

Integrasi Sistem Fotovoltaik Dalam Rancangan Bangunan Bertingkat Rendah Guna Meningkatkan Kinerja Energi

Qurrotul A'yun ^{*1} Septia Heryanti ²

Prodi Arsitektur, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Ampel, Surabaya, Indonesia ^{1,2}

E-mail: ^{*1} qurrotul_ayun@uinsa.ac.id, ² septia.heryanti@gmail.com

Submitted: 24-09-2024
Revised: 30-09-2024
Accepted: 15-09-2024
Available online: 02-12-2024

How To Cite: A'yun, Q., & Heryanti, S. (2024). Integrasi Sistem Fotovoltaik Dalam Rancangan Bangunan Bertingkat Rendah Guna Meningkatkan Kinerja Energi. *Nature: National Academic Journal of Architecture*, 11(2), 164-187. <https://doi.org/10.24252/nature.v11i2a4>

Abstrak Permasalahan emisi gas rumah kaca yang signifikan dari sektor bangunan, menyumbang lebih dari sepertiga emisi global dan sekitar 40% konsumsi energi dunia. Salah satu solusi yang ditawarkan untuk mengatasi permasalahan ini adalah integrasi sistem fotovoltaik dalam desain bangunan. Teknologi fotovoltaik memungkinkan konversi energi matahari menjadi listrik, sehingga mampu mengurangi ketergantungan pada energi tak terbarukan dan meminimalkan emisi CO₂. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental dalam bentuk pengujian langsung, untuk mengkaji kinerja sistem fotovoltaik tipe monokristal yang diintegrasikan pada bangunan, dengan berbagai orientasi dan sudut kemiringan. Penelitian dilakukan di Surabaya, sebagai salah satu kota yang memiliki intensitas penyinaran matahari yang tinggi di daerah beriklim tropis, dengan melakukan pengujian panel fotovoltaik yang dipasang di lima posisi yaitu di atap, serta fasad pada sisi utara, timur, selatan, dan barat. Data dikumpulkan melalui pengukuran tegangan, arus, daya, suhu, dan intensitas cahaya matahari selama periode penyinaran antara pukul 07.00 hingga 17.00 WIB. Variabel utama yang diuji adalah waktu penyinaran, orientasi arah hadap, dan sudut kemiringan panel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi atap dan fasad utara adalah yang paling optimal untuk pengoperasian fotovoltaik, dengan produksi daya tertinggi sekitar 120 Watt untuk posisi atap dan 110 Watt untuk fasad utara. Sisi timur menghasilkan daya optimal di pagi hari, sedangkan sisi barat lebih efisien pada sore hari. Sudut kemiringan 30° dan 45° terbukti paling efektif untuk menghasilkan daya maksimal. Integrasi estetis pada fasad dengan kemiringan 60° juga dinilai memberikan nilai visual yang baik bagi bangunan. Penelitian ini memberikan rekomendasi spesifik terkait orientasi, waktu operasi, dan konfigurasi sudut kemiringan yang optimal untuk memaksimalkan kinerja energi dari sistem fotovoltaik dalam desain bangunan tropis.

Kata kunci : Bangunan Bertingkat Rendah; BIPV; Energi; Fotovoltaik; Metode Eksperimental

Abstract The significant problem of greenhouse gas emissions from the building sector, contributes more than a third of global emissions and around 40% of world energy consumption. One solution offered to overcome this problem is the integration of photovoltaic systems in building design. Photovoltaic technology allows the conversion of solar energy into electricity, thereby reducing dependence on non-renewable energy and minimizing CO₂ emissions. This study was conducted using an experimental method, in the form of direct testing, to assess the performance of a monocrystalline photovoltaic system, which was integrated into buildings with various orientations and tilt angles. The research was conducted in Surabaya, as one of the cities with high intensity of sunlight in a tropical climate area, by testing photovoltaic panels installed in five positions, namely on the roof, and the facades on the north, east, south, and west sides. Data were collected by measuring voltage, current, power, temperature, and sunlight intensity during the irradiation period between 07.00 and 17.00 WIB. The main variables tested were irradiation time, orientation of the direction of the face, and the tilt angle of the panel. The results showed that the roof position and the north facade are the most optimal for photovoltaic operation, with the highest power production of around 120 Watts for the roof position and 110 Watts for the north facade. The east side produces optimal power in the morning, while the west side is more efficient in the afternoon. The slope angles of 30° and 45° proved to be the most effective for producing maximum power. The aesthetic integration of the facade with a slope of 60° is also considered to provide good visual value for the building. This study provides specific recommendations regarding the optimal orientation, operating time, and slope angle configuration to maximize the energy performance of the photovoltaic system in tropical building designs.

164 **Keywords:** BIPV; Energy; Low Rise Building; Photovoltaic; Experimental Method

Copyright 2024 © the Author(s)

Creative Commons License. [This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



PENDAHULUAN

Pembangunan yang terus bertambah menimbulkan sejumlah permasalahan lingkungan, tak terkecuali emisi gas rumah kaca (Li et al., 2020). Sektor bangunan menyumbang lebih dari sepertiga emisi gas rumah kaca dan mengkonsumsi sekitar 40% total energi di dunia. (Dehwah et al., 2020). Sejumlah negara maju sedang bertransformasi untuk meningkatkan kinerja energi dan lingkungan, salah satunya melalui fotovoltaik. Fotovoltaik merupakan teknologi yang solutif dalam memproduksi energi alternatif, yang memungkinkan konversi langsung sinar matahari menjadi listrik (Dehwah et al., 2020). Sifat sistem tenaga surya yang terdesentralisasi memungkinkan konsumen untuk dapat menghasilkan sendiri listriknya (Khan et al., 2017). Fotovoltaik dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi tak terbarukan dan mitigasi perubahan iklim dengan menyediakan sumber listrik yang tidak mengeluarkan CO₂ selama pengoperasiannya (Celadyn & Filipek, 2020). Fotovoltaik pun diakui sebagai salah satu solusi paling efisien untuk mengatasi konsumsi sumber daya yang berlebihan, pencemaran lingkungan, dan kerusakan ekologi (Song et al., 2018). Oleh karena itu, fotovoltaik mampu mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Yun et al., 2007).

Sejauh ini, kajian mengenai fotovoltaik seringkali cenderung membahas mengenai fotovoltaik dari sisi sudut pandang keilmuan Teknik Elektro seperti penelitian Akpolat et al., (2019) dan Kumar Behura dkk (2021). Ada pula kajian fotovoltaik terkait dengan unsur perkotaan seperti pada tulisan dari Gassar & Cha (2021), Karteris dkk (2014) serta Joshi dkk (2021). Pembahasan mengenai fotovoltaik dalam kaitannya terhadap keilmuan arsitektur, kini mulai berkembang, meskipun jumlahnya terbatas. Celadyn & Filipek (2020) menyebutkan bahwa fotovoltaik memiliki potensi yang signifikan untuk diintegrasikan ke dalam selubung bangunan. Selain menjadi sumber energi terbarukan, fotovoltaik juga memberi berbagai manfaat fungsional lainnya seperti perlindungan terhadap cuaca, memberi naungan terhadap matahari, dan memberikan privasi. Penting pula untuk mempertimbangkan kinerja energi, efisiensi material, dan integrasi arsitektur ketika memilih sistem fotovoltaik untuk bangunan. Attoye et al., (2017) juga menyebutkan bahwa fotovoltaik yang disusun dengan mekanisme *Building Integrated Photovoltaic (BIPV)*, cenderung bisa mengatasi persoalan estetika, integrasi arsitektur serta kinerja energi, dibandingkan dengan fotovoltaik yang tidak terintegrasi. *BIPV* dapat diintegrasikan ke dalam berbagai komponen bangunan, seperti atap maupun fasad. Fotovoltaik juga dapat diintegrasikan dengan atap hijau guna meningkatkan pendinginan lokal dan mengurangi polusi (Dimond & Webb, 2017). Penerapan fotovoltaik dalam arsitektur perlu mempertimbangkan parameter spasial dan teknis bangunan, untuk mencapai efisiensi energi sistem fotovoltaik yang diinginkan (Frontini et al., 2014).

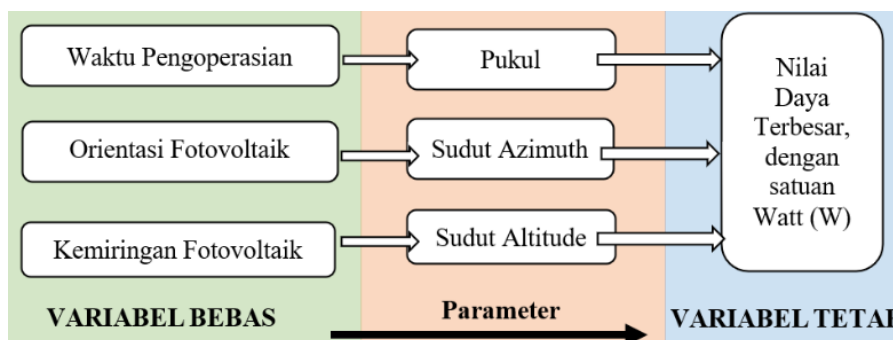
Inovasi-inovasi terkait integrasi fotovoltaik di bidang arsitektur pada berbagai negara pun terus dikembangkan, seperti penelitian dari Jayathissa dkk (2018) yang menggunakan perangkat lunak Pemodelan geometris untuk mensinergikan aspek kekuatan struktural, kinerja energi, dan estetika visual di Swiss, Martín-Chivelet dkk (2018) yang mengintegrasikan fotovoltaik ke dalam fasad berventilasi, serta Tablada dkk (2020) yang merekomendasikan fasad produktif di Singapura. Dalam tataran teknis, ada juga penelitian yang membahas perkiraan potensi cahaya matahari pada sistem fotovoltaik di atap wilayah perkotaan Bangkok, Thailand (Ninsawat & Hossain, 2016). Bahkan ada juga yang membahas daftar referensi lengkap untuk mengeksplorasi lebih jauh mengenai penghitungan radiasi matahari dan optimalisasi sudut panel surya (Song dkk 2018). Seperti penelitian milik Zhong dkk (2021) di China, penelitian milik Khan dkk (2017) dan Dehwah dkk (2020) di Saudi Arabia, penelitian milik Mokhtara dkk (2021) di Aljazair, serta penelitian milik Yuan dkk (2016) di Jepang. Akan tetapi dari sejumlah artikel yang ada, pembahasan mengenai integrasi

fotovoltaik pada bangunan hanya ditemukan di negara-negara di luar Indonesia. Padahal penerapan fotovoltaik di iklim panas lembab seperti di Indonesia, dihadapkan pada peluang dan tantangan yang unik. Tingginya tingkat radiasi matahari dapat menghasilkan potensi pembangkitan energi yang signifikan untuk sistem fotovoltaik. Namun, suhu lingkungan yang terlalu tinggi juga dapat menurunkan efisiensi panel fotovoltaik (Dehwah & Asif, 2019).

Penelitian yang sebelumnya ada di Indonesia cenderung tulisan-tulisan yang bersifat konseptual (Priatman, 2000), literatur review berdasarkan kondisi gambaran iklim di luar negeri (Fiqi Rizal, 2008), atau penelitian yang berbasis simulasi (Orhon, 2016). Maka posisi penelitian kali ini diharapkan lebih memberi gambaran teknis mengenai penerapan fotovoltaik pada bangunan karena dilakukan melalui observasi, percobaan serta pengukuran secara langsung. Berdasarkan paparan di atas, maka penting untuk melakukan penelitian terkait integrasi sistem fotovoltaik dalam rancangan bangunan bertingkat rendah untuk meningkatkan kinerja energi, khususnya di area beriklim tropis seperti di Indonesia.

METODE

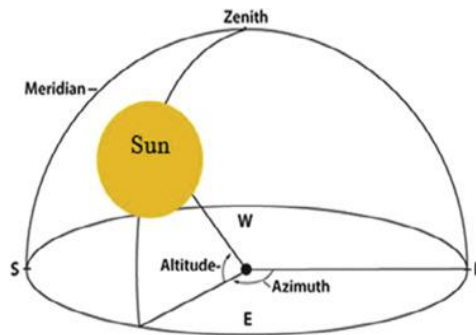
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Metode eksperimental merupakan metode yang mencari pengaruh satu aspek terhadap aspek lainnya, dengan mencari hubungan sebab akibat antara variabel bebas dengan variabel terikat (Xiang & Matusiak, 2019). Dalam konteks fotovoltaik, aspek-aspek yang mempengaruhi kinerja fotovoltaik ketika diintegrasikan ke dalam bangunan ialah : (1) waktu pengoperasian, di mana suhu fotovoltaik pada waktu-waktu tertentu dapat mempengaruhi efisiensinya (Yun dkk, 2007); (2) orientasi arah hadap fotovoltaik dan (3) kemiringan fotovoltaik, yang mampu memaksimalkan perolehan sinar matahari dan menghindari bayangan dari bangunan dan vegetasi di sekitarnya (Dimond & Webb, 2017). Ketiga aspek inilah yang dijadikan variabel bebas dalam penelitian ini, sedangkan variabel tetapnya adalah nilai daya fotovoltaik. Parameter yang digunakan untuk menguji waktu pengoperasian adalah pukul / jam, sedangkan orientasi fotovoltaik diukur dengan sudut azimuth dan kemiringan fotovoltaik diukur dengan sudut altitude. Untuk nilai daya fotovoltaik, diukur dengan satuan watt. Hal tersebut ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Hubungan Variabel Bebas Terhadap Variabel Tetap Penelitian
Sumber: Peneliti (2024)

Parameter yang digunakan untuk menunjukkan orientasi dan kemiringan fotovoltaik, menggunakan satuan sudut. Sudut yang dimaksud ialah sudut azimuth dan sudut altitude. Sudut azimuth dan sudut altitude adalah dua parameter penting dalam sistem koordinat langit yang digunakan untuk menentukan posisi panel fotovoltaik (Murgul et al., 2015). Sudut azimuth

merupakan sudut yang diukur di sepanjang cakrawala dalam arah searah jarum jam, mulai dari utara (0°), melalui timur (90°), selatan (180°), dan barat (270°), hingga kembali ke utara (360°). Sedangkan sudut altitude adalah sudut yang diukur dari cakrawala (0°) ke titik langsung di atas kepala (zenith, 90°).



Gambar 2. Sudut Azimuth dan Sudut Altitude
Sumber: ars.els-cdn.com (2022)

Untuk mengetahui daya yang menjadi variabel terikat, dihitung dengan menggunakan rumus $P = V \times I$, di mana P adalah daya dengan satuan Watt (W), V adalah tegangan dengan satuan Volt (V) dan I adalah arus dengan satuan Ampere (A). Dengan data nilai tegangan dan arus yang didapat dari *charge controller*, maka nilai daya akan bisa dihitung dengan menggunakan rumus tersebut.

Fotovoltaik yang digunakan berjenis monokristal dengan daya maksimum sebesar 50 Watt untuk tiap panelnya. Fotovoltaik diletakkan di ruang yang terbuka, tanpa penghalang atau elemen pembayang, untuk dapat memaksimalkan penerimaan cahaya matahari. Dimensi dari fotovoltaik sebesar 40 x 67 x 2,5 cm, dengan berat 2,5 kg. Jenis ini dipilih karena dimensinya yang tidak terlalu besar, bobotnya yang relatif ringan, dengan daya maksimum yang besar, sehingga mempermudah dalam proses pengintegrasian pada bangunan. Jumlah panel yang digunakan dalam penelitian ini ialah 2 panel fotovoltaik.

Selain panel fotovoltaik, komponen rangkaian juga terdiri atas *charge controller* untuk mengontrol aliran arus masuk dari fotovoltaik ke baterai, baterai sebagai media untuk menyimpan energi yang diterima, serta inverter yang berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi listrik AC.






Pengambilan data uji dilakukan dengan sistem pengujian parsial (*partial testing*). Pengujian parsial merujuk pada metode pengujian di mana setiap parameter diuji secara terpisah. Penelitian dilakukan di kota Surabaya Timur, yang berada dekat dengan Stasiun Meteorologi Juanda. Pengujian dilakukan selama 1 hari penuh untuk masing-masing aspek, dalam kondisi cuaca cerah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Luaran Daya Fotovoltaik Terhadap Waktu

Pengujian luaran daya fotovoltaik terhadap waktu, membutuhkan keteraturan dan pengamatan selama periode waktu tertentu. Pengukuran yang dilakukan setiap jam dapat membantu mengidentifikasi bagaimana perubahan intensitas matahari mempengaruhi kinerja fotovoltaik. Pada rangkaian awal penelitian, pengujian dilakukan dengan menempatkan dua panel fotovoltaik secara sejajar pada setiap sisi bangunan. Terdapat 5 area yang digunakan, yaitu (1) sisi atas pada bagian atap; (2) sisi fasad utara bangunan; (3) sisi fasad timur bangunan; (4) sisi fasad barat bangunan; serta (5) sisi selatan bangunan.

Tabel 1. Penempatan panel fotovoltaik dalam pengujian terhadap waktu

No	Sisi Penempatan Fotovoltaik	Sudut Azimuth	Sudut Altitude	Ilustrasi Pemasangan
1	Atap - Atas	-	90°	
2	Fasad - Utara	0°	0°	
3	Fasad - Timur	90°	0°	
4	Fasad - Selatan	180°	0°	
5	Fasad - Barat	270°	0°	

Sumber : Peneliti (2024)

Selanjutnya dilakukan pengukuran setiap 1 jam selama periode efektif penyinaran matahari, yaitu antara pukul 07.00 – 17.00 WIB. Pengukuran selalu terjadi dalam kondisi langit cerah.

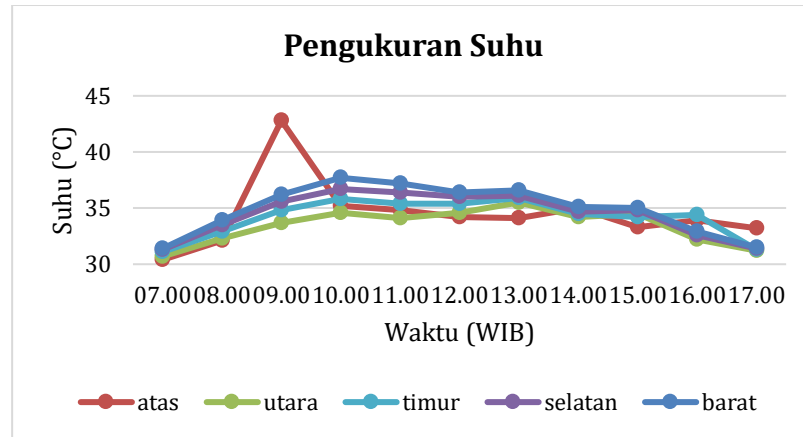
Tabel 2. Hasil pengujian luaran panel fotovoltaik terhadap waktu

No.	Sisi Penempatan Fotovoltaik	Waktu (WIB)	Suhu (°C)	Nilai Tegangan (Volt)	Nilai Arus (Ampere)	Daya (Watt)	Intensitas Cahaya Matahari (Lux)
1	Atas	07.00	30,4	12,2	0,3	3,66	31.680
		08.00	32,1	12,9	0,9	11,61	81.060
		09.00	42,8	13,0	1,5	19,50	107.200
		10.00	35,2	13,7	1,8	24,66	100.600
		11.00	34,8	13,7	1,3	17,81	120.900
		12.00	34,2	13,7	1,2	16,44	133.300
		13.00	34,1	13,8	0,8	11,04	122.600
		14.00	35,0	13,7	0,7	9,59	125.000
		15.00	33,3	13,7	0,6	8,22	64.760
		16.00	33,9	13,2	0,1	1,32	13.640
2	Fasad - Utara	17.00	33,2	12,7	0,0	0,00	1.704
		07.00	30,7	12,9	0,5	6,45	40.440
		08.00	32,3	13,2	1,4	18,48	81.290
		09.00	33,7	13,7	1,1	15,07	84.090
		10.00	34,6	12,2	1,3	15,86	68.040
		11.00	34,1	12,7	1,4	17,78	77.990
		12.00	34,6	12,7	1,3	16,51	48.260
		13.00	35,5	12,9	1,2	15,48	38.020
		14.00	34,2	12,6	0,7	8,82	21.940
		15.00	34,5	12,6	0,5	6,30	22.880
3	Fasad - Timur	16.00	32,2	12,6	0,0	0,00	5.596
		17.00	31,2	12,4	0,0	0,00	2.042
		07.00	31,1	12,9	0,5	6,45	48.610
		08.00	32,9	13,3	1,3	17,29	79.680
		09.00	34,8	13,7	1,2	16,44	81.310
		10.00	35,8	12,3	0,9	11,07	33.280
		11.00	35,4	12,6	0,3	3,78	17.100
		12.00	35,4	12,6	0,0	0,00	14.280
		13.00	35,9	12,8	0,0	0,00	13.480
		14.00	34,5	12,7	0,0	0,00	10.210
4	Fasad - Selatan	15.00	34,2	12,6	0,0	0,00	8.950
		16.00	34,4	12,6	0,0	0,00	4.930
		17.00	31,3	12,4	0,0	0,00	1.872
		07.00	31,3	12,8	0,0	0,00	6.557
		08.00	33,5	13,0	0,0	0,00	10.640
		09.00	35,6	13,1	0,0	0,00	12.150
		10.00	36,7	12,2	0,0	0,00	11.480
		11.00	36,4	12,4	0,0	0,00	10.070
		12.00	36,0	12,6	0,0	0,00	10.320
		13.00	36,1	12,7	0,0	0,00	10.960
5	Fasad - Barat	14.00	34,7	12,6	0,0	0,00	5.592
		15.00	34,8	12,6	0,0	0,00	4.033
		16.00	32,6	12,4	0,0	0,00	2.320
		17.00	31,4	12,4	0,0	0,00	846
		07.00	31,4	12,7	0,0	0,00	5.943
		08.00	33,9	12,9	0,0	0,00	10.480
		09.00	36,2	13,0	0,0	0,00	10.620
		10.00	37,7	12,2	0,0	0,00	8.002
		11.00	37,2	12,4	0,1	1,24	21.350
		12.00	36,4	12,7	0,8	10,16	29.170
13.00	36,6	12,8	1,4	17,92	72.730		
14.00	35,1	12,8	1,9	24,32	119.500		
15.00	35,0	12,8	1,8	23,04	116.300		
16.00	32,9	12,7	0,8	10,16	39.740		
17.00	31,5	12,4	0,0	0,00	3.432		

Sumber : Peneliti (2024)

1. Pengaruh Waktu Penyinaran Matahari Terhadap Suhu Fotovoltaik

Waktu penyinaran matahari berhubungan langsung dengan suhu panel fotovoltaik. Rangkuman tampilan suhu fotovoltaik dari 5 sisi ditunjukkan pada Gambar 3.

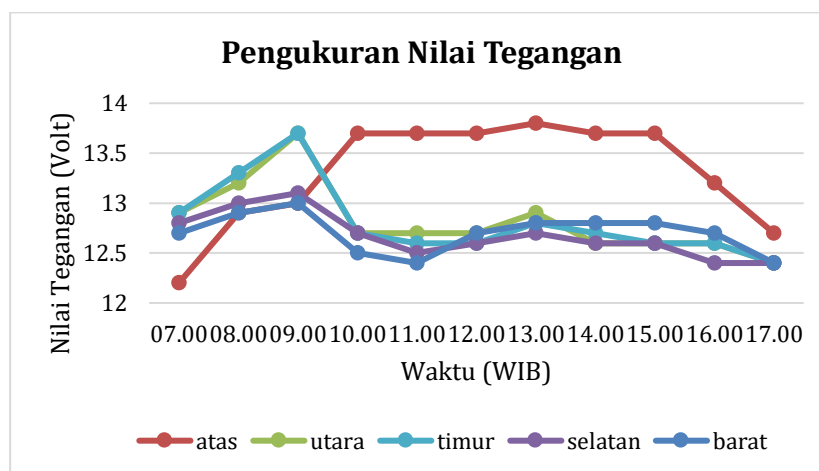


Gambar 3. Pengukuran Suhu Panel Fotovoltaik dari Semua Arah Terhadap Waktu Penyinaran Matahari
Sumber: Peneliti (2024)

Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa sisi atas (atap) mencatat suhu tertinggi pada pagi hari sekitar pukul 08:00. Sisi utara dapat digunakan untuk menjaga suhu lebih rendah dalam kondisi iklim yang sangat panas. Sisi timur dan Selatan menunjukkan suhu yang stabil dan tinggi dari pukul 09:00 hingga 15:00, periode dengan intensitas sinar matahari optimal. Sisi barat juga ideal untuk pengoperasian pada sore hari, khususnya antara pukul 12:00 dan 16:00. Suhu fotovoltaik bervariasi sepanjang hari mengikuti perubahan intensitas cahaya matahari, meningkat dari pagi hingga siang hari dan menurun saat matahari mulai terbenam.

2. Pengaruh Waktu Penyinaran Matahari Terhadap Nilai Tegangan Fotovoltaik

Waktu penyinaran matahari berhubungan dengan nilai tegangan fotovoltaik. Dikarenakan tegangan yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik bergantung pada intensitas cahaya matahari yang diterima. Untuk mengetahui hubungannya secara spesifik dari kelima sisi ditunjukkan pada Gambar 4.

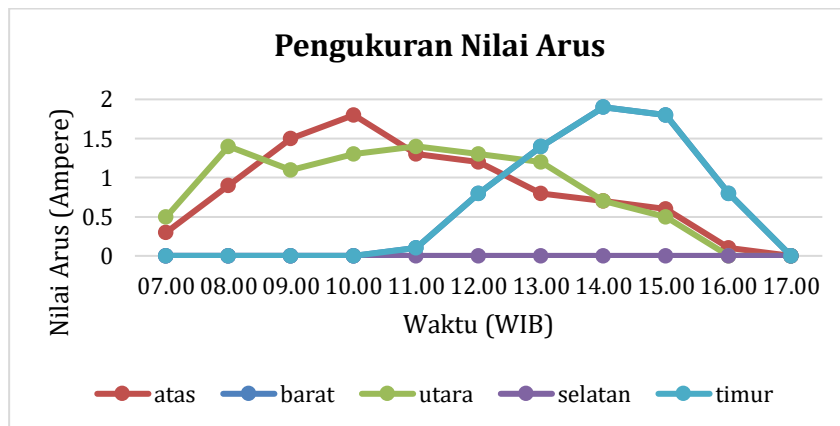


Gambar 4. Pengukuran Nilai Tegangan Panel Fotovoltaik dari Semua Arah Terhadap Waktu Penyinaran Matahari
Sumber: Peneliti (2024)

Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa waktu optimal untuk pengoperasian fotovoltaik adalah dari pukul 09:00 hingga 15:00, ketika intensitas cahaya matahari cukup tinggi dan tegangan yang dihasilkan oleh panel berada pada kisaran yang stabil dan optimal. Sisi atas menunjukkan kinerja yang baik pada pagi hari tetapi mengalami penurunan yang signifikan setelah puncaknya. Meskipun demikian, sisi ini tetap menghasilkan tegangan stabil di siang hari. Sisi timur optimal pada pagi hari hingga sekitar pukul 09:00 karena menghasilkan tegangan tertinggi pada saat ini. Sisi selatan stabil sepanjang hari, membuatnya cukup optimal untuk pengoperasian fotovoltaik sepanjang hari. Sisi barat optimal pada siang hingga sore hari, terutama setelah pukul 12:00 hingga 15:00, karena ini adalah waktu ketika tegangan stabil dan tinggi di sisi ini.

3. Pengaruh Waktu Penyinaran Matahari Terhadap Nilai Arus Fotovoltaik

Waktu penyinaran matahari berhubungan dengan nilai arus fotovoltaik. Untuk mengetahui hubungannya secara spesifik dari kelima sisi ditunjukkan pada Gambar 5.



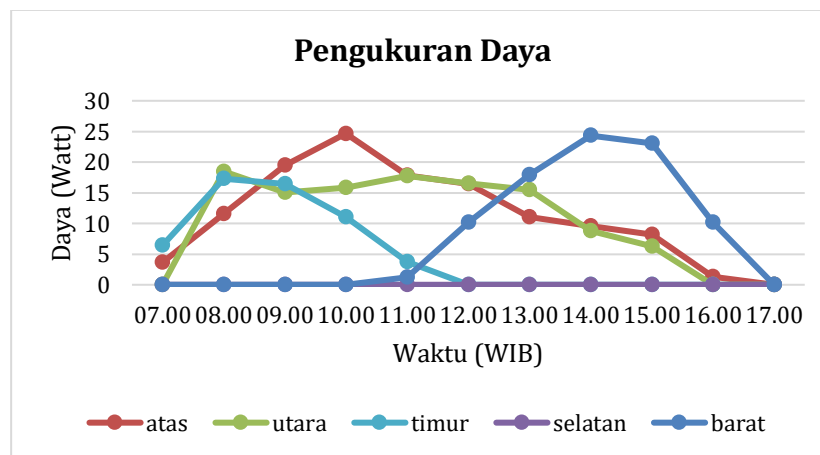
Gambar 5. Pengukuran Nilai Arus Panel Fotovoltaik dari Semua Arah Terhadap Waktu Penyinaran Matahari
Sumber: Peneliti (2024)

Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa sisi atas paling optimal dari pukul 07:00 hingga sekitar pukul 11:00. Setelah itu, arus menurun secara bertahap. Sisi utara efektif pada pagi hari hingga menjelang siang, dengan arus puncak sekitar pukul 09:00-10:00. Pengoperasian fotovoltaik di sisi ini optimal dari pukul 07:00 hingga sekitar pukul 12:00. Sisi timur optimal pada pagi hari antara pukul 07:00 hingga sekitar pukul 09:00. Panel di sisi ini paling efektif ketika matahari terbit dan arus maksimum dicapai pada pukul 08:00-09:00. Pada sisi selatan arus yang dihasilkan oleh panel di sisi selatan sangat rendah sepanjang hari, mendekati nol, menunjukkan bahwa sisi ini tidak mendapatkan cukup sinar matahari untuk menghasilkan arus yang signifikan. Sisi barat optimal pada siang hingga sore hari, terutama dari pukul 12:00 hingga 15:00, dengan arus puncak pada pukul 14:00. Ini membuat sisi barat ideal untuk menghasilkan arus di sore hari.

4. Pengaruh Waktu Penyinaran Matahari Terhadap Luaran Daya Fotovoltaik

Waktu penyinaran matahari berhubungan dengan luaran daya fotovoltaik. Untuk mengetahui hubungannya secara spesifik dari kelima sisi ditunjukkan pada Gambar 6. Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik selalu

berbeda jika diukur pada waktu yang berbeda pula. Daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik yang menghadap sisi atas cenderung bersifat hirarkis. Puncak daya tertinggi hingga mencapai 25 watt terjadi pada pukul 10.00 WIB. Sedangkan nilai daya terendah dengan nilai ≤ 10 watt, terjadi pada pukul 08.00 WIB ke bawah dan di atas pukul 15.00 WIB. Daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik yang menghadap sisi utara cenderung bersifat stabil dengan luaran daya 14-16 watt pada rentang waktu sejak pukul 08.00 – 13.00 WIB. Di luar itu, nilai dayanya akan menurun. Daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik yang menghadap sisi timur cenderung tinggi sebesar 11-17 watt hanya pada pukul 08.00 - 10.00 WIB, yang merupakan waktu saat terbitnya matahari. Setelahnya daya menurun tajam, bahkan pada pukul 12.00 – 17.00 WIB dayanya bernilai 0 watt. Daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik yang menghadap sisi selatan konstan berada di angka 0 watt pada semua jam pengukuran, baik sejak pukul 07.00 – 17.00 WIB. Hal ini terjadi karena panel fotovoltaik cenderung membelakangi posisi matahari, jika didasarkan pada lokasi Surabaya sebagai lokasi penelitian, yang ada di sisi selatan equator. Untuk daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik yang menghadap sisi barat cenderung tinggi sebesar 10-25 watt hanya pada pukul 12.00 - 16.00 WIB, yang merupakan waktu saat matahari akan tenggelam. Sebelum itu dayanya amat rendah, bahkan pada pukul 07.00 – 10.00 WIB dayanya bernilai 0 watt.



Gambar 6. Nilai Daya Fotovoltaik dari Semua Arah Hadap Penempatan Fotovoltaik Terhadap Waktu
Sumber: Peneliti (2024)

5. Rekomendasi Waktu Pengoperasian Fotovoltaik

Efisiensi fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh intensitas penyinaran matahari. Memahami kapan penyinaran matahari paling intens di lokasi tertentu sangat penting untuk menentukan waktu pengoperasian fotovoltaik yang paling efektif. Hal ini bertujuan untuk memperoleh daya yang paling tinggi, dengan memperhatikan faktor suhu, tegangan dan arus, sesuai dengan dasar data yang ada pada Tabel 2. Tabel 3 dibuat dengan tujuan untuk mempermudah pemahaman mengenai bagaimana optimalisasi penggunaan fotovoltaik dari segi waktu dan lokasi penempatan. Pemberian tanda centang pada tabel didasarkan pada posisi nilai daya terhadap rata-rata daya luaran fotovoltaik secara keseluruhan yang ada di Tabel 2. Dari tabel tersebut ditemukan bahwa rata-rata luaran daya dalam per jam per hari ialah 6,90 watt. Sehingga angka-angka yang berada di atas nilai rata-rata tersebut, dianggap efektif dan dapat direkomendasikan sebagai waktu optimal untuk pengoperasian fotovoltaik.

Tabel 3. Tabulasi Waktu Optimal Penggunaan Fotovoltaik Berdasarkan Posisi Penempatan

Pukul (WIB)	Posisi Penempatan				
	Atas	Utara	Timur	Selatan	Barat
08:00	✓	✓	✓		
09:00	✓	✓	✓		
10:00	✓	✓	✓		
11:00	✓	✓			
12:00	✓	✓			✓
13:00	✓	✓			✓
14:00	✓	✓			✓
15:00	✓				✓
16:00					✓

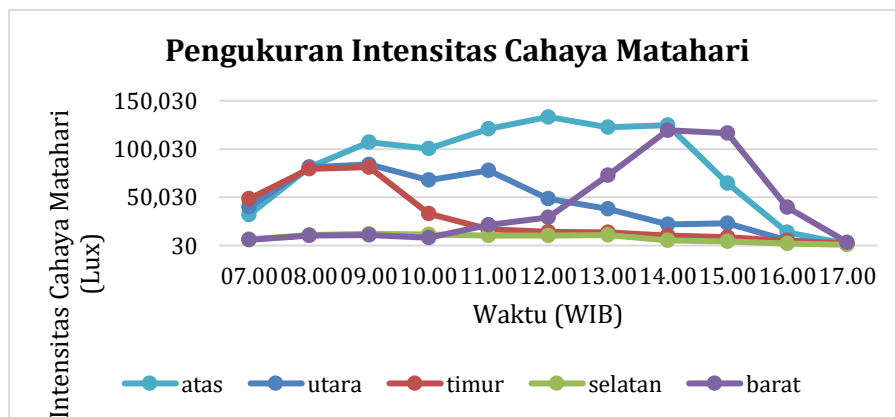
Sumber : Peneliti (2024)

B. Pengujian Luaran Daya Fotovoltaik Terhadap Orientasi Arah Hadap

Pengujian luaran daya fotovoltaik terhadap orientasi arah hadap memiliki urgensi dalam memastikan optimalisasi kinerja fotovoltaik. Bagan alur kerjanya ditunjukkan pada Gambar 8.

1. Pengaruh Waktu Penyinaran Matahari Terhadap Intensitas Cahaya Matahari yang Diterima oleh Fotovoltaik

Pengaruh waktu penyinaran matahari terhadap intensitas cahaya yang diterima oleh fotovoltaik sangat penting dalam menentukan daya yang dihasilkan. Grafik pengujian tingkat intensitas penyinaran matahari pada fotovoltaik di kelima sisi ditunjukkan pada Gambar 7.

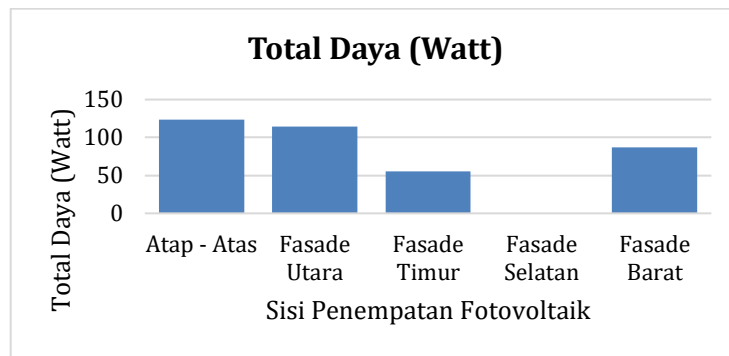


Gambar 7. Nilai Intensitas Cahaya Matahari dari Panel Fotovoltaik yang Menghadap ke Segala Sisi Terhadap Waktu
Sumber: Peneliti (2024)

Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa sisi atas memiliki intensitas cahaya tertinggi sepanjang hari, menjadikannya posisi paling efisien untuk penyerapan sinar matahari. Sisi timur adalah yang paling optimal untuk menangkap sinar matahari di pagi hari, sementara sisi barat di sore hari. Sisi utara dan sisi selatan memiliki intensitas cahaya yang lebih rendah.

2. Rekomendasi Arah Hadap Pemasangan Fotovoltaik

Menghitung total daya yang dihasilkan dari setiap sisi pemasangan fotovoltaik, dilakukan untuk menentukan arah penempatan panel yang paling efisien. Total daya didapatkan dari penjumlahan angka yang ada di Tabel 2. Informasi mengenai total daya yang dimaksud, ditunjukkan pada Gambar 8.








Gambar 8. Total Daya Fotovoltaik dari Setiap Sisi Sepanjang Hari
Sumber: Peneliti (2024)

Grafik ini menunjukkan total daya yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik sepanjang hari saat dipasang sejajar dengan dinding. Panel fotovoltaik yang dipasang di atas (atap) menunjukkan kinerja terbaik dengan menghasilkan daya tertinggi sekitar 120 watt. Panel yang dipasang di fasad utara juga memberikan hasil yang cukup baik, mendekati panel di atap dengan daya sekitar 110 watt. Sebaliknya, panel yang dipasang di fasad timur menghasilkan daya yang lebih rendah, yaitu sekitar 60 watt. Panel di fasad selatan tidak menghasilkan daya. Sementara itu, panel yang dipasang di fasad barat menghasilkan daya sekitar 80 watt.

C. Pengujian Luaran Daya Fotovoltaik Terhadap Derajat Kemiringan Posisi Pemasangan

Pengujian luaran daya fotovoltaik terhadap derajat kemiringann pemasangan memiliki urgensi yang sangat penting dalam mengoptimalkan kinerja fotovoltaik. Ilustrasi pemasangan fotovoltaik dengan sejumlah variasi kemiringan pemasangan, yang diterapkan ke semua sisi arah hadap, ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Penempatan Panel Fotovoltaik dalam Pengujian Terhadap Kemiringan Pemasangan Fotovoltaik

Sudut Altitude	0°	30°	45°	60°	90°
Ilustrasi Pemasangan					

Sumber : Peneliti (2024)

Pengujian dilakukan pada 4 sisi arah hadap yaitu arah utara dengan sudut azimuth 0°, arah timur dengan sudut azimuth 90°, arah selatan dengan sudut azimuth 180° dan arah timur dengan sudut azimuth 270°. Masing-masing dari keempat arah hadap tersebut dimiringkan dengan sudut altitude yang bervariasi yaitu sebesar 0° (posisi horisontal mendatar), 30°, 45°, 60°, serta 90° (posisi vertikal / tegak). Untuk pengujian dengan sudut altitude 0° (posisi horisontal mendatar), 30° dan 45°, diasumsikan sebagai fungsi atap karena memiliki standar kemiringan yang serupa. Sedangkan untuk pengujian dengan sudut altitude 60° dan 90° difungsikan sebagai fotovoltaik yang memiliki posisi di fasad karena cenderung tegak dan tidak terlalu memakan tempat. Terdapat 20 pengujian yang dilakukan selama 9 jam, sehingga total ada 180 pengujian.

1. Pengaruh Sudut Kemiringan Fotovoltaik Terhadap Besar Luaran Daya Fotovoltaik

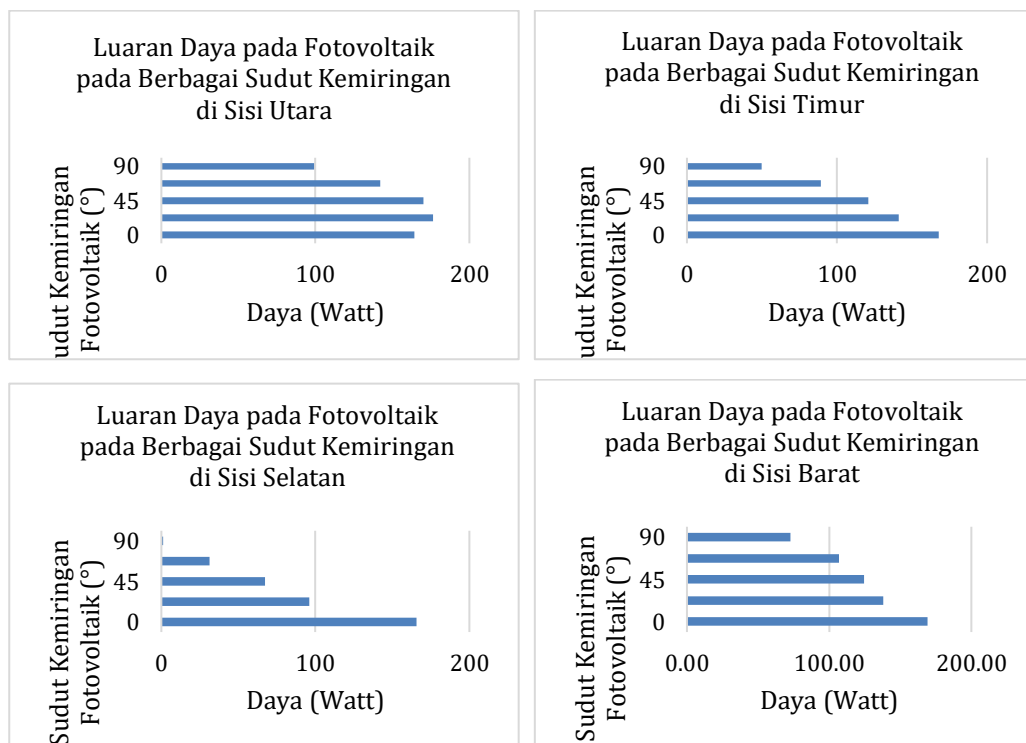
Tabel 4 menunjukkan luaran daya dari panel fotovoltaik yang dipasang dengan 5 variasi kemiringan yaitu sebesar 0°, 30°, 45°, 60° 90°.

Tabel 5. Tabulasi luaran daya dari fotovoltaik yang dipasang pada 4 arah dengan 5 variasi kemiringan

Sudut Altitude (°)	Sudut Azimuth (°)			
	0	90	180	270
0	164,23	167,79	165,50	169,06
30	176,5	141,04	96,90	137,93
45	170,05	120,69	67,47	124,53
60	142,12	89,08	31,31	106,95
90	99,32	49,76	1,26	72,84

Sumber : Peneliti (2024)

Data yang ada di Tabel 5 selanjutnya ditransformasikan ke dalam data grafik.



Gambar 9. Total luaran Daya dari Panel Fotovoltaik yang Dipasang di Sisi Barat Bangunan dengan 5 Variasi Kemiringan yaitu Sebesar 0°, 30°, 45°, 60° serta 90°

Sumber: Peneliti (2024)

2. Rekomendasi Sudut Kemiringan Fotovoltaik

Rekomendasi sudut kemiringan fotovoltaik terbaik berdasarkan arah hadap posisi penempatan untuk menghasilkan daya tertinggi :

- a. Fotovoltaik yang menghadap ke utara

Pada sisi arah hadap ini, fotovoltaik memberikan performa yang paling baik di antara arah hadap yang lain, karena cenderung menghasilkan daya yang tertinggi pada seluruh variasi sudut kemiringan pemasangan (0°, 30°, 45°, 60°, serta 90°). Pada arah hadap ini, fotovoltaik dapat ditempatkan pada atap maupun pada fasad.

- b. Fotovoltaik yang menghadap ke timur dan barat
Fotovoltaik pada arah hadap timur dan barat memberikan performa yang hampir sama. Menghasilkan daya yang cukup baik, namun dengan tingkatan jumlah daya di bawah sisi utara. Pada kedua sisi ini fotovoltaik dapat dipasang di atap maupun di fasad. Hanya saja untuk penempatan pada fasade, terbatas pada sudut kemiringan altitude 60° saja.
- c. Fotovoltaik yang menghadap ke selatan
Pemasangan fotovoltaik pada sisi arah hadap selatan adalah yang paling minim potensinya. Sisi ini hanya dapat menghasilkan daya yang baik jika ditempatkan di atap, itupun dengan sudut kemiringan 0° dan 30° saja. Sisi ini juga sangat tidak direkomendasikan untuk diletakkan dengan tegak di fasad karena tidak dapat menghasilkan daya sama sekali.


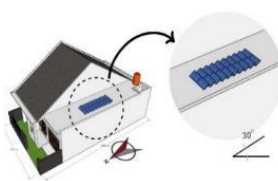



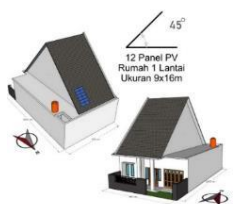
D. Rekomendasi Konfigurasi Penyusunan Fotovoltaik

Konfigurasi penyusunan fotovoltaik merupakan konsep yang berkaitan dengan bagaimana fotovoltaik disusun pada bangunan.

1. Konfigurasi Penyusunan Fotovoltaik Pada Atap

Konfigurasi penyusunan fotovoltaik pada atap adalah proses perencanaan dan pengaturan fotovoltaik pada permukaan atap untuk mengoptimalkan penyerapan sinar matahari. Tabel 6 menunjukkan variasi rencana penyusunan fotovoltaik pada atap, berdasarkan data-data penelitian yang sebelumnya didapat.

Tabel 6. Variasi rekomendasi penyusunan fotovoltaik pada atap

No	Jenis	Sudut Altitude Fotovoltaik (°)		
		0	30	45
1	Atap Datar	 <p>12 Panel PV di Atap Datar Rumah 1 Lantai Ukuran 6x16m</p>	 <p>30°</p>	
2	Atap Miring		 <p>30° 12 Panel PV Rumah 1 Lantai</p>	 <p>45° 12 Panel PV Rumah 1 Lantai Ukuran 6x16m</p>

Sumber : Peneliti (2024)

2. Konfigurasi Penyusunan Fotovoltaik Pada Fasad

Konfigurasi penyusunan fotovoltaik pada fasad adalah proses perencanaan dan pemasangan panel fotovoltaik pada permukaan vertikal bangunan, seperti dinding luar (fasad), untuk memaksimalkan penyerapan sinar matahari sekaligus mempertahankan arsitektural bangunan. Pemasangan fotovoltaik pada fasad, yang sering kali disebut sebagai *Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)*, memungkinkan fotovoltaik menjadi bagian integral dari desain bangunan dan bukan sekadar tambahan. Tabel 7 menunjukkan variasi rencana penyusunan fotovoltaik pada fasade.

Tabel 7. Variasi Rekomendasi Penyusunan Fotovoltaik pada Fasad

No	Jenis	Ilustrasi 1	Ilustrasi 2
1	<i>Awning System</i> - Sudut Altitude 60°		
2	<i>Curtain Wall</i> - Sudut Altitude 90°		

Sumber : Peneliti (2024)

KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam integrasi fotovoltaik pada bangunan bertingkat rendah di Indonesia, melalui pendekatan eksperimental yang membuktikan efektivitas panel fotovoltaik tipe monokristal dalam memanfaatkan potensi energi matahari. Penelitian ini menawarkan panduan teknis terkait waktu operasional, arah hadap, dan sudut kemiringan optimal fotovoltaik, yang sebelumnya jarang ditemukan pada studi-studi di Indonesia. Waktu pengoperasian optimal panel fotovoltaik adalah antara pukul 08:00 hingga 14:00 WIB karena intensitas cahaya matahari yang tinggi dan stabil pada rentang waktu tersebut. Dari segi arah hadap, posisi atap merupakan yang terbaik karena mendapatkan sinar matahari langsung sepanjang hari dengan total daya tertinggi hingga 120 Watt. Fasad utara menunjukkan hasil yang stabil mendekati kinerja atap dengan daya sekitar 110 Watt. Sudut kemiringan optimal untuk panel fotovoltaik adalah 30° hingga 45°, yang memberikan daya tertinggi di hampir semua arah hadap, khususnya di utara. Penelitian ini membuka peluang untuk aplikasi fotovoltaik yang lebih luas di iklim tropis, sekaligus rekomendasi desain bangunan berkelanjutan dan efisien energi.

DAFTAR REFERENSI

- Akpolat, A. N., Dursun, E., Kuzucuoğlu, A. E., Yang, Y., Blaabjerg, F., & Baba, A. F. (2019). Performance analysis of a Grid-connected rooftop solar photovoltaic system. *Electronics (Switzerland)*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/electronics8080905>
- Attoye, D. E., Aoul, K. A. T., & Hassan, A. (2017). A review on building integrated photovoltaic façade customization potentials. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9122287>
- Celadyn, W., & Filipek, P. (2020). Investigation of the effective use of photovoltaic modules in architecture. *Buildings*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10090145>
- Dehwah, A. H. A., & Asif, M. (2019). Assessment of net energy contribution to buildings by rooftop photovoltaic systems in hot-humid climates. *Renewable Energy*, 131, 1288–1299. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.031>
- Dehwah, A. H. A., Asif, M., Budaiwi, I. M., & Alshibani, A. (2020). Techno-economic assessment of rooftop PV systems in residential buildings in hot-humid climates. *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su122310060>

- Dimond, K., & Webb, A. (2017). Sustainable roof selection: Environmental and contextual factors to be considered in choosing a vegetated roof or rooftop solar photovoltaic system. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 35, pp. 241–249). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.015>
- Fiqi Rizal, M. (2008). *Penerapan Panel Fotovoltaik Terintegrasi pada Fasad dan Atap Application Of Integrated Photovoltaics Panel In Façade And Roof*.
- Frontini, F., Bonomo, P., Scognamiglio, A., Polo Lopez, C., Frontini, F., Bonomo, P., & Scognamiglio, A. (2014). *PV And Façade Systems For The Building Skin. Analysis of Design Effectiveness And Technological Features*. www.schueco.com
- Gassar, A. A. A., & Cha, S. H. (2021). Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116817>
- Jayathissa, P., Caranovic, S., Hofer, J., Nagy, Z., & Schlueter, A. (2018). Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture. *Automation in Construction*, 93, 339–347. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.013>
- Joshi, S., Mittal, S., Holloway, P., Shukla, P. R., Ó Gallachóir, B., & Glynn, J. (2021). High resolution global spatiotemporal assessment of rooftop solar photovoltaics potential for renewable electricity generation. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25720-2>
- Karteris, M., Theodoridou, I., Mallinis, G., & Papadopoulos, A. M. (2014). Façade photovoltaic systems on multifamily buildings: An urban scale evaluation analysis using geographical information systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 39, pp. 912–933). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.063>
- Khan, M. M. A., Asif, M., & Stach, E. (2017). Rooftop PV potential in the residential sector of the kingdom of Saudi Arabia. *Buildings*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/buildings7020046>
- Kumar Behura, A., Kumar, A., Kumar Rajak, D., Pruncu, C. I., & Lamberti, L. (2021). Towards better performances for a novel rooftop solar PV system. *Solar Energy*, 216, 518–529. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.045>
- Li, H. X., Zhang, Y., Edwards, D., & Hosseini, M. R. (2020). Improving the energy production of roof-top solar PV systems through roof design. *Building Simulation*, 13(2), 475–487. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0585-6>
- Martín-Chivelet, N., Gutiérrez, J. C., Alonso-Abella, M., Chenlo, F., & Cuenca, J. (2018). Building retrofit with photovoltaics: Construction and performance of a BIPV ventilated façade. *Energies*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/en11071719>
- Mokhtara, C., Negrou, B., Settou, N., Bouferrouk, A., & Yao, Y. (2021). Optimal design of grid-connected rooftop PV systems: An overview and a new approach with application to educational buildings in arid climates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101468>
- Murgul, V., Vatin, N., & Zayats, I. (2015). The role of the solar light quantity in the architectural forming of buildings. *Procedia Engineering*, 117(1), 819–824. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.146>
- Ninsawat, S., & Hossain, M. D. (2016). Identifying potential area and financial prospects of rooftop solar photovoltaics (PV). *Sustainability (Switzerland)*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/su8101068>
- Orhon, A. V. (2016). *A Review on Adaptive Photovoltaic Facades 0171-A Review On Adaptive Photovoltaic Facades*. <https://www.researchgate.net/publication/327776050>
- Priatman, J. (2000). Perspektif Arsitektur Surya di Indonesia. *DIMENSI TEKNIK ARSITEKTUR*, 28(1), 1–7.
- Song, X., Huang, Y., Zhao, C., Liu, Y., Lu, Y., Chang, Y., & Yang, J. (2018). An approach for estimating solar photovoltaic potential based on rooftop retrieval from remote sensing images. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/en11113172>
- Tablada, A., Kosorić, V., Huang, H., Lau, S. S. Y., & Shabunko, V. (2020). Architectural quality of the productive façades integrating photovoltaic and vertical farming systems: Survey among experts in Singapore. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 301–318. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.005>
- Xiang, C., & Matusiak, B. S. (2019). Façade Integrated Photovoltaic, state of the art of Experimental Methodology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 352(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012062>
- Yuan, J., Farnham, C., Emura, K., & Lu, S. (2016). A method to estimate the potential of rooftop photovoltaic power generation for a region. *Urban Climate*, 17, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.03.001>
- Yun, G. Y., McEvoy, M., & Steemers, K. (2007). Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade. *Solar Energy*, 81(3), 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.016>
- Zhong, T., Zhang, Z., Chen, M., Zhang, K., Zhou, Z., Zhu, R., Wang, Y., Lü, G., & Yan, J. (2021). A city-scale estimation of rooftop solar photovoltaic potential based on deep learning. *Applied Energy*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117132>