

Pengaruh Lebar Saluran pada *Building Integrated Photovoltaic* pada Performa PV

Elang Pramudya Wijaya^{1,2*}, Ardiyansyah Saad Yatim³, R Rizal Isnanto², Agus Suprihanto²

¹Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University
Kampus IPB Dramaga Bogor 16680, Indonesia

²Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

³Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Jl. Margonda Raya, Kampus UI Depok, Indonesia

elangpramudya@ipb.ac.id, elang@students.undip.ac.id

Abstrak

Salah satu contoh dalam mengkonversi energi matahari adalah dengan menggunakan solar photovoltaic atau yang biasa disebut solar PV untuk menghasilkan energi listrik dari sistem tersebut. Salah satu cara paling umum untuk mendapatkan energi dari matahari adalah melalui panel surya (PV). Namun, dalam beberapa kasus, kita dihadapkan pada tantangan keterbatasan lahan. Untuk mengatasi hal ini, integrasi panel PV ke dalam struktur bangunan dirancang guna mengoptimalkan potensi pemanfaatan energi matahari sekaligus menyelesaikan kendala ruang yang terbatas. Dengan mengintegrasikannya sebagai fasad atau menggantikan bahan bangunan tradisional, hal ini dapat mengurangi jejak karbon. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan pendinginan alami konvektif dan pendinginan pasif pada sistem BIPV dalam skala nyata serta menemukan pengaruh lebar saluran terhadap pendinginan pasif di permukaan modul PV. Selain itu, studi literatur juga dilakukan untuk mengetahui dampak pendinginan pasif terhadap kinerja PV dalam berbagai kondisi kecepatan angin. Simulasi CFD dilakukan dengan kondisi batas mengacu pada kondisi tes standar. Hasilnya menunjukkan bahwa kenaikan suhu PV yang paling rendah terjadi pada lebar celah yang lebih besar. Hal ini menunjukkan efisiensi produksi listrik yang lebih tinggi dari BIPV. Lebar celah udara menentukan perpindahan panas di dalam celah tersebut. Konduksi panas mendominasi proses perpindahan panas pada kecepatan rendah (1 m/s). Di sisi lain, suhu operasi sel dipengaruhi oleh apakah aliran mencapai kondisi aliran yang sepenuhnya berkembang atau tidak.

Kata kunci: BIPV, Solar PV, Perpindahan Panas, Panel Surya

I. PENDAHULUAN

Berbagai metode telah diteliti untuk menambah potensi dari manfaat energi matahari. Salah satu contoh dalam mengkonversi energi matahari adalah dengan menggunakan *solar photovoltaic* atau yang biasa disebut solar PV untuk menghasilkan energi listrik dari sistem tersebut. Salah satu cara paling umum untuk mendapatkan energi dari matahari adalah melalui panel surya (PV). Namun, dalam beberapa kasus, kita dihadapkan pada tantangan keterbatasan lahan. Untuk mengatasi hal ini, integrasi panel PV ke dalam struktur bangunan dirancang guna mengoptimalkan potensi pemanfaatan energi matahari sekaligus menyelesaikan kendala ruang yang terbatas. Dengan mengintegrasikannya sebagai fasad atau

menggantikan bahan bangunan tradisional, hal ini dapat mengurangi jejak karbon (Fernández-Solas et al., 2022; Gholami & Røstvik, 2020). *Building Integrated Photovoltaic* (BIPV) bisa diletakkan sebagai pengganti material-material di dalam sebuah bangunan yang bertujuan untuk menghemat pemakaian tempat pada lahan yang terbatas (Reddy et al., 2020; Yang & Zou, 2016). Penghematan energi dilakukan sebagai langkah mengurangi pemanasan global (Adanta et al., n.d.; Bahar et al., n.d.; Wijaya & Yatim, 2021; A. Yatim et al., 2022; A. S. Yatim & Wijaya, 2023)

Sistem BIPV digambarkan sebagai sel fotovoltaik yang dapat dipasang atau diintegrasikan sebagai bagian dari bangunan, baik di atap maupun fasad, dan menghasilkan listrik. Selain itu, sistem ini dapat digunakan untuk dua fungsi secara bersamaan.

Sistem BIPV harus memenuhi peraturan terkait material selubung bangunan seperti perlindungan terhadap cuaca, keselamatan kebakaran, isolasi, perlindungan terhadap kebisingan, kekuatan struktural, dan isolasi panas.

Memanfaatkan energi matahari melalui panel surya yang dipasang pada fasad atau atap adalah cara inovatif dan berkelanjutan untuk menghasilkan listrik di area perkotaan dengan keterbatasan ruang. Dengan menggabungkan energi terbarukan dan desain yang tepat, pendekatan ini menjadi pilihan yang menarik untuk menciptakan bangunan yang ramah lingkungan dan hemat energi.

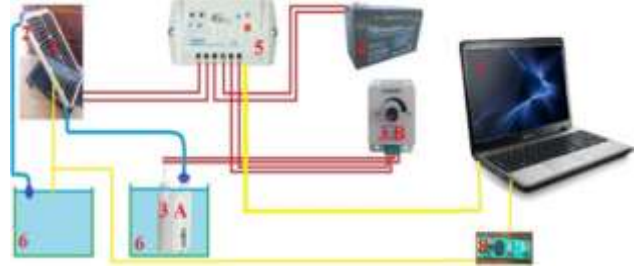
Kinerja listrik panel surya bergantung pada spesifikasi sel surya dan prosedur pemasangannya (Taşer et al., 2023). Beberapa aspek lingkungan seperti tingkat radiasi, lokasi, iklim, dan suhu berperan penting dalam kinerjanya. Selain itu, sangat penting untuk meneliti dan mengkaji faktor-faktor khusus yang memengaruhi efisiensi energi berkelanjutan dari sistem PV pada tahap perancangan. Faktor-faktor ini meliputi luas cakupan PV, sudut kemiringan, jenis sel surya, dan metode pendinginan.

Kesulitan yang terkait dengan pengaturan modul fotovoltaik adalah bahwa efisiensi listriknya menurun, dan umur pakainya juga berkurang seiring kenaikan suhu akibat radiasi matahari. Penurunan efisiensi modul PV sering diukur menggunakan koefisien suhu, yang biasanya berkisar antara -0,2% hingga -0,5% per derajat Celsius, menunjukkan penurunan efisiensi sebesar 0,4% untuk setiap kenaikan suhu 1°C dari rentang suhu ideal operasinya.

Untuk mengatasi masalah tersebut, berbagai metode pendinginan disarankan dan dievaluasi. Secara umum, metode pendinginan atau manajemen termal dapat dikategorikan sebagai metode aktif atau pasif. Metode aktif melibatkan penggunaan perangkat mekanis seperti kipas atau pompa untuk mengalirkan pendingin atau fluida kerja dan menurunkan suhu operasi PV.

Peningkatan keluaran daya dapat meningkatkan pengembalian investasi (*Return of Investment*) atau mengurangi jumlah ruang modul yang diperlukan, yang dapat menyebabkan biaya pemasangan yang lebih rendah dan jejak karbon yang lebih kecil secara keseluruhan. Selain itu, peningkatan keluaran listrik dapat menurunkan biaya yang terkait dengan pembangkit listrik fotovoltaik sekaligus meningkatkan pendapatan dari penjualan listrik ke jaringan. Selain meningkatkan efisiensi, mengurangi suhu sel juga dapat memperlambat laju degradasi termal, memperpanjang umur panel (Bahaidarah et

al., 2013; Peng et al., 2017; Rahman et al., 2015).



Gambar 1. Setup eksperimen sirkulasi air untuk pendinginan panel surya (Colt, 2016)

Cara untuk mengurangi penggunaan energi di bangunan adalah dengan menggunakan pendinginan pasif. Ini adalah solusi efektif untuk menyediakan kualitas udara dalam ruangan yang memadai tanpa menggunakan listrik, serta memberikan kesehatan yang lebih baik dan kenyamanan termal bagi penghuni. Gagasan menggunakan efek cerobong pada panel PV diintegrasikan ke dalam bangunan untuk menghasilkan aliran udara yang cukup dari luar ke dalam ruangan. Penelitian mengenai sistem PV yang dikombinasikan dengan ventilasi di bangunan masih terbatas.

Sistem PV untuk ventilasi pasif dapat memberikan manfaat bagi penghuni, karena bangunan akan mendapatkan lebih banyak ventilasi dan sekaligus mendinginkan panel PV. Di era modern, berbeda dengan metode observasi tradisional, penggunaan berbagai program komputasi untuk integrasi data, terutama integrasi Dinamika Fluida Komputasi (CFD) dan sumber lain seperti Building Information Modeling (BIM), memfasilitasi pemeriksaan yang efektif terhadap kondisi luar ruangan yang rumit di sekitar bangunan nyata yang kompleks. CFD adalah teknologi yang dapat diintegrasikan dan memberikan wawasan penting tentang lingkungan eksternal. Wawasan ini mencakup faktor-faktor seperti pola aliran udara, koefisien perpindahan panas konvektif, kontur suhu udara, dan kelembaban relatif (RH), serta konsentrasi kontaminan jika diperlukan.

Keunggulan utama CFD adalah fleksibilitasnya, yang mengurangi kendala terkait peralatan, waktu operasional, dan lokasi geografis dibandingkan dengan observasi di lokasi secara tradisional. Akibatnya, pendekatan ini secara signifikan mengurangi baik waktu maupun biaya finansial (Zheng et al., 2022). Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan pendinginan alami konvektif dan pendinginan pasif pada sistem BIPV dalam skala nyata serta menemukan

pengaruh lebar saluran terhadap pendinginan pasif di belakang modul PV. Selain itu, studi literatur juga dilakukan untuk mengetahui dampak pendinginan pasif terhadap kinerja PV dalam berbagai kondisi kecepatan angin.

II. METODE PENELITIAN

Photovoltaic dapat diuji pada kondisi uji standar yang mengacu pada *Standard Test Conditions* (STC) atau *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT). Untuk menemukan kinerja PV, biasanya kita menggunakan standar STC yang melibatkan suhu lingkungan sebesar 25°C dan irradiansi sebesar 1000 W/m². Efisiensi listrik (η_0) pada STC berfungsi sebagai ukuran metrik. Perhitungan efisiensi listrik (η_{el}) dapat diselesaikan menggunakan Persamaan (1) ketika suhu modul PV dinyatakan sebagai T (Zondag et al., 2003). Koefisien suhu (β), yang dipengaruhi oleh material modul PV, memainkan peran penting. Perlu dicatat bahwa peningkatan suhu modul PV menyebabkan penurunan efisiensi listrik. Ini menunjukkan bahwa penggunaan teknologi pendinginan dapat meningkatkan kinerja modul PV.

$$\eta_{el} = \eta_0(1 - \beta[T - T_a]) \quad (1)$$

Di sisi lain, standar IEC 61215/61646 menyajikan kondisi yang lebih realistis dibandingkan dengan STC. Mereka mendefinisikan NOCT sebagai suhu modul fotovoltaik (PV) dalam lingkungan referensi standar (SRE), di mana suhu lingkungan (T_{ambi}) ditetapkan pada 20 °C, irradiansi sebesar 800 W/m², dan kecepatan angin 1 m/s. Selain itu, dalam kondisi operasi dengan irradiansi G dan kondisi T_{ambi} , Anda dapat menemukan suhu modul PV (T_m) dengan menggunakan Persamaan (2) dengan NOCT sebagai parameter.

$$T_m = T_a + (NOCT - 20) \times \frac{G}{800} \quad (2)$$

Dalam penelitian ini, sel surya silikon monokristalin dipilih karena efisiensinya yang unggul dan masa pakainya yang lebih panjang. Di sisi lain, sel PV monokristalin, yang dikenal dengan struktur kristal tunggalnya, merupakan pilihan yang baik di wilayah dengan iklim panas. Efisiensi luar biasa dalam kondisi tersebut memungkinkan penyerapan energi matahari secara efektif, menghasilkan output listrik yang lebih tinggi. Ini memainkan peran penting di iklim panas di mana sinar matahari melimpah.

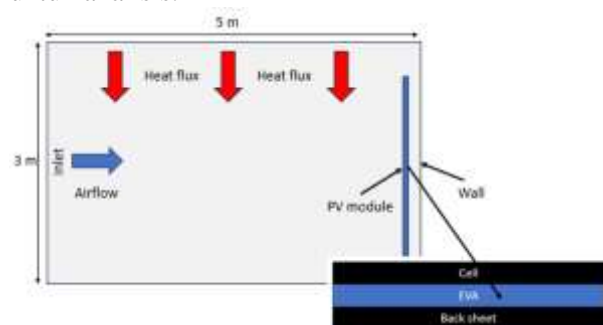
Selain itu, tampilan gelap membantu melepaskan panas berlebih dengan lebih efisien, yang

berkontribusi pada pengelolaan suhu di lingkungan yang ekstrim (Tirupati Rao & Raja Sekhar, 2023). Panel monokristalin dikenal karena masa pakainya yang panjang, yang semakin penting di iklim panas di mana suhu ekstrem dan sinar matahari yang intens dapat mengurangi daya tahan instalasi surya. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Han et al. (Han et al., 2018) menilai penurunan kinerja sistem fotovoltaik 110 kWp dalam 18 tahun operasinya di iklim panas dan lembap. Temuan mereka mengungkapkan bahwa penurunan daya untuk modul-modul ini adalah 24,38%, setara dengan penurunan tahunan sebesar 1,54%.

Tabel 1. Spesifikasi panel PV

Module	SunPower SPR-E19-315
Nominal efficiency	19.2%
Maximum Power	315 Wdc
Max power voltage	54.7 Vdc
Temperature coefficient	-0.386%/°C
Material	Mono-c-si
Module area	1.631 m ²

Dalam mengevaluasi tingkat keefektifan pendinginan pada modul PV, simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan dengan *software* Ansys Fluent 2022. Sebuah model 3D dibuat untuk mempelajari dampak sirkulasi udara di sekitar modul, dengan model uji berasal dari pengujian dalam ruangan yang melibatkan *solar simulator*. Selain itu, modul tersebut ditempatkan dalam volume udara berukuran 2 m × 3 m × 5 m untuk analisis.



Gambar 2. Skematik dari model simulasi

Pada studi berikut, mengacu pada jarak instalasi panel dan tembok, maka jarak yang dipakai sebagai

kondisi batas pada penelitian ini adalah sebagai berikut. Spesifikasi dari panel surya didapatkan sebagai berikut:

Tabel 2. Properti dari panel PV

Components	Thickness (mm)	Thermal Conductivity (W/mK)	Density (kg/m ³)	Heat Capacity (J/kg °C)
Cell (Si)	10	148	2330	677
EVA	10	0.35	960	2090
Back sheet	1	0.2	1200	250

Tabel 3. Kondisi parameter penelitian

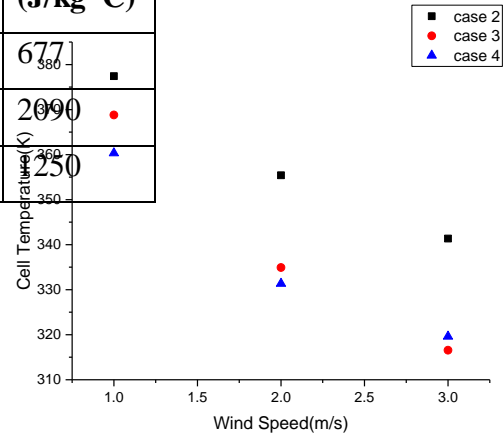
Case	Length (m)
1	0.1
2	0.15
3	0.2
4	0.3

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

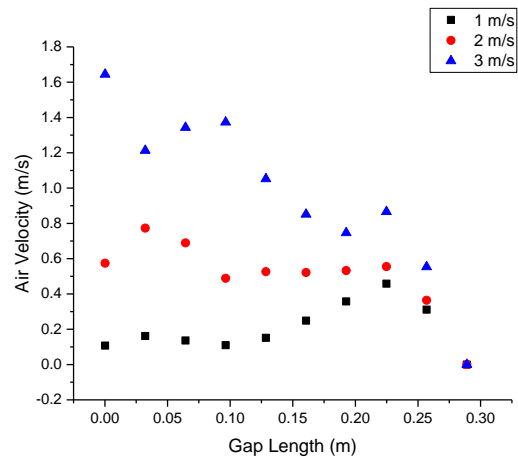
Hasil dari simulasi CFD akan menjelaskan bagaimana pengaruh lebar celah yang berbeda terhadap suhu rata-rata modul melalui kontur temperatur. Melalui simulasi CFD, pola aliran udara di dalam celah dapat divisualisasikan dan dianalisis, memberikan pengetahuan tentang bagaimana lebar celah yang bervariasi berkontribusi pada perilaku aliran udara tertentu. Simulasi ini juga memprediksi distribusi temperatur untuk menilai pengaruh lebar celah terhadap efisiensi keseluruhan panel PV. Dengan secara sistematis mengeksplorasi panjang celah yang berbeda melalui studi parametrik, kita dapat mengoptimalkan konfigurasi BIPV untuk meningkatkan pendinginan pasif, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi dalam desain bangunan.

Gambar XX menunjukkan hubungan antara suhu rata-rata modul dengan kecepatan angin. Hasil awal menunjukkan korelasi linear antara suhu operasi rata-rata sistem Building Integrated Photovoltaic (BIPV) dan kecepatan angin, sebuah fenomena yang telah banyak didokumentasikan dalam literatur yang ada, seperti yang dicatat oleh Davis et al. (Davis et al., 2001). Karena penelitian ini menggunakan PV yang diintegrasikan pada fasad bangunan, sudut kemiringannya akan 0. Xing et al. (Xing et al., 2014) mempelajari hubungan antara efisiensi dan sudut kemiringan pada kecepatan yang berbeda di

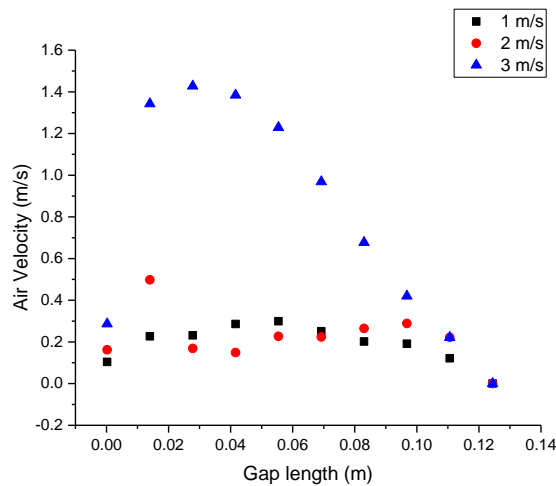
dalam celah antara PV dan atap. Celah udara berkontribusi secara signifikan terhadap perpindahan panas dari PV ke udara dan sangat memengaruhi kinerja modul. Meskipun mereka hanya melakukan penelitian sudut kemiringan pada sudut kemiringan atap dan tidak menyebutkan efek cerobong yang disebabkan oleh daya apung udara di dalam saluran.



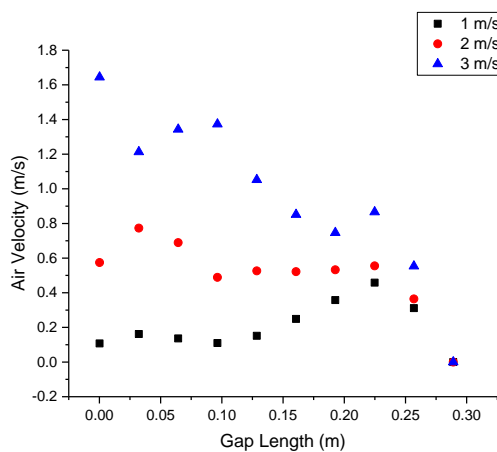
Gambar 3. Temperatur sel pada kondisi kecepatan angin yang berbeda



Gambar 4. Kecepatan udara diantara fasad dan PV pada kondisi kecepatan angin yang berbeda (10cm)



Gambar 5. Kecepatan udara diantara fasad dan PV pada kondisi kecepatan angin yang berbeda (15cm)

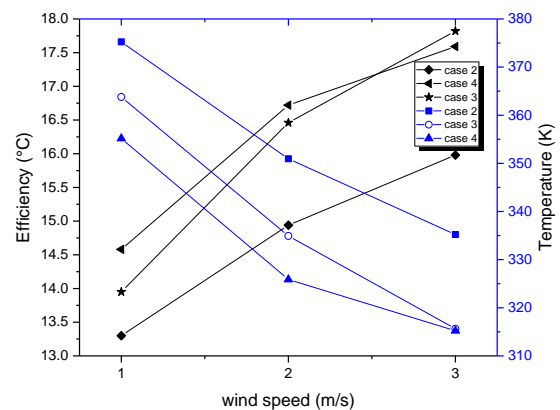


Gambar 6. Kecepatan udara diantara fasad dan PV pada kondisi kecepatan angin yang berbeda (30cm)

Ukuran celah udara sebesar 10 cm, 15 cm, dan 30 cm dipelajari dalam penelitian ini. Kecepatan angin diatur dalam konfigurasi yang berbeda. Dari data meteorologi, kecepatan angin sebesar 1, 2, dan 3 m/s dipilih karena kecepatan angin di daerah Dammam. Ketika kecepatan angin diatur menjadi 1 m/s, suhu sel dan panjang celah ditunjukkan pada Gambar 3 - 6 dalam berbagai kasus lebar celah. Penurunan kecepatan pada kedua ujung celah menunjukkan bahwa lapisan batas terbentuk di dekat permukaan solar panel. Lapisan batas dapat mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi (Rhakasywi et al., 2024). Ketika kecepatan angin meningkat, kita dapat melihat bahwa kecepatan maksimum di dalam celah berbeda dalam setiap kasus. Terlihat jelas bahwa kecepatan yang lebih tinggi terjadi karena suhu permukaan yang lebih tinggi pada lapisan batas. Peristiwa serupa juga diamati dalam studi Lizcano et al. (Ortiz Lizcano et al., 2020), yang menunjukkan bahwa meskipun

diharapkan ada dampak lebar saluran pada kecepatan udara, kecepatan pada kasus 1 didominasi oleh suhu permukaan.

Aspek penting lainnya dari pola kecepatan yang diamati pada panjang celah 10 dan 15 cm adalah fenomena kecepatan yang lebih tinggi di dekat permukaan belakang panel PV. Mengacu pada pernyataan sebelumnya, peningkatan kecepatan ini juga didukung oleh dampak suhu permukaan yang meningkat pada panel belakang PV. Selain itu, hal ini juga terjadi di dekat permukaan bangunan, tetapi suhu permukaan fasad bangunan lebih rendah daripada suhu permukaan belakang PV. Ini akan menyebabkan pendinginan fasad luar dengan menurunkan suhu permukaan pada kondisi musim dingin. Namun, kelemahan fasad berventilasi ketika isolasi termal berkurang karena aliran udara hanya terjadi pada musim dingin (Rubina et al., 2023).



Gambar 7. Grafik efisiensi terhadap temperature pada kondisi kecepatan angin yang berbeda

IV. KESIMPULAN

Dampak lebar celah pada temperatur modul PV telah dipelajari. Hasilnya menunjukkan bahwa kenaikan suhu PV yang paling rendah terjadi pada lebar celah yang lebih besar. Hal ini menunjukkan efisiensi produksi listrik yang lebih tinggi dari BIPV. Lebar celah udara menentukan perpindahan panas di dalam celah tersebut. Konduksi panas mendominasi proses perpindahan panas pada kecepatan rendah (1 m/s). Di sisi lain, suhu operasi sel dipengaruhi oleh apakah aliran mencapai kondisi aliran yang sepenuhnya berkembang atau tidak.

Terlihat jelas bahwa kecepatan yang lebih tinggi terjadi karena suhu permukaan yang lebih tinggi pada lapisan batas. Ini menunjukkan bahwa meskipun ada dampak yang diharapkan dari lebar saluran pada kecepatan udara, kecepatan pada kasus 1 didominasi oleh suhu permukaan. Kecepatan udara

terutama dipengaruhi oleh suhu permukaan pada lebar celah yang lebih sempit.

Celah yang lebih besar antara panel PV dan fasad memerlukan panjang yang lebih besar agar aliran mencapai aliran yang sepenuhnya berkembang. Dengan terus bertambahnya lebar celah udara, perpindahan panas antara panel PV dan fasad bergeser ke model pelat terpisah tanpa batas, yang mengakibatkan penurunan suhu sel. Semakin besar celah udara, semakin rendah suhu maksimum panel PV, yang menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya tujukan kepada PSPPI Universitas Diponegoro yang telah berkenan mendukung kami sebagai mahasiswa program profesi insinyur.

REFERENSI

- Adanta, D., Warjito, B., Prakoso, A. P., & Wijaya, E. P. (n.d.). Effect of Blade Depth on the Energy Conversion Process in Crossflow Turbines. *CFD Letters*, 12, 123–131.
- Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., & Rehman, S. (2013). Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 59, 445–453.
- Bahar, A. R. A., Yatim, A. S., & Wijaya, E. P. (n.d.). *CFD Analysis of Universitas Indonesia Psychrometric Chamber Air Loop System*.
- Colt, G. (2016). Performance evaluation of a PV panel by rear surface water active cooling. *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 1–5.
- Davis, M. W., Fanney, A. H., & Dougherty, B. P. (2001). Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures. *J. Sol. Energy Eng.*, 123(3), 200–210.
- Fernández-Solas, Á., Montes-Romero, J., Micheli, L., Almonacid, F., & Fernández, E. F. (2022). Estimation of soiling losses in photovoltaic modules of different technologies through analytical methods. *Energy*, 244, 123173.
- Gholami, H., & Røstvik, H. N. (2020). Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. *Energy*, 204, 117931.
- Han, H., Dong, X., Lai, H., Yan, H., Zhang, K., Liu, J., Verlinden, P. J., Liang, Z., & Shen, H. (2018). Analysis of the degradation of monocrystalline silicon photovoltaic modules after long-term exposure for 18 years in a hot-humid climate in China. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(3), 806–812.
- Ortiz Lizcano, J. C., Haghghi, Z., Wapperom, S., Infante Ferreira, C., Isabella, O., v. d. Dobbelsteen, A., & Zeman, M. (2020). Photovoltaic chimney: Thermal modeling and concept demonstration for integration in buildings. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(6), 465–482. <https://doi.org/10.1002/pip.3194>
- Peng, Z., Herfatmanesh, M. R., & Liu, Y. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy Conversion and Management*, 150, 949–955.
- Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2015). Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, 103, 348–358.
- Reddy, P., Gupta, M. V. N. S., Nundy, S., Karthick, A., & Ghosh, A. (2020). Status of BIPV and BAPV system for less energy-hungry building in India—A review. *Applied Sciences*, 10(7), 2337.
- Rhakasywi, D., Wasito, A., Wijaya, E. P., Rizal, R., & Adanta, D. (2024). Effect of Vortex Generator Angle on Fin and Tube Heat Exchanger. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*, 16(1), 82–99.
- Rubina, A., Uher, P., Vrána, J., Novotný, M., Nespěšný, O., Skřek, D., Šuhajdová, E., Vystrčil, J., & Formánek, M. (2023). Heat Flow through a Facade with a Controlled Ventilated Gap. *Buildings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030817>
- Taşer, A., Koyunbaba, B. K., & Kazanasmaz, T. (2023). Thermal, daylight, and energy potential of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems: A comprehensive review of effects and developments. *Solar Energy*, 251, 171–196.
- Tirupati Rao, V., & Raja Sekhar, Y. (2023). Hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector systems with different absorber configurations for thermal management—a review. *Energy & Environment*, 34(3), 690–735.
- Wijaya, E. P., & Yatim, A. S. (2021). Numerical Investigation of Air Movement on Laboratory Scale Psychrometric Chamber. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 84(2), 82–91.
- Xing, W., Zhou, J., & Feng, Z. (2014). Effects of mounting geometries on photovoltaic module performance using CFD and single-diode model. *Solar Energy*, 103, 541–549.

- Yang, R. J., & Zou, P. X. W. (2016). Building integrated photovoltaics (BIPV): Costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy. *International Journal of Construction Management*, 16(1), 39–53.
- Yatim, A. S., & Wijaya, E. P. (2023). Air Quality Improvement in COVID-19 Pandemic: Numerical Study of ventilation system in a classroom. *CFD Letters*, 15(1), 26–38.
- Yatim, A., Wijaya, E. P., Irwansyah, R., Auzani, A. S., & Liu, Y. (2022). Risk Assessment of Flammable Natural Refrigerant Application in Air Conditioning Systems. *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1078–1082.
- Zheng, L., Lu, W., Wu, L., & Zhou, Q. (2022). A review of integration between BIM and CFD for building outdoor environment simulation. *Building and Environment*, 109862.
- Zondag, H. A., De Vries, D. W., Van Helden, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., & Van Steenhoven, A. A. (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74(3), 253–269.

