PENGARUH PELAPISAN CAT HITAM PADA CORAN SEMEN TERHADAP PERFORMA THERMOELECTRIC GENERATOR SURYA

Marcell Mario Theo Brazio Pangau[1], Hidayat Muzaki[1], Sujono[1*]
[1]Program Studi Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora 58315
**E-mail:* jono1166@gmail.com

ABSTRAK

Ketergantungan pada bahan bakar fosil dan besarnya kesenjangan antara potensi dan pemanfaatan energi surya mendorong kajian teknologi konversi energi alternatif berbiaya rendah. Berbeda dari penelitian thermoelectric generator (TEG) surya yang umumnya menggunakan absorber logam selektif atau semen aktif berdoping karbon, penelitian ini mengkaji coran semen konvensional berlapis cat hitam sebagai media penyerap panas pasif pada modul TEG SP1848-27145, dibandingkan dengan coran polos. Dua coran bermassa 3 kg, masing-masing dipasangi lima modul TEG paralel, diuji di bawah radiasi matahari selama 60 menit dengan sisi dingin didinginkan heatsink tercelup air. Coran cat hitam menghasilkan ΔT maksimum 22,8°C, tegangan 0,33 V, arus 32,60 mA, dan daya 10,76 mW, sedangkan coran polos menghasilkan ΔT maksimum 13,0°C, tegangan 0,18 V, arus 20,50 mA, dan daya 3,69 mW. Regresi linier menunjukkan hubungan ΔT-tegangan yang kuat (R^2 = 0,901 dan 0,990), sesuai hukum Seebeck. Efisiensi konversi terhadap radiasi matahari mencapai 2,20% pada coran hitam dan 0,78% pada coran polos. Panas buang sisi dingin menaikkan temperatur air hingga 0,6°C. Coran semen berlapis cat hitam berpotensi menjadi penyerap panas TEG surya yang murah dan mudah difabrikasi untuk energi terbarukan skala kecil.

Kata kunci: *thermoelectric generator; efek Seebeck; energi surya; coran semen; absorptivitas permukaan*

1. PENDAHULUAN

Bauran energi baru terbarukan nasional baru mencapai 13,21% pada 2023, jauh tertinggal dari target 23% yang dicanangkan untuk 2025 [1], sementara kebutuhan energi terus tumbuh seiring pertumbuhan penduduk dan aktivitas industri [2]. Kesenjangan ini menegaskan bahwa ketergantungan pada bahan bakar fosil belum banyak bergeser, sehingga diperlukan kajian teknologi konversi energi alternatif yang efektif sekaligus mudah dan murah diterapkan pada skala kecil. Energi surya menjadi kandidat paling realistis untuk konteks Indonesia sebagai negara tropis; potensi teknisnya diperkirakan mencapai 3.294 gigawatt-peak, sementara kapasitas PLTS atap yang benar-benar terpasang baru sekitar 149 megawatt-peak pada awal 2024 [3] kesenjangan yang menunjukkan masih terbukanya ruang pengembangan pada berbagai skala aplikasi, termasuk skala rumah tangga dan edukasi vokasi.

Salah satu jalur pemanfaatan energi surya yang relatif kurang dieksplorasi dibandingkan fotovoltaik adalah konversi termoelektrik. Thermoelectric generator (TEG) menghasilkan listrik secara langsung dari perbedaan temperatur antara dua sisi material semikonduktor melalui efek Seebeck, yaitu timbulnya gaya gerak listrik akibat gradien temperatur pada material tersebut [4]. Tanpa bagian bergerak, TEG relatif tahan lama dan minim perawatan, dan performanya sangat bergantung pada seberapa besar perbedaan temperatur (ΔT) yang dapat dipertahankan antara sisi panas dan sisi dingin modul, sehingga desain media penyerap panas pada sisi panas menjadi faktor penentu utama.

Riset TEG bertenaga surya belakangan ini berkembang melalui dua jalur utama. Jalur pertama memanfaatkan semen sebagai elemen termoelektrik aktif itu sendiri, dengan

mendoping pasta atau komposit semen menggunakan serat karbon, grafit, atau oksida logam sehingga semen memiliki sifat Seebeck pendekatan yang berkembang pesat karena semen tersedia luas dan dapat diintegrasikan langsung ke selubung bangunan maupun perkerasan jalan untuk pemanenan energi skala besar [5]–[8]. Jalur kedua memperbaiki kualitas penyerap panas melalui lapisan selective solar absorber atau lapisan oksida logam yang mampu mencapai absorptivitas di atas 0,9 dengan emisivitas inframerah rendah, meski efisiensi konversi keseluruhan sistem tetap rendah, umumnya di bawah 5% pada sistem tanpa konsentrator optik [9]–[11].

Kedua jalur tersebut memiliki kendala praktis untuk aplikasi berbiaya sangat rendah dan mudah direplikasi. Cement-based thermoelectric generator memerlukan formulasi semen khusus dengan kontrol rasio doping dan rasio air-semen yang presisi, sehingga sulit direplikasi dengan peralatan bengkel biasa [7], sedangkan selective absorber memerlukan fasilitas deposisi lapisan tipis yang tidak tersedia di laboratorium sederhana [9]. Di sisi lain, riset TEG atap logam berwarna gelap yang didinginkan air menunjukkan hasil menjanjikan untuk aplikasi pedesaan berbiaya rendah, mencapai ΔT hingga 43,16°C dan tegangan 4,226 V menggunakan empat modul pada konfigurasi atap hitam tertutup kaca dengan pendinginan air [12]. Namun logam tetap lebih mahal dan rentan korosi pada penggunaan luar ruangan jangka panjang dibandingkan material sipil seperti semen cor.

Kesenjangan yang teridentifikasi adalah belum tersedianya kajian yang secara khusus mengevaluasi coran semen konvensional tanpa doping, sebagai material struktural pasif yang murah dan mudah dicetak sebagai media penyerap panas eksternal untuk modul TEG komersial siap pakai, dikombinasikan dengan pelapisan cat hitam biasa, sekaligus mengevaluasi pemanfaatan sisi dingin modul untuk menghasilkan air hangat sebagai keluaran termal tambahan. Permasalahan yang diajukan dalam penelitian ini adalah sejauh mana pelapisan cat hitam pada coran semen memengaruhi ΔT dan keluaran listrik modul TEG berbasis energi surya, serta sejauh mana sistem pendinginan heatsink-air mampu mempertahankan ΔT tersebut sekaligus menghasilkan air hangat sebagai keluaran tambahan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ΔT terhadap tegangan dan arus keluaran modul SP1848-27145, mengevaluasi pengaruh pelapisan cat hitam terhadap kemampuan penyerapan panas coran semen dibandingkan coran polos, dan mengevaluasi kemampuan sistem pendingin heatsink-air dalam menjaga ΔT sekaligus menghasilkan air hangat. Hipotesis yang diuji adalah coran semen yang dilapisi cat hitam akan menghasilkan ΔT, tegangan, arus, dan daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan coran polos, sejalan dengan teori absorptivitas permukaan yang menyatakan permukaan gelap menyerap radiasi termal lebih besar daripada permukaan terang. Sistematika artikel ini disusun sebagai berikut: Bagian 2 menjelaskan metode eksperimen, Bagian 3 menyajikan hasil pengujian sekaligus pembahasannya, dan Bagian 4 memuat simpulan penelitian.

2. METODE

Penelitian dilaksanakan secara eksperimental di area terbuka lingkungan bengkel mekanik Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, pada bulan Mei 2026, memanfaatkan radiasi matahari langsung sebagai sumber panas tanpa simulator surya. Pengujian dilakukan pada pukul 12.30 s.d 13.30 waktu setempat dengan pengambilan data setiap 10 menit, menghasilkan tujuh titik data per variasi perlakuan.

Rancangan eksperimen bersifat komparatif dua kelompok, yaitu coran semen polos dan coran semen yang dilapisi cat hitam, masing-masing bermassa 3 kg dan berukuran identik. Pada tiap coran dipasang lima modul thermoelectric generator (TEG) SP1848-27145 yang dirangkai secara paralel untuk meningkatkan arus keluaran total. Sisi panas modul ditempelkan pada permukaan coran menggunakan thermal paste, sedangkan sisi dingin dipasangi heatsink

aluminium yang dicelupkan ke dalam wadah berisi air bermassa 10 kg sebagai media pendingin sekaligus objek pemanasan air. Temperatur sisi panas dan sisi dingin diukur menggunakan thermogun inframerah, intensitas cahaya diukur menggunakan lux meter, sedangkan tegangan dan arus keluaran diukur menggunakan multimeter DC.

Variabel bebas penelitian adalah jenis permukaan coran, yaitu coran semen polos dan coran semen yang dilapisi cat hitam. Variabel terikat meliputi tegangan, arus, daya, dan ΔT. Variabel kontrol meliputi jumlah dan jenis modul TEG, massa coran, massa air, waktu pengambilan data, serta posisi pengujian terhadap arah datang sinar matahari.

Landasan teori utama yang mendasari pengukuran adalah efek Seebeck, yaitu timbulnya tegangan listrik akibat perbedaan temperatur pada material semikonduktor, yang dinyatakan pada Pers. (1) [4]:

$$V = S \cdot \Delta T \tag{1}$$

dengan V adalah tegangan yang dihasilkan (V), S adalah koefisien Seebeck material (V/°C), dan ΔT adalah perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin (°C). Perbedaan temperatur dihitung menggunakan Pers. (2):

$$\Delta T = T_h - T_c \tag{2}$$

dengan T_h dan T_c berturut-turut adalah temperatur sisi panas dan sisi dingin (°C). Daya listrik keluaran dihitung menggunakan Pers. (3):

$$P = V \times I \tag{3}$$

dengan P adalah daya listrik keluaran (W), V adalah tegangan (V), dan I adalah arus (A).

Kalor yang diserap coran semen dihitung menggunakan pendekatan kalor sensibel dengan Pers. (4):

$$Q = m \times c \times \Delta T \tag{4}$$

Dengan m adalah massa coran (3 kg), c adalah kalor jenis semen (880 J/kg°C), dan ΔT adalah perubahan temperatur coran (°C).

Daya radiasi matahari sesaat yang diterima permukaan coran diestimasi berdasarkan pembacaan lux meter yang dikonversi ke satuan W/m², kemudian dikalikan dengan luas permukaan coran (A = 0,06237 m²), sebagaimana dinyatakan pada Pers. (5):

$$\dot{Q}_rad = I_rad \times A \tag{5}$$

dengan Q̇_rad adalah daya radiasi matahari yang diterima permukaan coran (W), I_rad adalah irradiansi matahari hasil estimasi (W/m²), dan A adalah luas permukaan coran (m²).

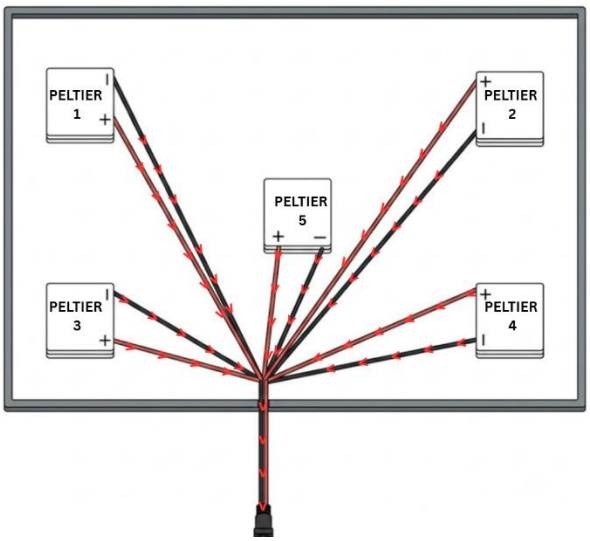
Intensitas cahaya matahari yang terukur menggunakan lux meter selama pengujian berada pada kisaran 765–940 lux. Nilai tersebut dikonversi menjadi irradiansi menggunakan faktor konversi 0,01 W/m² per lux, sehingga diperoleh estimasi irradiansi sebesar 7,65–9,40 W/m². Dengan demikian, nilai I_rad yang digunakan dalam Pers. (5) dan perhitungan efisiensi pada Pers. (6) berasal dari hasil konversi pembacaan lux meter tersebut. Efisiensi konversi TEG terhadap radiasi matahari yang diterima dihitung menggunakan Pers. (6):

$$\eta = (P / \dot{Q}_rad) \times 100\% \quad (6)$$

dengan η adalah efisiensi konversi (%), P adalah daya listrik keluaran TEG (W), dan Q̇_rad adalah daya radiasi matahari yang diterima permukaan coran (W). Persamaan (6) merepresentasikan efisiensi konversi energi listrik secara sesaat terhadap daya radiasi matahari yang tersedia pada permukaan penyerap, berbeda dari rasio kalor yang ditransfer ke air terhadap radiasi yang melibatkan akumulasi kalor sensibel pada coran dan media air.

Perlu ditegaskan bahwa konversi lux ke W/m² dalam penelitian ini merupakan pendekatan estimasi karena lux meter mengukur iluminansi berdasarkan respons fotopik, sedangkan irradiansi merupakan besaran daya radiasi per satuan luas. Oleh karena itu, nilai irradiansi dan efisiensi yang diperoleh, termasuk nilai efisiensi sebesar 2,20% dan 0,78%, bersifat indikatif. Penggunaan pyranometer terkalibrasi pada penelitian selanjutnya diperlukan untuk memperoleh pengukuran irradiansi matahari secara langsung dan meningkatkan akurasi perhitungan efisiensi.

Untuk mengevaluasi kekuatan hubungan antara ΔT dan keluaran listrik, dilakukan regresi linier sederhana dengan koefisien determinasi (R^2) sebagai ukuran kesesuaian model terhadap data eksperimen. Pengujian dilakukan dalam satu sesi tanpa replikasi (n = 1), sehingga belum tersedia ukuran variabilitas statistik antarulangan. Keterbatasan tersebut perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil penelitian dan dibahas lebih lanjut pada Bagian 3.
Skema dan konfigurasi fisik alat uji yang menunjukkan posisi modul TEG, heatsink, wadah air, serta titik pengukuran temperatur ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema dan konfigurasi alat uji TEG

3. PEMBAHASAN

A. Karakteristik Temperatur dan Mekanisme Penyerapan Panas

Data hasil pengujian pada kedua variasi coran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Coran Cat Hitam dan Coran Polos

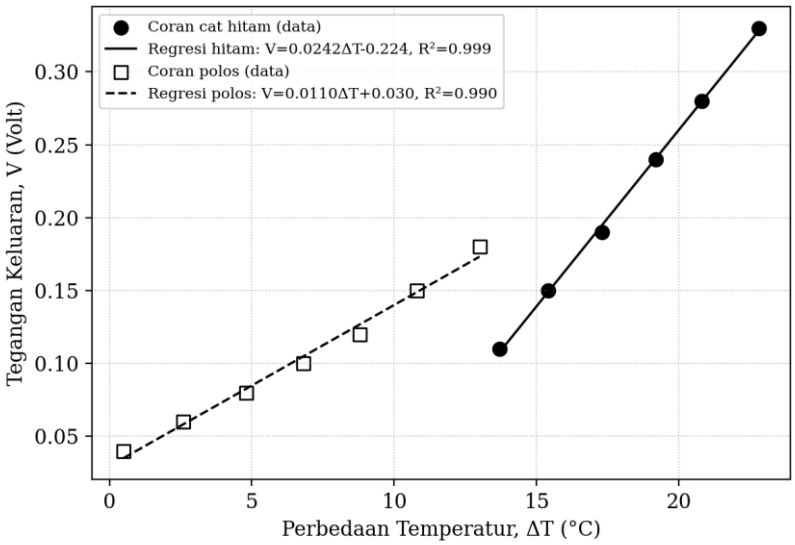
Waktu (menit)	Th hitam (°C)	Tc hitam (°C)	ΔT hitam (°C)	V hitam (V)	I hitam (A)	Th polos (°C)	Tc polos (°C)	ΔT polos (°C)	V polos (V)	I polos (A)
0	35,5	35,5	0	0	0	34,6	34,1	0,5	0,04	0,006
10	47,5	33,8	13,7	0,11	0,0106	36,8	34,2	2,6	0,06	0,008
20	49,6	34,2	15,4	0,15	0,0142	39,2	34,4	4,8	0,08	0,009
30	51,8	34,5	17,3	0,19	0,0188	41,5	34,7	6,8	0,1	0,011
40	54,1	34,9	19,2	0,24	0,0234	43,8	35	8,8	0,12	0,014
50	56	35,2	20,8	0,28	0,0279	46,1	35,3	10,8	0,15	0,017
60	58,4	35,6	22,8	0,33	0,0326	48,6	35,6	13	0,18	0,021

Temperatur sisi panas pada coran cat hitam meningkat dari 35,5°C menjadi 58,4°C, sedangkan coran polos hanya meningkat dari 34,6°C menjadi 48,6°C, menghasilkan ΔT akhir masing-masing 22,8°C dan 13,0°C — selisih hampir dua kali lipat. Perbedaan ini terjadi karena nilai absorptivitas radiasi (α) permukaan berwarna hitam jauh lebih tinggi dibandingkan permukaan semen alami yang berwarna abu-abu terang. Semen tanpa pelapisan memantulkan sebagian signifikan radiasi gelombang pendek yang diterimanya, sedangkan cat hitam menyerap hampir seluruh spektrum cahaya tampak dan mengonversinya menjadi energi panas pada permukaan [13]. Mekanisme ini konsisten dengan prinsip radiasi benda hitam, di mana permukaan dengan absorptivitas dan emisivitas tinggi — sebagaimana ditunjukkan pada studi pelapisan carbon black pada sisi panas TEG yang melaporkan absorptivitas hingga 0,98 dengan emisivitas termal serendah 0,073 [9] — secara signifikan meningkatkan fluks panas neto yang tertahan pada permukaan penyerap dibandingkan permukaan tanpa perlakuan.

Menariknya, laju kenaikan temperatur pada kedua variasi tidak konstan sepanjang waktu pengujian: pada coran hitam, kenaikan temperatur paling tajam justru terjadi pada sepuluh menit pertama (dari 35,5°C menjadi 47,5°C, atau 12°C dalam 600 detik), lalu melandai pada interval-interval berikutnya (rata-rata sekitar 1,8°C per 10 menit). Pola ini sejalan dengan karakteristik pemanasan benda bermassa termal dengan kapasitas kalor terbatas: pada awal pemanasan, selisih temperatur antara permukaan coran dan udara sekitar masih kecil sehingga kerugian kalor konvektif ke lingkungan rendah dan hampir seluruh energi radiasi yang diserap digunakan untuk menaikkan temperatur coran; seiring meningkatnya temperatur permukaan, kerugian konvektif dan reradiasi inframerah ke lingkungan turut membesar sehingga laju kenaikan neto melambat menuju kondisi mendekati kesetimbangan termal. Coran polos tidak menunjukkan pola serupa karena penyerapan panasnya jauh lebih rendah sehingga belum mendekati titik kesetimbangan dalam rentang waktu pengujian.

B. Pengaruh ΔT terhadap Tegangan dan Arus Keluaran

Sesuai Pers. (1), tegangan keluaran modul TEG meningkat secara proporsional terhadap ΔT melalui koefisien Seebeck material semikonduktor. Gambar 2 menyajikan hubungan ΔT terhadap tegangan pada kedua variasi coran beserta hasil regresi liniernya.



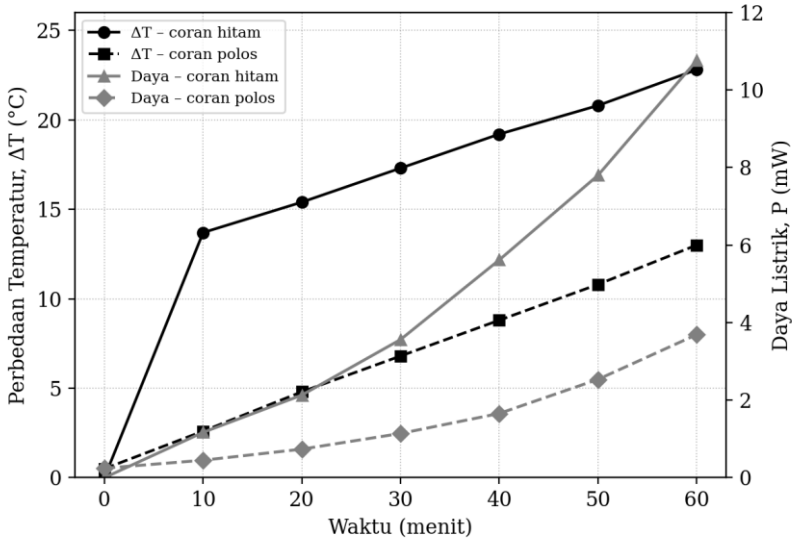
Gambar 2. Hubungan ΔT terhadap Tegangan Keluaran

Regresi linier menghasilkan nilai R^2 = 0,901 pada coran cat hitam dan R^2 = 0,990 pada coran polos untuk hubungan ΔT–tegangan, yang menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat antara beda temperatur dan tegangan pada kedua variasi coran. Tegangan tertinggi coran hitam sebesar 0,33 V dan arus 32,60 mA diperoleh pada ΔT = 22,8°C, sedangkan coran polos menghasilkan tegangan sebesar 0,18 V dan arus 20,50 mA pada ΔT = 13,0°C. Nilai tegangan ini lebih rendah dibandingkan hasil Kindie dkk. yang melaporkan 4,226 V pada ΔT 43,16°C menggunakan atap logam hitam dan empat modul TEC1-12706 [12]. Kesenjangan tersebut secara proporsional lebih besar daripada yang dapat dijelaskan semata oleh perbedaan ΔT (rasio ΔT sekitar 1,9 kali, sedangkan rasio tegangan mencapai lebih dari 12 kali), yang mengindikasikan adanya faktor lain yang turut berperan. Pelat logam pada penelitian Kindie dkk. memiliki konduktivitas termal lebih tinggi dan kontak termal yang lebih rapat dengan modul dibandingkan permukaan coran semen yang berpori dan bertekstur kasar, sehingga sebagian energi panas pada penelitian ini kemungkinan hilang pada antarmuka coran–modul sebelum sepenuhnya mencapai sisi panas material semikonduktor. Perbedaan spesifikasi modul (TEC1-12706 versus SP1848-27145) turut berkontribusi terhadap perbedaan koefisien Seebeck efektif kedua sistem.

Arus keluaran turut meningkat seiring peningkatan ΔT, dengan nilai R^2 = 0,893 pada coran cat hitam dan R^2 = 0,974 pada coran polos. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara ΔT dan arus juga bersifat linier, meskipun tingkat kesesuaiannya berbeda antara kedua variasi coran. Penyimpangan dari kelinieran sempurna dapat dipengaruhi oleh distribusi panas antarmodul yang tidak seragam. Ketika sebagian modul menerima intensitas radiasi yang berbeda akibat perbedaan posisi atau bayangan parsial, kontribusi arus masing-masing modul terhadap total rangkaian dapat berubah. Hal tersebut dapat menyebabkan variasi arus keluaran pada rangkaian paralel TEG, sedangkan tegangan keluaran cenderung mengikuti karakteristik tegangan modul yang terhubung secara paralel. Perilaku ini konsisten dengan karakteristik rangkaian paralel TEG yang dilaporkan pada literatur [4].

C. Daya Listrik dan Efisiensi Konversi Termoelektrik

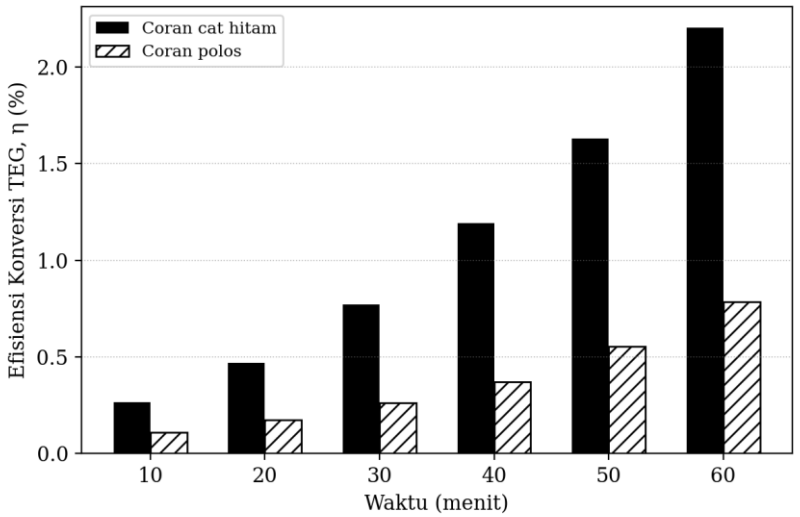
Perkembangan ΔT dan daya listrik terhadap waktu pengujian disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perkembangan ΔT dan Daya Listrik terhadap Waktu Pengujian

Daya listrik meningkat mengikuti pola ΔT pada kedua variasi, dengan daya maksimum coran hitam (10,76 mW) mencapai hampir tiga kali daya maksimum coran polos (3,69 mW). Peningkatan rasio daya ini lebih besar dibandingkan rasio peningkatan tegangan (1,83 kali) maupun arus (1,59 kali) secara individual karena daya merupakan hasil kali keduanya (Pers. 3), sehingga keuntungan dari pelapisan cat hitam terakumulasi secara multiplikatif pada keluaran daya akhir — sebuah efek yang secara implisit memperkuat argumen bahwa perbaikan pada sisi penyerap panas memberi pengungkit (leverage) yang lebih besar terhadap daya keluaran TEG dibandingkan yang tampak dari perbandingan ΔT semata.

Efisiensi konversi TEG terhadap radiasi matahari yang diterima, dihitung menggunakan Pers. (6), disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Efisiensi Konversi Termoelektrik terhadap Waktu Pengujian

Efisiensi konversi meningkat dari mendekati nol pada menit ke-10 hingga mencapai 2,20% pada coran hitam dan 0,78% pada coran polos di akhir pengujian. Nilai ini sejalan dengan rentang efisiensi solar thermoelectric generator (STEG) tanpa konsentrator optik yang dilaporkan pada penelitian-penelitian terbaru: studi metal oxide layer absorber melaporkan efisiensi 0,96–1,75% pada iradiansi setara satu matahari [11], sementara studi lain melaporkan

peningkatan daya lebih dari 25% pada iradiansi sekitar satu matahari menggunakan absorbent layer beremisivitas rendah [10]. Posisi efisiensi penelitian ini — khususnya pada coran cat hitam — berada pada kisaran wajar meskipun menggunakan cat hitam konvensional yang jauh lebih sederhana dan murah dibandingkan selective absorber berlapis oksida logam atau nitrida logam campuran yang dipakai pada studi-studi pembanding tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa untuk aplikasi berbiaya rendah, selisih efisiensi antara pelapis sederhana dan absorber canggih tidak selalu proporsional dengan selisih biaya dan kompleksitas fabrikasinya, sehingga cat hitam tetap menjadi pilihan yang rasional secara ekonomis untuk skala aplikasi kecil dan edukatif.

Rendahnya efisiensi absolut pada kedua variasi — dibandingkan potensi teoretis material bismuth telluride yang dapat mencapai efisiensi lebih tinggi pada ΔT besar — pada dasarnya adalah konsekuensi dari rendahnya ΔT yang dapat dicapai sistem berpendingin pasif (heatsink tercelup air tanpa sirkulasi paksa) dibandingkan sistem dengan pendinginan aktif atau dengan konsentrator optik yang mampu mendorong ΔT jauh lebih tinggi pada beberapa studi simulasi [9]. Nilai figure of merit (ZT) modul komersial seperti SP1848-27145 juga tidak dioptimalkan untuk operasi pada ΔT rendah (di bawah 25°C) sebagaimana kondisi pada penelitian ini, sehingga efisiensi konversi aktual jauh di bawah efisiensi Carnot maupun efisiensi termoelektrik ideal pada ΔT tersebut [14].

D. Perbandingan Rekapitulatif dan Pemanfaatan Panas Buang

Rekapitulasi seluruh parameter pada ΔT maksimum kedua variasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Performa pada ΔT Maksimum (Menit ke-60)

Parameter	Coran Hitam	Coran Polos	Rasio (Hitam/Polos)
ΔT (°C)	22,8	13,0	1,75
Tegangan (V)	0,33	0,18	1,83
Arus (mA)	32,60	20,50	1,59
Daya (mW)	10,76	3,69	2,92
Kalor terserap coran (J)	60.192	34.320	1,75
Efisiensi konversi (%)	2,20	0,78	2,82

Selain menghasilkan listrik, sistem pendinginan heatsink-air pada sisi dingin modul turut memanfaatkan panas buang untuk menaikkan temperatur air. Pada akhir pengujian, temperatur air pada sistem coran hitam meningkat 0,6°C (dari 35,5°C menjadi 36,2°C), dua kali lebih besar dibandingkan sistem coran polos yang meningkat 0,3°C. Peningkatan penyerapan panas pada sisi panas modul secara langsung membesarkan jumlah panas yang harus dibuang melalui sisi dingin agar ΔT dapat dipertahankan, sehingga sistem coran hitam menghasilkan pemanasan air yang lebih signifikan konsisten dengan prinsip kekekalan energi pada siklus perpindahan panas TEG. Skema pemanfaatan ganda ini sejalan dengan konsep solar thermoelectric cogenerator yang telah dikembangkan pada skala lebih besar menggunakan modul termoelektrik silindris, dengan efisiensi termoelektrik 1,2–1,8% dan efisiensi pemanasan air 59–61% pada ΔT besar [17] menunjukkan bahwa proporsi keluaran termal umumnya jauh lebih besar dibandingkan keluaran listrik pada sistem TEG surya, sebagaimana juga tercermin pada penelitian ini meski dalam skala yang jauh lebih kecil. Pada skala penelitian ini, kenaikan temperatur air masih relatif kecil karena volume air (10 kg) jauh lebih besar dibandingkan kapasitas kalor yang mampu dipindahkan lima modul TEG dalam 60 menit; penggunaan volume air lebih kecil atau durasi pemanasan lebih panjang berpotensi menghasilkan kenaikan temperatur yang lebih signifikan secara praktis.

E. Implikasi terhadap Pengembangan Thermoelectric Generator dan Energi Terbarukan

Temuan penelitian ini memiliki beberapa implikasi bagi pengembangan TEG berbasis energi surya. Pertama, hasil ini menegaskan bahwa perbaikan pada sisi penyerap panas eksternal bahkan dengan intervensi sederhana seperti pelapisan cat hitam pada material sipil murah memberi pengaruh yang signifikan terhadap keluaran daya TEG tanpa memerlukan penggantian modul maupun investasi pada teknologi absorber canggih. Ini relevan khususnya untuk konteks pendidikan vokasi dan pengembangan energi mandiri skala rumah tangga di wilayah dengan keterbatasan anggaran, di mana solusi berbiaya rendah dan mudah direplikasi lebih realistis diadopsi dibandingkan teknologi selective absorber atau cement-based thermoelectric generator berdoping karbon yang memerlukan fasilitas fabrikasi khusus [5]–[8].

Kedua, posisi coran semen sebagai media penyerap panas pasif berbeda dari pendekatan yang menjadikan semen sebagai elemen termoelektrik aktif dengan kontrol struktural dan material yang ketat [15] membuka kemungkinan pengembangan hibrida, misalnya menggabungkan sifat kapasitas termal (thermal mass) coran semen konvensional dengan modul TEG komersial pada aplikasi bangunan sederhana, tanpa memerlukan kompleksitas proses doping material semen. Ketiga, hasil pemanfaatan panas buang untuk pemanasan air, meski masih terbatas pada skala penelitian ini, mengindikasikan potensi pengembangan sistem kogenerasi listrik-termal skala kecil yang relevan untuk kebutuhan air hangat rumah tangga di daerah tropis, sejalan dengan prinsip yang telah didemonstrasikan pada skala lebih besar oleh sistem termoelektrik-kogenerasi [17].

Keempat, dari perspektif pengembangan energi terbarukan secara lebih luas, penelitian ini menggarisbawahi bahwa besarnya kesenjangan antara potensi energi surya nasional dan pemanfaatannya [3] tidak semata memerlukan solusi berskala besar seperti PLTS ground-mounted, tetapi juga dapat diisi melalui teknologi skala kecil dan terdesentralisasi seperti TEG surya berbiaya rendah, yang berperan sebagai pelengkap bagi sistem energi terbarukan yang lebih besar dalam mendukung transisi ke ekonomi rendah karbon [16], khususnya pada aplikasi daya rendah seperti pengisian baterai kecil, sensor mandiri energi, atau demonstrasi edukasi energi terbarukan.

F. Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan perlu dikemukakan secara terbuka. Pengujian dilakukan dalam satu sesi tanpa replikasi ($n = 1$), sehingga belum tersedia ukuran variabilitas maupun uji signifikansi statistik formal untuk memperkuat klaim perbedaan performa antar-variasi, meskipun kekuatan hubungan regresi yang tinggi ($R^2 > 0{,}89$ pada seluruh model) memberikan indikasi konsistensi internal data. Intensitas radiasi matahari diestimasi dari pembacaan lux meter dan dikonversi menggunakan faktor pendekatan, bukan hasil pengukuran langsung menggunakan pyranometer terkalibrasi, sehingga nilai efisiensi yang dilaporkan bersifat indikatif. Durasi pengujian yang singkat (60 menit, satu hari) turut membatasi generalisasi hasil terhadap variasi cuaca dan musim. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan pyranometer terkalibrasi, replikasi pengujian minimal tiga kali per variasi, serta pengujian pada kondisi cuaca dan musim yang berbeda untuk memperkuat validitas eksternal temuan ini.

4. SIMPULAN

Pelapisan cat hitam pada coran semen terbukti secara konsisten meningkatkan kemampuan penyerapan radiasi matahari dibandingkan coran polos, tercermin dari peningkatan ΔT, kalor terserap, dan seluruh parameter keluaran listrik dengan rasio sekitar 1,59–2,92 kali. Nilai ΔT, tegangan, arus, dan daya tertinggi pada coran cat hitam masing-masing mencapai 22,8°C, 0,33 V, 32,60 mA, dan 10,76 mW, jauh melampaui coran polos. Analisis regresi mengonfirmasi hubungan ΔT–tegangan yang sangat kuat pada kedua variasi ($R^2 = 0{,}999$ dan 0,990), sesuai prinsip efek Seebeck, sedangkan hubungan ΔT arus relatif lebih lemah akibat sensitivitas

rangkaian paralel terhadap distribusi panas antarmodul yang tidak seragam. Efisiensi konversi termoelektrik terhadap radiasi matahari yang diterima mencapai 2,20% pada coran hitam dan 0,78% pada coran polos, sebanding dengan rentang efisiensi STEG tanpa konsentrator pada literatur terbaru meskipun menggunakan pelapis konvensional yang jauh lebih murah dibandingkan selective absorber. Sistem pendinginan heatsink-air turut memanfaatkan panas buang untuk menaikkan temperatur air hingga 0,6°C, menunjukkan potensi pengembangan skema kogenerasi listrik-termal sederhana. Secara umum, penelitian ini menegaskan bahwa material sipil murah dan mudah difabrikasi seperti coran semen, ketika dikombinasikan dengan intervensi permukaan sederhana berupa pelapisan warna gelap, merupakan alternatif yang layak dipertimbangkan bagi pengembangan TEG surya berbiaya rendah untuk aplikasi energi terbarukan skala kecil, meskipun keluaran listrik absolutnya masih memerlukan optimasi lebih lanjut pada aspek kontak termal, jumlah modul, dan sistem pendinginan aktif pada penelitian mendatang.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Caritra, "Bauran Energi Terbarukan Indonesia: Masih Jauh dari Target 2025," Caritra, 2025. [Daring]. Tersedia: https://www.caritra.org/2025/09/23/bauran-energi-terbarukan-indonesia-masih-jauh-dari-target-2025/. Diakses: 3 Agt. 2026.

[2] S. Sansuadi et al., Statistik Ketenagalistrikan PLN 2022, vol. 36. Jakarta: PT PLN (Persero), 2022, pp. 1–114.

[3] KNIC, "Perkembangan Panel Surya di Indonesia pada 2024," KNIC, 2024. [Daring]. Tersedia: https://knic.co.id/id/perkembangan-panel-surya-di-indonesia-pada-2024. Diakses: 2 Agt. 2026.

[4] D. M. Rowe, Ed., Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.

[5] Z. Gu, S. He, X. Li, P. Sun, J. H. Wu, and Q. Zhang, "Structural study of the thermoelectric work units encapsulated with cement paste for building energy harvesting," Materials, vol. 17, no. 4, p. 926, 2024.

[6] J. Wei, Y. Zhou, Y. Wang, Z. Miao, Y. Guo, H. Zhang, X. Li, Z. Wang, and Z. Shi, "A large-sized thermoelectric module composed of cement-based composite blocks for pavement energy harvesting and surface temperature reducing," Energy, vol. 265, p. 126398, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126398.

[7] W. Li, C. Du, L. Liang, and G. Chen, "Cement-based thermoelectric materials, devices and applications," Nano-Micro Letters, vol. 18, p. 29, 2026, doi: 10.1007/s40820-025-01866-2.

[8] M. Barzegar, G. Goracci, P. Martauz, and J. S. Dolado, "A chessboard-like photothermoelectric cement cell: a new design for scalable and high efficiency solar energy conversion," Materials Horizons, vol. 12, pp. 10760–10769, 2025, doi: 10.1039/D5MH01248A.

[9] J. Faraj, G. El Achkar, M. Hammoud, R. Taher, S. Ali, M. Julian, C. Salame, and M. Khaled, "Boosting thermoelectric power generation with black body coatings and oil thermal storage tank," Unconventional Resources, vol. 8, p. 100237, 2025, doi: 10.1016/j.uncres.2025.100237.

[10] D. T. Cotfas, A. Enesca, and P. A. Cotfas, "Enhancing the performance of the solar thermoelectric generator in unconcentrated and concentrated light," Renewable Energy, vol. 221, p. 119831, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119831.

[11] A. Rjafallah, D. T. Cotfas, and P. A. Cotfas, "Enhancing solar thermoelectric generator performance using metal oxide layer absorbers under concentrated solar radiation," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 67, p. 105808, 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.105808.

[12] F. G. Kindie and G. Kidanemariam, "Development and evaluation of a thermoelectric generator from sun-heated metallic rooftop for rural areas," International Journal of Photoenergy, vol. 2026, p. 9946168, 2026.

[13] J. P. Holman, Heat Transfer, 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

[14] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 9th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.

[15] Y. Luo and H. Liu, "Thermoelectric power generation in concrete: A study on influential material and structural factors," Energy and Buildings, vol. 328, p. 115159, 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.115159.

[16] M. R. A. Bhuiyan, H. Mamur, Ö. F. Dilmaç, and M. A. Üstüner, "Opportunities for thermoelectric generators in supporting a low carbon economy," Nanomaterials and Energy, vol. 11, no. 1–2, pp. 8–26, 2023, doi: 10.1680/jnaen.22.00033.
[17] H. Hazama, Y. Masuoka, A. Suzumura, M. Matsubara, S. Tajima, and R. Asahi, "Cylindrical thermoelectric generator with water heating system for high solar energy conversion efficiency," Applied Energy, vol. 226, pp. 381–388, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.015.

Daftar Simbol

Simbol		Keterangan
V	=	Tegangan listrik, Volt
S	=	Koefisien Seebeck, V/°C
I	=	Arus listrik, Ampere
P	=	Daya listrik, Watt
T_h	=	Temperatur sisi panas, °C
T_c	=	Temperatur sisi dingin, °C
ΔT	=	Perbedaan temperatur, °C
Q	=	Kalor, Joule
m	=	Massa, kg
c	=	Kalor jenis, J/kg°C
η	=	Efisiensi konversi, %
A	=	Luas permukaan, m²