

Analisis Eksperimental Pengaruh Plat Konduktor terhadap Kinerja Thermoelectric Generator Berbasis Limbah Panas

Raihan Putri¹, Dimas Syahputra², Selamat Meliala^{3*}, Badriana⁴, Rosdiana⁵

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh - Aceh Utara

Email : Raihan@unimal.ac.id, dimas.210150017@unimal.ac.id, selamat.meliala@unimal.ac.id*,
badriana@unimal.ac.id, rosdiana@unimal.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan energi alternatif menjadi salah satu upaya penting dalam meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional. Salah satu potensi energi yang belum dimanfaatkan secara optimal adalah panas buangan dari peralatan, mesin, maupun proses industri. Penelitian ini membahas pemanfaatan panas buangan sebagai sumber energi listrik melalui sistem Thermoelectric Generator (TEG). TEG bekerja berdasarkan perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul yang menghasilkan tegangan listrik melalui efek Seebeck. Fokus penelitian ini adalah menganalisis pengaruh jenis pelat konduktor terhadap kinerja TEG. Material pelat yang diuji meliputi tembaga, aluminium, dan stainless steel. Pengujian dilakukan menggunakan dua modul TEC1-12706 sebagai sumber panas dan satu modul TEG SP1848 sebagai penghasil listrik. Parameter yang diamati meliputi perbedaan suhu, tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi konversi energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tembaga menghasilkan ΔT tertinggi sebesar 63,8 °C, namun efisiensinya paling rendah. Aluminium menunjukkan kinerja yang lebih stabil dengan ΔT sebesar 62,4 °C dan arus tertinggi 2,0 μA . Stainless steel menghasilkan ΔT sebesar 62,2 °C, tetapi memiliki efisiensi konversi tertinggi serta respons termal paling cepat. Hasil ini menunjukkan bahwa kinerja TEG tidak hanya ditentukan oleh besar ΔT , tetapi juga dipengaruhi oleh kestabilan distribusi panas dan karakteristik termal material pelat konduktor..

Kata Kunci : Thermoelectric Generator, Plat Konduktor, Efisiensi Energi, Konduktivitas Termal, Limbah Panas

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik global terus mengalami peningkatan seiring berkembangnya industri, teknologi, serta pertumbuhan populasi. Ketergantungan terhadap sumber energi konvensional, terutama bahan bakar fosil, membawa konsekuensi serius terhadap ketersediaan sumber daya alam dan peningkatan emisi gas rumah kaca[1][2]. Oleh karena itu, pengembangan dan pemanfaatan sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan menjadi prioritas strategis di berbagai sektor [3]. Salah satu pendekatan yang dinilai menjanjikan adalah konversi energi panas khususnya limbah panas dari proses industri maupun mesin menjadi energi listrik menggunakan sistem Thermoelectric Generator (TEG)[4].

TEG adalah perangkat solid-state yang mampu merubah perbedaan suhu antara dua sisi modul menjadi tegangan listrik melalui fenomena efek Seebeck [5].

Keunggulan sistem ini meliputi struktur yang sederhana, tanpa komponen bergerak, bebas dari polusi suara maupun emisi, serta memiliki potensi penerapan luas mulai dari sektor otomotif, manufaktur, hingga pemanfaatan panas buangan domestik [6].

Meskipun demikian, performa TEG sangat dipengaruhi oleh efisiensi dalam proses perpindahan panas dari sumber ke modul, yang pada praktiknya dimediasi oleh plat konduktor sebagai penghubung antara panas dan modul termoelektrik [7].

Karakteristik termal bahan plat konduktor, seperti konduktivitas termal, difusivitas termal, serta dimensi fisiknya (ketebalan dan luas permukaan), berperan penting dalam membentuk gradien suhu (ΔT) yang optimal pada modul TEG[8]. Semakin tinggi perbedaan suhu yang tercipta antara sisi panas dan dingin modul, semakin besar pula tegangan listrik yang dihasilkan [9]. Oleh sebab itu, pemilihan material plat yang sesuai menjadi salah satu aspek krusial dalam mendesain sistem termoelektrik yang efisien [10].

Oleh karena itu, efisiensi konversi energi bukan hanya bergantung pada ΔT semata, melainkan juga pada kestabilan distribusi panas, waktu respons termal, dan resistansi termal total dari plat konduktor yang digunakan [11].

Riset ini bertujuan untuk mengkaji secara eksperimental pengaruh jenis plat konduktor terhadap performa sistem TEG dalam konteks pemanfaatan limbah panas. Tiga jenis material tembaga, aluminium, dan stainless steel dipilih sebagai objek pengujian karena mewakili karakteristik konduktivitas termal yang berbeda dan umum digunakan dalam berbagai aplikasi termal [12].

Studi ini difokuskan pada pengukuran ΔT , tegangan dan arus output, efisiensi konversi, serta pola distribusi panas dari masing-masing plat terhadap kinerja TEG [13]. Selain itu, riset ini juga mempertimbangkan pengaruh dimensi plat dan waktu pemanasan terhadap kestabilan daya yang dihasilkan [14].

Dengan memanfaatkan limbah panas yang selama ini belum dioptimalkan, sistem TEG berpeluang menjadi solusi energi alternatif yang efisien, berkelanjutan, dan aplikatif di akan datang [15]. Hasil dari riset ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pengembangan dalam selektif material plat konduktor yang optimal serta menjadi acuan dalam pengembangan sistem termoelektrik pada skala nyata. Selain itu, studi ini juga membuka peluang untuk riset lanjutan mengenai integrasi sistem TEG dengan teknologi pendinginan dan sistem penyimpanan energi untuk meningkatkan efisiensi secara keseluruhan.

Kebaruan dari riset ini terletak pada pendekatan eksperimental yang mengkaji pengaruh jenis plat konduktor terhadap kinerja Thermoelectric Generator (TEG) tidak hanya berdasarkan besarnya perbedaan suhu (ΔT), tetapi juga dengan mempertimbangkan respons termal, kestabilan distribusi panas, serta keterkaitan antara konduktivitas termal, resistivitas listrik, dan massa jenis material. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme perpindahan panas dan efisiensi konversi energi pada sistem TEG, khususnya dalam pemanfaatan panas buangan sebagai sumber energi terbarukan).

II. TINJAUAN PUSTAKA

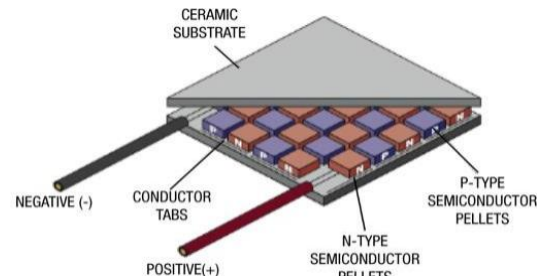
2.1 Termoelektrik

Termoelektrik secara bahasa berasal 2 suku kata yaitu thermo yang berarti panas dan electric yang yaitu listrik, sehingga secara harfiah diartikan sebagai hubungan antara panas dan listrik. Dalam istilah fisika, termoelektrik merujuk pada fenomena yang melibatkan perubahan langsung diantara energi panas dan listrik melewati bahan tertentu yang memiliki sifat termoelektrik.

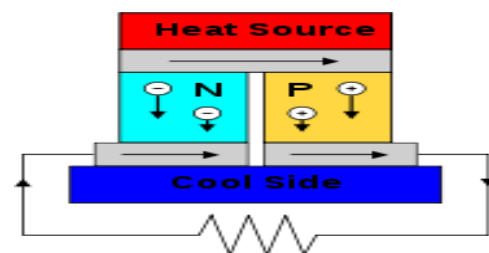
Teknologi ini mencakup aplikasi seperti Thermoelectric Generators (TEG), yang mengubah energi panas menjadi listrik, dan Thermoelectric Coolers (TEC), yang memanfaatkan listrik untuk mengontrol perpindahan panas [16].

Termoelektrik adalah fenomena yang melibatkan konversi energi listrik menjadi energi termal (panas) atau sebaliknya, energi termal menjadi energi listrik. Dalam sistem pendinginan termoelektrik, aliran listrik melalui modul termoelektrik menyebabkan perbedaan suhu di kedua sisinya.

Salah satu sisi akan menyerap thermal, sementara sisi lainnya melepaskan panas [17]. Contoh penerapan teknologi ini dapat ditemukan pada perangkat seperti kulkas dan pemanas air. Selisih suhu di antara kedua sisi modul membangkitkan perpindahan elektron. Semakin tinggi selisih suhu yang terjadi, semakin cepat perpindahan elektron, yang pada akhirnya menghasilkan arus listrik yang lebih tinggi [18].



Gambar 1. Modul Termoelektrik



Gambar 2. Struktur *Thermoelectric Generator*

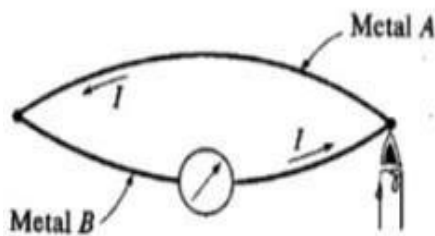
Gambar 2 memperlihatkan susunan TEG yang strukturnya terdiri dari pasangan material semikonduktor tipe-n (material dengan kelebihan elektron) dan tipe-p (material dengan kekurangan elektron) yang membentuk termokopel yang mempunyai susunan mirip lapisan roti antara dua wafer keramik tipis. Panas masuk dari satu sisi dan dibuang pada sisi yang lainnya, membangkitkan suatu tegangan yang melalui sambungan termoelektrik. Adapun spesifikasi dari modul TEG adalah seperti Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Spesifikasi Modul Termoelektrik Generator

Model	SP1848-27145 SA				
Dimensi	40mm x 40mm x 4mm				
Suhu Operasional	-30°C Hingga +120°C				
Perbedaan Suhu (ΔT°C)	20	40	60	80	100
Tegangan Keluaran (V)	0,97	1,8	2,4	3,6	4,8
Arus Keluaran (mA)	225	368	469	558	669

2.2 Efek Seebeck

Efek seebeck adalah gejala yang mengkonversikan selisih suhu menjadi energi listrik. Seandainya dua jenis material yang tidak sama yang selanjutnya kedua ujungnya dihubungkan satu sama lain sehingga akan terjadi dua hubungan dalam satu loop. Seandainya terjadi selisih suhu diantara kedua hubungan ini, sehingga akan terjadi arus listrik akan terjadi. Prinsip ini lah yang digunakan termoelektrik sebagai generator (pembangkit listrik) [19].



Gambar 3. Efek Seebeck

Pada Gambar 3 diatas dijelaskan bahwa semua bahan mempunyai koefisien seebeck yang tidak sama. Semakin tinggi koefisien seebeck ini, sehingga beda potensial yang dibangkitkan juga bertambah besar. Akibat selisih suhu ini bisa dirubah menjadi tegangan listrik, sehingga cara ini dipakai salah satu sensing suhu yang disebutkan thermocouple. Secara matametis dapat ditulis [6]:

$$S = \frac{V}{\Delta T} \tag{3}$$

Dimana V adalah tegangan, S adalah koefisien Seebeck (V/°C), dan ΔT adalah selisih suhu antara dua hubungan (°C).

2.2 Efek Peltier

Efek Peltier terjadi ketika arus listrik mengalir melalui sambungan dua bahan termoelektrik yang berbeda, menghasilkan perpindahan panas di antara kedua sambungan tersebut. Sambungan yang terhubung ke kutub positif akan menyerap panas (pendinginan), sedangkan sambungan yang terhubung ke kutub negatif akan melepaskan panas (pemanasan). Prinsip kerja ini merupakan kebalikan dari Efek Seebeck, di mana perbedaan suhu menghasilkan tegangan listrik.

Pada modul TEC, dua jenis logam atau bahan semikonduktor digabungkan dalam suatu rangkaian yang dialiri arus listrik. Salah satu sambungan akan menyerap panas, sementara sambungan lainnya membuang panas, tergantung arah aliran arus. Jika arah arus dibalik, sambungan yang sebelumnya panas menjadi dingin, dan sebaliknya. Fenomena ini merupakan dasar dari proses pendinginan termoelektrik yang dikenal sebagai Efek Peltier.

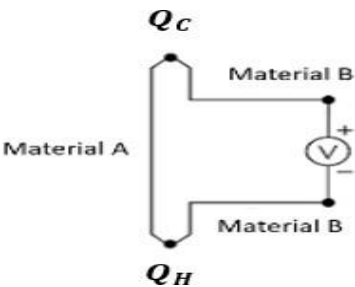
Dasar pengembangan teknologi termoelektrik mencakup gabungan dari Efek Seebeck dan Efek Peltier. Ketika arus listrik mengalir melalui termokopel, suhu sambungan berubah, menyebabkan salah satu sisi menyerap panas dan sisi lainnya melepaskan panas.

Journal of Electrical Technology, Vol. 11, No. 2, Juni 2026

Jumlah panas yang dipindahkan sebanding dengan besar arus yang mengalir.

2.3 Sifat dan Karakteristik Konduktor

Dalam konteks perpindahan panas, konduktor adalah material yang mampu menghantarkan energi termal secara efisien. Kemampuan penghantaran ini tidak hanya bergantung pada nilai konduktivitas termal, tetapi juga pada sejumlah karakteristik pendukung lainnya. Berikut adalah penjelasan dari sifat-sifat utama material konduktor:



Gambar 4. Efek Peltier

Pada Gambar 4 di atas dijelaskan bahwa perpindahan panas yang terjadi ketika arus listrik mengalir melalui dua jenis material konduktor berbeda, yang dalam hal ini disebut sebagai material A dan B. Arus listrik (I) mengalir dari bagian bawah ke atas, melalui dua titik sambungan yang berada pada suhu berbeda. T1 sebagai sisi dingin (Q_C) dan T2 sebagai sisi panas (Q_H). Saat arus melewati sambungan antara kedua material, terjadi perbedaan tingkat energi elektron yang menyebabkan panas berpindah. Di titik T1, sambungan menyerap panas dari lingkungan, sehingga sisi ini menjadi dingin. Sebaliknya, di T2, panas dilepaskan, menjadikan sisi ini lebih panas.

Tabel 2. Sifat dan Karakteristik Konduktor

Sifat / Material	Tembaga	Aluminium	Stainless Steel
Konduktivitas Termal ($W/m \cdot K$)	385	205	16
Difusivitas Termal ($\times 10^{-5} m^2/s$)	1.12	0.84	0.041
Konduktivitas Listrik ($\times 10^7 S/m$)	5.96	3.77	1.45
Kapasitas Panas Jenis ($J/kg \cdot K$)	385	900	500
Massa Jenis (kg/m^3)	8960	2700	8000
Koef. Muai Panjang ($\times 10^{-6} /K$)	16.5	23.1	17
Ketahanan Korosi	Rendah	Sedang	Tinggi

Efek Peltier dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut [20]:

$$Q_H = \Pi \times I = (S.T) \times I \quad (1)$$

Dimana Π adalah koefisien Peltier (dengan satuan volt) dan I adalah arus listrik (ampere). Koefisien Peltier sendiri dapat diturunkan sebagai berikut:

$$\Pi = S \times I \quad (2)$$

2.4 Daya Output dan Efisiensi Konversi Energi Plat Konduktor

Dalam sistem pembangkit listrik termoelektrik (TEG), plat konduktor memegang peranan penting dalam menentukan seberapa besar energi panas dari sumber dapat dihantarkan secara efektif ke permukaan modul. Plat ini berfungsi sebagai penghubung termal antara sumber panas seperti elemen pemanas, knalpot kendaraan, atau panas buangan industry dan sisi panas dari modul TEG.

Efisiensi plat dalam menghantarkan panas sangat berpengaruh terhadap terciptanya perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul, yang menjadi dasar terbentuknya tegangan listrik melalui mekanisme efek Seebeck.

Dengan demikian, semakin tinggi kemampuan pelat dalam mentransfer panas, maka semakin besar pula selisih suhu yang terbentuk, sehingga meningkatkan potensi daya listrik yang dihasilkan oleh sistem. Besar daya listrik keluaran (P) dari modul TEG dapat dihitung jika nilai tegangan (V) dan arus listrik (I) telah diketahui, menggunakan persamaan berikut [21]:

$$P = V \times I \quad (4)$$

dimana:

P = Daya (Watt)

I = Arus (Ampere)

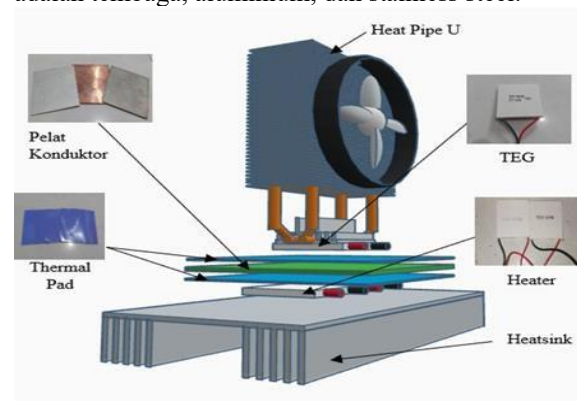
V = Tegangan (Volt)

Secara umum, efisiensi konversi energi termoelektrik (η) didefinisikan sebagai perbandingan antara daya listrik keluaran (P) dengan laju energi panas yang masuk ke modul (Q_H)[15]:

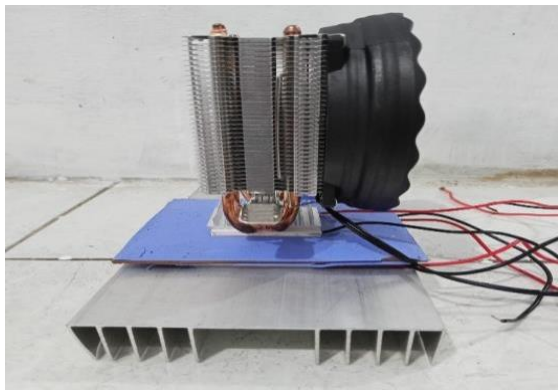
$$\eta\% = \frac{P}{Q_H} \times 100\% \quad (5)$$

III. METODE PENELITIAN

Riset ini merupakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk mengevaluasi pengaruh jenis plat konduktor terhadap kinerja Thermoelectric Generator (TEG). Tiga material plat konduktor yang diuji adalah tembaga, aluminium, dan stainless steel.



Gambar 5. Desain Perancangan Pembangkit Listrik Termoelektrik



Gambar 6. Pratikal Perancangan Pembangkit Listrik Termoelektrik

Sistem pengujian terdiri dari satu modul TEG tipe SP1848 yang ditempatkan di antara pe-
lat konduktor dan sistem pendingin pasif. Dua modul TEC1-12706 digunakan sebagai sumber panas dan diberi suplai dari power supply DC. Plat konduktor diposisikan langsung di atas pemanas, sedangkan sistem pendingin berupa heatpipe berbentuk U dipasang pada sisi dingin modul TEG untuk mempertahankan perbedaan suhu.

Seluruh plat konduktor memiliki dimensi 10 cm × 10 cm × 2 mm. Untuk meminimalkan hambatan kontak termal, thermal pad dipasang pada setiap antarmuka plat dengan pemanas dan modul TEG. Suhu sisi panas (T1) dan sisi dingin (T2) diukur menggunakan termokopel, sedangkan tegangan dan arus keluaran diukur menggunakan multimeter digital.

Pengujian dilakukan dengan menaikkan suhu sisi panas secara bertahap dari suhu lingkungan hingga sekitar 100°C. Pada setiap kondisi, data suhu, tegangan, arus, dan waktu dicatat setelah sistem mencapai kondisi stabil. Setiap material plat diuji menggunakan konfigurasi dan prosedur yang sama untuk memastikan keseragaman perlakuan.

Parameter yang diamati mencakup selisih suhu (ΔT), daya keluaran, laju perpindahan panas, koefisien Seebeck, dan efisiensi konversi energi.

Analisis difokuskan pada hubungan antara karakteristik termal material plat konduktor dengan efektivitas perpindahan panas dan performa listrik modul TEG.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dimulai dengan mengalirkan arus dari power supply DC ke modul Thermoelectric Cooler (TEC) yang dipasang di bawah plat konduktor untuk menciptakan perbedaan suhu (ΔT) [22]. Tiga jenis plat tembaga, aluminium, dan stainless steel dipilih karena ketersediaan tinggi dan biaya yang ekonomis.

Selama pengujian, nilai konduktivitas termal (k), luas penampang (A), dan ketebalan plat (L) digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas (Q_h). Panas yang dihantarkan ke modul Thermoelectric Generator (TEG) menghasilkan tegangan (V) dan arus (I), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung daya listrik (P) dan efisiensi sistem (η). Rentang suhu pengujian dimulai dari sekitar 33°C hingga 100°C, menyesuaikan dengan spesifikasi alat dan batas aman modul. Data yang didapat dianalisis untuk mengevaluasi hubungan antara suhu, efisiensi, dan kinerja plat konduktor dalam menghantarkan panas ke TEG.

Tabel 3. Data Pengujian Kinerja Modul TEG pada Plat Tembaga

No	T1 (°C)	t (menit)	T2 (°C)	ΔT (°C)	V (Volt)	A (μA)	P (μW)	Qh (Watt)	η (%)
1	33	0	33	0	0	0	0	0	0
2	40	1	33,4	6,6	0,35	0,3	0,0105	12705	0,82645
3	50	1,74	33,8	16,2	0,62	0,6	0,0372	31105	1,1929
4	60	2	34,5	25,5	0,86	0,8	0,0688	49007,5	1,4016
5	70	3	34,6	35,4	1,12	1,1	0,1232	68145	1,8079
6	80	6,69	35,7	44,3	1,38	1,3	0,1794	85277,5	2,1037
7	90	11,74	36	54	1,48	1,4	0,2072	103950	1,9933
8	100	127	36,2	63,8	1,62	1,6	0,2592	122815	2,1105

Tabel 4. Data Pengujian Kinerja Modul TEG pada Plat Aluminium

No	T1 (°C)	t (menit)	T2 (°C)	ΔT (°C)	V (Volt)	A (μA)	P (μW)	Qh (Watt)	η (%)
1	33	0	33	0	0	0	0	0	0
2	40	1	33,1	6,9	0,68	0,6	0,0408	7072,5	5,7688
3	50	1,43	33,6	16,4	0,98	0,9	0,0882	16810	5,2469
4	60	1,9	34,3	25,7	1,21	1,2	0,1452	26342,5	5,512
5	70	2	34,9	35,1	1,4	1,3	0,182	35977,5	5,0587
6	80	4,36	35,8	44,2	1,59	1,6	0,2544	45305	5,8153
7	90	33,3	36,6	53,4	1,79	1,8	0,3222	54735	5,8865
8	100	45	37,6	62,4	2,03	2	0,406	63960	6,3477

Tabel 5. Data Pengujian Kinerja Modul TEG pada Plat Stainless steel

No	T1 (°C)	t (menit)	T2 (°C)	ΔT (°C)	V (Volt)	A (μA)	P (μW)	Qh (Watt)	η (%)
1	33	0	33	0	0	0	0	0	0
2	40	0,73	33,3	6,7	0,8	0,8	0,064	536	119,4
3	50	1	34,4	15,6	1,22	1,2	0,1464	1248	117,31
4	60	1,24	35,4	24,6	1,46	1,4	0,2044	1968	103,86
5	70	1,53	36,3	33,7	1,69	1,7	0,2873	269	106,57
6	80	2	37,2	42,8	1,9	1,9	0,361	3424	105,43
7	90	2,56	37,6	52,4	1,98	1,9	0,3762	4192	897,42
8	100	4	37,8	62,2	2,02	1,9	0,3838	4976	771,3

Eksperimen ini dirancang untuk mengevaluasi peran material plat konduktor terhadap performa sistem Thermoelectric Generator (TEG) dalam konteks pemanfaatan energi panas terbuang. Tiga jenis bahan plat tembaga (Cu), aluminium (Al), dan stainless steel (SS) digunakan untuk menilai pengaruh sifat termal masing-masing terhadap efisiensi konversi energi. Parameter utama yang dianalisis meliputi suhu awal plat (T1), suhu sisi dingin modul TEG (T2), selisih suhu ($\Delta T = T1 - T2$), tegangan listrik (V), arus (I), daya listrik ($P = V \times I$), laju energi panas yang masuk ke sistem (Qh), serta efisiensi konversi ($\eta = P / Qh$). Prosedur pengujian dilakukan dengan menaikkan suhu plat secara bertahap dari 40°C hingga 100°C, sambil mencatat nilai-nilai output serta waktu respons termal pada tiap tahapan.

Hasil uji menunjukkan bahwa plat tembaga menghasilkan ΔT tertinggi, yakni 63,8°C, serta laju perpindahan panas paling besar, namun efisiensinya justru rendah (2,11%) karena akumulasi panas pada sisi panas dan durasi pemanasan yang panjang (127 menit). Plat aluminium menunjukkan performa yang lebih seimbang, dengan efisiensi konversi sebesar 6,35%, ΔT tinggi (62,4°C), arus maksimum mencapai 2 μA , dan kestabilan kinerja yang baik sepanjang rentang suhu pengujian. Sebaliknya, stainless steel mencatat nilai ΔT terendah (62,2°C), namun menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 7,71%, waktu respons tercepat (4 menit), serta tegangan maksimum yang cukup tinggi (2,02 V), mengindikasikan keunggulannya dalam kondisi panas transien atau aplikasi jangka pendek. Pendekatan eksperimental ini secara metodologis dinilai tepat dalam mengungkap keterkaitan antara sifat fisis plat konduktor terutama konduktivitas dan difusivitas termal dengan kinerja output listrik sistem TEG, serta memberikan dasar ilmiah dalam pemilihan material berdasarkan kebutuhan operasional sistem termoelektrik berbasis limbah panas.

Efisiensi penghantaran panas sangat memengaruhi kinerja modul Thermoelectric Generator (TEG) dalam mengkonversi thermal menjadi listrik. Material seperti tembaga, aluminium, dan stainless steel sering digunakan sebagai plat konduktor karena memiliki sifat termal yang berbeda. Masing-masing material memiliki karakteristik unik yang menentukan seberapa baik panas dapat dialirkan ke modul TEG. Analisis berikut membahas faktor-faktor yang memengaruhi efektivitas transfer panas dari ketiga jenis plat tersebut.

Tabel 6. Data Pengujian Penghantaran Panas plat Konduktor

S (V/°C)			Q (Joule)			c (J/Kg.°C)			α ($\mu m^2/s$)			L_g (cm)		
Cu	Al	SS	Cu	Al	SS	Cu	Al	SS	Cu	Al	SS	Cu	Al	SS
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,053	0,098	0,119	8640	8640	6307,2	8285,3	19264,2	6492,2	5,1861	3,9413	0,31596	3,52	3,07	0,74
0,038	0,059	0,078	15033,6	12355,2	8640	5873,4	11590,2	3819,6	7,3158	6,5508	0,53704	5,52	4,74	1,13
0,033	0,047	0,059	17280	16416	10713,6	4288,9	9826,9	3003,5	10,019	7,7263	0,68296	6,93	5,93	1,42
0,032	0,039	0,05	25920	17280	13219,2	4634,1	7573,9	2705,2	9,2721	10,025	0,75826	8,17	6,93	1,66
0,031	0,035	0,044	37801,6	37670,4	17280	8258,07	13111,8	25784,4	5,2032	5,7906	0,7367	9,14	7,78	1,88
0,027	0,033	0,037	101433,6	287712	22118,4	11888,6	82890,2	2911,08	3,6143	0,91398	0,70465	10,09	8,55	2,08
0,025	0,032	0,032	1097280	388800	34560	108852,8	95837,9	3831,9	0,39474	0,79207	0,33532	10,96	9,24	2,26

Analisis metode berdasarkan data tabel bertujuan untuk mengevaluasi sifat termal dan performa tiga jenis plat konduktor tembaga (Cu), aluminium (Al), dan stainless steel (SS) dalam sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis pemanfaatan panas limbah. Pengujian dilakukan secara eksperimental dengan mengamati parameter seperti koefisien Seebeck, energi panas masuk, kapasitas panas spesifik, difusivitas termal, dan panjang sebar panas pada setiap kenaikan suhu. Hasil menunjukkan bahwa stainless steel memiliki nilai koefisien Seebeck tertinggi sebesar 0,119 V/°C pada suhu 40°C, menandakan sensitivitas tinggi terhadap perbedaan suhu, meskipun nilainya menurun seiring meningkatnya suhu [23]. Tembaga menyerap energi paling besar, mencapai 1.097.280 Joule, tetapi konversinya menjadi energi listrik kurang efisien. Aluminium mencatat kapasitas panas tertinggi di suhu rendah, namun nilainya menurun pada suhu lebih tinggi, mencerminkan distribusi panas yang lebih terkontrol. Difusivitas termal tembaga tertinggi pada suhu 60°C (10,019 $\mu m^2/s$), namun menurun di suhu tinggi karena distribusi panas yang melebar.

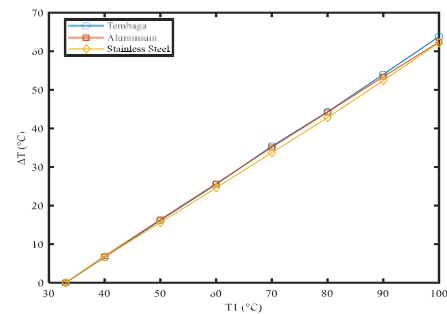
Sebaliknya, stainless steel memiliki difusivitas paling rendah, menunjukkan penyebaran panas yang terbatas di sekitar sumber. Panjang sebar panas juga mendukung temuan ini, di mana tembaga mencapai hingga 10,96 cm, melampaui dimensi plat, aluminium mencapai 9,24 cm, dan stainless steel hanya 2,26 cm. Secara umum, tembaga unggul dalam kemampuan menyerap dan menyebarkan panas, namun kurang ideal untuk aplikasi jangka pendek. Aluminium menawarkan keseimbangan antara kapasitas termal dan kestabilan distribusi panas, sedangkan stainless steel menunjukkan efisiensi tertinggi dalam respons termal cepat. Metode ini membuktikan bahwa kinerja sistem termoelektrik tidak hanya ditentukan oleh besar energi panas yang dihantarkan, tetapi juga oleh kecepatan respons termal dan distribusi suhu yang stabil.

Jenis material plat konduktor memberikan kontribusi signifikan terhadap performa sistem Thermoelectric Generator (TEG), terutama dalam menentukan selisih suhu (ΔT) antara sisi panas dan dingin modul. Tiga material yang dipakai tembaga, aluminium, dan stainless steel memiliki karakteristik konduktivitas termal yang berbeda, sehingga memengaruhi efisiensi aliran panas ke permukaan TEG.

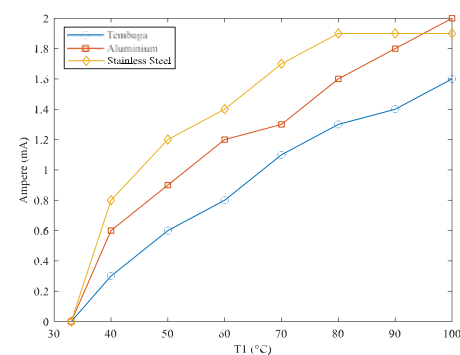
Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 2, tembaga menghasilkan ΔT tertinggi sebesar 63,8 °C. Namun demikian, efisiensi konversi dayanya justru paling rendah, yakni 0,0021%. Hal ini disebabkan oleh akumulasi panas pada sisi panas modul yang tidak terdistribusi secara optimal ke sisi dingin. Sebaliknya, aluminium mencatat ΔT sebesar 62,4 °C dengan efisiensi konversi yang lebih baik, yaitu 0,0063%, berkat kemampuan distribusi panas yang lebih merata. Menariknya, stainless steel dengan ΔT paling rendah (62,2 °C) justru menunjukkan efisiensi tertinggi, mencapai 0,077%. Temuan ini menegaskan bahwa efisiensi TEG tidak hanya ditentukan oleh besar ΔT , melainkan juga oleh kestabilan distribusi panas dan karakteristik termal material secara keseluruhan.

Dari sisi tegangan, plat tembaga menunjukkan kenaikan tegangan yang cukup stabil dari 0,35 V hingga 1,62 V, menandakan kestabilan output meskipun memerlukan waktu pemanasan lebih lama. Aluminium dan stainless steel juga mengalami peningkatan tegangan yang signifikan, masing-masing dari 0,68 V ke 2,03 V dan 0,8 V ke 2,02 V, meskipun dengan gradien yang lebih datar. Stainless steel, dengan konduktivitas termal yang rendah, mampu memberikan output tegangan tinggi secara cepat dan relatif stabil, menandakan keunggulannya dalam aplikasi dengan kebutuhan respons termal yang cepat. Dalam hal output arus, aluminium menunjukkan performa terbaik dengan nilai tertinggi sebesar 2 μA yang relatif stabil sepanjang rentang suhu 40°C–100°C. Tembaga mencatat peningkatan arus secara bertahap (0,3–1,6 μA), mengindikasikan potensi jangka panjang dalam sistem yang beroperasi pada suhu tinggi.

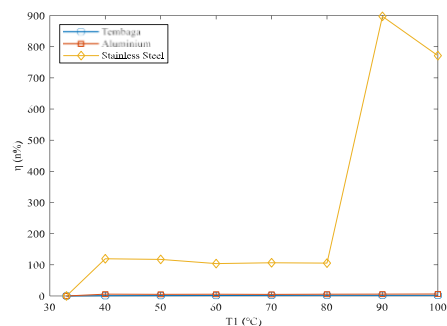
Sementara itu, stainless steel mencapai arus maksimum 1,9 μA pada suhu 80°C, namun tidak mengalami peningkatan lebih lanjut, menunjukkan keterbatasan dalam kapasitas jangka panjang, meskipun unggul dalam respons awal. Oleh karena itu, pemilihan material plat konduktor dalam sistem TEG perlu disesuaikan dengan karakteristik operasional dan kebutuhan spesifik dari sistem pembangkitan yang dirancang.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Kinerja perubahan suhu 3 jenis material terhadap suhu



Gambar 8. Grafik Perbandingan 3 jenis material, tegangan terhadap suhu



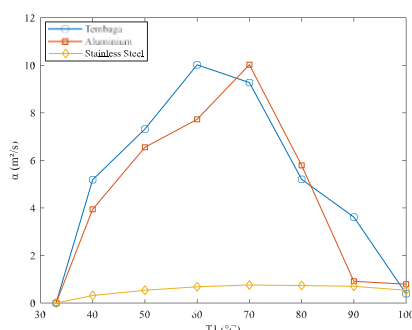
Gambar 9. Grafik Perbandingan 3 jenis material, efisiensi terhadap suhu

Penyebaran panas yang merata dalam plat konduktor memainkan peran penting dalam menentukan efektivitas penghantaran energi termal ke permukaan Thermoelectric Generator (TEG). Efektivitas ini sangat dipengaruhi oleh difusivitas termal dari masing-masing material serta durasi pemanasan. Berdasarkan Gambar 3, tembaga dan aluminium menunjukkan nilai difusivitas yang tinggi pada suhu menengah, yang mendukung distribusi panas secara cepat dan menyeluruh. Namun, saat temperatur meningkat, difusivitas kedua material ini cenderung menurun akibat meluasnya area panas dan melemahnya gradien suhu.

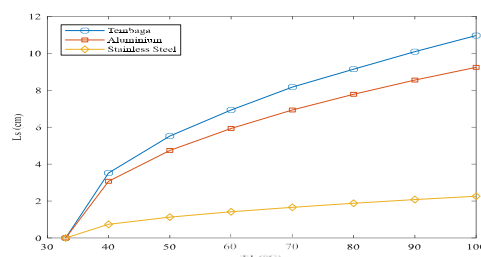
Sebaliknya, stainless steel memiliki nilai difusivitas rendah sejak awal, menyebabkan panas lebih banyak tertahan di sekitar sumber dan kurang menyebar ke seluruh permukaan, sehingga menghambat pembentukan perbedaan suhu (ΔT) yang optimal dan berdampak negatif terhadap efisiensi sistem.

Pada suhu 100 °C, plat tembaga mencatat panjang sebar panas tertinggi sebesar 10,96 cm, bahkan melampaui ukuran plat itu sendiri, diikuti aluminium dengan 9,24 cm, sementara stainless steel hanya mencapai 2,26 cm. Namun demikian, stainless steel unggul dari segi kecepatan respons termal, hanya membutuhkan waktu 4 menit untuk mencapai suhu kerja, dibandingkan aluminium yang memerlukan 45 menit dan tembaga hingga 127 menit. Keunggulan ini menunjukkan bahwa stainless steel lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan adaptasi cepat terhadap perubahan suhu, meskipun distribusi panasnya terbatas.

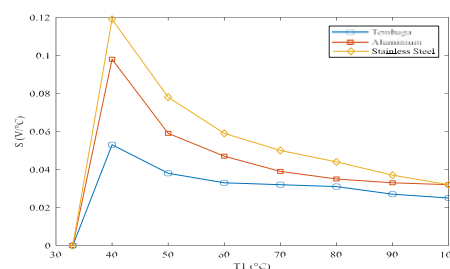
Proses perpindahan panas dari plat ke modul TEG secara langsung memengaruhi pembentukan ΔT , yang menentukan tegangan output melalui efek Seebeck. Menariknya, meskipun ΔT meningkat dengan suhu, koefisien Seebeck justru cenderung menurun. Sebagai ilustrasi, tembaga mencatat ΔT tertinggi (63,8 °C) pada 100 °C, namun menghasilkan koefisien Seebeck rendah (0,025 V/°C), sedangkan stainless steel mencatat nilai tertinggi (0,119 V/°C) pada suhu lebih rendah, yakni 40 °C. Hal ini mengindikasikan bahwa performa TEG tidak hanya bergantung pada ΔT , melainkan juga sangat dipengaruhi oleh sifat termal dan mikrostruktur material plat. Oleh sebab itu, pemilihan plat konduktor perlu mempertimbangkan sinergi antara kecepatan transfer panas, kapasitas distribusi energi, dan kestabilan suhu untuk mencapai efisiensi konversi energi yang maksimal.



a. Grafik 3 jenis material difusitas terhadap perubahan suhu



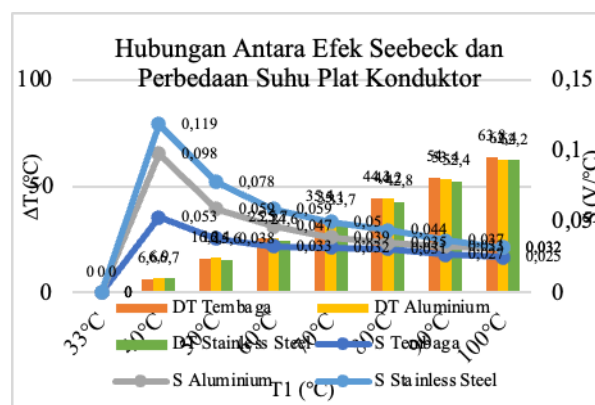
b. Grafik 3 jenis material penyebaran panas terhadap perubahan suhu



c. Grafik 3 jenis material koefisien Seebeck terhadap perubahan suhu

Gambar 10. Pengaruh Difusivitas Termal Terhadap Plat Konduktor

Dari hasil pengujian dianalisis sejauh mana plat tembaga, aluminium, dan stainless steel berkontribusi dalam membentuk perbedaan suhu tersebut dan bagaimana pengaruhnya terhadap tegangan listrik yang dihasilkan. Grafik perbandingan ditampilkan untuk menunjukkan hubungan antara nilai ΔT dan koefisien Seebeck, guna memberikan pemahaman lebih dalam mengenai efektivitas konversi energi panas menjadi energi listrik pada masing-masing jenis plat konduktor yang diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 9. Pengaruh Difusivitas Termal Terhadap Plat Konduktor

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Pembentukan sistem yang didukung dengan Hasil riset menunjukkan bahwa variasi jenis plat konduktor secara nyata memengaruhi kinerja Thermoelectric Generator (TEG) saat menkonversi energi thermal menjadi energi listrik. Plat tembaga memiliki kemampuan konduksi dan penyebaran panas terbaik, namun menunjukkan efisiensi konversi yang rendah karena akumulasi panas pada sisi panas TEG. Aluminium memperlihatkan performa yang seimbang dengan penyebaran panas yang merata, nilai ΔT yang memadai, dan efisiensi konversi pada tingkat menengah. Di sisi lain, plat stainless steel, meski memiliki konduktivitas termal dan jarak sebar panas yang rendah, justru menghasilkan efisiensi konversi tertinggi dalam waktu pemanasan yang singkat. Temuan ini menegaskan bahwa efisiensi sistem TEG tidak hanya bergantung pada besar ΔT , tetapi juga dipengaruhi oleh kecepatan serta kestabilan aliran panas ke kedua sisi modul.

Berdasarkan hal tersebut, pemilihan bahan plat konduktor perlu disesuaikan dengan kebutuhan operasional sistem. Stainless steel lebih ideal untuk aplikasi yang membutuhkan respons cepat terhadap panas, aluminium cocok untuk sistem yang mengutamakan kestabilan output, sedangkan tembaga efektif untuk penyebaran panas yang lebih luas. Optimalisasi dimensi plat, terutama ketebalan dan luas permukaan, juga penting untuk menekan resistansi termal dan memaksimalkan aliran panas ke TEG. Di samping itu, penerapan sistem pendingin aktif pada sisi dingin TEG dapat mempertahankan perbedaan suhu (ΔT) yang tinggi secara konsisten. Untuk pengembangan lebih lanjut, riset lanjutan disarankan dengan mempertimbangkan variasi bahan dan desain plat yang lebih luas serta pengujian di kondisi panas limbah nyata guna meningkatkan relevansi hasil terhadap aplikasi industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Seng, P. P. Aluminium, K. D. A. N. Seng, S. T. Elektro, F. Teknik, and U. N. Surabaya, "No Title," 2013.
- [2] N. Saputra, R. I. Mainil, and A. Aziz, "Panas Jalan Beton Menggunakan Teknologi Termoelektrik Generator (Teg) Dengan Pelat," vol. 15, no. 2, pp. 325–335, 2023.
- [3] A. A. Rokhim and L. Endahwati, "Pemanfaatan Energi panas menggunakan Termoelektrik Generator dengan Variasi Peltier," vol. 14, no. 1, pp. 19–23, 2023.
- [4] R. Faizal *et al.*, "ANALISA VARIASI HEATSINK PROCESSOR TERHADAP," vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2022.
- [5] B. Energi, P. Dari, T. Pembakaran, and M. Irfan, "Evaluasi Penerapan Termoelektrik Sebagai Penghasil Listrik," vol. 1, no. 2, pp. 50–55, 2023.
- [6] B. R. Utomo, H. Kusnanto, N. T. Atmoko, D. Gustiani, and H. Lilih, "Investigasi Kinerja Luaran Listrik Modul Thermoelectric Menggunakan Pemanas Heater dan Pendingin Air," vol. 2, no. 2, pp. 88–98, 2022.
- [7] H. Haryanto, M. R. Makhsum, I. Saraswati, and A. M. Penelitian, "PERANCANGAN MODUL TERMoeLEKTRIK GENERATOR," pp. 26–37, 2004.
- [8] K. Rezki and R. Lapis, "The Influence of Coolant Fluid Variations on the Thermoelectric Generator Performance Utilizing Solar Radiation on Zinc Roof Pengaruh Variasi Fluida Pendingin terhadap Performa Termoelektrik Generator dengan Memanfaatkan Radiasi Matahari terhadap Atap Seng," pp. 501–512, 2023.
- [9] V. P. Fahriani, M. Sahril, R. Setiawan, and S. R. Pertiwi, "Uji Eksperimen Konfigurasi Lup pada Termoelektrik Generator Tipe TEG SP1848-27145 SA untuk Alat Penerangan Jalan," vol. 10, no. 2, 2022.
- [10] M. I. Kamil, I. Imaduddin, and A. Herlina, "Perancangan Sistem Pendingin Stayrofoam Air Conditionerportable Menggunakan Thermoelectric Cooler (Elemen Peltier)," vol. 4, pp. 2–6, 2021.
- [11] A. Wijaya, G. Eddy, and W. Pratama, "Perbandingan Penggunaan Termoelektrik Cooler (TEC) Dan Termoelektrik Generator (TEG) Untuk Optimalisasi Daya Panel Surya," vol. 7, no. 2, 2024.
- [12] N. T. Yono and M. A. Marpaung, "Pengembangan Media Pembelajaran Termoelektrik Generator sebagai Sumber Energi," vol. 2, pp. 65–70, 2016.
- [13] T. Bi, S. Ansys, D. Fisika-fia, I. Teknologi, S. Nopember, and K. Its, "Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik Cooler Menggunakan Material Semikonduktor Bismuth," vol. 7, no. 2, pp. 7–9, 2018.

- [14] M. Facta, “Pemanfaatan Thermoelectric Energy Generator (Teg) Sebagai Sumber Energi Listrik Menggunakan Buck Converter Dengan Umpan Balik Tegangan Berbasis Ic TL494,” pp. 3–9.
- [15] A. B. Pradana, F. Irawan, A. Wisnu, B. D. Saputra, and G. Subakti, “Perancangan Purwarupa Pembangkit Termoelektrik sebagai Media Pembelajaran Konversi Energi,” vol. 05, no. 1, pp. 14–19, 2021.
- [16] F. Sigalingging, M. Idris, and I. Hermawan, “Analisis Pembangkit Listrik Termoelektrik Generator Diradiasi Oleh Panas Matahari Thermoelectric Power Plant Analysis Generator Irradiated By Solar Heat i.” vol. 7, no. 1, pp. 104–112, 2023, doi: 10.31289/jmemme.v7i1.6191.
- [17] A. F. Ulva, C. Meurah, and N. Akla, “Pedampingan Petani Dengan Aplikasi BS (Buying and Selling) Farmer Untuk Meningkatkan Promosi dan Pemasaran di Gampong Ulee Pulo Kecamatan Dewantara Aceh Utara,” vol. 12, no. 3, pp. 1611–1619, 2023.
- [18] S. S. Putra, “Prototipe Sistem Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik Memanfaatkan Limbah Panas Pabrik Semen,” vol. 4, no. 2, pp. 573–583, 2023.
- [19] T. A. A. Galih Yoganingwang, Qurthobi., ahmad, “EVALUAS I PERFORMANS I MODUL TERMoeLEKTRIK SEBAGAI GENERATOR LISTRIK PEFORMANCE EVALUATION OF THERMOELECTRIC MODULE AS ELECTRIC GENERATOR,” vol. 6, no. 2, pp. 5074–5081, 2019.
- [20] R. F. Akbar, O. Heriyani, and R. Ariyansah, “Pembangkit Listrik Menggunakan Generator Termoelektrik pada Dinding Model Bangunan,” vol. 9, no. 2502, pp. 1–14, 2024.
- [21] N. Tambun, D. Mustika, and N. A. Lubis, “Rancang alat konverter energi panas menjadi energi listrik dengan menggunakan termoelektrik sederhana,” vol. 6, no. 1, 2025.
- [22] I. Bayusari and M. R. Baskara, “Pendingin Portable Menggunakan Thermoelectric Cooler Tipe TEC1-12706,” vol. 3, no. 2, pp. 202–208.
- [23] Q. Doraghi and H. Jouhara, “Thermoelectric generator efficiency : An experimental and computational approach to analysing thermoelectric generator performance,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 55, no. September, p. 102884, 2024.