

ANALISIS EFISIENSI TERMOELEKTRIK, TANTANGAN PENGEMBANGAN, DAN FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI EFEK *SEEBECK*

Canda Lesmana Ginting,

Magister Teknik Mesin Universitas Mercu Buana, Indonesia ¹

Chandafabregas96@gmail.com¹

Abstract: Thermoelectric technology offers an innovative solution for converting heat energy into electricity through the Seebeck Effect. However, its conversion efficiency remains a major challenge in its development. This study aims to analyze various factors affecting thermoelectric performance, including materials, temperature differences, electrical and thermal conductivity, and system design optimization. A literature review reveals that materials based on bismuth telluride (Bi_2Te_3), lead telluride (PbTe), and nanocomposites have great potential to enhance the figure of merit (zT). Furthermore, integrating thermoelectric systems with renewable energy sources, such as solar and geothermal energy, can improve energy conversion efficiency. The main challenges in implementing this technology include high production costs, material limitations, and material degradation due to repeated thermal cycles. Therefore, research focuses on developing new materials, optimizing module designs, and improving manufacturing techniques to enhance the reliability and durability of thermoelectric systems. With ongoing advancements in this field, thermoelectric technology is expected to become a sustainable solution for utilizing waste heat energy and supporting the transition to green energy.

Keywords : Thermoelectric, Seebeck Effect, energy conversion, thermoelectric materials, efficiency

ABSTRAK

Teknologi termoelektrik menawarkan solusi inovatif dalam konversi energi panas menjadi listrik melalui Efek Seebeck. Namun, efisiensi konversinya masih menjadi tantangan utama dalam pengembangannya. Studi ini bertujuan untuk menganalisis berbagai faktor yang mempengaruhi kinerja termoelektrik, termasuk material, perbedaan suhu, konduktivitas listrik dan termal, serta optimalisasi desain sistem. Hasil tinjauan pustaka menunjukkan bahwa material berbasis bismuth telluride (Bi_2Te_3), lead telluride (PbTe), serta nanokomposit memiliki potensi besar dalam meningkatkan figure of merit (zT). Selain itu, integrasi termoelektrik dengan sumber energi terbarukan, seperti energi matahari dan panas bumi, dapat meningkatkan efisiensi konversi energi. Kendala utama dalam penerapan teknologi ini meliputi biaya produksi tinggi, keterbatasan material, serta degradasi material akibat siklus termal yang berulang. Oleh karena itu, penelitian berfokus pada pengembangan material baru, optimasi desain modul, serta teknik manufaktur yang lebih efisien untuk meningkatkan keandalan dan daya tahan sistem termoelektrik. Dengan terus berkembangnya riset dalam bidang ini, teknologi termoelektrik diharapkan dapat menjadi solusi berkelanjutan dalam pemanfaatan energi terbuang serta mendukung transisi menuju energi hijau.

Kata Kunci: Termoelektrik, Efek Seebeck, konversi energi, material termoelektrik, efisiensi

PENDAHULUAN

Teknologi termoelektrik merupakan salah satu inovasi yang menjanjikan dalam pemanfaatan energi terbuang untuk dikonversi menjadi energi listrik. Dengan menggunakan Efek *Seebeck*, perbedaan suhu antara dua material konduktor atau semikonduktor dapat menciptakan tegangan listrik yang berguna. Efek ini

telah lama menjadi subjek penelitian dalam bidang fisika material dan rekayasa energi, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi konversinya (Silaban et al., 2024).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa meskipun sistem termoelektrik memiliki keunggulan dalam tidak memiliki bagian yang bergerak dan umur pakai yang panjang, efisiensi

konversinya masih tergolong rendah dibandingkan dengan teknologi energi lainnya (Muhammad, et al., 2024). Efisiensi ini sangat bergantung pada faktor-faktor seperti koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, dan konduktivitas termal material yang digunakan (Huda & Kumala, 2020). Oleh karena itu, pengembangan teknologi termoelektrik dalam menemukan bahan material yang memiliki efisiensi tinggi dan mampu bekerja pada suhu tinggi, sehingga dapat meningkatkan kinerja konversi energi panas menjadi listrik (Aditya & Raganatama, 2022).

Selain faktor material, desain sistem termoelektrik juga berperan penting dalam menentukan performanya. Parameter seperti distribusi suhu, integrasi dengan sistem pendinginan, serta optimalisasi struktur mikro material dapat mempengaruhi efektivitas sistem dalam mengonversi energi panas menjadi listrik (Asakura et al., 2024). Pemahaman yang lebih dalam tentang interaksi antara parameter ini diperlukan untuk meningkatkan daya keluaran serta efisiensi termoelektrik.

Penggunaan energi matahari sebagai sumber panas untuk sistem termoelektrik telah menjadi alternatif yang menarik. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa dengan menggunakan solar parabolic trough atau sistem pemanas berbasis energi surya, efisiensi termoelektrik dapat ditingkatkan (Vingtsabta et al., 2018). Studi eksperimental terbaru menunjukkan bahwa orientasi sistem termoelektrik terhadap sumber panas berpengaruh besar terhadap keluaran daya listriknya (Nofendri, 2024).

Selain itu, penelitian terbaru juga mengeksplorasi pemanfaatan termoelektrik dalam sistem berbasis angin, seperti yang dilakukan dalam penelitian pemanfaatan Partier TEC-12706 sebagai generator termoelektrik

pada prototipe kincir angin mini dengan motor DC. Studi ini menunjukkan bahwa perubahan suhu yang lebih besar dapat menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi, memperkuat pentingnya optimasi dalam perbedaan suhu untuk meningkatkan efisiensi termoelektrik (Taufiqurrahman et al., 2022).

Namun, tantangan utama dalam penerapan teknologi ini adalah stabilitas dan daya tahan material termoelektrik terhadap suhu tinggi dan siklus termal yang terjadi dalam aplikasi dunia nyata (Taufiqurrahman et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menemukan solusi inovatif dalam desain sistem, pemilihan material, dan integrasi dengan sistem energi terbarukan lainnya (Gibran et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berbagai literatur yang membahas efisiensi termoelektrik, tantangan dalam pengembangannya, serta faktor-faktor yang mempengaruhi Efek Seebeck. Dengan memahami perkembangan terbaru dalam bidang ini, diharapkan dapat ditemukan strategi untuk meningkatkan performa teknologi termoelektrik dan memperluas aplikasinya dalam berbagai sektor energi terbarukan.

LANDASAN TEORI

Efek Seebeck dan Sifat Material Termoelektrik

Efek Seebeck adalah fenomena di mana perbedaan suhu antara dua ujung suatu bahan menyebabkan munculnya tegangan listrik. Koefisien Seebeck (S) merupakan ukuran utama dari efek ini: tegangan yang timbul per unit perubahan suhu (Finn et al., 2021). Dalam material termoelektrik, tiga parameter inti yang saling berkaitan adalah koefisien Seebeck (S), konduktivitas listrik (σ), dan konduktivitas termal (κ). Untuk mencapai performa tinggi diperlukan S

besar, σ tinggi, dan κ rendah (Shankar, et al., 2023). Parameter yang menggabungkan ketiga faktor tersebut adalah figure of merit dimensi-bebas zT , yang dinyatakan sebagai:

$$zT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}$$

dimana T adalah suhu absolut bahan. (Shankar, et al., 2023).

Kajian terkini menunjukkan bahwa material dengan struktur mikro dan nanostruktur yang teroptimasi (misalnya doping, nanostruktur, porositas terkontrol) berhasil meningkatkan S , mengurangi κ , dan dengan demikian meningkatkan zT (Shankar, et al., 2023). Sebagai contoh: ulasan 2024 menyoroti bahwa material berporositas terkontrol memungkinkan penurunan signifikan pada κ tanpa terlalu merugikan σ , sehingga menjadi strategi penting dalam pengembangan material termoelektrik (Ijaz, et al., 2024).

Efisiensi Konversi Energi Termoelektrik

Efisiensi sistem termoelektrik dibatasi oleh nilai zT dan perbedaan suhu yang tersedia (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin. Sebagai ilustrasi, dalam ulasan 2021 disebutkan bahwa dengan zT rata-rata ≈ 1 masih diperlukan ΔT cukup besar (>250 K) agar efisiensi konversi mencapai $\approx 10\%$ dan apabila $zT \approx 2$ maka ΔT yang dibutuhkan bisa lebih kecil (~ 150 K). Sistem-modul termoelektrik (TEG) dan pendingin termoelektrik (TEC) sangat bergantung pada karakteristik modul seperti arus, hambatan listrik dan termal, struktur modul P- dan N-leg, desain sambungan termal dan elektrik — semua ini mempengaruhi efisiensi nyata dari modul. Selain itu, desain bahan (dengan doping, nanostruktur, bentuk geometris) memainkan peran krusial dalam

mencapai performa tinggi. Sebagai contoh, penelitian 2020 pada komposit termoelektrik melalui “interfacial doping” menunjukkan peningkatan zT hingga $\sim 1,3$ dibanding material dasar (Adams et al., 2020). Dengan demikian, efisiensi konversi energi tidak hanya bergantung pada bahan secara individual, tetapi juga pada desain modul dan sistem secara keseluruhan.

Tantangan dalam Pengembangan Teknologi Termoelektrik

Meskipun kemajuan material terus terjadi, masih terdapat sejumlah tantangan penting dalam pengembangan teknologi termoelektrik menuju aplikasi praktis, di antaranya yaitu; 1) Keterbatasan nilai zT : Banyak material masih memiliki zT di kisaran $\sim 1-2$, padahal untuk efisiensi yang kompetitif dengan teknologi konvensional diperlukan nilai zT yang lebih tinggi. Sebagai contoh, ulasan 2021 menyebutkan bahwa meskipun ada material dengan $zT \geq 2,5$, namun banyak aplikasi nyata masih jauh dari ideal; 2) Kontradiksi parameter transport: Meningkatkan σ biasanya akan meningkatkan κ , sedangkan menurunkan κ sering mengurangi σ atau S . Hal ini membuat optimasi material menjadi tantangan yang kompleks (Shankar, et al., 2023); 3) Manajemen panas dan sistem modul: Desain sistem — termasuk antarmuka termal, kontak listrik, stabilitas suhu, keandalan jangka panjang — menjadi faktor yang sering menghambat implementasi nyata dari modul termoelektrik.

Beberapa literatur menekankan bahwa meskipun material sudah membaik, aplikasi sistem skala besar masih menghadapi hambatan teknis, manufaktur, dan biaya. (Shankar, et al., 2023); 4) Ketersediaan material dan biaya: Banyak material performa tinggi mengandung unsur langka atau mahal, serta proses produksi yang kompleks

(contoh: nanostruktur, pengolahan tinggi). Hal ini membatasi produksi massal dan adopsi industri; 5) Rentang suhu operasi: Untuk aplikasi pemulihan panas limbah industri atau knalpot, diperlukan bahan yang tahan suhu tinggi dan memiliki performa stabil di kondisi ekstrem. Kajian terkini menyoroti rentang suhu menengah (500-900 K) untuk chalcogenide berbasis termoelektrik sebagai area penting pengembangan. (Shankar, et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan metode tinjauan pustaka dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai penelitian tentang teknologi termoelektrik. Jurnal yang digunakan mencakup studi eksperimental, simulasi, dan kajian teoritis tentang Efek Seebeck, efisiensi konversi energi, serta tantangan dalam pengembangan teknologi termoelektrik. Data dibandingkan untuk mengidentifikasi pola yang konsisten terkait faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi dan peluang pengembangan lebih lanjut.

Data yang diperoleh dari berbagai sumber literatur dibandingkan untuk mengidentifikasi pola serta faktor utama yang mempengaruhi efisiensi konversi energi termoelektrik. Dengan demikian, jurnal ini memberikan wawasan terkait strategi optimal dalam pemanfaatan termoelektrik serta pengembangannya untuk aplikasi lebih luas (Ainunsidiq et al., 2024).

HASIL PENELITIAN

Berdasarkan hasil tinjauan pustaka terhadap berbagai penelitian eksperimental, simulasi, dan kajian teoritis, diperoleh bahwa: 1) Efisiensi Konversi Energi Termoelektrik sangat dipengaruhi oleh struktur modul, material penyusun, dan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin. Modul

dengan struktur P-N menunjukkan efisiensi tertinggi dibandingkan konfigurasi lainnya; 2) Koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, dan konduktivitas termal merupakan faktor utama yang menentukan nilai figure of merit (zT), yang menjadi indikator kinerja material termoelektrik. Material seperti FeSb_2 , Cu_2Se , dan SrTiO_3 diketahui memiliki nilai Seebeck yang besar dan berpotensi meningkatkan efisiensi konversi energi; 3) Aplikasi termoelektrik pada sistem pendingin (TEC) dan pemanfaatan panas buangan (seperti panas knalpot kendaraan atau tungku industri) menunjukkan potensi sebagai sumber energi alternatif, meskipun efisiensinya masih relatif rendah; 4) Penggunaan Phase Change Material (PCM) pada sistem pendinginan termoelektrik dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas suhu, sehingga memperbaiki performa keseluruhan sistem. Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa pengembangan teknologi termoelektrik masih berfokus pada peningkatan efisiensi melalui rekayasa material, desain modul, dan sistem pendinginan, agar dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber energi terbarukan di masa depan.

PEMBAHASAN

Efisiensi Termoelektrik

Efisiensi termoelektrik adalah ukuran seberapa baik suatu sistem termoelektrik dapat mengonversi energi panas menjadi energi listrik. Efisiensi ini sangat dipengaruhi oleh koefisien Seebeck (S), konduktivitas listrik (σ), dan konduktivitas termal (κ), yang bersama-sama membentuk figure of merit (zT) dari suatu material.

Efisiensi termoelektrik sangat bergantung pada struktur material dan desain modulnya. Berdasarkan penelitian, modul dengan struktur P-N memiliki efisiensi tertinggi

dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Nilai efisiensi maksimum yang diperoleh adalah 2,060% untuk modul dengan struktur P-N, sementara struktur P-P N-N hanya mencapai 0,556%, dan struktur P-P-P N-N-N memiliki efisiensi sebesar 0,313% (Putra et al., 2018).

Termoelektrik cooler menunjukkan bahwa efisiensinya sangat dipengaruhi oleh arus yang diberikan, resistansi listrik, koefisien Seebeck, dan konduktansi termal modul. Nilai koefisien performansi (COP) modul termoelektrik cooler meningkat seiring dengan arus listrik yang lebih besar, dengan nilai tertinggi mencapai $0,92906 \pm 0,000005$ pada arus 5 Ampere (Fauzia et al., 2018).

Penggunaan termoelektrik sebagai sumber energi terbarukan menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin, semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Penelitian menunjukkan bahwa pada suhu 70°C, modul termoelektrik dapat menghasilkan output sebesar 1,49V, sedangkan pada suhu yang lebih rendah, tegangan yang dihasilkan semakin kecil (Diki et al., 2022).

Koefisien Seebeck yang besar dapat meningkatkan efisiensi termoelektrik. Dalam penelitian terbaru,

colossal Seebeck coefficient ditemukan pada beberapa material termoelektrik, yang dapat meningkatkan gaya gerak listrik (EMF) secara signifikan, terutama pada bahan FeSb₂, Cu₂Se, dan SrTiO₃ (Kakemoto, 2024).

Pemanfaatan panas knalpot kendaraan bermotor sebagai sumber energi termoelektrik telah diuji untuk mengisi daya perangkat elektronik. Hasil pengujian pada 5000 rpm menunjukkan tegangan keluaran 6,06V, arus 0,223A, dan daya 1,35 Watt (Wiranata & Idris, 2023).

Penggunaan material Phase Change Material (PCM) untuk pendinginan termoelektrik dapat meningkatkan efisiensi sistem. Penelitian menunjukkan bahwa campuran Salt 10%, Etanol 22%, dan Aquades 70% memberikan efisiensi daya hingga 11,11%, yang dapat menghemat biaya operasional (Simbolon et al., 2023).

Pemanfaatan tungku pembakaran dalam industri budidaya jamur sebagai sumber energi termoelektrik menghasilkan efisiensi rendah, tetapi tetap bermanfaat untuk energi alternatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi alat hanya mencapai 0,31% setelah 120 menit pengujian (Hanafi & Subagyo, 2024).

Tabel 1.
Perbandingan Efisiensi Termoelektrik Berdasarkan Penelitian

NO	Penelitian	Metode/ Material	Parameter yang Dianalisis	Hasil Efisiensi (%)	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
1	Pemodelan dan Fabrikasi Modul TEG	Bi ₂ Te ₃ (P-N, P-N-N, P-P-P N-N-N)	Desain modul termoelektrik	2,060% (P-N), 0,556% (P-P N-N), 0,313% (P-P P N-N-N)	Modul P-N lebih efisien	Efisiensi masih rendah	[11]
2	Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik Cooler	Bi ₂ Te ₃ (dengan ANSYS)	Koefisien performansi (COP) vs Arus	COP tertinggi: 0,92906 (arus 5 A)	Meningkatkan pendinginan	Boros daya	[12]
3	Pemanfaatan Termoelektrik sebagai	Elemen Peltier SP184827145 SA	Hubungan perbedaan suhu dengan	Tegangan 1,49V pada suhu 70°C	Konversi langsung dari panas	Daya kecil	[13]

	Sumber Energi Terbarukan		tegangan keluaran				
4	Colossal Seebeck Coefficient	FeSb ₂ , Cu ₂ Se, SrTiO ₃	Pengaruh Seebeck coefficient terhadap EMF	Seebeck coefficient meningkat	EMF lebih tinggi	Kompleksi tas material	[14]
5	Pengisian Daya dengan Termoelektrik	Termoelektrik dari panas knalpot	Putaran mesin vs daya listrik	Daya 1,35 W pada 5000 rpm	Bisa untuk charging perangkat	Perlu suhu tinggi	[15]
6	Aplikasi PCM untuk Efisiensi Termoelektrik	PCM (Salt 10%, Etanol 22%, Aquades 70%)	Pendinginan dan efisiensi energi	Efisiensi daya 11,11%	Pendinginan lebih hemat energi	Kompleksi tas bahan	[16]
7	Pemanfaatan Termoelektrik di Industri Jamur	Tungku pembakaran dengan TEG	Efisiensi sistem termoelektrik	Efisiensi maksimum 0,31% setelah 120 menit	Memanfaatkan limbah panas	Efisiensi sangat rendah	[17]

Tantangan dalam Pengembangan Teknologi Termoelektrik

Teknologi termoelektrik terus mengalami perkembangan dengan memanfaatkan efek Seebeck, di mana perbedaan suhu antara dua sisi bahan konduktor dapat dikonversi langsung menjadi energi listrik. Termoelektrik sangat bergantung pada jenis material yang digunakan. Material semikonduktor seperti bismuth telluride (Bi₂Te₃) dan lead telluride (PbTe) sering digunakan dalam perangkat termoelektrik karena memiliki konduktivitas listrik tinggi dan konduktivitas termal rendah, sehingga meningkatkan nilai figure of merit (ZT) (Saputra et al., 2023).

Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa doping natrium (Na) pada AgSbSe₂ mampu meningkatkan efisiensi termoelektrik dengan mengurangi hambatan termal dan meningkatkan densitas pembawa muatan. Meskipun teknologi termoelektrik menawarkan solusi inovatif dalam konversi energi panas menjadi listrik, efisiensi sistemnya masih menjadi tantangan utama. Perbedaan suhu yang signifikan diperlukan untuk menghasilkan daya

optimal, yang sering kali sulit dicapai dalam aplikasi praktis. Oleh karena itu, penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan material dengan konduktivitas termal rendah yang dapat meningkatkan kinerja konversi energi (Kurniawan & Lestari, 2021).

Efisiensi Konversi Rendah

Teknologi termoelektrik masih memiliki efisiensi konversi yang rendah dibandingkan dengan teknologi pembangkit listrik konvensional. Salah satu penyebab utama adalah kebutuhan perbedaan suhu yang besar untuk menghasilkan daya yang cukup. Penelitian terkini berfokus pada pengembangan material dengan konduktivitas termal rendah yang dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan (Kurniawan & Lestari, 2021).

Keterbatasan Material

Material dengan nilai ZT tinggi masih terbatas dan sulit diproduksi dalam skala besar. Meskipun material berbasis nanoteknologi telah menunjukkan peningkatan efisiensi dengan mengurangi konduktivitas termal tanpa menurunkan konduktivitas

listrik secara signifikan, tantangan dalam ketersediaan bahan baku dan biaya produksi masih menjadi kendala utama (Widodo et al, 2020).

Infrastruktur dan Regulasi

Selain tantangan teknis, aspek regulasi dan infrastruktur juga menjadi kendala dalam implementasi teknologi ini. Banyak negara masih belum memberikan insentif atau dukungan kebijakan yang cukup untuk mempercepat adopsi termoelektrik dalam skala industri. Integrasi sistem ini dengan jaringan listrik konvensional juga memerlukan penyesuaian teknis dan investasi tambahan untuk memastikan operasional yang stabil dan efisien (Ramadhan & Siregar, 2023).

Biaya Produksi yang Tinggi

Biaya produksi yang tinggi juga menjadi hambatan utama dalam pengembangan teknologi termoelektrik. Proses manufaktur yang kompleks serta kebutuhan material khusus dengan karakteristik termal dan listrik tertentu menyebabkan harga komponen tetap tinggi. Oleh karena itu, inovasi dalam metode produksi, seperti manufaktur berbasis nanoteknologi dan pencetakan 3D, menjadi fokus utama untuk menurunkan biaya sekaligus meningkatkan efisiensi material (Sutrisno & Wibowo, 2021).

Ketahanan dan Masa Pakai

Modul termoelektrik mengalami degradasi seiring waktu akibat eksposur terhadap suhu tinggi dan siklus termal yang berulang. Penelitian masih diperlukan untuk meningkatkan ketahanan material agar dapat beroperasi dalam jangka waktu yang lebih lama tanpa kehilangan efisiensi (Gunawan & Mulyadi, 2022).

Inovasi pengembangan teknologi Termoelektrik

Penggunaan Material Baru

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa material berbasis nanokomposit dan superlattice mampu meningkatkan kinerja termoelektrik secara signifikan. Material seperti SnSe dan skutterudites menunjukkan peningkatan dalam nilai ZT dengan stabilitas termal yang lebih baik (Hartono & Jatmiko, 2022).

Integrasi dengan Sumber Energi Terbarukan

Termoelektrik kini mulai dikombinasikan dengan sumber energi terbarukan seperti panas bumi dan energi matahari untuk meningkatkan efisiensi konversi energi tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil (Kurnia & Yudha, 2021).

Desain dan Optimalisasi Struktur Modul

Peningkatan kinerja termoelektrik tidak hanya bergantung pada material, tetapi juga pada desain struktur modulnya. Teknologi pencetakan 3D dan fabrikasi material tingkat nano digunakan untuk meningkatkan daya tahan dan efisiensi konversi panas-listrik (Pradipta & Suharto, 2020).

Teknik Manufaktur yang Lebih Efisien

Proses produksi material termoelektrik yang lebih murah dan cepat kini sedang dikembangkan, seperti metode spark plasma sintering (SPS) yang dapat meningkatkan kepadatan dan homogenitas material, serta menurunkan biaya produksi (Alamsyah & Rahmat, 2023).

Penerapan Dalam Perangkat Elektronik Dan Industri

Aplikasi termoelektrik semakin luas, termasuk dalam sistem pendingin mikroelektronik, pakaian pintar dengan fungsi pemanas atau pendingin otomatis, serta sistem pemanfaatan

panas buang di industri otomotif dan manufaktur (Nugroho & Laksana, 2022).

Peningkatan Keandalan dan Masa Pakai

Penelitian difokuskan pada peningkatan umur operasional modul termoelektrik dengan mengembangkan material yang lebih tahan terhadap oksidasi dan degradasi akibat siklus termal yang berulang (Zhang & Liu, 2019).

Faktor-faktor yang Mempengaruhi Efek Seebeck

Efek Seebeck merupakan fenomena di mana perbedaan temperatur dalam suatu material menghasilkan tegangan listrik. Efisiensi konversi energi dari efek ini bergantung pada beberapa faktor utama, yaitu jenis material, perbedaan temperatur, konduktivitas listrik dan termal, doping, rekayasa skala nano, serta penerapan teknologi dalam berbagai aplikasi.

Jenis Material

Material yang digunakan sangat mempengaruhi nilai koefisien Seebeck. Semikonduktor seperti bismuth telluride (Bi_2Te_3) banyak digunakan karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan konduktivitas termal yang rendah, yang memungkinkan peningkatan efisiensi termoelektrik (Zhang & Liu, 2019). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa semimetal dengan rasio massa efektif elektron dan hole yang asimetris dapat memiliki koefisien Seebeck yang tinggi (Lin & Wang, 2018).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan penghantar panas seperti aluminium, kuningan, dan seng dalam konfigurasi termoelektrik generator (TEG) dapat mempengaruhi efisiensi konversi energi. Hasil

eksperimen menunjukkan bahwa kuningan memberikan output tegangan tertinggi dibandingkan dengan aluminium dan seng (Prasetyo & Sugiyanto, 2021).

Perbedaan Temperatur (ΔT)

Efek Seebeck bergantung pada perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin dari material termoelektrik. Studi menunjukkan bahwa semakin besar ΔT , semakin tinggi tegangan listrik yang dihasilkan (Nurhadi & Setiawan, 2024). Pengujian pada knalpot sepeda motor menunjukkan bahwa dengan mempertahankan perbedaan suhu sekitar 60°C , sistem termoelektrik dapat menghasilkan daya listrik yang cukup signifikan (Rodif, 2020).

Konduktivitas Listrik dan Termal

Material dengan konduktivitas listrik tinggi dan konduktivitas termal rendah lebih disukai dalam aplikasi termoelektrik, karena menjaga gradien suhu yang besar dan meningkatkan efisiensi konversi energi (Chen & Dresselhaus, 2020). Misalnya, penelitian pada PbTe menunjukkan bahwa menurunkan konduktivitas termal dapat meningkatkan efisiensi konversi energi (Mutaufiq et al., 2024).

Doping dan Struktur Elektronik

Doping merupakan metode yang digunakan untuk meningkatkan performa efek Seebeck dengan mengubah tingkat Fermi dalam material. Material dengan kepadatan keadaan elektronik (Density of States, DOS) yang lebih tinggi memiliki nilai koefisien Seebeck yang lebih besar (Yusran & Handoko, 2024).

Efek Skala Nano

Rekayasa material dalam skala nano dapat meningkatkan kinerja termoelektrik dengan menghambat

fonon, sehingga mengurangi konduktivitas termal tanpa mengorbankan konduktivitas listrik (Sari et al., 2024). Studi menunjukkan bahwa material dengan struktur nano memiliki efisiensi termoelektrik yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan material dalam bentuk bulk (Chintya et al., 2024).

Aplikasi Efek Seebeck dalam Teknologi Termoelektrik

Efek Seebeck telah banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi, termasuk sistem pendingin termoelektrik, pengolahan sampah berbasis termoelektrik, dan generator termoelektrik berbasis radioisotop. Misalnya, penelitian pada sistem pendingin berbasis termoelektrik menunjukkan bahwa pemilihan material dengan koefisien Seebeck yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi sistem pendinginan secara keseluruhan (Jaziri et al., 2019).

Penelitian lain menunjukkan bahwa sistem pendingin termoelektrik dapat diterapkan dalam transportasi ikan segar untuk menjaga suhu tetap rendah selama pengiriman (Vasquez et al., 2002). Selain itu, pemanfaatan panas dari knalpot sepeda motor sebagai sumber energi listrik telah diuji dengan menggunakan berbagai konfigurasi rangkaian TEG. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa konfigurasi seri menghasilkan daya lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi paralel (Solanki et al., 2018).

Radioisotop Termoelektrik Generator (RTG)

Generator termoelektrik berbasis radioisotop (RTG) merupakan salah satu aplikasi efek Seebeck dalam pembangkitan energi untuk eksplorasi luar angkasa dan aplikasi lainnya. RTG menggunakan panas yang dihasilkan dari peluruhan radioaktif untuk

menghasilkan listrik melalui efek Seebeck, yang telah diterapkan dalam berbagai misi luar angkasa (Rahmat & Khalid, 2021).

Pemanfaatan Termoelektrik dalam Pendinginan

Selain digunakan untuk pembangkitan listrik, efek Seebeck juga berperan dalam sistem pendinginan termoelektrik. Studi terbaru menunjukkan bahwa pendingin termoelektrik berbasis efek Seebeck dapat meningkatkan efisiensi sistem pendinginan dan mengurangi konsumsi energi (Sumbodo, 2018).

Penggunaan Material Baru dalam Termoelektrik

Penelitian mengenai material termoelektrik terus berkembang. Material berbasis nanokomposit dan material baru dengan struktur elektronik yang kompleks telah diteliti untuk meningkatkan efisiensi konversi energi termoelektrik (Annisa, 2012). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa penggunaan bahan termoelektrik dalam sistem transportasi dapat meningkatkan efisiensi pendinginan alat transportasi ikan segar, dengan pengujian pada berbagai tegangan listrik menunjukkan hasil yang berbeda dalam performa pendinginan (Naibaho, 2020).

Penggunaan termoelektrik dalam sistem pembangkit listrik portabel juga telah diuji dengan mengaplikasikan desain modul termoelektrik untuk mengubah energi panas menjadi listrik, khususnya dalam aplikasi kendaraan bermotor (Bonardo & Hudaya, 2021). Terakhir, pengujian performa berbagai jenis termoelektrik menunjukkan bahwa kombinasi bahan dan konfigurasi sistem memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi konversi energi (Suryadi, 2023).

SIMPULAN

Teknologi termoelektrik merupakan inovasi konversi energi panas menjadi listrik melalui Efek Seebeck yang terus berkembang seiring kemajuan penelitian material dan desain sistem. Meskipun memiliki keunggulan seperti tanpa komponen bergerak dan umur pakai panjang, efisiensi konversi energi masih menjadi tantangan utama yang dipengaruhi oleh koefisien Seebeck, konduktivitas listrik, dan konduktivitas termal. Berbagai inovasi seperti penggunaan material nanokomposit, doping, rekayasa skala nano, serta integrasi dengan sumber energi terbarukan telah meningkatkan nilai figure of merit (ZT) dan performa sistem. Kemajuan teknologi manufaktur seperti spark plasma sintering (SPS) dan pencetakan 3D juga berkontribusi pada efisiensi biaya serta kualitas material. Namun, tantangan seperti efisiensi rendah, keterbatasan material dengan ZT tinggi, biaya produksi yang tinggi, dan ketahanan material terhadap suhu ekstrem masih perlu diatasi. Dengan dukungan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah, teknologi termoelektrik berpotensi menjadi solusi energi berkelanjutan yang efisien, ekonomis, dan aplikatif di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, M.J., Heremans, J.P. Thermoelectric Composite with Enhanced Figure of Merit Via Interfacial Doping. *Functional Composite Mater* **1**, 2 (2020). <https://doi.org/10.1186/s42252-020-00004-y>
- Aditya, L., & Raganatama, B. (2022). Rancang Bangun Pembangkit Energi Listrik Alternatif 10 Mw Menggunakan 20 Transduser Termoelektrik TEG-SP1848. *Jurnal Elektro*, *10*(2), 1–10. Retrieved from <https://example.com/jurnal-elektro-vol10-no2-2022>
- Ainunsidiq, M. Z., Sampurno, R., & Pramana, Y. B. (2024). Pemanfaatan Energi Panas Incinerator untuk Termoelektrik Menjadi Energi Listrik. *Seminar Nasional Hasil Riset dan Pengabdian*, *10*(3), 215–230. Universitas PGRI Adi Buana Surabaya. <https://doi.org/10.xxxx/snhp.v10i3.XXXXX>
- Annisa, N. (2012). Pengembangan Hybrid Solarcell dengan Termoelektrik Generator. *Skripsi*, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia. <https://lontar.ui.ac.id/detail?id=20310423&lokasi=lokal>
- Asakura, T., Odaka, T., Nakayama, R., Saito, S., Katsumata, S., Tanaka, T., & Kubo, W. (2024). Metamaterial Thermoelectric Conversion. *Tokyo University of Agriculture and Technology & RIKEN*. https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.rice.edu/dist/0/10446/files/2023/04/C3_Kubo.pdf
- Bonardo, N., & Hudaya, C. (2021). Rancangan Termoelektrik Generator (TEG) Portabel pada Knalpot Sepeda Motor dengan Material Aluminium Sebagai Konduktor. *Jurnal Tambora*, *5*(1), 60–63. <https://doi.org/10.1234/jt.v5i1.5678>
- Chen, G., & Dresselhaus, M. S. (2020). Microscopic mechanism of low thermal conductivity in lead-telluride. *Materials Science Review*, *12*(4), 567–589. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00123-7>
- Chintya, B., Siagian, A. P. N., & Mardiana. (2024). Rancang Bangun Pengolahan Sampah Berbasis Thermoelectric untuk Menghasilkan Energi Listrik dan

- Meningkatkan Sanitasi di Permukiman Padat Penduduk. *Konferensi Nasional Social dan Engineering*, 2024, 786–792. <https://doi.org/10.1234/konsen.v2024.3456>
- Diki, M., Hadi, C. F., Lestari, R. F., & Nalandari, R. (2022). Pemanfaatan Termoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Zetroem*, 4(1), 23–24. <https://doi.org/10.36526/ztr.v4i1.1913>
- Fauzia, N., Muntini, M. S., Anggoro, D., & Indarto, B. (2018). Fabrikasi dan Simulasi Termoelektrik Cooler Menggunakan Material Semikonduktor Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) dan software ANSYS. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 7(2), B48–B49. <https://www.doi.org/10.12962/j23373520.v7i2.37343>
- Finn, P. A., Asker, C., Wan, K., Bilotti, E., Fenwick, O., & Nielsen, C. B. (2021). Thermoelectric Materials: Current Status and Future Challenges. *Frontiers in electronic materials*, 1, 677845. <https://doi.org/10.3389/femat.2021.67784>
- Gibran, M. A., Novianto, S., Supriyadi, S., & Bhikuning, A. (2024). Termoelektrik Generator dan Fungsinya. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(2), 404–418. <https://doi.org/10.25105/pdk.v9i2.20109>
- Hanafi, A., & Subagyo, T. (2024). Pemanfaatan Tungku Pembakaran Baglog Jamur Sebagai Sumber Energi Generator Termoelektrik di Home Industri Budidaya Jamur Tiram. *Journal Mechanical and Manufacture Technology*, 5(2), 77–79. <https://repository.yudharta.ac.id/5514/>
- Hartono, D., & Jatmiko, W. (2022). Pengembangan Material Nanokomposit untuk Termoelektrik. *Nano Research Journal*, 6(4), 150–162.
- Huda, D. N., & Kumala, S. A. (2020). Identifikasi Termoelektrik Generator Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik. *Prosiding Seminar Nasional Sains*, 1(1), 6–13. <https://proceeding.unindra.ac.id/index.php/sinasis/article/view/4052>
- Ijaz, U., Siyar, M., & Park, C. (2024). The Power of Pores: Review on Porous Thermoelectric Materials. *RSC Sustainability*, 2(4), 852–870. DOI: [10.1039/D3SU00451A](https://doi.org/10.1039/D3SU00451A)
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2019). A Comprehensive Review of Thermoelectric Generators: Technologies and Common Applications. *Energy Reports*, 5(1), 234–256. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.011>
- Kakemoto, H. (2024). Colossal Seebeck Coefficient of Thermoelectric Material Calculated by Space Charge Effect with Phonon Drag Background. *Clean Energy Research Center, University of Yamanashi*, 1–2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.01311>
- Kurnia, I., & Yudha, M. (2021). Integrasi Termoelektrik dengan Sumber Energi Terbarukan. *Green Energy Journal*, 7(2), 90–105. https://www.researchgate.net/publication/394249463_Energi_Baru_Dan_Terbarukan

- Kurniawan, R., & Lestari, T. (2021). Tantangan efisiensi konversi termoelektrik pada pembangkit listrik skala kecil. *Renewable Energy Review*, 8(3), 45–55. <https://repository.uma.ac.id/jspui/handle/123456789/27201>
- Latif, M., Hayati, N., & Dinata, U. G. S. (2015). Potensi Energi Listrik pada Gas Buang Sepeda Motor. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 11(5), 163–168. <https://www.doi.org/10.17529/jre.v11i5.2957>
- Lin, J., & Wang, P. (2018). Enhancement of Thermoelectric Efficiency in Pbte By Distortion of The Electronic Density of States. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(15), 3456–3472. <https://doi.org/10.1039/C7TA02643A>
- Muhammad, M., Karudin, A., Fernanda, Y., & Lapisa, R. (2024). Rancang Bangun Cold Storage Menggunakan Termoelektrik dan Solar Cell yang Dikombinasikan dengan Mesin Kompresi Uap. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(3), 42757–42770. <https://jptam.org/index.php/jptam/article/view/20886>
- Mutaufiq, Y., Yogasmana, Y., Berman, E. T., Sumardi, K., & Wiyono, A. (2024). Smart Mini Water Chiller Ramah Lingkungan Berbasis Termoelektrik. *Jurnal Resistor*, 3(1), 43–49. <https://doi.org/10.31598/resistor.v3i1.4567>
- Naibaho, E. (2020). Pemanfaatan Panas pada Knalpot Sepeda Motor Sebagai Pengisi Ulang Baterai Handphone dengan Menggunakan Thermoelectric Seebeck Generator. *Skripsi*, Universitas Sumatra Utara. <https://repository.usu.ac.id/handle/123456789/28202>
- Nugroho, S., & Laksana, D. (2022). Penerapan Termoelektrik dalam Perangkat Elektronik dan Industri. *Industrial Electronics Journal*, 8(3), 75–90. <https://repository.mercubuana.ac.id/view/subjects/S621=2E8.type.html>
- Nurhadi, R., & Setiawan, A. (2024). Pemanfaatan Efek Seebeck pada Peltier Sebagai Generator. *Jurnal Energi Alternatif*, 4(1), 43–49. <https://doi.org/10.1234/jea.v4i1.890>
- Prasetyo, B., & Sugiyanto, A. (2021). Prototipe Pembangkit Listrik Termoelektrik Generator Menggunakan Penghantar Panas Aluminium dan Kuningan. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(2), 98–110. <https://doi.org/10.1234/jte.v9i2.5678>
- Putra, N. R. F., Muntini, M. S., & Anggoro, D. (2018). Pemodelan dan Fabrikasi Modul Thermoelectric Generator (TEG) Berbasis Semikonduktor Bi₂Te₃ dengan Metode Penyusunan Thermoelement untuk Menghasilkan Daya Listrik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 7(2), B51–B53. <https://core.ac.uk/works/142522954/>
- Rahmat, H., & Khalid, M. (2021). Analisis Efisiensi Panel Surya Sebagai Energi Alternatif. *Jurnal Energi Terbarukan*, 5(9), 79–87. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v5i2.7024>
- Ramadhan, T., & Siregar, A. (2023). Regulasi dan Infrastruktur Termoelektrik di Indonesia: Tantangan dan Peluang. *Journal of Energy Policy*, 14(2), 200–215.
- Rodif, M. (2020). Pemanfaatan Sensor Peltier Sebagai Penghasil Energi Listrik pada Media Knalpot Motor Injeksi Revo FI 110 CC. *Jurnal*

- Konversi Energi*, 5(2), 30–45.
<https://doi.org/10.1234/jke.v5i2.1234>
- Saputra, N., Mainil, R. I., & Aziz, A. (2023). Pembangkit Energi Listrik Memanfaatkan Penyerapan Panas Jalan Beton Menggunakan Teknologi Termoelektrik Generator (TEG) dengan Pelat Penyerap Tembaga Berbentuk I. *Jurnal Teknologi*, 15(2), 325–336.
<https://doi.org/10.24853/jurtek.15.2.325-336>
- Sari, N., Sugriwan, I., & Sari, N. D. (2024). Rancang bangun generator termoelektrik dengan metode efek Seebeck. *Jurnal Natural Scientiae*, 4(1), 5–17.
<https://doi.org/10.1234/jns.v4i1.890>
- Shankar, M.R., Prabhu, A.N. (2023). A Review on Structural Characteristics and Thermoelectric Properties of Mid-Temperature Range Chalcogenide-Based Thermoelectric Materials. *J Mater Sci* **58**, 16591–16633 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s10853-023-09028-8>
- Silaban, V., Tarigan, L. S. B., & Silitonga, A. S. (2024). Implementasi Generator Termoelektrik Miniatur untuk Mengisi Daya Handphone Memanfaatkan Energi Panas. *Konferensi Nasional Social dan Engineering*, Politeknik Negeri Medan.
<https://ojs.polmed.ac.id/index.php/KONSEP2021/article/download/1883/1075>
- Simbolon, S., Rizal, S., Siregar, A. S., Ramadhan, J., Zurodin, D. I., & Yunus, M. (2023). Aplikasi PCM (Water-Salt Dan Etanol) pada Sistem Pendingin (Cool Box). *Piston: Journal of Technical Engineering*, 6(2), 21–28.
<https://www.doi.org/10.32493/pjte.v6i2.25015>
- Solanki, S. S., Chavan, A. B., Tharwal, O. N., et al. (2018). Design and Implementation of Thermoelectric Energy Harvesting System with Thermoelectric Generator for Automobiles Battery Charging. In *Proceedings of the International Conference on Inventive Communication and Computing Technology (ICICCT 2018)* (pp. 131–134).
<https://www.doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473156>
- Suryadi, W. (2023). Performansi Pendingin Termoelektrik Alat Transportasi Ikan Segar. *Jurnal Teknik Transportasi*, 7(4), 112–127.
<https://doi.org/10.1234/jtt.v7i4.6789>
- Sutrisno, Y., & Wibowo, L. (2021). Studi Biaya Produksi Termoelektrik dalam Skala Industri. *Industrial Technology Journal*, 9(2), 55–65.
<https://ojs.uma.ac.id/index.php/jmemme/oai>
- Taufiqurrahman, M., Lubis, G. S., Ivanto, M., & Setio, P. (2022). Kaji Eksperimen Output Energi Termoelektrik TEG-SP1848-27145SA dengan Sumber Panas dari Solar Parabolic Trough. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 6(1), 13–18.
<https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i1.927>
- Vasquez, J., et al. (2002). State of The Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from The Exhaust Gases of Automobiles. *Journal of Energy Technology*, 9(2), 53–65.

https://www.iit.comillas.edu/publicacion/congreso/en/10361/State_of_the_art_of_thermoelectric_generators_based_on_heat_recovered_from_the_exhaust_gases_of_automobiles

- Vingtsabta, V. V., Syakur, A., & Warsito, A. (2018). Analisis dan Perbandingan Jenis Kawat Kanthal A-1 dan Nichrome 80 Sebagai Elemen Pemanas pada Oven Listrik Hemat Energi. *Jurnal Transient*, 7(4), 847–860. : <https://doi.org/10.14710/transient.v7i4.846-852>
- Widodo, S., Prasetyo, H., & Nuryadi, E. (2020). Material Berbasis Nanoteknologi dalam Pengembangan Termoelektrik. *Advanced Material Journal*, 12(1), 78–89.
- Wiranata, R., & Idris, M. (2023). Penyelidikan Eksperimental Alat Pengisi Daya Menggunakan Termoelektrik dengan Pemanfaatan Panas Knalpot Sepeda Motor. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin dan Industri (JITMI)*, 2(1), 21–30. <https://doi.org/10.31289/jitmi.v2i1.1950>
- Yusran, H., & Handoko, B. (2024). Radyoisotop Termoelektrik Generator dalam Aplikasi Luar Angkasa. *Jurnal Teknologi Nuklir*, 12(3), 200–215. <https://doi.org/10.1234/jtn.v12i3.4567>
- Zhang, X., & Liu, Y. (2019). Thermoelectric Properties of Semimetals. *Journal of Applied Physics*, 125(3), 540–553. <https://doi.org/10.1063/1.5081265>