

STUDI PERBANDINGAN MATERIAL FOTOVOLTAIK TRANSPARAN UNTUK FUNGSI GANDA SEBAGAI JENDELA DAN SUMBER ENERGI PADA BANGUNAN PASIF

Muhammad Thofa Saputra¹, Muhammad Dhifan Rizqi Setiyono², Zulkifli Iqbal Yakin³, Achmad Ridho Alfino⁴

^{1,2,3,4} Universitas Airlangga; Kampus MERR C Mulyorejo-Surabaya; Telp. (031) 5914042, 5914043, 5915551 Fax. (031) 5915551

Keywords:

Transparan Fotovoltaik (TPV); Bangunan Pasif, Efisiensi Energi; Arsitektur Berkelanjutan; Jendela Fungsi Ganda.

Correspondent Email:

muhammad.thofa.saputra-2023@ftmm.unair.ac.id



Copyright © [JITET](#) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstrak. Krisis energi dan meningkatnya konsumsi listrik di sektor bangunan menimbulkan tantangan serius bagi keberlanjutan energi di Indonesia. Sebagai negara berkembang dengan tingkat urbanisasi yang tinggi, Indonesia perlu mengadopsi solusi inovatif yang mendukung efisiensi energi sekaligus ramah lingkungan. Penelitian ini merupakan studi komparatif dari berbagai material transparent photovoltaic (TPV) yang didesain untuk fungsi ganda pada bangunan pasif, yaitu sebagai elemen jendela transparan dan sekaligus sebagai penghasil energi listrik. Dengan meningkatnya tuntutan akan arsitektur yang berkelanjutan, integrasi teknologi TPV dinilai mampu mengurangi konsumsi energi tanpa mengorbankan pencahayaan alami. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter efisiensi konversi daya, transmisi cahaya tampak, insulasi termal, dan daya tahan material. Hasilnya menunjukkan kompromi antara transparansi dan efisiensi, serta menyarankan pilihan material yang paling sesuai dengan konteks iklim dan kebutuhan arsitektur tropis. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi bangunan pintar dan mendukung desain selubung bangunan yang hemat energi dan estetik.

Abstract. The energy crisis and increasing electricity consumption in the building sector pose serious challenges to energy sustainability in Indonesia. As a developing country with rapid urbanisation, Indonesia needs to adopt innovative solutions that support energy efficiency while being environmentally friendly. This research is a comparative study of various transparent photovoltaic (TPV) materials designed for dual functions in passive buildings, namely as transparent window elements and at the same time as electrical energy generation. With the increasing demand for sustainable architecture, the integration of TPV technology is considered capable of reducing energy consumption without sacrificing daylighting. The evaluation was conducted based on the parameters of power conversion efficiency, visible light transmission, thermal insulation, and material durability. The results show a compromise between transparency and efficiency, and suggest material choices that best suit the climatic context and needs of tropical architecture. This study contributes to the development of smart building technologies and supports the design of building envelopes that are both energy efficient and aesthetically pleasing.

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim kini semakin terasa dalam kehidupan sehari-hari karena kota-kota besar semakin berkembang dan semakin banyak

orang pindah ke sana. Hampir semua hal yang dilakukan manusia membutuhkan listrik, sehingga kita membutuhkan lebih banyak energi bersih setiap saat. Sayangnya, sebagian besar energi berasal dari bahan bakar fosil yang menghasilkan banyak karbon berbahaya[1]. Kondisi ini menimbulkan tantangan dalam memenuhi kebutuhan listrik tanpa merusak alam cukup sulit sekarang.

Banyak penelitian telah memikirkan bangunan pasif yang menggunakan lebih sedikit daya dengan memanfaatkan pencahayaan alami, ventilasi silang, dan insulasi termal[2]. Strategi ini dapat mengurangi konsumsi listrik, tapi tidak dapat menghasilkan listrik dengan sendirinya. Teknologi surya bisa menjadi pilihan energi yang baik, tapi panel surya saat ini tidak sepenuhnya fleksibel untuk desain dan penggunaannya pada bangunan.

Isu-isu ini kemudian membuka peluang untuk menciptakan hal-hal baru. Dibutuhkan pembangkitan listrik secara langsung pada struktur bangunan itu sendiri. Sehingga, muncul inovasi penggunaan material fotovoltaik transparan yang menawarkan fungsi ganda dengan pemasangan pada jendela, dinding, atau atap kaca[3]. Inovasi ini memiliki dua fungsi yaitu menghasilkan listrik dan membantu menerangi ruangan dengan baik.

Keunggulan material fotovoltaik transparan terletak pada kontribusinya dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan secara keseluruhan yang mendukung pencapaian konsep bangunan *net-zero energy*[4]. Meskipun memiliki potensi luar biasa, belum banyak penelitian yang mengkaji seberapa baik inovasi ini dalam menghasilkan listrik dan memaksimalkan cahaya masuk pada bangunan pasif. Sehingga, pada penelitian ini kami melakukan studi bagaimana penggunaan material transparan dari fotovoltaik bekerja, dan melihat bagaimana benda itu membantu bangunan menghemat energi dan tetap ramah lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Fotovoltaik (PV)

Fotovoltaik adalah teknologi konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek *fotolistrik* yang terjadi pada material semikonduktor. Ketika *foton* dari sinar matahari mengenai permukaan sel fotovoltaik[5], Maka energi tersebut akan diserap oleh atom-atom dalam material semikonduktor dan menyebabkan *elektron* berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi. Pergerakan *elektron* inilah yang dapat menghasilkan beda potensial sehingga arus listrik dapat terbentuk. Teknologi ini menjadi salah satu hal yang penting dalam pengembangan energi terbarukan karena mampu menghasilkan listrik tanpa emisi gas rumah kaca.

Secara umum, prinsip kerja fotovoltaik terdapat tiga tahap utama, yaitu penyerapan cahaya (*absorption*), pembentukan pasangan *elektron-hole* (*generation*), dan pemisahan serta pengumpulan muatan listrik (*collection*). Proses awal terjadi saat material aktif menyerap energi cahaya dengan panjang gelombang tertentu[6]. Selanjutnya, energi tersebut menggerakkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, dan menghasilkan muatan bebas. Setelah itu medan listrik internal dalam sambungan p-n akan mengarahkan *elektron* dan *hole* menuju elektroda yang berbeda untuk menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan.

2.2. Konsep Bangunan Pasif

Bangunan pasif menggunakan tata letak, isolasi termal, ventilasi alami, dan pencahayaan alami untuk mengurangi konsumsi energi. Bangunan pasif dirancang untuk memberikan kenyamanan visual dan kenyamanan tanpa bergantung pada banyak sistem mekanik seperti AC atau pemanas. Konsep ini sangat penting untuk mengurangi konsumsi energi bangunan, terutama di negara-negara tropis[7]. Konsep bangunan pasif semakin banyak dikombinasikan dengan teknologi energi terbarukan. Penggunaan jendela *photovoltaic* (PV) adalah salah satu contoh kombinasi ini, yang menghasilkan sistem bangunan yang efisien yang juga menghasilkan energi secara mandiri.

Prinsip kerja dari bangunan pasif ini didasarkan pada pemanfaatan sumber energi, terutama cahaya matahari, untuk memenuhi kebutuhan energi tanpa mengandalkan sistem mekanis secara berlebihan[8]. Desain bangunan dirancang untuk mengurangi penggunaan pencahayaan dan pendinginan buatan dan mengoptimalkan pencahayaan alami. Orientasi, ukuran bukaan, dan material dinding bangunan memengaruhi keseimbangan suhu ruangan. Dengan cara ini, bangunan dapat tetap nyaman sepanjang waktu.

2.3. Karakteristik Material Fotovoltaik

Material fotovoltaik merupakan komponen utama dalam sistem konversi energi surya menjadi energi listrik. Setiap jenis material memiliki kemampuan berbeda dalam menyerap cahaya, menghasilkan arus, dan menahan pengaruh lingkungan. Karakteristik ini sangat mempengaruhi efisiensi, daya tahan, dan biaya produksi panel surya[9]. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat menjadi faktor penting dalam pengembangan sistem fotovoltaik yang efisien dan ekonomis.

Silikon merupakan material yang paling banyak digunakan dalam pembuatan sel surya karena kestabilannya dan ketersediaannya yang melimpah. Jenis silikon yang umum digunakan adalah silikon monokristalin dan polikristalin, di mana silikon monokristalin memiliki struktur kristal tunggal yang seragam sehingga menghasilkan efisiensi lebih tinggi[10]. Sebaliknya, silikon polikristalin tersusun dari banyak butiran kristal yang membuat efisiensinya sedikit lebih rendah namun dengan biaya produksi yang lebih terjangkau. Selain silikon, terdapat material *thin film* yang memiliki bentuk lapisan sangat tipis dan fleksibel, seperti *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), dan *copper indium gallium selenide* (CIGS). Material thin film memiliki keunggulan berupa bobot yang ringan dan mudah disesuaikan dengan berbagai permukaan, meskipun efisiensinya masih lebih rendah dibandingkan panel berbasis silikon konvensional.

2.4. Integrasi Fotovoltaik pada Bangunan

Integrasi fotovoltaik pada bangunan merupakan konsep penerapan teknologi sel surya yang menjadi bagian dari struktur bangunan itu sendiri. Sistem ini tidak hanya berfungsi menghasilkan energi listrik, tetapi juga menjadi elemen arsitektur seperti atap, dinding, atau jendela. Konsep ini dikenal dengan istilah *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV)[11]. Penerapan ini bertujuan untuk menciptakan bangunan yang efisien energi, ramah lingkungan, dan mandiri secara listrik.

Penerapan fotovoltaik pada bangunan dipengaruhi oleh orientasi, posisi, dan kemiringan panel terhadap arah datangnya sinar matahari. Penentuan posisi yang tepat akan meningkatkan penyerapan energi dan memaksimalkan efisiensi sistem. Arah yang ideal biasanya menghadap ke utara atau selatan tergantung lokasi geografis untuk mendapatkan intensitas sinar matahari optimal[12]. Selain itu, bayangan dari bangunan sekitar perlu diperhitungkan agar tidak mengurangi kinerja panel surya.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Studi Literatur

Untuk mendukung pendapat atau keyakinan dalam mencapai suatu tujuan, para penulis jurnal menggunakan pendekatan studi komparatif literatur[13] untuk menganalisis dan membandingkan berbagai jenis material fotovoltaik transparan yang digunakan dalam sistem *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) pada bangunan pasif. Pendekatan ini dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder dari berbagai penelitian terdahulu, kemudian dilakukan perbandingan berdasarkan kriteria teknis, optik, dan ekonomi. Tujuan metode ini adalah mengidentifikasi karakteristik material yang paling sesuai dengan kebutuhan bangunan hemat energi di iklim tropis.

3.2. Variabel dan Kriteria Analisis

Kriteria yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada parameter umum performa fotovoltaik transparan[14]. Masing-masing variabel dijelaskan dengan menggunakan data dan temuan dari literatur ilmiah.

3.2.1. Efisiensi Konversi Energi

Efisiensi konversi untuk material fotovoltaik transparan sangat variatif. Perovskite semi-transparan telah mencapai efisiensi hingga 14–15 %, bahkan ada laporan mencatat efisiensi 21–22 % dengan transparansi tinggi pada perangkat BIPV terbaru. *Organic PV* transparan umumnya memiliki efisiensi lebih rendah (5–11 %) tetapi riset menunjukkan bahwa peningkatan material donor-akseptor telah melampaui 11 % pada *organic solar cells* terbaru.

3.2.2. Transmittansi Cahaya Tampak (AVT)

Transparansi visual sering dinyatakan sebagai *Average Visible Transmittance (AVT)*. Nilai AVT idealnya tinggi (≥ 40 –80 %) agar tetap memberikan pencahayaan alami. Material seperti *a-Si* semi transparan yang digunakan di Indonesia mencapai sekitar 40 % transparansi. *Organic PV* dan *DSSC* juga umumnya memiliki transparansi tinggi (> 60 %) tetapi dengan efisiensi lebih rendah.

3.2.3. Estetika Visual

Estetika visual bergantung pada warna, uniformitas, dan kemurnian tampilan panel. *Perovskite* transparan modern telah didesain agar memberikan tampilan netral atau hampir tidak terlihat, dengan warna minimal yang sesuai integrasi arsitektural. *Organic PV* semi transparan memungkinkan variasi warna ringan namun tetap mempertahankan estetika bersih bila dirancang dengan tepat.

3.2.4. Biaya Produksi dan Keberlanjutan

Biaya produksi *Perovskite* lebih rendah dibandingkan sel silikon tradisional dan pemrosesannya bisa dilakukan secara *solution-based*, tetapi penggunaan timbal (Pb) menimbulkan kekhawatiran lingkungan. *Organic PV* memanfaatkan proses cetak larutan murah dan bahan fleksibel, namun umur pakai terbatas. *Transparent Conductive Oxides (TCO)* seperti ITO tetap mahal karena mengandung indium, tetapi alternatif berbasis grafena atau bahan polimer yang lebih murah sedang dikembangkan.

3.2.5. Daya Tahan dan Umur Pakai

Stabilitas jangka panjang masih menjadi tantangan utama. *Perovskite* dengan rekayasa antarmuka (misalnya dengan MXene) mampu mempertahankan sekitar 85 % efisiensi asal setelah lebih dari 1000 jam uji lingkungan. *Organic PV* semi transparan memperlihatkan umur pakai hingga 10 tahun dalam kondisi optimal. Teknologi *amorphous silicon (a-Si)* secara historis menampilkan ketahanan lebih dari 15 tahun, meskipun referensi modern masih terbatas.

3.3. Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

Data diperoleh melalui kajian literatur ilmiah dan data sekunder dari berbagai jurnal, artikel riset, dan laporan penelitian terkini (2020–2025)[15]. Pemilihan literatur dilakukan berdasarkan:

1. Relevansi terhadap topik *transparent photovoltaic (TPV)* dan aplikasinya pada bangunan pasif.
2. Kredibilitas sumber (jurnal bereputasi dan *peer-reviewed*).
3. Kelengkapan data teknis yang mencakup efisiensi, AVT, umur pakai, dan biaya.

Seluruh data kuantitatif dan kualitatif kemudian disusun dalam bentuk tabel perbandingan material. Tabel tersebut membandingkan lima jenis material fotovoltaik transparan, *Perovskite Transparan*, *Organic PV*, *DSSC*, *Amorphous Silicon (a-Si)*, dan *TCO seperti ITO/IZTO* yang berdasarkan efisiensi, transparansi, biaya, daya tahan, serta estetika visual.

Analisis dilakukan menggunakan pendekatan komparatif deskriptif yaitu dengan menjelaskan keunggulan dan kelemahan tiap material secara sistematis untuk memperoleh pemahaman yang menyeluruh terhadap performa masing-masing.

3.4. Prosedur Analisis Data

Analisis dilakukan dalam beberapa tahapan sistematis, yaitu:

3.4.1. Identifikasi Material dan Parameter Kinerja

Setiap jenis material fotovoltaik transparan diidentifikasi berdasarkan performa

yang tercatat dalam literatur. Parameter utama yang digunakan meliputi efisiensi, AVT, umur pakai, biaya produksi, dan estetika visual.

3.4.2. Analisis Komparatif dan Interpretatif

Perbandingan dilakukan terhadap lima jenis material utama:

- A) *Indium Tin Oxide* (TCO/IZTO): Memiliki konduktivitas tinggi dan AVT > 70 %, tetapi mahal karena indium dan proses sputtering .
- B) *Perovskite Transparan*: Efisiensi tinggi (14–22 %), namun memiliki isu stabilitas dan toksisitas Pb, meskipun rekayasa MXene memperpanjang umur hingga 1000 jam.
- C) *Organic PV* (OPV): Efisiensi > 10 % dan AVT > 40 %, fleksibel serta estetik, namun umur pakai pendek (5–10 tahun).
- D) *Dye Sensitized Solar Cells* (DSSC): Transparansi tinggi (AVT 60 %), estetik, dan murah, tetapi efisiensi rendah (2–10 %) serta tidak tahan kelembaban.
- E) *Amorphous Silicon* (a-Si): Stabil dan tahan lama (> 15 tahun), transparansi ~40 %, efisiensi moderat (7–10 %).

3.4.3. Penyusunan Tabel Perbandingan

Semua data dikompilasi ke dalam tabel perbandingan untuk menunjukkan variasi performa antar-material.

Tabel 1. Perbandingan Material

Material	Efisiensi (%)	Transmittansi (AVT %)	Biaya Produksi	Umur Pakai (tahun)	Estetika Visual
Indium Tin Oxide (ITO-based)	–	> 70 %	Tinggi (karena indium)	≥ 15–20	Transparan sangat tinggi
Perovskite Transparan	14–22	26–50 %	Menengah	≈ 5–10	Netral/minimal distorsi
Organic PV Transparan	5–11	> 40 %	Rendah–Menengah	≈ 5–10	Warna netral, estetika baik
Dye-Sensitized Solar Cell	5–10	~40–60 %	Rendah	≈ 5–8	Bisa berwarna artistik
Amorphous Silicon (a-Si)	7–10	~40 %	Menengah	≥ 15–20	Transparansi moderat

3.4.4. Validasi Data

Validasi dilakukan melalui *cross-check* antar-sumber untuk memastikan keakuratan data efisiensi dan transparansi. Perbandingan hasil antar penelitian memastikan bahwa

kesimpulan yang diambil bersifat objektif dan representatif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

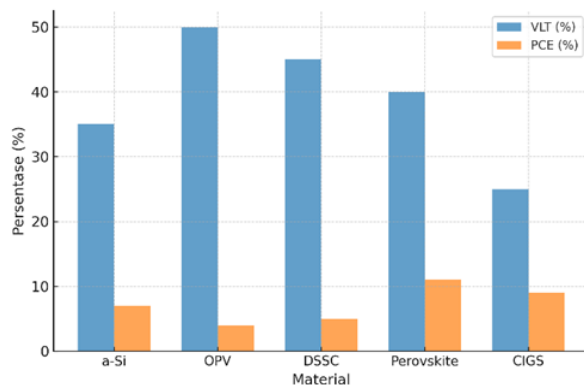
4.1.1 Perbandingan Karakteristik Material TPV

Hasil analisis perbandingan material *Transparent Photovoltaic* (TPV) menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang signifikan antara jenis material. Seperti tersaji pada Tabel 2, material *Organic Photovoltaic* (OPV) dan *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) memiliki nilai *Visible Light Transmittance* (VLT) yang lebih tinggi (40–60% dan 35–55%)[16], sehingga lebih unggul dalam aspek penerusan cahaya alami. Sebaliknya, *Perovskite* menonjol dalam aspek *Power Conversion Efficiency* (PCE) dengan kisaran 10–12%, menjadikannya pilihan ideal untuk area terbatas dengan kebutuhan energi tinggi[16].

Hasil ini mengindikasikan adanya kompromi antara efisiensi listrik dan transparansi optik. Semakin tinggi nilai VLT, semakin rendah efisiensi konversi daya, dan sebaliknya. Oleh karena itu, pemilihan material harus disesuaikan dengan kebutuhan bangunan, apakah lebih menekankan pada pencahayaan alami, efisiensi energi, atau nilai estetika arsitektural.

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Material TPV

Material	VLT (%)	PCE (%)	Estetika
a-Si	30–40	6–8	Menengah
OPV	40–60	3–5	Baik
DSSC	35–55	4–6	Baik
Perovskite	30–50	10–12	Sangat Baik
CIGS	20–30	8–10	Menengah



Gambar 1. Perbandingan Rata-Rata VLT dan PCE Material TPV

4.1.2 Studi Kasus Implementasi Global

Implementasi TPV di berbagai negara menunjukkan bahwa keberhasilan sistem sangat bergantung pada strategi desain dan adaptasi terhadap iklim lokal. Misalnya, proyek di Universitas Michigan, Amerika Serikat, berhasil menggunakan OPV pada façade laboratorium yang tidak hanya memproduksi listrik tetapi juga mempertahankan kualitas pencahayaan alami[17].

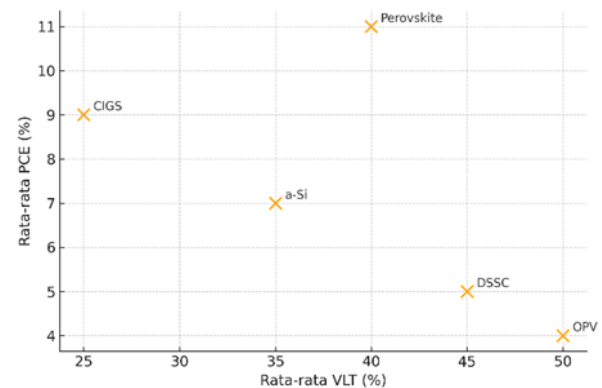
Sementara itu, penerapan di Tokyo menggunakan jendela berbasis *Indium Tin Oxide* (ITO) berhasil menghasilkan energi listrik tanpa mengorbankan kenyamanan visual pengguna. Kedua kasus ini menegaskan bahwa desain integratif antara sistem energi, pencahayaan, dan estetika merupakan faktor kunci keberhasilan penerapan TPV dalam arsitektur modern.

4.1.3 Analisis Parameter Desain

Hasil analisis menunjukkan bahwa transmisi cahaya minimal 40% merupakan ambang optimal untuk mempertahankan fungsi *daylighting* tanpa menurunkan efisiensi energi secara signifikan. Selain itu, orientasi modul terhadap lintasan matahari mempengaruhi kinerja hingga 15% per hari.

Integrasi sistem dengan *smart building* terbukti meningkatkan efisiensi pemakaian energi secara signifikan, melalui kontrol otomatis pencahayaan dan pendinginan ruangan. Sistem otomatis ini juga membantu

menjaga suhu modul tetap stabil, sehingga memperpanjang umur pakai TPV.



Gambar 2. Trade-Off Efisiensi vs Transparansi Material TPV

4.1.4 Efisiensi dan Kenyamanan Termal

Material dengan VLT tinggi seperti OPV dan DSSC mampu meningkatkan pencahayaan alami, namun efek sampingnya adalah kenaikan *heat gain* yang berpotensi menambah beban pendinginan ruangan. Sebaliknya, material dengan VLT rendah seperti a-Si dan CIGS dapat menurunkan panas masuk, tetapi membutuhkan tambahan penerangan buatan.

Perbandingan dengan kaca *low-E* menunjukkan bahwa TPV mampu berperan ganda sebagai pembangkit energi dan pengendali panas pasif, dengan catatan pemilihan rasio VLT–PCE dilakukan secara tepat. Pada kondisi tropis seperti di Indonesia, kombinasi TPV dan teknologi *shading passive design* menghasilkan efisiensi energi bangunan yang lebih baik.

4.1.5 Tantangan Implementasi

Secara teknis, tantangan terbesar berasal dari degradasi material akibat iklim lembab dan panas tinggi. Material seperti *Perovskite* dan *OPV* membutuhkan lapisan pelindung (*barrier film encapsulation*) untuk memperpanjang umur operasionalnya. Namun, teknologi tersebut meningkatkan biaya produksi dan membutuhkan keahlian manufaktur tinggi[18].

Dari sisi non-teknis, tantangan utama adalah biaya investasi awal, kurangnya produsen lokal, dan belum adanya standar nasional TPV. Oleh karena itu, dukungan

kebijakan publik dan insentif fiskal menjadi krusial dalam mempercepat adopsi teknologi ini.

4.1.6 Potensi Implementasi di Indonesia

Indonesia memiliki potensi besar dalam penerapan TPV karena intensitas radiasi matahari rata-rata mencapai 4,8 kWh/m²/hari. TPV dapat diintegrasikan pada bangunan pendidikan, kesehatan, dan perkantoran untuk mendukung target *Net Zero Energy Building (NZEB)*. Selain efisiensi energi, TPV juga menawarkan nilai estetika tinggi melalui fleksibilitas desain arsitektur.

Namun, implementasi di iklim tropis memerlukan pengujian lapangan jangka panjang untuk menilai daya tahan material terhadap kelembapan, suhu tinggi, dan kondensasi. Dukungan kebijakan pemerintah, kolaborasi riset, serta peningkatan kapasitas industri menjadi faktor penting dalam mempercepat adopsi teknologi TPV di Indonesia[19].

4.2 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat hubungan berbanding terbalik antara *Visible Light Transmittance (VLT)* dan *Power Conversion Efficiency (PCE)* pada material TPV. Material dengan VLT tinggi seperti OPV dan DSSC unggul dalam penerusan cahaya alami, sedangkan Perovskite memiliki efisiensi konversi energi tertinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya keseimbangan antara transparansi optik dan efisiensi listrik dalam desain bangunan pasif. Studi kasus di Amerika Serikat dan Jepang juga menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan TPV sangat bergantung pada desain integratif dan adaptasi terhadap kondisi iklim setempat. Di wilayah tropis seperti Indonesia, kombinasi TPV dengan strategi pasif seperti *shading* dan ventilasi alami diperlukan untuk menjaga efisiensi energi dan kenyamanan termal. Tantangan utama meliputi degradasi material akibat kelembapan tinggi serta biaya investasi awal yang besar, namun potensi pemanfaatannya tetap tinggi dengan dukungan riset dan kebijakan pemerintah.

4.3 Implikasi Penelitian

Penelitian ini memiliki implikasi penting terhadap pengembangan desain bangunan berenergi rendah di Indonesia. Secara teoritis, hasilnya memperkuat konsep integrasi teknologi energi surya dengan elemen arsitektural tanpa mengorbankan kenyamanan pengguna. Secara praktis, temuan ini dapat menjadi acuan dalam pemilihan material TPV yang sesuai dengan kebutuhan pencahayaan, efisiensi, dan kondisi iklim tropis. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi perumusan standar nasional dan kebijakan insentif yang mendukung penerapan teknologi *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)* menuju bangunan berkonsep *net zero energy*[20].

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai penerapan *Transparent Photovoltaic (TPV)* pada bangunan pasif, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Terdapat hubungan berbanding terbalik antara *Visible Light Transmittance (VLT)* dan *Power Conversion Efficiency (PCE)*. Material dengan VLT tinggi seperti OPV dan DSSC lebih unggul dalam penerusan cahaya alami, sedangkan material seperti *Perovskite* dan CIGS menawarkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi.
2. Keberhasilan penerapan TPV sangat dipengaruhi oleh desain arsitektural, orientasi bangunan, serta integrasi dengan sistem *smart building*. Penyesuaian parameter desain seperti sudut pemasangan dan transmisi cahaya minimal 40% terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus menjaga kenyamanan visual pengguna.
3. Material dengan VLT tinggi dapat meningkatkan pencahayaan alami namun berpotensi menambah *heat gain* dalam ruangan, sedangkan material dengan VLT rendah membutuhkan tambahan penerangan buatan. Kombinasi TPV dengan strategi *passive cooling* dan kaca pengendali

panas dapat menghasilkan efisiensi energi yang optimal di iklim tropis.

4. Dengan potensi radiasi matahari rata-rata 4,8 kWh/m²/hari, Indonesia memiliki peluang besar untuk pengembangan TPV sebagai bagian dari strategi *Net Zero Energy Building (NZEB)*. Penelitian lanjutan disarankan difokuskan pada peningkatan ketahanan material terhadap kondisi tropis, efisiensi biaya produksi, serta pengembangan kebijakan dan standar nasional untuk sistem *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing, rekan peneliti, serta institusi yang telah menyediakan fasilitas dan sumber data yang diperlukan. Dukungan moral dan teknis dari berbagai pihak telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. K. Wachjoe, H. Zein, Y. Suprianti and B. Eliana, "Optimal Electricity Supply System Based on the Clean Energy Transition," 2023 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP), Jakarta, Indonesia, 2023, pp. 29-34, doi: 10.1109/ICT-PEP60152.2023.10351141.
- [2] "Comparison of different controlling strategies of an integrated ground source energy system operated in a passive office building," 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Wuhan, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510318.
- [3] A. Mdallal et al., "Review on Semi-Transparent Solar Cells: Applications, Recent Advances and Recent Transparent Conductive Electrode Materials," 2023 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirates, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ASET56582.2023.10180590.
- [4] B. N. S. K. Jakhar and A. Kumar, "Optimizing Solar Thermal Energy Storage In Net-Zero Energy Buildings With Earth-Air Heat Exchangers," 2023 International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC), Greater Noida, India, 2023, pp. 1223-1228, doi: 10.1109/PEEIC59336.2023.10450327.
- [5] I. Amos, R. Siregar, N. Soedjarwanto, A. U. Darajat, E. Komalasari, and U. Lampung, "Rancang Bangun Purwarupa Zeta Converter Dengan Maximum Power Point Tracking (Mppt) Untuk Optimalisasi Penyerapan Energi Pada," vol. 12, no. 3, pp. 10–15, 2024.
- [6] K. S. Rahimah and I. A. Abed, "Design and Analysis of Proposed Photovoltaic system," 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872931.
- [7] J. Singh, R. K. Tomar, N. D. Kaushika and G. Nandan, "Investigation of Solar Passive concepts in building envelope for a reduction of energy usage," 2021 2nd International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM), London, United Kingdom, 2021, pp. 619-624, doi: 10.1109/ICIEM51511.2021.9445359.
- [8] T. Radeva and N. Petkova, "Photovoltaic Energy Usage for Agricultual Building: A case Study," 2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA61056.2024.10637900.
- [9] M. Balaji, A. Y. Begum, C. J. S. Reddy, G. Mahesh and D. Charunya, "Comparison of Efficiencies Using Thermal Characteristics of Different PV Materials Using ANSYS," 2023 Third International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT), Bhilai, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAECT57570.2023.10117703.
- [10] S. M. Heidari and A. Anctil, "Material Requirement and Resource Availability for Silicon Photovoltaic Laminate Manufacturing in the Next 10 Years," 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Fort Lauderdale, FL, USA, 2021, pp. 1768-1772, doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518663.
- [11] R. Li, L. Dai, J. Zeng and J. Wei, "Application of Photovoltaic Energy Storage Integration and Flexible Control Technology Based on the Construction Industry," 2024 IEEE 8th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Shenyang, China,

- 2024, pp. 4406-4409, doi: 10.1109/EI264398.2024.10990346.
- [12] M. Mosaid, H. El Mghari and R. El Amraoui, "Energy management system's and photovoltaic energy in buildings : What impacts?," 2025 5th International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), Fez, Morocco, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRASET64571.2025.11008318.
- [13] R. Alamsyah, E. Ryansyah, A. Y. Permana, and R. Mufidah, "Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Menggunakan Logika Fuzzy dengan Teknologi Internet of Things Berbasis ESP8266 dan Aplikasi Blynk," Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan, vol. 12, no. 2, 2024.
- [14] M. E. Deowan et al., "Development of an Agro-Photovoltaic Transparent Solar Panel and DOCR for Agriculture and Grid System Usage," 2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS), Tuticorin, India, 2023, pp. 7-12, doi: 10.1109/ICEARS56392.2023.10084966.
- [15] K. R. Felizardo et al., "On the Difficulties of Conducting and Replicating Systematic Literature Reviews Studies Using LLMs in Software Engineering," 2025 IEEE/ACM International Workshop on Methodological Issues with Empirical Studies in Software Engineering (WSESE), Ottawa, ON, Canada, 2025, pp. 20-23, doi: 10.1109/WSESE66602.2025.00010.
- [16] S. S, R. J. M, A. A. V, N. J. R. Muniraj, J. G. Ramani and A. J, "An overview of photovoltaic performance of organic solar cells using PCDTBT:PCBM and PTB7:PCBM active-layer materials," 2022 IEEE International Conference on Nanoelectronics, Nanophotonics, Nanomaterials, Nanobioscience & Nanotechnology (5NANO), Kottayam, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/5NANO53044.2022.9828907.
- [17] Y. Li, T. Wang, A. Amassian and S. Forrest, "Instability of Non-fullerene Acceptors Used in Organic Solar Cells," 2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), San Juan, PR, USA, 2023, pp. 1-1, doi: 10.1109/PVSC48320.2023.10359724.
- [18] B. Shen et al., "Semitransparent Perovskite Solar Cells With Dielectric-Metal-Dielectric Electrode Passivated by Antioxidant Dibutylhydroxytoluene," in IEEE Electron Device Letters, vol. 46, no. 2, pp. 227-230, Feb. 2025, doi: 10.1109/LED.2024.3512653.
- [19] J. Zhu, Y. Zhao, J. Xiong, Z. Zhang and C. Ge, "Research on the optimization and configuration of integrated photovoltaic and energy storage systems in smart buildings considering the lifecycle costs," 2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Xi'an, China, 2024, pp. 2975-2980, doi: 10.1109/CCDC62350.2024.10587537.
- [20] C. A. Priya, M. Masood and M. Krishnamoorthy, "Optimizing Building Integrated Photovoltaic: Energy Conservation Simulation by Using BEOPT Tool," 2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2024, pp. 785-790, doi: 10.1109/ICPEICES62430.2024.10719079.