasi super kapasitor dalam sistem memerlukan evaluasi yang cermat untuk memastikan bahwa manfaatnya melebihi dampak negatifnya.

Sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan organik, telah muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk bahan bakar fosil tradisional. Di antara berbagai bahan baku biomassa, tongkol jagung telah menarik minat yang signifikan karena kelimpahannya dan potensinya untuk produksi energi. Tongkol jagung, inti utama tanaman jagung yang berkayu, merupakan residu pertanian yang tersedia secara luas yang dapat digunakan untuk aplikasi bioenergi, termasuk pembangkitan listrik melalui pembakaran.

Konversi biomassa tongkol jagung menjadi listrik memiliki potensi besar untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mempromosikan solusi energi berkelanjutan. Biomassa tongkol jagung dianggap sebagai sumber bahan bakar netral karbon, karena karbon dioksida yang dilepaskan selama pembakaran diimbangi oleh karbon yang diserap oleh tanaman selama pertumbuhan. Lebih jauh, penggunaan tongkol jagung sebagai sumber energi terbarukan dapat berkontribusi pada diversifikasi campuran energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang terbatas dan meningkatkan keamanan energi. (Smith *et al.*, 2008).

Logistik pengumpulan bahan baku biomassa, praproses, dan transportasi merupakan faktor penting dalam kelayakan dan efektivitas biaya konversi biomassa menjadi energi. Tongkol jagung, sebagai sisa pertanian yang mudah didapat, dapat dikumpulkan dan diangkut secara efisien ke pembangkit listrik, menjadikannya sumber daya biomassa yang layak dan mudah diakses. Dibandingkan dengan bahan baku biomassa lainnya, tongkol jagung memiliki kepadatan energi yang relatif tinggi dan kadar air yang rendah, yang dapat menyederhanakan proses prapemrosesan dan pembakaran (Du, Chen and Lucas, 2014).

KESIMPULAN

Berdasarkan data hasil analisis yang diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa, rancangan rangkaian seri termoelektrik generator (TEG) yang memanfaatkan panas buang dari pembakaran biomassa tongkol jagung pada kompor besi berbentuk persegi panjang dan diranxcang dengan konfigurasi seri dan paralel. Kemudian, penagruh lama pembakaran terhadap kuat arus listrik dan tegangan listrik diperoleh bahwa kuat arus listrik lebih kecil pada rangkaian seri dibandingkan pada rangkaian paralel. Terakhir, pengaruh susunan rangkaian seri dan paralel terhadap energy listrik yang dihasilkan rancangan dapat mempengaruhi daya listrik yang dihasilkan, dengan variasi rangkaian yang digunakan dapat mempengaruhi daya listrik dan daya listrik yang dihasilkan. Namun, perlu dip[erhatikan bahwa pengaruh ini dapat berbeda-beda tergantung pada jenis rancangan dan metode yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrapica, G., Mainil, R.I. And Aziz, A. (2017) 'Pengujian Thermoelectric Generator Sebagai Pembangkit Listrik Dengan Sisi Dingin Menggunakan Air Bertemperatur 10 °C', *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 14(2), Pp. 45–50.
- Apollo And Musa, L.O. (2017) 'Penerapan Thermoelectric Generator Sebagai Peniup Udara Pada Kompor Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Tipe Kontinyu', 2017(2001), Pp. 104–109.
- Du, S.W., Chen, W.H. And Lucas, J.A. (2014) 'Pretreatment Of Biomass By Torrefaction And Carbonization For Coal Blend Used In Pulverized Coal Injection', *Bioresource Technology*, 161, Pp. 333–339. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.090>.
- Haluti, S. And Hantoro, R. (2015) 'Pemanfaatan Potensi Limbah Tongkol Jagung Sebagai Briketarang Melalui Proses Karbonisasidiwilayah Provinsi Gorontalo', *Jtech*, (1), Pp. 8–11.
- Hamid Elsheikh, M. *Et Al.* (2014) 'A Review On Thermoelectric Renewable Energy: Principle Parameters That Affect Their Performance', *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 30, Pp. 337–355. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.027>.
- Huda, D.N. (2020) 'Identifikasi Termoelektrik Generator Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik', *Prosiding Seminar Nasional Sains 2020*, 1(1), Pp. 6–13.
- Ishaq, H. *Et Al.* (2020) 'Development And Performance Investigation Of A Biomass Gasification Based Integrated System With Thermoelectric Generators', *Journal Of Cleaner Production*, 256, P. 120625. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120625>.
- Khalid, M., Syukri, M. And Gapy, M. (2016) 'Pemanfaatan Energi Panas Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berskala Kecil Dengan Menggunakan Termoelektrik', *Karya Ilmiah Teknik Elektro*, 1(3), Pp. 57–62.
- Manaf, N.S.A., Bistamam, M.S.A. And Azam, M.A. (2013) 'Development Of High Performance Electrochemical Capacitor: A Systematic Review Of Electrode Fabrication Technique Based On Different Carbon Materials', *Ecs Journal Of Solid State Science And Technology*, 2(10), Pp. M3101–M3119. Available At: <https://doi.org/10.1149/2.014310jss>.
- Masid, M. *Et Al.* (2018) 'Pemanfaatan Panas Panci Yang Terbuang Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Berbasis Termoelektrik Generator', *Publikasi Online Mahasiswa Teknik Mesin*, 1(2), Pp. 1–8.
- Meilianti, M. (2020) 'Pembuatan Karbon Aktif Dari Arang Tongkol Jagung Dengan Variasi Konsentrasi Aktivator Natrium Karbonat (Na₂co₃)', *Jurnal Distilasi*, 5(1), P. 14. Available At: <https://doi.org/10.32502/Jd.V5i1.3025>.
- Nawawi, A.J., Ma, G. And Arsyi, N.S. (2019) 'Pemanfaatan Energi Suara Dengan Menggunakan Piezoelektrik Untuk Memanfaatkan Kebisingan Di Sepanjang Jalan Tol Trans Jawa Guna Mewujudkan Sumber Listrik Alternatif Untuk Lampu Penerangan Jalan Tol', *Pemanfaatan Energi Suara By Nafis, Jalil, Gustama* [Preprint].
- Nurhasmia, Subagiada, K. And Natalisanto, A.I. (2021) 'Studi Penggunaan Superkapasitor Sebagai Media Penyimpan Energi', *Progressive Physics Journal*, 2, Pp. 79–88.

- Putra, N. *Et Al.* (2009) 'Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik Untuk Kendaraan Hibrid', *Makara Teknologi*, 13(2), Pp. 53–58.
- Rezania, A. And Rosendahl, L.A. (2012) 'Thermal Effect Of A Thermoelectric Generator On Parallel Microchannel Heat Sink', *Energy*, 37(1), Pp. 220–227. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.043>.
- Salsabila, N., Suwandi And Ajiwiguna, T.A. (2019) 'Studi Pemanfaatan Panas Buangan Kompor Biomassa Dengan Menggunakan Generator Termoelektrik', *E-Proceeding Of Engineering*, 6(2), Pp. 5421–5428.
- Shittu, S. *Et Al.* (2019) 'Advancements In Thermoelectric Generators For Enhanced Hybrid Photovoltaic System Performance', *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 109(March), Pp. 24–54. Available At: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.023>.
- Smith, P. *Et Al.* (2008) 'Greenhouse Gas Mitigation In Agriculture', *Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), Pp. 789–813. Available At: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>.
- Wang, Y. And Xia, Y. (2013) 'Recent Progress In Supercapacitors: From Materials Design To System Construction. Advanced Materials', *Advanced Materials*, 25(37), Pp. 5336-5342.
- Xiao, D. *Et Al.* (2023) 'Thermoelectric Generator Design And Characterization For Industrial Pipe Waste Heat Recovery', *Processes*, 11(6), Pp. 1–12. Available At: <https://doi.org/10.3390/pr11061714>.