

Pembangkit Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik pada Dinding Model Bangunan

Rifky*¹⁾, Reza Ferizal Akbar¹⁾, Oktarina Heriyani¹⁾, Riyan Ariyansah¹⁾ & Akhmad Rizal Dzikrillah²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin,

²⁾Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika,
Fakultas Teknologi Industri dan Informatika
Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA

Jl. Tanah Merdeka No. 06 Rambutan Ciracas Jakarta Timur DKI Jakarta.

Corresponding author: rifky@uhamka.ac.id

Abstrak

Penelitian ini diinsiasi pemikiran membuat material bangunan dan atau komponen/bagian bangunan menjadi sumber energi listrik, terutama pada bagian atap dan dinding bangunan. Atap dan dinding bangunan memiliki potensi sebagai sarana pemanfaatan energi matahari menjadi energi listrik dengan konverter generator termoelektrik (TEG). Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah mendapatkan kinerja generator termoelektrik dengan rangkaian seri dan paralel sebagai pembangkit listrik pada dinding model bangunan. Metodologi penelitian yang digunakan adalah eksperimental yang diawali dengan perancangan alat penelitian yang terdiri dari rangka model bangunan dan susunan sistem termoelektrik. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan rangkaian TEG seri dengan paralel. Kedua rangkaian sistem TEG ini dilekatkan aluminium sebagai penyerap kalor dari panas matahari pada sisi panas TEG dan ditempelkan waterblock yang terbuat dari aluminium pada sisi dingin TEG. Pada sisi-sisi sekeliling antar modul TEG dilekatkan styrofoam sebagai isolator termal. Parameter pada penelitian ini terdiri dari variabel bebas, variabel moderator, dan variabel terikat. Variabel bebasnya adalah temperatur sisi panas TEG dan temperatur sisi dingin TEG. Untuk variabel moderator adalah temperatur air baik, debit air, temperatur air masuk ke waterblock, temperatur air keluar dari waterblock. Sementara variabel terikatnya adalah kuat arus listrik, tegangan listrik, daya listrik, dan efisiensi TEG. Hasil penelitian mendapatkan kuat arus listrik maksimum sebesar 0.54 A dan tegangan listrik maksimum sebesar 0,08 V. Daya listrik maksimum sebagai daya keluaran dari sistem TEG sebesar 0,0432 W dan efisiensi rata-rata termoelektrik sebesar 4%.

Kata Kunci: termoelektrik, pembangkit, listrik, dinding, bangunan

Abstract

This research was initiated by the idea of making building materials and/or building components/parts into sources of electrical energy, especially on the roof and walls of buildings. Building roofs and walls have the potential as a means of utilizing solar energy into electrical energy with a thermoelectric generator (TEG) converter. Therefore, the aim of this research is to obtain the performance of thermoelectric generators with series and parallel circuits as power generators on the walls of building models. The research methodology used is experimental which begins with designing research equipment consisting of a building model frame and a thermoelectric system arrangement. In this research, a series and parallel TEG circuit was compared. Both sets of TEG systems have aluminum attached to absorb heat from the sun on the hot side of the TEG and a water block made of aluminum is attached to the cold side of the TEG. Styrofoam is attached to the surrounding sides between the TEG modules as a thermal insulator. The parameters in this research consist of independent variables, moderator variables and dependent variables. The independent variables are the temperature of the hot side of the TEG and the temperature of the cold side of the TEG. The moderator variables are good water temperature, water discharge, water temperature entering the waterblock, water temperature leaving the waterblock. Meanwhile, the dependent variables are electric current strength, electric voltage, electric power, and TEG efficiency.

The research results showed that the maximum electric current was 0.54 A and the maximum electric voltage was 0.08 V. The maximum electric power as output power from the TEG system was 0.0432 W and the average thermoelectric efficiency was 4%.

Keywords: *thermoelectric, generator, electricity, wall, building*

1. PENDAHULUAN

Konsumsi energi semakin besar seiring dengan pertumbuhan jumlah manusia yang membutuhkan energi dengan segala aktivitasnya. Energi dibutuhkan mulai dari sektor domestik (rumah tangga), sekolah, pasar, industri, perdagangan, komersil, kewilayahan, sampai skala negara. Oleh karena itu kebutuhan yang semakin meningkat dengan segala keanekaragamannya tersebut energi harus disediakan oleh pengambil kebijakan di suatu negara. Namun, ironisnya kebutuhan energi berbanding terbalik dengan ketersediaannya, yakni energi berbahan fosil. Selama ini manusia terlena dengan energi fosil yang terdiri dari minyak bumi, batubara, dan gas alam. Ketiga energi fosil tersebut ketersediaannya semakin menipis. Untuk mengantisipasi krisis energi secara global beberapa negara sudah mengembangkan energi baru dan terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang mempunyai potensi besar dengan teknologi yang dapat dikembangkan untuk dimanfaatkan adalah energi surya. Berdasarkan perkembangan pemanfaatan energi surya yang sudah dan tengah berlangsung dan terus meningkat secara signifikan, maka diprediksi pada tahun 2050 kapasitas energi yang dimanfaatkan manusia sebesar 45% bersumber dari matahari [1].

Indonesia adalah negara tropis yang berada di garis khatulistiwa. Sepanjang tahun radiasi matahari menerangi dan menyinari negeri nusantara ini. Setiap hari matahari meradiasikan energi termal dan energi cahayanya ke negeri yang disebut zamrud khatulistiwa ini selama 10 sampai 12 jam dari pagi hingga petang hari dengan nilai radiasinya perhari rata-rata 4,8 kWh/m²/hari [2]. Sejak dahulu matahari sudah menjadi sumber kehidupan di bumi, dimana cahayanya berperan dalam proses asimilasi karbon atau fotosintesis pada tumbuhan hijau yang

menyediakan sumber makanan bagi kehidupan ekosistem bumi. Matahari dengan energi termalnya digunakan manusia untuk penguapan dan pengeringan hasil bumi, baik hasil panen pertanian maupun hasil tangkapan laut. Pemanfaatan energi matahari secara tradisional tersebut belum memberikan hasil yang dapat dimanfaatkan pelbagai kebutuhan, tidak ada pengubahannya menjadi energi bentuk lain, dan belum ada penyimpanan energinya. Akibatnya, sebagian energinya akan terbuang dengan percuma [3].

Salah satu pilihan untuk mengoptimalkan penggunaan energi matahari adalah mengubahnya menjadi energi bentuk lain. Melalui teknologi modul termoelektrik yang dapat mengubah energi termal menjadi listrik, maka pemanfaatan panas matahari menjadi lebih berguna. Modul termoelektrik dapat mengkonversi energi termal matahari menjadi energi listrik [4]. Modul-modul termoelektrik dapat disusun membentuk sistem termoelektrik yang dapat ditempatkan pada dinding bangunan, sehingga dinding bangunan menjadi sumber energi listrik. Selama ini sinar matahari yang terpapar pada dinding bangunan belum dimanfaatkan, sedangkan bagian bangunan yang menghasilkan energi menggunakan teknologi panel surya adalah bagian atapnya [5].

Bangunan menjadi sumber energi adalah bangunan yang dapat menihilkan konsumsi energinya, karena bangunan tidak memerlukan pasokan energi dari luar, bahkan dapat saja bangunan surplus energi meskipun masih utopia. Namun, untuk mencapai Zero Energy Building (ZEB) tidak semudah membalik telapak tangan. Jika konsep ini tercapai sudah prestasi luar biasa dalam menyediakan energi bagi bangunan. Konsep ZEB akan mengurangi kebutuhan energi sehingga terjadi peningkatan efisiensi. Antara kebutuhan energi dengan ketersediaan energi terjadi keseimbangan,

sehingga bangunan menjadi ramah energi dengan dukungan teknologi terbarukan [6] yang dapat dimulai dari sistem termoelektrik.

Perangkat termoelektrik sangat andal, stabil, tidak ada bagian yang bergerak, dan tidak menghasilkan getaran karena operasinya tidak memerlukan kontribusi energi mekanis sehingga penggunaannya menjadi lebih menarik, karena menawarkan keuntungan dari mengkonversikan energi termal dari radiasi matahari menjadi energi listrik [7]. Energi termal (temperatur tinggi) ditempatkan pada sisi panas modul termoelektrik dan pendingin (temperatur rendah) ditempatkan pada sisi dinginnya. Akibat perbedaan temperatur antar kedua sisinya, maka konversi energi terjadi yang hasilnya adalah energi listrik.

Berdasarkan hal di atas peluang untuk memanfaatkan energi termal surya menjadi beralasan, mengingat dari yang tersedia 208 GW baru dimanfaatkan 200 MW [8].

2. DASAR TEORI

2.1 Energi Surya

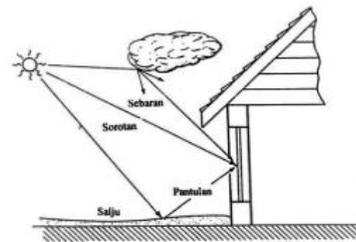
Energi surya yang diterima oleh permukaan bidang konverter besarnya dihitung sebagai (E) yaitu jumlah radiasi energi yang diterima dengan intensitas radiasi (I) rata-rata yang diterima selama satu jam, serta pada (A) luas bidang permukaan konverter, sehingga diformulasikan sebagai [9].

$$E = I \times A \quad (1)$$

2.1.1 Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang diterima oleh Bumi meliputi berbagai panjang gelombang dalam spektrum elektromagnetik, termasuk sinar inframerah, cahaya tampak, dan sinar ultraviolet. Sinar infra merah memiliki panjang gelombang 700 nm sampai 1 mm dengan distribusi energi sebesar 45% dari total energi radiasi matahari. Fungsi sinar infra merah adalah memberikan efek termal. Cahaya tampak berada pada panjang gelombang 400 – 700 nm dan besarnya 45% dari total energi radiasi matahari. Sinar ultraviolet mempunyai panjang gelombang 100 – 400 nm dengan besar radiasi 10% dari total energi radiasi

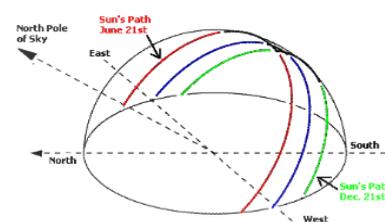
matahari. Energi radiasi matahari yang dipantulkan kembali ke angkasa sebesar 30%, energi radiasi yang diserap atmosfer sekitar 20%, dan energi radiasi yang mencapai permukaan bumi adalah sebesar 50% dari total besaran konstanta matahari sebesar 1353W/m² [10].



Gambar 1 Jenis-jenis radiasi sumber

2.1.2 Posisi Arah Matahari

Posisi Matahari dilihat dari Bumi dapat dihitung menggunakan koordinat matahari yang terdiri dari ketinggian (altitude) dan azimuth. Keduanya menggambarkan posisi Matahari pada suatu waktu dan lokasi tertentu di langit. Jika dilihat dari bumi, matahari bergerak dari timur ke barat secara konsisten. Arah matahari bergeser dari 23,50 ° LU (pada 21 Desember) ke 23,50 ° S (pada 21 Juni) membingkai siklus konstan dari waktu ke waktu seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Lintasan tahunan matahari

Lintasan matahari yang tampak dari Bumi merupakan hasil dari pergerakan rotasi dan revolusi Bumi. Secara matematis, lintasan ini dapat diprediksi menggunakan beberapa persamaan astronomi, seperti deklinasi matahari, sudut jam matahari, ketinggian

matahari, azimuth matahari, panjang hari, dan ekuasi waktu. Untuk analisis energi matahari ASHRAE menggunakan *relative transmittance* untuk menggambarkan jumlah radiasi matahari langsung yang melewati atmosfer dan mencapai permukaan tanah, dengan persamaan [11].

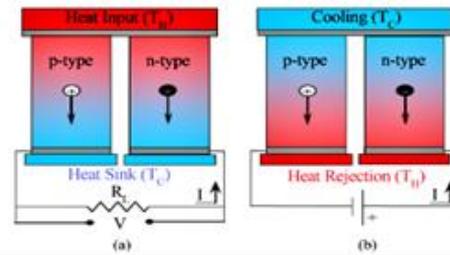
$$F_{TB}(\theta_s) = 1 - b_o \left(\frac{1}{\cos\theta_s} - 1 \right) \quad (2)$$

Persamaan di atas untuk memahami bagaimana sudut datang radiasi mempengaruhi efisiensi sistem, dengan penjelasan: $F_{TB}(\theta_s)$ adalah faktor transmisi relatif radiasi langsung, θ_s adalah sudut datang sinar matahari terhadap normal permukaan, dan b_o adalah koefisien kehilangan optik yang tergantung pada material dan desain permukaan.

2.2 Termoelektrik

Termoelektrik adalah material yang dapat mengkonversi langsung temperatur gradien terhadap perbedaan potensi listrik [12]. Termoelektrik mempunyai dua jenis yaitu Thermoelectric cooler (TEC) dan Thermoelectric generator (TEG). Kedua jenis elemen termoelektrik mampu mengubah termal atau energi panas menjadi listrik dan sebaliknya. Elemen termoelektrik berfungsi sebagai sarana untuk mengubah listrik menjadi termal atau panas yang berbasis konsep efek Peltier, yang diaplikasikan sebagai jenis Thermoelectric Cooling TEC, sedangkan penggunaan elemen termoelektrik untuk pembangkit listrik dengan mengubah termal atau panas menjadi listrik adalah konsep efek Seebeck, yang diterapkan pada elemen tipe Thermoelectric Generator TEG [13].

Untuk memahami perbedaan antara TEG dan TEC lebih jelasnya dapat diamati dan ditelaah dengan seksama pada gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3 Pengaturan modul termoelektrik untuk (a) pembangkit listrik oleh efek Seebeck dan (b) pendinginan oleh efek Peltier.

2.2.1 Karakteristik Termoelektrik

Termoelektrik memiliki berbagai karakteristik sesuai dengan konsep efeknya. Berkenaan dengan termoelektrik, tidak dapat dipisahkan dari teori dasar *Joule Effect*, *Peltier effect*, *Seebeck effect* dan *Thomson effect*. Ketiga teori dasar ini adalah spekulasi dasar termoelektrik [14].

2.2.1.1 Joule Effect

Efek Joule pada termoelektrik mengacu pada fenomena di mana energi listrik yang melewati material diubah menjadi panas karena hambatan listrik material tersebut. Dalam konteks termoelektrik, efek Joule bisa menjadi faktor signifikan karena mempengaruhi efisiensi sistem konversi energi panas menjadi listrik (atau sebaliknya). Efek Joule terjadi ketika arus listrik mengalir melalui suatu material dengan hambatan listrik tertentu, menghasilkan panas yang dihitung menggunakan rumus [15]:

$$Q_j = I^2 \cdot R \cdot t \quad (3)$$

2.2.1.2 Seebeck Effect

Efek Seebeck adalah konversi suhu gradien di persimpangan dua logam berbeda dengan tegangan listrik dalam kisaran milivolt perbedaan Kelvin. Efeknya nonlinear dengan suhu, dan tergantung pada suhu absolut, jenis dan struktur bahan. Efek Seebeck terjadi ketika ada perbedaan suhu (ΔT) antara dua ujung material konduktor atau semikonduktor. Perbedaan suhu ini menciptakan aliran elektron yang menghasilkan tegangan listrik

(V). Hubungan antara tegangan listrik dan perbedaan suhu diberikan oleh [16]:

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \quad (4)$$

2.2.1.3 Peltier Effect

Efek Peltier adalah produksi atau penyerapan panas di persimpangan antara dua konduktor yang berbeda ketika muatan listrik mengalir melaluinya. Efek Peltier terjadi ketika arus listrik (I) mengalir melalui sambungan antara dua bahan berbeda, menghasilkan pemanasan di satu sisi dan pendinginan di sisi lainnya. Fenomena ini dijelaskan oleh persamaan berikut [17]:

$$Q = \pi \cdot I \quad (5)$$

2.2.1.4 Thomson Effect

Efek Thomson terjadi ketika arus listrik (I) mengalir melalui konduktor yang memiliki gradien suhu (∇T) (perbedaan suhu sepanjang panjang material). Fenomena ini menyebabkan konduktor menyerap atau melepaskan panas, bergantung pada arah arus relatif terhadap gradien suhu. Koefisien Thomson (τ) adalah parameter material yang menunjukkan kemampuan suatu material untuk menghasilkan atau menyerap panas akibat interaksi gradien suhu dan arus listrik, yang secara matematis dirumuskan [18].

$$Q = \tau \cdot I \cdot \nabla T \quad (6)$$

2.3 Modul Termoelektrik

Termoelektrik sebagai potensi energi yang telah dimanfaatkan cukup lama namun harus dibangun kembali sebagai energi alternatif dengan sumber konversi yang melimpah sebagai mata air transformasi. Dengan inovasi TEG yang meninjau kemampuan daya yang dihasilkan dengan memanfaatkan pendinginan dan temperatur panas dengan perbedaan suhu dari kedua komponen ini untuk membangun hasil menjadi sumber energi listrik. Inovasi ini membutuhkan jenis perubahan yang kreatif sebagai pengujian transformasi panas ke

dingin, untuk memberikan batas hasil kritis generator [19].

2.3.1 Tegangan Listrik

Tegangan listrik adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam sebuah rangkaian listrik. Tegangan listrik ini mendorong aliran arus listrik melalui suatu penghantar. Sementara gaya gerak listrik adalah energi per satuan muatan yang dihasilkan oleh sumber energi listrik seperti baterai atau generator. Gaya gerak listrik mengacu pada kemampuan sumber listrik untuk menghasilkan arus listrik dalam rangkaian. Hubungan antara tegangan listrik (V), arus listrik (I), dan hambatan (R) dalam suatu rangkaian listrik dijelaskan dengan Hukum Ohm. Hukum ini dirumuskan oleh Georg Simon Ohm, seorang fisikawan Jerman. Bunyinya, “besar arus listrik yang mengalir melalui suatu penghantar sebanding dengan tegangan listrik di ujung-ujung penghantar tersebut dan berbanding terbalik dengan hambatannya”, yang dinyatakan dalam persamaan [20]:

$$V = I \cdot R \quad (7)$$

2.3.2 Arus Listrik

Arus listrik adalah aliran muatan listrik melalui suatu penghantar dalam satuan waktu tertentu. Arus listrik terjadi karena adanya perbedaan potensial listrik (tegangan) yang mendorong elektron bergerak dari satu titik ke titik lainnya dalam suatu rangkaian. Arus listrik umumnya berupa aliran elektron (muatan negatif) dalam logam penghantar. Dalam beberapa kasus, seperti larutan elektrolit, ion positif dan negatif juga berkontribusi pada arus. Arus listrik dirumuskan sebagai [21]:

$$I = Q / t \quad (8)$$

2.3.3 Daya Listrik

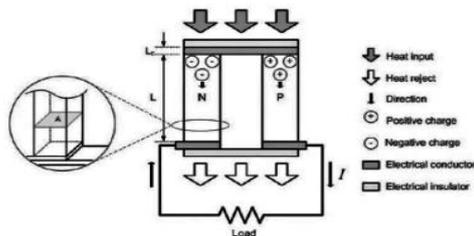
Daya listrik adalah laju transfer energi listrik atau laju penggunaan energi listrik dalam suatu rangkaian. Daya listrik menunjukkan seberapa cepat energi listrik diubah menjadi bentuk energi lain, seperti

energi panas, cahaya, atau gerak. Daya listrik pada termoelektrik mengacu pada daya yang dihasilkan atau dikonsumsi oleh perangkat termoelektrik saat mengubah energi termal menjadi energi listrik (generator termoelektrik) atau sebaliknya (pendingin termoelektrik). Prinsip ini didasarkan pada efek Seebeck, Peltier, dan Thomson. Persamaan daya listrik adalah [22]:

$$P = V \cdot I \quad (9)$$

2.4 Kinerja Termoelektrik

Generator termoelektrik bekerja dengan efek Seebeck yang dipresentasikan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821. Kinerja efek ini adalah jika ada dua material berbeda yang dihubungkan dalam rangkaian tertutup dan pada dua perpotongannya dan dipertahankan pada temperatur berbeda, sehingga aliran listrik akan mengalir di sirkuit. Perbedaannya dapat diperkirakan dengan memasukkan galvanometer pada salah satu sambungannya [23].



Gambar 4 Skema kinerja generator termoelektrik

Kinerja modul termoelektrik diukur dengan besaran figure of merit (Z), yang juga merupakan karakteristik dari material modul termoelektrik. Untuk material yang baik memiliki nilai sama dengan atau lebih dari satu ($Z \geq 1$) [24]

2.4.1 Figure of Merit

Figure of merit (Z) adalah parameter kunci yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja material termoelektrik dalam konversi energi termal menjadi listrik (generator termoelektrik) atau listrik menjadi efek pendinginan/pemanasan (pendingin

termoelektrik). Semakin tinggi nilai Z , semakin efisien material tersebut dalam aplikasi termoelektrik. Nilai Z dihitung dengan persamaan (10) di bawah ini. Material TEG bismuth telurida (Bi_2Te_3) mempunyai besaran resistivitas listrik (ρ) $0,000009 \Omega \cdot \text{m}$, koefisien Seebeck (α) 0.050774 (V/K) , konduktivitas termal (k) TEC adalah 0.1391 (W/mK) dan konduktivitas listrik sebesar $1,1 \times 10^5 \text{ S/m}$ [25][26]:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (10)$$

2.4.2 Efisiensi

Efisiensi generator termoelektrik dihitung dari pembangkitan atau keluaran daya listrik dibagi dengan daya termal masukan. Besarnya efisiensi TEG (η) ditentukan dari formulasi berikut [27]:

$$\eta = \frac{p}{Qh} \quad (11)$$

Efisiensi pada persamaan (11) dapat juga ditentukan dengan lebih rinci dengan menggunakan persamaan (12) di bawah ini. Pada persamaan berikut diikutsertakan besaran tegangan (V) dengan satuan volt, arus listrik (I) dengan satuan ampere, α yaitu efek Seebeck, T_h adalah temperatur sisi panas dan T_c temperatur sisi dingin, R merupakan resistansi listrik dan K yaitu konduktansi termal [24] material modul termoelektrik.

$$\eta_t = \frac{VI}{\alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K (T_h - T_c)} \quad (12)$$

Resistansi listrik (R) material modul termoelektrik diperoleh dari persamaan (13) di bawah ini. Besaran-besaran yang digunakan untuk menghitungnya adalah ρ adalah resistivitas listrik, L merupakan tebal material modul termoelektrik dan A adalah luas permukaan [24] modul termoelektrik:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (13)$$

Demikian pula halnya dalam menghitung besar konduktansi termal (K) material modul termoelektrik dengan menggunakan persamaan (14) dibawah ini, dimana digunakan besaran (k) yang merupakan konduktivitas termal, A adalah luas permukaan modul termoelektrik dan L merupakan tebal modul termoelektrik[24]:

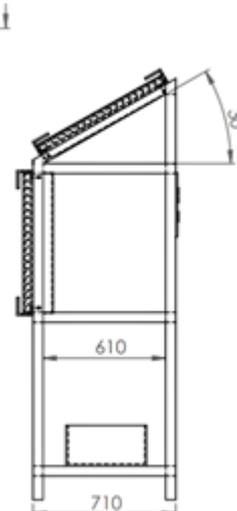
$$K = \frac{k \cdot A}{L} \quad (14)$$

2.5 Dinding sebagai Pemasok Energi Bangunan

Konsep zero energy building (ZEB) adalah pemahaman tentang struktur yang umumnya tidak memakai energi yang bersumber dari jaringan listrik (PLN) atau produk minyak bumi. Melalui ZEB bangunan dapat memenuhi kebutuhannya sendiri dari sumber daya yang ramah lingkungan, misalnya, berorientasi matahari, angin, air, biofuel, biomassa, dan biogas [28]. TEG sebagai konverter energi termal matahari menjadi energi listrik dapat mendukung konsep ZEB. Diperkirakan bahwa bangunan mengkonsumsi sekitar 25%-30% dari total penggunaan energi di seluruh dunia. Sebagian besar konsumsi energi tersebut digunakan untuk kenyamanan termal dalam bangunan melalui aplikasi pemanasan dan pendinginan. Terbukti bahwa mengurangi konsumsi energi bangunan menjadi penting, mempertimbangkan keterbatasan sumber daya energi konvensional yang merugikan yang terkait dengan penggunaan jenis energi tersebut pada lingkungan, dengan membuat sistem TEG pada dinding bangunan guna menciptakan energi yang ramah lingkungan dengan pemanfaatan termal matahari sehingga bangunan mempunyai pasokan energi sendiri [29].

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian



Gambar 5 Desain model penelitian

Gambar di atas adalah desain model penelitian yang berbentuk rangka dengan konstruksi besi hollow 5cm x 5cm dengan ketinggian rangka 2 meter. Pada rangka tersebut terdapat sistem termoelektrik, pendingin berbahan aluminium, dan bak penampung.

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan modul termoelektrik dan material yang akan digunakan.
2. Perancangan sistem termoelektrik.
3. Membuat rangka untuk penelitian
4. Penyusunan sistem rangkaian dengan variabel seri dan paralel.
5. Membuat sistem pendingin untuk penelitian.
6. Melakukan perakitan modul termoelektrik menjadi sistem termoelektrik ke rangka dan pendingin.
7. Pengecekan komponen perangkat peralatan dan alat ukur sebelum memulai penelitian.
8. Melakukan pengukuran variabel masukan dan keluaran setiap 30 menit dari pukul 08.00 sampai 16.00 WIB.
9. Mengumpulkan dan mengolah data
10. Simpulan

3.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Variabel bebas: Perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin termoelektrik
2. Variabel moderator:
 - a. Rangkaian seri modul termoelektrik
 - b. Rangkaian paralel modul termoelektrik
3. Variabel terikat:
 - a. Daya listrik
 - b. Efisiensi



Gambar 6 Alat penelitian TEG

Gambar di atas adalah alat penelitian dengan model pembangkit listrik pada dinding bangunan dengan termoelektrik sebagai sumber energi serta menggunakan dua variabel yaitu rangkaian seri dan paralel.

3.4 Metode Pengambilan dan Pengumpulan Data

Pengambilan data dilakukan di lantai 5 Fakultas Teknologi Industri dan Informatika [FTII] UHAMKA dengan mengukur intensitas radiasi matahari, kecepatan angin, temperatur, voltage dan arus yang dihasilkan. Metode yang dilakukan yaitu eksperimental.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Temuan atau Hasil Penelitian

Setelah melakukan penelitian menggunakan hasil rancangan generator termoelektrik dengan rangka yang dibuat menyerupai dinding bangunan maka dihasilkan data berikut: intensitas radiasi matahari, kelembaban udara, kecepatan angin (m/s), debit air (lpm), temperatur termoelektrik sisi panas, temperatur termoelektrik sisi dingin, temperatur termoelektrik sisi pendingin, temperatur lingkungan, temperatur air masuk, temperatur air keluar, temperatur air (bak), tegangan (volt), dan arus (ampere).

4.1.1 Hasil Pengukuran TEG Rangkaian Seri pada Dinding

Pengukuran parameter baik masukan maupun luaran dari generator termoelektrik yang dirangkai seri. Hasil pengukuran dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengukuran TEG rangkaian seri pada dinding

No. Pukul	Kelembaban Udara		DATA MASUKAN										DATA LUARAN		KETERANGAN
	(Dry bulb)	(Wet bulb)	$T_{amb}(^{\circ}C)$	$T_{sisi\ panas}(^{\circ}C)$	$T_{sisi\ dingin}(^{\circ}C)$	$T_{sisi\ pendingin}(^{\circ}C)$	$T_{lingkungan}(^{\circ}C)$	$T_{air\ masuk}(^{\circ}C)$	$T_{air\ keluar}(^{\circ}C)$	$T_{air\ bak}(^{\circ}C)$	$I_{tegangan}(V)$	$I_{arus}(A)$			
1 08.00	28	25	1,2	28,4	30,7	29,6	28,1	28,3	28,1	2	0,07	0,41	Mendung		
2 08.30	28	25	2,4	28,2	30,9	29,4	28,3	29,6	29,5	29,6	2	0,05	0,55	Mendung	
3 09.00	29	26	2,2	28,9	31,6	29,6	30,2	29,8	29,8	29,8	2	0,08	0,54	Mendung	
4 09.30	30	25	2,4	29,1	31,9	29,2	30,5	30,1	29,9	30,1	2	0,05	0,58	Mendung	
5 10.00	30	25	1,1	30,2	31,8	29,4	30,2	30,2	30	30,2	2	0,04	0,40	Mendung	
6 10.30	30	24	3,1	28,4	31,5	29,1	29,8	29,6	29,5	29,6	2	0,02	0,55	Gerimis	
7 11.00	30	25	2,8	28,2	30,8	28,9	29,8	29,3	29,3	29,3	2	0,02	0,51	Gerimis	
8 11.30	29	25	1,4	28,6	30,4	28,8	29,4	29,4	29,2	29,4	2	0,02	0,51	Gerimis	
9 12.00	28	24	3,3	27,8	30,2	29,2	29,6	29,6	29,5	29,6	2	0,02	0,54	Gerimis	
10 12.30	28	24	3,8	29,5	30,2	30,4	30,1	30,3	30,1	30,3	2	0,04	0,58	mendung	
11 13.00	29	25	1,2	29,8	31,1	30,9	30,6	30,5	30,3	30,5	2	0,04	0,27	mendung	
12 13.30	28	26	1,6	29,8	31,5	30,8	30,9	30,8	30,5	30,8	2	0,05	0,21	mendung	
13 14.00	28	26	2,8	29,5	31,9	31,2	31,1	30,4	30,2	30,4	2	0,03	0,58	Mendung	
14 14.30	30	26	2,2	30,1	30,8	30,4	30,7	30,1	29,9	30,1	2	0,04	0,55	mendung	
15 15.00	27	25	3,1	30,4	30,5	30,4	30,5	30,6	30,2	30,6	2	0,03	0,28	mendung	
16 15.30	28	26	2,4	30,2	30,2	30,1	30,8	30,9	30,5	30,9	2	0,04	0,35	mendung	
17 16.00	29	26	1,7	30,6	30,5	30,4	30,5	30,5	30,1	30,5	2	0,05	0,33	mendung	
Maksimum	30	26	3,8	30,6	31,8	31,2	31,1	30,9	30,5	30,9	2	0,08	0,54		
Minimum	27	24	1,1	27,8	30,2	28,8	28,1	28,1	28,3	28,1	2	0,02	0,51		
Rata-rata	28,89	25,18	2,25	29,31	31,04	29,87	30,12	29,99	29,81	29,99	2,00	0,04	0,25		

Dari Tabel 1 di atas didapat temperatur termoelektrik sisi panas maksimum 32,4°C dan minimum 30,2°C. Temperatur termoelektrik sisi dingin maksimum 31,2°C dan minimum 28,8°C. Arus termoelektrik maksimum 0,54 ampere dan minimum 0,11 ampere. Tegangan termoelektrik maksimum 0,08 volt dan minimum 0,02 volt.

4.1.2 Hasil Pengukuran TEG Rangkaian Paralel pada Dinding

Pengukuran parameter baik masukan maupun luaran generator termoelektrik yang dirangkaiakan paralel. Hasil pengukuran dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2 Hasil pengukuran TEG rangkaian paralel pada dinding

No.	Pukul	DATA MASUKAN			DATA LUARAN			KINERJA SISTEM		
		T _{hot} [K]	T _{cold} [K]	ΔT _{TE} [K]	V [volt]	I [ampere]	P [watt]	S [volt/K]	Z	η
1	08.00	303,5	302,7	0,8	0,01	0,21	0,0021	0,0125	0,00005	0,0015
2	08.30	303,7	302,6	1,1	0,01	0,19	0,0019	0,0091	0,00002	0,0013
3	09.00	303,3	302,8	0,5	0,01	0,22	0,0022	0,0200	0,00012	0,0013
4	09.30	304,6	302,4	2,2	0,02	0,32	0,0064	0,0091	0,00002	0,0024
5	10.00	305,1	302,2	2,9	0,01	0,17	0,0017	0,0034	0,00000	0,0006
6	10.30	304,4	302	2,4	0,01	0,15	0,0015	0,0042	0,00001	0,0007
7	11.00	303,7	301,7	2	0,02	0,16	0,0032	0,0100	0,00003	0,0015
8	11.30	303,4	301,9	1,5	0,01	0,09	0,0009	0,0067	0,00001	0,0006
9	12.00	303,2	302,5	0,7	0,01	0,12	0,0012	0,0143	0,00006	0,0011
10	12.30	303,6	302,8	0,8	0,01	0,18	0,0018	0,0125	0,00005	0,0014
11	13.00	304,2	303,5	0,7	0,02	0,22	0,0044	0,0286	0,00024	0,0018
12	13.30	304,4	303,5	0,9	0,02	0,15	0,0030	0,0222	0,00014	0,0017
13	14.00	304,5	304	0,5	0,01	0,18	0,0018	0,0200	0,00012	0,0012
14	14.30	303,5	303,2	0,3	0,01	0,21	0,0021	0,0333	0,00032	0,0009
15	15.00	303,7	303,5	0,2	0,01	0,34	0,0034	0,0500	0,00072	0,0007
16	15.30	303,3	303,1	0,2	0,01	0,14	0,0014	0,0500	0,00072	0,0006
17	16.00	303,8	303,5	0,3	0,01	0,28	0,0028	0,0333	0,00032	0,0010

Dari Tabel 2 di atas didapat temperatur termoelektrik sisi panas maksimum 32,1°C dan minimum 30,2°C. Temperatur termoelektrik sisi dingin maksimum 31°C dan minimum 28,7°C. Arus termoelektrik maksimum 0,34 ampere dan minimum 0,09 ampere. Tegangan termoelektrik maksimum 0,02 volt dan minimum 0.01 volt.

4.2 Pembahasan

Dalam pembahasan ini dilakukan terlebih dahulu pengolahan data. Data yang diperoleh berasal dari data mentah yang dimasukkan dalam perhitungan.

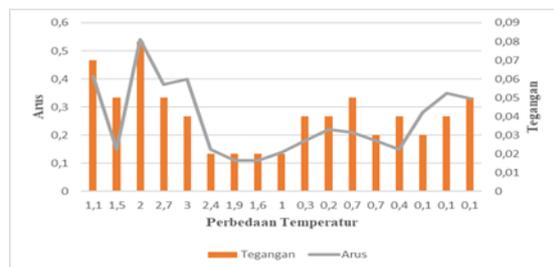
4.2.1 Pengaruh Rangkaian Seri terhadap Kinerja TEG pada Dinding

Hasil pengolahan data pada Tabel 3 di bawah ini menunjukkan hubungan antara waktu pengukuran dengan semua variabel TEG rangkaian seri yaitu data masukan, data luaran dan kinerja sistem TEG. Data-data rangkaian seri dimasukkan dalam Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3 Pengaruh rangkaian seri terhadap kinerja TEG pada dinding

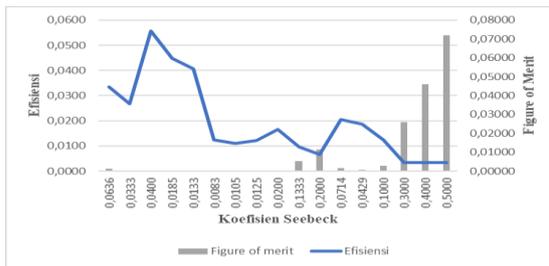
No.	Pukul	DATA MASUKAN			DATA LUARAN			KINERJA SISTEM		
		T _{hot} [K]	T _{cold} [K]	ΔT _{TE} [K]	V [volt]	I [ampere]	P [watt]	S [volt/K]	Z	η
1	08.00	303,7	302,6	1,1	0,07	0,41	0,0287	0,0636	0,00117	0,0335
2	08.30	303,9	302,4	1,5	0,05	0,15	0,0075	0,0333	0,00032	0,0269
3	09.00	304,6	302,6	2	0,08	0,54	0,0432	0,0400	0,00046	0,0557
4	09.30	304,9	302,2	2,7	0,05	0,38	0,0190	0,0185	0,00010	0,0449
5	10.00	305,4	302,4	3	0,04	0,40	0,0160	0,0133	0,00005	0,0405
6	10.30	304,5	302,1	2,4	0,02	0,15	0,0030	0,0083	0,00002	0,0123
7	11.00	303,8	301,9	1,9	0,02	0,11	0,0022	0,0105	0,00003	0,0110
8	11.30	303,4	301,8	1,6	0,02	0,11	0,0022	0,0125	0,00005	0,0122
9	12.00	303,2	302,2	1	0,02	0,14	0,0028	0,0200	0,00012	0,0166
10	12.30	303,7	303,4	0,3	0,04	0,18	0,0072	0,1333	0,00513	0,0096
11	13.00	304,1	303,9	0,2	0,04	0,22	0,0088	0,2000	0,01153	0,0065
12	13.30	304,5	303,8	0,7	0,05	0,21	0,0105	0,0714	0,00147	0,0206
13	14.00	304,9	304,2	0,7	0,03	0,18	0,0054	0,0429	0,00053	0,0186
14	14.30	303,8	303,4	0,4	0,04	0,15	0,0060	0,1000	0,00288	0,0123
15	15.00	303,5	303,4	0,1	0,03	0,28	0,0084	0,3000	0,02595	0,0033
16	15.30	303,2	303,1	0,1	0,04	0,35	0,0140	0,4000	0,04613	0,0033
17	16.00	303,5	303,4	0,1	0,05	0,33	0,0165	0,5000	0,07208	0,0033

Dari Tabel 3 didapatkan ΔT sisi panas dan dingin maksimum 3 K dan minimum 0,1 K. Arus termoelektrik maksimum 0,54 ampere dan minimum 0,11 ampere. Tegangan termoelektrik maksimum 0,08 volt dan minimum 0,02 volt. Dalam kinerja sistem koefisien Seebeck maksimum 0,5000 volt/K didapatkan dari persamaan (4) Figure of merit maksimum 0,0721 1/K didapatkan dari persamaan (10). Efisiensi rata-rata 4% didapatkan dari persamaan (11). Pada penelitian [18] figure of merit (Z) maksimum adalah sebesar 0,00267 1/K. Nilai Z juga dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir pada rangkaian, semakin tinggi nilai rata-rata arus yang dihasilkan, maka nilai Z rata-rata juga akan semakin tinggi. Efisiensi maksimal yang dihasilkan pada susunan seri yaitu 2% dalam penelitian Hendro Simatupang. Perlu diketahui bahwa semakin besar perbedaan temperatur dari sisi panas dan dingin TEG maka kinerja semakin baik dan akan memiliki efisiensi yang semakin tinggi [27].



Gambar 7 Pengaruh perbedaan temperatur terhadap tegangan dan arus pada rangkaian seri

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa kinerja termoelektrik hanya membutuhkan perbedaan temperatur dimana semakin tinggi selisih temperatur maka tegangan dan arus yang didapatkan semakin besar. Tegangan dan arus tertinggi 0,08 V dan 0,54A. Daya tertinggi yang dihasilkan yaitu pada pukul 09.30 WIB sebesar 0,0432 W karena temperatur pada saat itu meningkat. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh dari temperatur lingkungan selama pengambilan data (pengukuran).



Gambar 8 Pengaruh koefisien Seebeck terhadap figure of merit dan efisiensi pada rangkaian seri

Gambar 8 menunjukkan efisiensi dengan hasil maksimal yaitu 10%. Pada pukul 10.00 WIB terjadi kenaikan, tetapi efisiensi turun hingga pukul 13.00 WIB. Hal ini terjadi karena perbedaan temperatur sisi panas termoelektrik dengan sisi dingin terlalu rendah. Figure of merit meningkat pada pukul 14.30 WIB sampai 16.00 WIB karena dipengaruhi efek Seebeck, yang ditentukan oleh nilai tegangan dan perbedaan temperatur pada TEG.

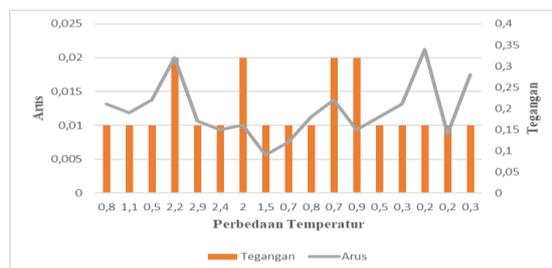
4.2.2 Pengaruh Rangkaian Paralel terhadap Kinerja TEG pada Dinding

Hasil pengolahan data pada Tabel 4 di bawah ini menunjukkan hubungan antara waktu pengukuran dengan semua variabel TEG rangkaian paralel yaitu data masukan, data luaran dan kinerja sistem TEG. Data-data rangkaian paralel dimasukkan dalam Tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4 Pengaruh rangkaian paralel terhadap kinerja TEG pada dinding

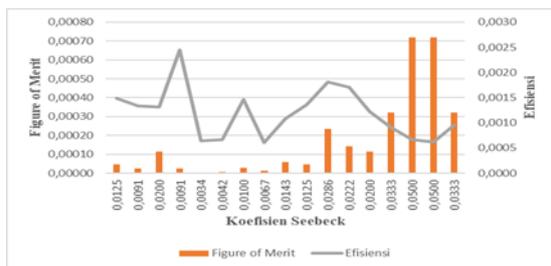
No.	Pukul	DATA MASUKAN			DATA LUARAN			KINERJA SISTEM		
		T _{hot} [K]	T _{cold} [K]	ΔT _{TE} [K]	V [volt]	I [ampere]	P [watt]	S [volt/K]	Z	η
1	08.00	303,5	302,7	0,8	0,01	0,21	0,0021	0,0125	0,00005	0,0015
2	08.30	303,7	302,6	1,1	0,01	0,19	0,0019	0,0091	0,00002	0,0013
3	09.00	303,3	302,8	0,5	0,01	0,22	0,0022	0,0200	0,00012	0,0013
4	09.30	304,6	302,4	2,2	0,02	0,32	0,0064	0,0091	0,00002	0,0024
5	10.00	305,1	302,2	2,9	0,01	0,17	0,0017	0,0034	0,00000	0,0006
6	10.30	304,4	302	2,4	0,01	0,15	0,0015	0,0042	0,00001	0,0007
7	11.00	303,7	301,7	2	0,02	0,16	0,0032	0,0100	0,00003	0,0015
8	11.30	303,4	301,9	1,5	0,01	0,09	0,0009	0,0067	0,00001	0,0006
9	12.00	303,2	302,5	0,7	0,01	0,12	0,0012	0,0143	0,00006	0,0011
10	12.30	303,6	302,8	0,8	0,01	0,18	0,0018	0,0125	0,00005	0,0014
11	13.00	304,2	303,5	0,7	0,02	0,22	0,0044	0,0286	0,00024	0,0018
12	13.30	304,4	303,5	0,9	0,02	0,15	0,0030	0,0222	0,00014	0,0017
13	14.00	304,5	304	0,5	0,01	0,18	0,0018	0,0200	0,00012	0,0012
14	14.30	303,5	303,2	0,3	0,01	0,21	0,0021	0,0333	0,00032	0,0009
15	15.00	303,7	303,5	0,2	0,01	0,34	0,0034	0,0500	0,00072	0,0007
16	15.30	303,3	303,1	0,2	0,01	0,14	0,0014	0,0500	0,00072	0,0006
17	16.00	303,8	303,5	0,3	0,01	0,28	0,0028	0,0333	0,00032	0,0010

Dari Tabel 4 di atas didapat tegangan termoelektrik maksimum 0,02 volt dan minimum 0.01 volt. Daya termoelektrik maksimum 0,0064 Watt dan minimum 0,0034 Watt. Dalam kinerja sistem koefisien Seebeck maksimum 0,0500 volt/K didapatkan dari persamaan (4). Figure of merit rata-rata 0,000173 1/K didapatkan dari persamaan (10). Efisiensi rata-rata 2% didapatkan dari persamaan (11). Dalam penelitian [30] nilai figure of merit (Z) rata-rata adalah sebesar 0,00179 1/K. Nilai Z lebih besar pada penelitian sebelumnya karena karakteristik bahan modul termoelektrik yang digunakan lebih berkinerja dibandingkan dengan penelitian kali ini. Semakin besar nilai Z, performansi termoelektrik akan semakin bagus. Efisiensi maksimum yang diperoleh dari penelitian didapatkan pada variasi termoelektrik secara paralel yaitu 0,5% [31].



Gambar 9 Pengaruh perbedaan temperatur terhadap tegangan dan arus pada rangkaian paralel

Gambar 9 menunjukkan tegangan dan arus tertinggi adalah 0,02 V dan 0,34A. Temperatur mengalami kenaikan setiap 30 menitnya dan mencapai temperatur tertinggi pada pukul 10.00 WIB serta mengalami naik turun hingga sore hari. Daya tertinggi dihasilkan yaitu pada pukul 09.30 WIB sebesar 0,0064 W. Arus keluaran generator semakin besar dengan bertambahnya temperatur sisi panas atau berkurangnya temperatur sisi dingin.



Gambar 10 Pengaruh koefisien Seebeck terhadap figure of merit dan efisiensi pada rangkaian paralel

Gambar 10 menunjukkan efisiensi rata-rata termoelektrik yaitu 2%. Waktu efisiensi tertinggi pukul 10.00 WIB dan terendah 15.00 WIB. Efisiensi meningkat apabila temperatur sisi panas semakin bertambah atau selisih temperatur kedua sisi termoelektrik semakin besar. Pada pukul 14.30 WIB sampai 15.30 WIB terjadi lonjakan kenaikan figure of merit dan efek Seebeck. Hal ini terjadi karena nilai Seebeck yang tinggi. Nilai efek Seebeck yang tinggi disebabkan dari peningkatan tegangan atas perbedaan temperatur pada TEG.

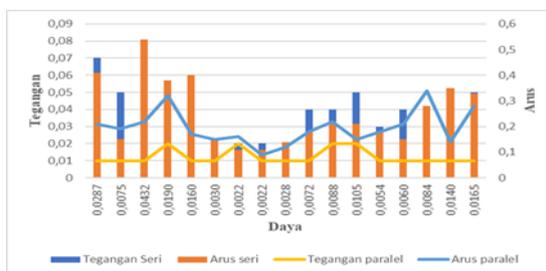
4.2.3 Pengaruh Rangkaian Seri dan Paralel terhadap Kinerja TEG pada Dinding

Untuk mengetahui pengaruh rangkaian seri dan paralel terhadap kinerja TEG maka dibuat perbandingan daya luaran. Oleh karena itu dibuat perhitungan sebagaimana Tabel 5.

Tabel 5 Perhitungan daya luaran termoelektrik

NO	PUKUL	RANGKAIAN TEG					
		SERI			PARALEL		
		V [volt]	I [ampere]	P [Watt]	V [volt]	I [ampere]	P [Watt]
1	08.00	0,07	0,41	0,0287	0,01	0,21	0,0021
2	08.30	0,05	0,15	0,0075	0,01	0,19	0,0019
3	09.00	0,08	0,54	0,0432	0,01	0,22	0,0022
4	09.30	0,05	0,38	0,0190	0,02	0,32	0,0064
5	10.00	0,04	0,40	0,0160	0,01	0,17	0,0017
6	10.30	0,02	0,15	0,0030	0,01	0,15	0,0015
7	11.00	0,02	0,11	0,0022	0,02	0,16	0,0032
8	11.30	0,02	0,11	0,0022	0,01	0,09	0,0009
9	12.00	0,02	0,14	0,0028	0,01	0,12	0,0012
10	12.30	0,04	0,18	0,0072	0,01	0,18	0,0018
11	13.00	0,04	0,22	0,0088	0,02	0,22	0,0044
12	13.30	0,05	0,21	0,0105	0,02	0,15	0,0030
13	14.00	0,03	0,18	0,0054	0,01	0,18	0,0018
14	14.30	0,04	0,15	0,0060	0,01	0,21	0,0021
15	15.00	0,03	0,28	0,0084	0,01	0,34	0,0034
16	15.30	0,04	0,35	0,0140	0,01	0,14	0,0014
17	16.00	0,05	0,33	0,0165	0,01	0,28	0,0028

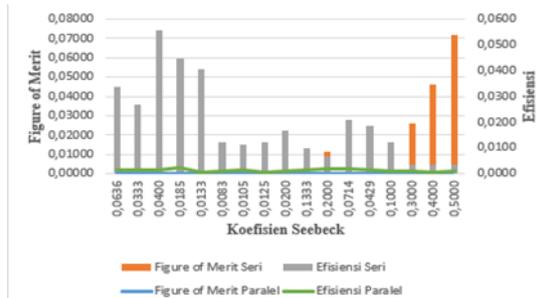
Dari data yang telah diolah menghasilkan daya luaran rangkaian seri lebih besar dari paralel karena arus maksimum yang dihasilkan susunan seri sebesar 0,54 A, sementara susunan paralel 0,34 A, diikuti dengan nilai tegangan maksimum seri sebesar 0,8 V dan paralel 0,2 V. Pada rangkaian seri arus yang dihasilkan lebih besar karena arus yang mengalir pada rangkaian seri besarnya sama sedangkan tegangannya berbeda. Pada rangkaian paralel arus yang mengalir pada termoelektrik nilainya berbeda tetapi memiliki tegangan yang sama.



Gambar 11 Pengukuran terhadap temperatur, tegangan dan arus pada rangkaian seri dan paralel

Gambar 11 menunjukkan tegangan pada rangkaian seri mendapatkan hasil maksimum pada pukul 09.00 WIB sebesar 0,08 V, rangkaian paralel maksimum pada pukul 09.30 WIB sebesar 0,02 V. Diikuti arus maksimum rangkaian seri pada jam yang sama sebesar 0,54 A namun arus pada rangkaian paralel arus maksimum yang didapatkan pada pukul 15.00 sebesar 0,34 A. Hasil dari tegangan dan arus termoelektrik menghasilkan daya maksimum pada rangkaian seri dan paralel di pukul 09.00

dan 09.30 sebesar 0,0432 W dan 0,0064 W. Dilihat dari data tersebut bahwa tegangan, arus dan daya rangkaian seri lebih besar dari pada rangkaian paralel. Hal ini disebabkan tegangan pada rangkaian seri nilainya berbeda sedangkan pada rangkaian paralel nilainya sama, dan arus yang mengalir pada rangkaian seri nilainya sama sedangkan arus pada paralel berbeda. Daya pada rangkaian seri lebih besar karena nilai dari tegangan dan arus lebih besar.



Gambar 12 Harga figure of merit, koefisien Seebeck, dan efisiensi pada rangkaian seri dan paralel

Tabel 6 Kinerja sistem termoelektrik

NO	PUKUL	Kinerja Sistem TEG					
		SERI			PARAREL		
		α	Z	η	α	Z	η
1	08.00	0,0636	0,00117	0,0335	0,0125	0,00005	0,0015
2	08.30	0,0333	0,00032	0,0269	0,0091	0,00002	0,0013
3	09.00	0,0400	0,00046	0,0557	0,0200	0,00012	0,0013
4	09.30	0,0185	0,00010	0,0449	0,0091	0,00002	0,0024
5	10.00	0,0133	0,00005	0,0405	0,0034	0,00000	0,0006
6	10.30	0,0083	0,00002	0,0123	0,0042	0,00001	0,0007
7	11.00	0,0105	0,00003	0,0110	0,0100	0,00003	0,0015
8	11.30	0,0125	0,00005	0,0122	0,0067	0,00001	0,0006
9	12.00	0,0200	0,00012	0,0166	0,0143	0,00006	0,0011
10	12.30	0,1333	0,00513	0,0096	0,0125	0,00005	0,0014
11	13.00	0,2000	0,01153	0,0065	0,0286	0,00024	0,0018
12	13.30	0,0714	0,00147	0,0206	0,0222	0,00014	0,0017
13	14.00	0,0429	0,00053	0,0186	0,0200	0,00012	0,0012
14	14.30	0,1000	0,00288	0,0123	0,0333	0,00032	0,0009
15	15.00	0,3000	0,02595	0,0033	0,0500	0,00072	0,0007
16	15.30	0,4000	0,04613	0,0033	0,0500	0,00072	0,0006
17	16.00	0,5000	0,07208	0,0033	0,0333	0,00032	0,0010

Tabel 6 menunjukkan data yang telah diolah menjadi efisiensi (%) yaitu diperoleh dari persamaan (10). Susunan seri memiliki efisiensi rata-rata 4% sedangkan paralel 2%. Hal ini disebabkan karena nilai daya dari rangkaian seri lebih besar daripada rangkaian paralel. Perbandingan efisiensi total pada kedua susunan termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 12. Figure of merit rangkaian seri sebesar 0,07208 1/K dan rangkaian paralel sebesar 0,00072 1/K, pada rangkaian paralel kinerja lebih besar karena koefisien Seebeck-nya lebih besar. Koefisien Seebeck pada rangkaian seri mempunyai nilai maksimum 0,5000 volt/K sedangkan pada rangkaian paralel 0,0500 volt/K. Koefisien Seebeck lebih besar dikarenakan nilai tegangan dan perbedaan temperatur antara sisi dingin dan panas cenderung lebih besar.

Gambar 12 menunjukkan koefisien Seebeck pada rangkaian seri mempunyai nilai maksimum 0,5000 volt/K dan paralel 0,0500 volt/K di jam yang berbeda yaitu pada pukul 15.00 WIB sampai 16.00 WIB. Koefisien Seebeck lebih besar dikarenakan nilai tegangan dan perbedaan temperatur antara sisi dingin dan panas cenderung lebih besar. *Figure of merit* (Z) susunan seri mempunyai nilai maksimum 0,07208 1/K dan rangkain paralel 0,00072 1/K, nilai (Z) pada rangkaian seri lebih besar karena mempunyai koefisien Seebeck yang besar. Efisiensi rata-rata pada rangkaian seri yaitu sebesar 4% dan rangkaian paralel 2%. Hal ini disebabkan karena nilai daya dari rangkaian seri lebih besar daripada rangkaian paralel.

5. SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan daya yang didapatkan pada rangkaian seri sebesar 0,0423 W sedangkan pada rangkaian paralel 0,0064 W. Efisiensi rata-rata yang didapatkan yaitu 4% pada rangkaian paralel dan pada rangkaian seri 2%. Figure of merit pada rangkaian seri sebesar 0,0007 1/K sedangkan pada rangkaian paralel 0,0721 1/K.

KEPUSTAKAAN

- [1] Y. S. Rifky, Gaos, "Pengembangan Model Pendingin Kabin City Car Bertenaga Surya Menggunakan

- Photovoltaics (PV) dan Thermoelectric (TEC),” vol. 10, no. 1, pp. 34–40, 2019.
- [2] Z. Lubis, T. Uhsg, and T. B. Sitorus, “Analisa Kinerja Sistem Pendingin Peltier yang Menggunakan Sel PV dengan Sumber Energi Radiasi Matahari,” vol. 9, no. 2, pp. 166–173, 2016.
- [3] A. I. Ramadhan *et al.*, “Analisis Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 50 WP,” *Tek. 37 (2), 2016, 59-63*, vol. 11, no. 2, pp. 61–78, 2016.
- [4] Y. Prasetyo *et al.*, “Karakteristik Termoelektrik TEC Bervariasi Tipe dengan Variasi Pembebanan Resistor,” vol. 02, no. 01, pp. 37–41, 2019.
- [5] Y. Latief, M. A. Berawi, A. B. Koesalamwardi, L. Sagita, and A. Herzanita, “Cost Optimum Design of A Tropical Near Zero Energy House (nZEH),” *Int. J. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 376–385, 2019.
- [6] S. Salamaat, “Zero Energy Building - A Review of Definition and Design Strategies,” no. December, 2015.
- [7] M. A. Zoui, S. Bentouba, J. G. Stocholm, and M. Bourouis, “A Review On Thermoelectric Generators: Progress and Applications,” *Energies*, vol. 13, no. 14, 2020, doi: 10.3390/en13143606.
- [8] S. Sukmajati and M. Hafidz, “Perancangan dan Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 10 MW On Grid Di Yogyakarta,” 2015.
- [9] E. Sinduningrum, P. Studi, T. Elektro, and F. Teknik, “Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Lahan Pertanian Terpadu Ciseeng Parung Bogor,” vol. 4, no. 2502, 2019.
- [10] H. A. S and M. Bastomi, “Analisis Pengaruh Perubahan Temperatur Panel terhadap Daya dan Efisiensi Keluaran Sel Surya Poycrystalline,” *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, p. 33, 2019.
- [11] M. Rifan, S. Hp, M. Shidiq, R. Yuwono, H. Suyono, and A. P. Cell, “Optimasi Pemanfaatan Energi Listrik Tenaga Matahari di Jurusan Teknik Elektro Universitas,” vol. 6, no. 1, pp. 44–48, 2012.
- [12] N. Putra, R. A. Koestoer, M. Adhitya, A. Roekettino, and B. Trianto, “Kendaraan Hibrid,” *Makara Teknol.*, vol. 13, no. 2, pp. 53–58, 2009.
- [13] A. Tranggono, A. Salim, Y. Prasetyo, and Y. A. Fakhruddin, “Study of Effect Comparison Thermoelectric Characteristics of TEC and TEG by Considering the Difference in Temperature and Variable Resistant,” *Int. Res. J. Adv. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 225–228, 2018.
- [14] Wardoyo, “Studi Karakteristik Pembangkit Listrik Termoelektrik Melalui Pemanfaatan Panas Knalpot Sepeda Motor Sport 150 cc .,” no. April, pp. 70–75, 2016.
- [15] U. S. Utara, “Universitas Sumatera Utara 4 Termoelektrik,” pp. 4–16, 2003.
- [16] P. D. Y. Ismail and A. Al-Askalany, “Thermoelectric Devices,” no. March, 2014.
- [17] U. Lachish, “Thermoelectric Effect Peltier Seebeck and Thomson,” no. 1, pp. 1–12, 2017.
- [18] M. Nair and B. Tripathi, “Experimental Studies on Thermoelectric Refrigeration System,” no. April, 2019.
- [19] Z. Zhang, Y. Zhang, X. Sui, W. Li, and D. Xu, “Performance of Thermoelectric Power-Generation System for Sufficient Recovery and Reuse of Heat Accumulated at Cold Side of TEG with Water-Cooling Energy Exchange Circuit,” *Energies*, vol. 13, no. 21, 2020.

- [20] Heri Kiswanto, "Analisis pada Tegangan, Arus dan Daya Listrik pada Lab Listrik Penelitian Elektro Univ.Yogyakarta," 2006.
- [21] U. M. Rifanti, T. N. Padilah, and I. Widyaningrum, "Sistem Dinamik Arus Listrik dengan Persamaan Diferensial Metode Koefisien Tak Tentu," *J. Mat. Integr.*, vol. 15, no. 1, p. 1, 2019.
- [22] M. Yusuf, "Unjuk Kinerja Pembangkit Energi Elektrik Memanfaatkan Limbah Panas Mesin Mobil City Car Menggunakan Modul Termoelektrik Cooler," pp. 1–6, 2018.
- [23] R. I. Mainil and G. Andrapica, "Pengaruh Laju Aliran Air Pendingin terhadap Kinerja Pembangkit Listrik Berbasis Thermoelectric Generator (Teg)," vol. 19, no. 1, pp. 36–41, 2020.
- [24] H. Lee, *Heat Sinks , Thermoelectrics , Heat Pipes , Compact Heat Exchangers , and Solar Cells*. 2010.
- [25] V. Jovanovic, S. Ghamaty, and J. C. Bass, "New Thermoelectric Materials and Applications," *Intersoc. Conf. Therm. Thermomechanical Phenom. Electron. Syst. I THERM*, pp. 1159–1169, 2012.
- [26] A. K. Mainil, A. Aziz, and M. Akmal, "Portable Thermoelectric Cooler Box Performance with Variation of Input Power and Cooling Load," *Aceh Int. J. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 85–92, 2018, doi: 10.13170/aijst.7.2.8722.
- [27] H. Simatupang, "Karakteristik Thermoelektrik untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya dengan Pendingin Air," 2009.
- [28] E. D. Magdalena and L. Tondobala, "Implementasi Konsep Zero Energy Building (Zeb) Dari Pendekatan Eco-Friendly pada Rancangan Arsitektur," *Media Matrasain*, vol. 13, no. 1, pp. 1–15, 2016.
- [29] A. Muhaisen, "Effect of Wall Thermal Properties on the Energy Consumption of Buildings in the Gaza Strip," *Int. Sustain. Build. Symp.*, vol. 2, no. August, 2015.
- [30] D. W. I. H. Oktorina, "Kajian Karakteristik Modul Termoelektrik untuk Sistem Penyimpanan Dingin," 2006.
- [31] J. Yeonardy, "Characteristic of Air Cooled Parallel Faculty of Science and Tecnology," 2008.