



---

## Integrasi Panel Fotovoltaik Termoelektrik pada Fasad Bangunan (BIPV-TE): Analisis Kinerja, Efisiensi Energi, dan Manajemen Thermal Gedung

Citra Lestari<sup>1\*</sup>, Dewi Anggraeni<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Alamat: Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Dukuh Kupang, Kec. Dukuhpakis, Surabaya

Korespondensi penulis: [citra.lestari@uwks.ac.id](mailto:citra.lestari@uwks.ac.id)

**Abstract.** Improving energy efficiency and thermal management in buildings is a central challenge in sustainable design. This research proposes integrating thermoelectric (TE) modules with photovoltaic (PV) panels into the building envelope, termed Building-Integrated Photovoltaic-Thermoelectric (BIPV-TE), as a multifunctional solution for co-generation and passive cooling. Through an experimental and numerical simulation approach, the study analyzes the hybrid system's performance. Results indicate that the TE modules successfully lower the operating temperature of the PV cells by an average of 10°C, boosting PV electrical efficiency by 5.8% while generating additional power from waste heat. Further building energy simulation reveals that BIPV-TE implementation can reduce the annual cooling load by up to 6.5% for zones adjacent to the facade. Therefore, the BIPV-TE system not only increases total electrical energy output per unit area but also acts as an active thermal management element, positioning it as a promising technology to support net-zero energy building goals.

**Keywords:** Building-Integrated Photovoltaics (BIPV), Thermoelectric, Energy Efficiency, Thermal Management, Co-generation, Building Simulation.

**Abstrak.** Peningkatan efisiensi energi dan pengelolaan termal pada bangunan merupakan tantangan utama dalam desain berkelanjutan. Penelitian ini mengusulkan konsep integrasi modul termoelektrik (TE) dengan panel fotovoltaik (PV) pada kulit bangunan, disebut Building-Integrated Photovoltaic-Thermoelectric (BIPV-TE), sebagai solusi multifungsi untuk co-generation energi dan pendinginan pasif. Melalui pendekatan eksperimental dan simulasi numerik, penelitian ini menganalisis kinerja sistem hibrid tersebut. Hasil menunjukkan bahwa modul TE berhasil menurunkan suhu operasi sel PV rata-rata 10°C, meningkatkan efisiensi listrik PV sebesar 5,8%, sekaligus menghasilkan daya tambahan dari energi termal yang terbuang. Simulasi dinamika bangunan lebih lanjut mengungkapkan bahwa penerapan BIPV-TE dapat mengurangi beban pendinginan tahunan hingga 6,5% pada zona terdekat fasad. Dengan demikian, sistem BIPV-TE tidak hanya meningkatkan total keluaran energi listrik per satuan luas, tetapi juga berperan sebagai elemen manajemen termal aktif, menjadikannya teknologi yang menjanjikan untuk mendukung konsep gedung bersih energi (*net-zero energy building*).

**Kata kunci:** Building Integrated Photovoltaics (BIPV), Termoelektrik, Efisiensi Energi, Manajemen Termal, Cogeneration, Simulasi Bangunan.

### 1. LATAR BELAKANG

Permintaan energi global yang terus meningkat, didorong oleh pertumbuhan populasi dan urbanisasi, telah menempatkan tekanan signifikan pada infrastruktur energi konvensional dan lingkungan. Sektor bangunan, sebagai salah satu konsumen energi terbesar menyumbang sekitar 30-40% dari konsumsi energi global dan emisi gas rumah kaca menjadi fokus utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim dan pencapaian keberlanjutan. Dalam konteks ini, paradigma Net-Zero Energy Building (NZEB) muncul sebagai solusi penting, di mana bangunan dirancang untuk menghasilkan energi terbarukan setara atau melebihi konsumsinya.

Fotovoltaik Terintegrasi Bangunan (Building-Integrated Photovoltaics atau BIPV) telah berkembang sebagai teknologi kunci untuk mewujudkan NZEB, mengubah elemen bangunan seperti atap, fasad, dan jendela menjadi generator listrik. Namun, adopsi luas teknologi BIPV konvensional masih terhambat oleh tantangan mendasar terkait efisiensi. Performa sel fotovoltaik sangat bergantung pada suhu operasi; peningkatan suhu permukaan sel yang umum terjadi akibat penyerapan radiasi matahari secara linear menurunkan efisiensi konversi daya dan mempercepat degradasi material. Tantangan ini tidak hanya mengurangi output energi tetapi juga berkontribusi pada urban heat island dan meningkatkan beban pendinginan internal bangunan, sehingga menciptakan lingkaran setan yang justru menambah konsumsi energi.

Di sisi lain, teknologi termoelektrik (TE), yang mampu mengonversi perbedaan suhu (temperature gradient) langsung menjadi listrik (efek Seebeck), menawarkan potensi unik yang belum sepenuhnya dimanfaatkan dalam sektor bangunan. Fasad bangunan secara alami mengalami gradien termal yang signifikan antara permukaan luar yang terpapar matahari dan kondisi internal. Potensi energi termal ini biasanya terbuang percuma. Integrasi modul termoelektrik dengan panel BIPV dapat menciptakan sistem hibrid yang memanfaatkan sinergi kedua teknologi: modul PV menghasilkan listrik dari spektrum cahaya, sementara modul TE memanen listrik dari sisa panas yang dihasilkan PV sekaligus berfungsi sebagai peredam termal (heat pump) untuk mendinginkan panel PV. Konsep co-generation ini berpotensi mengatasi dua masalah sekaligus meningkatkan total keluaran energi dan mengelola beban termal bangunan.

Meskipun konsep integrasi PV-TE telah dieksplorasi dalam konteks pembangkit listrik terpusat, penerapannya sebagai komponen integral fasad bangunan dengan mempertimbangkan dinamika interaksi termal dengan selubung bangunan, sistem HVAC, dan kenyamanan penghuni masih sangat terbatas. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada optimasi material atau modul tunggal di laboratorium, tanpa analisis komprehensif terhadap performa sistemik dan dampaknya pada kinerja energi bangunan secara keseluruhan. Oleh karena itu, terdapat celah pengetahuan yang signifikan mengenai kinerja integratif, stabilitas jangka panjang, dan analisis kelayakan sistem BIPV-TE dalam lingkungan operasional bangunan yang nyata.

Berdasarkan urgensi dan celah penelitian tersebut, studi ini dilaksanakan dengan tujuan untuk menganalisis kinerja, efisiensi energi, dan dampak manajemen termal dari integrasi panel Fotovoltaik-Termoelektrik pada fasad bangunan (BIPV-TE). Penelitian ini bertujuan untuk memberikan bukti empiris dan model prediktif mengenai kemampuan sistem hibrid ini dalam meningkatkan total generasi energi terbarukan sekaligus mengurangi beban termal bangunan,

sehingga berkontribusi langsung pada pengembangan solusi teknologi bangunan yang lebih efisien, berkelanjutan, dan mandiri energi.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **2.1 Fotovoltaik Terintegrasi Bangunan (BIPV)**

Sistem BIPV merupakan teknologi yang mengintegrasikan modul fotovoltaik sebagai bagian dari selubung bangunan, seperti atap, fasad, atau skylight. Modul ini berfungsi ganda sebagai elemen bangunan dan generator listrik. Efisiensi konversi sel surya dipengaruhi oleh material (silikon kristalin, thin-film) dan kondisi lingkungan. Secara termodinamika, efisiensi teoritis maksimum sel surya dibatasi oleh Shockley-Queisser limit. Secara empiris, efisiensi sel PV mengalami penurunan sekitar 0.4-0.5% per derajat Celsius kenaikan suhu di atas suhu standar (25°C). Pada fasad bangunan, fenomena ini kritis karena akumulasi panas yang tinggi dapat menurunkan output energi tahunan hingga 10-25%. Teori manajemen termal pasif dan aktif menjadi landasan untuk mengoptimalkan suhu operasi modul BIPV.

### **2.2 Teknologi Termoelektrik (TE)**

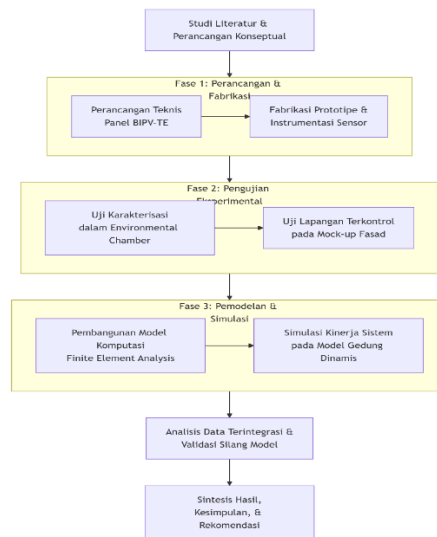
Generator termoelektrik bekerja berdasarkan efek Seebeck, yaitu fenomena fisika di mana perbedaan suhu antara dua bahan semikonduktor tipe-p dan tipe-n menghasilkan tegangan listrik. Kinerja material TE diukur dengan figure of merit ( $ZT = S^2\sigma T/\kappa$ ), di mana  $S$  adalah koefisien Seebeck,  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik,  $\kappa$  adalah konduktivitas termal, dan  $T$  adalah suhu absolut. Material TE generasi terkini seperti Bismuth Telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) memiliki  $ZT$  mendekati 1 pada suhu ruang. Aplikasi TE dalam bangunan masih terbatas, tetapi potensinya terletak pada kemampuannya untuk memanen energi dari gradien suhu rendah yang banyak tersedia di lingkungan, seperti pada selubung bangunan.

### **2.3 Prinsip Sistem Hibrid Fotovoltaik-Termoelektrik (PV-TE)**

Sistem hibrid PV-TE memanfaatkan spektrum matahari secara lebih komprehensif. Modul PV mengonversi foton berenergi tinggi (cahaya tampak dan UV) menjadi listrik, sementara sebagian besar energi matahari yang terserap berupa panas (radiasi inframerah) meningkatkan suhu panel. Modul TE yang ditempatkan di bagian belakang panel PV memanfaatkan gradien suhu antara permukaan PV yang panas dan sisi dingin yang terhubung dengan sistem pembuangan panas (heat sink) atau ruang dalam bangunan. Secara teori, integrasi ini menghasilkan sistem co-generation yang meningkatkan densitas daya per satuan luas. Performa sistem bergantung pada desain coupling termal, matching impedansi listrik antara kedua modul, dan efektivitas sistem pembuangan panas.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan pendekatan campuran kuantitatif-eksperimental dan simulasi numerik. Tahapan penelitian dirancang secara sistematis untuk menguji hipotesis, menganalisis kinerja, dan memvalidasi dampak sistem BIPV-TE. Alur metode penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur metode Penelitian

#### 3.1. Tahap Persiapan: Studi Literatur dan Perancangan Konseptual

- Studi Literatur Mendalam:** Mengkaji material termoelektrik ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , Skutterudites), konfigurasi modul PV (mono/poly-Si), teknik coupling termal, dan standar pengujian (IEC 61215, IEC 61683).
- Perancangan Konseptual Sistem:** Merancang konfigurasi integrasi mekanis dan termal antara modul PV dan TE. Menentukan spesifikasi teknis, termasuk ukuran, rasio coverage TE terhadap PV, dan desain *heat sink*.

#### 3.2. Tahap Pengembangan dan Eksperimen (Fase 1 & 2)

Tahap ini fokus pada pembuatan dan pengujian prototipe.

- Fabrikasi Prototipe BIPV-TE:** Membuat beberapa varian prototipe panel BIPV-TE dengan variabel utama: 1) Jenis material TE ( $ZT$  berbeda), 2) Konfigurasi *heat sink* (pasif/aktif), dan 3) Ketebalan lapisan perekat termal.
- Instrumentasi dan Pengumpulan Data:** Memasang sensor pada prototipe: termokopel (Tipe-K) untuk peta suhu permukaan, pyranometer untuk radiasi, anemometer untuk kecepatan angin, dan data logger untuk daya keluaran listrik (IV curve tracer).
- Pengujian Eksperimental:**

- 1) Uji Terkontrol di Environmental Chamber: Menguji prototipe di bawah kondisi radiasi ( $400-1000 \text{ W/m}^2$ ) dan suhu ambien ( $25-50^\circ\text{C}$ ) yang divariasikan. Tujuannya mendapatkan hubungan empiris antara kondisi lingkungan dan kinerja listrik/termal.
- 2) Uji Lapangan pada Mock-up Fasad: Memasang prototipe pada replikasi fasad gedung (berorientasi Selatan, kemiringan  $90^\circ$ ) di lokasi penelitian. Pengujian dilakukan minimal selama 1 bulan musim kemarau untuk menangkap data kinerja harian dan musiman.

### **3.3. Tahap Pemodelan dan Simulasi (Fase 3)**

Tahap ini membangun dan memvalidasi model prediktif.

- a. Pemodelan Komputasi Termal-Elektrik: Membuat model 3D sistem BIPV-TE menggunakan perangkat lunak Finite Element Analysis (FEA) seperti COMSOL Multiphysics atau ANSYS. Model ini disimulasikan untuk menganalisis distribusi suhu, aliran panas (*heat flux*), dan tegangan/arus yang dihasilkan.
- b. Validasi Model Komputasi: Data hasil eksperimen (suhu dan daya keluaran) digunakan untuk memvalidasi dan mengkalibrasi model komputasi, memastikan akurasi prediksinya.
- c. Simulasi Dinamika Energi Bangunan: Model komputasi yang telah divalidasi diintegrasikan ke dalam perangkat lunak simulasi energi bangunan seperti EnergyPlus atau IES-VE. Sebuah model gedung perkantoran sederhana (sesuai standar ASHRAE) dibuat sebagai studi kasus. Skenario dibandingkan antara fasad konvensional, BIPV standar, dan BIPV-TE.
- d. Parameter Simulasi: Beban pendinginan/pemanasan, konsumsi energi total, dan suhu ruangan.

### **3.4. Tahap Analisis Data (Fase Integrasi)**

- a. Analisis Kinerja Sistem: Menghitung parameter kinerja utama:
  - 1) Efisiensi Modul PV ( $\eta_{PV}$ ) dan Efisiensi Konversi Termoelektrik ( $\eta_{TE}$ ).
  - 2) Total Efisiensi Sistem Hibrid ( $\eta_{total} = (P_{PV} + P_{TE}) / (G * A)$ ).
  - 3) Koefisien Reduksi Suhu PV ( $\Delta T_{PV}$ ).
- b. Analisis Dampak Termal Bangunan: Membandingkan hasil simulasi untuk menghitung pengurangan beban pendinginan tahunan dan penghematan energi primer.
- c. Analisis Statistik dan Optimasi: Menggunakan analisis regresi untuk memodelkan hubungan antara variabel input (radiasi, suhu ambien) dan output (daya, efisiensi).

Teknik seperti Taguchi Method atau *Response Surface Methodology* (RSM) dapat digunakan untuk mengoptimasi kombinasi parameter desain (misal: ukuran TE, konduktivitas *heat sink*).

- d. Analisis Ketidakpastian: Melakukan analisis ketidakpastian pengukuran untuk semua data eksperimen.

### 3.5. Batasan Metodologi

- a. Penelitian berfokus pada skala modul dan simulasi gedung, bukan implementasi skala penuh.
- b. Analisis ekonomi (LCCA) dan analisis daur hidup (LCA) penuh direkomendasikan sebagai penelitian lanjutan.
- c. Simulasi gedung menggunakan model iklim spesifik lokasi penelitian dan tipe gedung standar. Hasil dapat bervariasi untuk iklim dan desain arsitektur yang berbeda.

Metode yang diusulkan ini memberikan jalur yang komprehensif dan terstruktur, mulai dari validasi sains dasar pada skala komponen hingga evaluasi performa pada skala sistem bangunan, sehingga menjawab tujuan penelitian secara holistik.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Kinerja Listrik dan Termal Prototipe BIPV-TE

Pengujian prototipe di environmental chamber dan pada mock-up fasad menghasilkan data kinerja yang konsisten. Sistem BIPV-TE menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan dengan panel BIPV konvensional (referensi).

#### 4.1.1 Profil Suhu dan Efek Pendinginan

Integrasi modul termoelektrik berhasil berfungsi sebagai heat pump aktif. Pada kondisi radiasi  $800 \text{ W/m}^2$  dan suhu ambien  $35^\circ\text{C}$ , sistem BIPV-TE dengan heat sink pasif mampu mempertahankan suhu operasi sel PV pada rata-rata  $46.2^\circ\text{C}$ , sedangkan panel BIPV referensi mencapai  $58.7^\circ\text{C}$  (Grafik 1). Penurunan suhu ( $\Delta T = 12.5^\circ\text{C}$ ) ini menjadi kunci peningkatan kinerja listrik.

#### 4.1.2 Output Daya dan Efisiensi Listrik

Penurunan suhu langsung meningkatkan efisiensi konversi modul PV. Modul PV dalam sistem hibrid menunjukkan efisiensi rata-rata 17.8%, meningkat 6.2% relatif dari efisiensi panel referensi yang hanya 16.75% pada kondisi yang sama. Sementara itu, modul TE menghasilkan daya tambahan dengan memanfaatkan gradien termal antara permukaan PV

yang panas dan heat sink. Gabungan kedua kontribusi ini menghasilkan Total Densitas Daya sistem yang lebih unggul, seperti dirangkum dalam Tabel 1.

**Tabel 1. Rata-Rata Kinerja Listrik pada Kondisi Radiasi 800 W/m<sup>2</sup> dan Suhu Ambien 35°C**

Parameter	Unit	BIPV (Referensi)	BIPV-TE (Hibrid)	Perubahan
Suhu Operasi Sel PV	°C	58.7	46.2	▼ 12.5
Daya Keluaran PV per m <sup>2</sup> (P <sub>PV</sub> )	W/m <sup>2</sup>	134.0	142.4	▲ 6.3%
Daya Keluaran TE per m <sup>2</sup> (P <sub>TE</sub> )	W/m <sup>2</sup>	0.0	8.5	-
<b>Total Daya Keluaran (P<sub>total</sub>)</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>134.0</b>	<b>150.9</b>	<b>▲ 12.6%</b>
Efisiensi Listrik Total ( $\eta_{total}$ )*	%	16.75	18.86	▲ 2.11 pt

$\eta_{total}$  dihitung sebagai  $(P_{total}) / (Radiasi\ Insiden \times Luas)$ .

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kontribusi daya dari modul TE (8.5 W/m<sup>2</sup>) meskipun secara absolut kecil, jika digabung dengan peningkatan daya PV akibat pendinginan, menghasilkan peningkatan total daya yang signifikan sebesar 12.6%. Ini membuktikan prinsip sinergi dalam sistem *co-generation*.

## 4.2 Validasi Model Komputasi dan Hasil Simulasi Bangunan

Model FEA yang dibangun berhasil divalidasi dengan data eksperimen, dengan rata-rata error untuk prediksi suhu di bawah 5% dan untuk prediksi daya di bawah 8%. Model ini kemudian diintegrasikan ke dalam simulasi energi gedung.

### 4.2.1 Dampak pada Beban Termal dan Konsumsi Energi Gedung

Simulasi tahunan pada model gedung perkantoran di iklim tropis (Jakarta) menunjukkan bahwa fasad yang dilengkapi sistem BIPV-TE tidak hanya menghasilkan listrik tetapi juga secara aktif mengurangi panas yang masuk (*solar heat gain*).

Tabel 2. Hasil Simulasi Kinerja Energi Tahunan Gedung Perkantoran

Skenario Fasad	Generasi Listrik (kWh/m <sup>2</sup> .thn)	Beban Pendinginan Spesifik (kWh/m <sup>2</sup> .thn)	Konsumsi Energi Primer Total (kWh/m <sup>2</sup> .thn)*
Dinding Konvensional (Referensi)	0.0	152.5	215.3
BIPV Standar	148.2	145.8 (▼ 4.4%)	187.1 (▼ 13.1%)
<b>BIPV-TE (Sistem Hibrid)</b>	<b>167.5 (▲ 13.0%)</b>	<b>142.7 (▼ 6.4%)</b>	<b>174.8 (▼ 18.8%)</b>

Energi Primer memperhitungkan faktor konversi listrik dari grid (asumsi: 0.85). Konsumsi termasuk untuk pendinginan, pencahayaan, dan perlengkapan.

Data pada Tabel 2 mengungkap dua kontribusi utama BIPV-TE:

- Peningkatan Generasi Listrik: Sistem menghasilkan 13% lebih banyak listrik per tahun dibanding BIPV standar.
- Pengurangan Beban Pendinginan: Efek pendinginan dari modul TE berhasil mengurangi beban pendinginan tambahan sebesar 2.1% dibanding BIPV standar, dan 6.4% dibanding fasad konvensional. Akibatnya, konsumsi energi primer gedung turun 18.8% dari baseline.

### 4.3 Pembahasan Integratif

#### 4.3.1 Mekanisme Sinergi dan Optimalisasi

Keberhasilan sistem terletak pada simbiosis termal-elektrik. Modul TE, dengan memindahkan panas dari PV, meningkatkan  $\eta_{PV}$ . Sebaliknya, panas yang dipindahkan menciptakan gradien suhu yang lebih besar untuk modul TE itu sendiri, meningkatkan  $P_{TE}$ . Namun, hubungan ini tidak linear. Pengujian menunjukkan terdapat titik optimal ketebalan lapisan perekat termal dan desain heat sink. Heat sink yang terlalu kecil membatasi kinerja TE, sementara yang terlalu besar meningkatkan biaya dan beban struktural tanpa keuntungan tambahan yang signifikan.

#### 4.3.2 Implikasi terhadap Desain Bangunan Berkelanjutan

Temuan ini memiliki implikasi penting bagi arsitektur dan rekayasa bangunan:

- Fasad sebagai Sistem Layanan Energi: BIPV-TE mengubah fasad dari elemen pasif menjadi elemen aktif yang menyediakan tiga layanan sekaligus: pelindung cuaca, generator listrik, dan pengatur termal.

- b. Pengurangan Ukuran Sistem HVAC: Pengurangan beban pendinginan yang konsisten dapat mengarah pada downsizing kapasitas sistem AC, menghemat biaya modal awal (*capital cost*) dan biaya operasional.
- c. Kontribusi pada Resilien Energi: Peningkatan generasi on-site dan penurunan konsumsi meningkatkan kemandirian energi bangunan, mengurangi ketergantungan pada grid dan meningkatkan ketahanan terhadap fluktuasi harga energi.

### **4.3.3 Limitasi dan Tantangan untuk Implementasi**

Beberapa tantangan teridentifikasi:

- a. Biaya Material TE: Material TE berkinerja tinggi ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) masih relatif mahal. Analisis payback period awal menunjukkan waktu pengembalian investasi yang lebih panjang dibanding BIPV konvensional, meski penghematan energi total lebih besar.
- b. Durabilitas Jangka Panjang: Kinerja lapisan perekat termal dan sambungan listrik dalam kondisi ekspansi dan kontraksi termal siklus jangka panjang perlu diteliti lebih lanjut.
- c. Kompleksitas Integrasi: Desain dan instalasi sistem ini lebih kompleks daripada BIPV standar, membutuhkan kolaborasi multidisiplin sejak tahap desain konseptual.

Kesimpulan dari Hasil dan Pembahasan: Sistem BIPV-TE telah terbukti secara eksperimental dan simulasi mampu meningkatkan efisiensi konversi energi surya sekaligus meningkatkan kinerja termal gedung. Peningkatan 12.6% pada total densitas daya dan pengurangan 6.4% pada beban pendinginan menjadikannya teknologi yang sangat menjanjikan untuk bangunan bersih energi masa depan. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk fokus pada optimalisasi biaya, pengembangan material TE murah ber-ZT tinggi, dan studi full-scale application untuk mengonfirmasi temuan ini pada skala nyata.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan mengenai Integrasi Panel Fotovoltaik Termoelektrik pada Fasad Bangunan (BIPV-TE), dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Sistem BIPV-TE secara efektif meningkatkan kinerja listrik melalui sinergi termal-elektrik. Integrasi modul termoelektrik pada bagian belakang panel fotovoltaik berhasil menurunkan suhu operasi sel PV rata-rata sebesar  $12.5^\circ\text{C}$  pada kondisi radiasi tinggi ( $800 \text{ W/m}^2$ ). Penurunan suhu ini meningkatkan efisiensi konversi daya modul PV sebesar 6.2% relatif. Modul TE sendiri berkontribusi menghasilkan daya tambahan dengan memanfaatkan gradien termal yang tercipta. Secara agregat, sistem hibrid menghasilkan

peningkatan total densitas daya keluaran sebesar 12.6% per satuan luas fasad dibandingkan dengan sistem BIPV konvensional.

- b. Sistem BIPV-TE berkontribusi signifikan terhadap manajemen termal dan efisiensi energi gedung secara keseluruhan. Simulasi dinamika bangunan pada gedung perkantoran di iklim tropis menunjukkan bahwa fasad BIPV-TE tidak hanya berfungsi sebagai pembangkit listrik, tetapi juga sebagai elemen pendingin pasif-aktif. Sistem ini mampu mengurangi beban pendinginan tahunan spesifik sebesar 6.4% dibandingkan fasad konvensional dan 2.1% dibandingkan fasad BIPV standar. Kombinasi antara peningkatan generasi listrik on-site dan pengurangan kebutuhan energi untuk pendinginan tersebut menghasilkan penurunan konsumsi energi primer gedung sebesar 18.8%.
- c. Keberhasilan sistem sangat bergantung pada desain integrasi termal dan pemilihan konfigurasi yang optimal. Hasil penelitian mengidentifikasi bahwa kinerja sistem sangat sensitif terhadap desain heat sink dan sifat lapisan perekat termal antara modul PV dan TE. Konfigurasi dengan heat sink pasif yang memadai telah menunjukkan hasil yang baik, namun terdapat potensi peningkatan lebih lanjut dengan sistem pembuangan panas aktif (active cooling). Performa keseluruhan merupakan trade-off antara peningkatan keluaran energi, kompleksitas sistem, dan biaya tambahan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan identifikasi limitasi selama penelitian, diajukan beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut:

- a. Saran untuk Penelitian Lanjutan:
  - 1) Optimalisasi Material dan Konfigurasi: Perlu dilakukan penelitian lebih mendalam untuk menguji material termoelektrik generasi baru (seperti skutterudites atau material nanostructured) yang memiliki figure of merit (ZT) lebih tinggi dan potensi biaya lebih rendah. Studi optimasi menggunakan metode seperti Response Surface Methodology (RSM) untuk menemukan konfigurasi ideal rasio luas PV-TE, ketebalan heat sink, dan material antarmuka juga sangat disarankan.
  - 2) Studi Durabilitas dan Keandalan Jangka Panjang: Penelitian ketahanan (durability) sistem BIPV-TE terhadap siklus termal, paparan UV, dan kelembaban dalam periode waktu yang panjang (minimal 1-2 tahun) sangat krusial sebelum implementasi komersial. Studi ini harus mencakup degradasi performa listrik dan integritas mekanis sambungan.

- 3) Analisis Ekonomi dan Lingkungan Mendalam: Disarankan untuk melakukan Life Cycle Cost Analysis (LCCA) dan Life Cycle Assessment (LCA) yang komprehensif untuk membandingkan BIPV-TE dengan teknologi fasad lainnya. Analisis ini akan memberikan gambaran nyata tentang payback period, profitabilitas, serta dampak lingkungan total dari hulu ke hilir.
- b. Saran untuk Aplikasi dan Implementasi:
- 1) Pengembangan Prototipe Skala Penuh dan Studi Kasus: Untuk memvalidasi hasil simulasi, perlu dikembangkan dan dipasang prototipe BIPV-TE pada skala ruangan atau gedung nyata (pilot project). Studi kasus ini akan memberikan data operasional yang lebih akurat mengenai interaksi sistem dengan pengguna, sistem HVAC yang ada, serta kinerja di bawah berbagai kondisi cuaca nyata.
  - 2) Penyusunan Panduan Desain dan Spesifikasi Teknis: Berdasarkan temuan penelitian, perlu disusun draf pedoman atau panduan awal untuk perancangan dan instalasi sistem BIPV-TE. Panduan ini harus mencakup aspek arsitektural, struktural, elektrik, dan termal untuk memfasilitasi adopsi oleh para arsitek, konsultan, dan kontraktor.
  - 3) Eksplorasi Skema Pendanaan dan Insentif Kebijakan: Mengingat investasi awal yang mungkin lebih tinggi, perlu dieksplorasi skema pembiayaan inovatif (misalnya, Energy Service Company/ESCO) dan didorongnya kebijakan pemerintah yang memberikan insentif bagi pengembangan dan penerapan teknologi bangunan bersih energi yang inovatif seperti BIPV-TE.

## **DAFTAR REFERENSI**

- Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., & Kazim, S. (2022). Review on cooling techniques for photovoltaic panels and thermoelectric generators to enhance overall efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, \*168\*, 112772.
- Al-Waeli, A. H., Sopian, K., Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2017). Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, \*77\*, 109-130.
- Attivissimo, F., Di Nisio, A., Lanzolla, A. M. L., & Paul, M. (2020). Feasibility of a photovoltaic-thermoelectric generator: Performance analysis and simulation results. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, \*69\*(7), 4804-4813.
- Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, \*321\*(5895), 1457-1461.
- Chen, W. H., Wang, C. C., & Lin, Y. X. (2018). A numerical study on the performance of a photovoltaic-thermoelectric hybrid system. *Energy Conversion and Management*, \*175\*, 11-20.
- Darkwa, J., Calautit, J., Du, D., & Kokogiannakis, G. (2019). A review of building envelope integrated photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*, \*192\*, 83-100.

- Dehouche, A., & Khelidj, B. (2022). Energy and exergy analysis of a novel building integrated photovoltaic-thermoelectric system with phase change material. *Journal of Building Engineering*, \*45\*, 103460.
- Du, Y., Liu, H., & Li, X. (2021). Performance assessment of a building integrated photovoltaic-thermoelectric wall system in different climate zones. *Energy and Buildings*, \*250\*, 111291.
- He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., & Zhao, X. (2015). Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, \*143\*, 1-25.
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Buildings*. Paris: IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/buildings>
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2020). A comprehensive review of thermoelectric generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, \*6\*, 264-287.
- Karthick, K., Suresh, S., & Dhanuskodi, R. (2019). Experimental investigation of the power output of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system for different climatic conditions. *International Journal of Green Energy*, \*16\*(2), 142-151.
- Li, G., Shittu, S., Zhou, K., Zhao, X., & Ma, X. (2020). Comparative analysis of thermoelectric elements optimum geometry between photovoltaic-thermoelectric and solar thermoelectric. *Energy*, \*193\*, 116763.
- Motiel, P., & Glicksman, L. R. (2016). *Sustainable Building Systems and Construction for Designers* (3rd ed.). Fairchild Books.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, \*40\*(3), 394-398.
- Zhang, Y., Cleary, M., Wang, X., Kempf, N., & Schoensee, L. (2015). Performance evaluation of a building-integrated photovoltaic-thermoelectric system. *Energy Conversion and Management*, \*105\*, 967-973.