

Analisis Pengaruh Arah Angin terhadap Gaya Dorong dan Tekanan pada Panel Surya *Ground-Mounted*

Muhamad Zulfakar

Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji

Alamat: Jl. Raya Dompok, Dompok, Kec. Bukit Bestari, Kota Tanjungpinang, Kepulauan Riau

Corresponding author: muhamad.zulfakar@umrah.ac.id

Abstract. *Ground-mounted solar panels are directly exposed to environmental conditions, particularly wind, making structural design essential. While wind tunnel experiments have been a primary research method, they are costly and time-consuming. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations provide an efficient alternative by accurately modeling fluid-structure interactions, allowing for detailed aerodynamic analysis without physical testing. This study examines a solar panel configuration of 2×18 (1700×1200 mm panels) under a wind speed of 30 m/s at a height of 10 m. Wind direction variations (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°) significantly impact aerodynamic behavior. Drag Force analysis reveals that frontal wind (0°) generates the highest drag, while lateral wind (90°) has the least effect. Surface Pressure and Surface Coefficient (C_p) analysis indicate maximum pressure at 0°, where C_p values are highest, highlighting a pronounced pressure differential. At 90°, pressure distribution is more uniform, reducing aerodynamic impact. At 180°, rear-side pressure remains influential but lower than frontal exposure.*

Keywords: *Computational Fluid Dynamics (CFD), drag force, surface coefficient, surface pressure.*

Abstrak. Panel surya tipe *ground-mounted* secara langsung terpapar kondisi lingkungan, terutama angin, sehingga desain struktural menjadi aspek penting. Eksperimen terowongan angin telah lama menjadi metode penelitian utama, namun metode ini memiliki keterbatasan dari segi biaya dan waktu. Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menawarkan solusi lebih efisien dengan kemampuannya dalam memodelkan interaksi fluida-struktur secara akurat, memungkinkan analisis aerodinamika yang mendetail tanpa perlu pengujian fisik. Penelitian ini mengkaji konfigurasi panel surya 2×18 (dimensi panel 1700×1200 mm) dengan kecepatan angin 30 m/s pada ketinggian 10 m. Variasi arah angin (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°) memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik aerodinamika. Analisis gaya dorong menunjukkan bahwa angin frontal (0°) menghasilkan gaya tarik terbesar, sedangkan angin lateral (90°) memiliki dampak paling kecil. Analisis tekanan permukaan dan koefisien permukaan (C_p) menunjukkan bahwa tekanan maksimum terjadi pada 0°, dengan nilai C_p tertinggi, mengindikasikan perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi depan dan belakang panel. Pada sudut 90°, distribusi tekanan lebih merata, sehingga efek aerodinamika terhadap panel lebih kecil. Pada 180°, tekanan dari belakang masih berpengaruh tetapi lebih rendah dibandingkan angin frontal.

Kata kunci: *Computational Fluid Dynamics (CFD), gaya dorong, koefisien permukaan, tekanan permukaan.*

Received June 08, 2025; Revised June 12, 2025; Accepted June 30, 2025

* Muhammad Zulfakar. muhamad.zulfakar@umrah.ac.id

LATAR BELAKANG

Tenaga surya adalah salah satu elemen kunci dalam perubahan menuju energi berkelanjutan secara global. Panel surya yang dipasang di tanah (*ground-mounted*) semakin diminati karena pemasangannya yang praktis serta kemampuannya mengoptimalkan penggunaan ruang (Li et al., 2019; Siva Apparao, 2014). Paparan langsung terhadap kondisi lingkungan, terutama angin, menjadi aspek penting dalam perancangan struktur penopang panel surya. Aliran angin yang menciptakan gaya angkat dapat berujung pada kegagalan mekanis, seperti pelepasan panel atau kerusakan pada kerangka pendukung. Meskipun standar desain pada umumnya memberikan panduan untuk struktur konvensional, analisis spesifik terkait konfigurasi panel surya dengan berbagai sudut dan arah angin masih belum sepenuhnya terakomodasi (Kawulok et al., 2023; Tonkacheiev et al., 2024).

Metode eksperimen terowongan angin telah menjadi pendekatan utama dalam penelitian sebelumnya. Namun, teknik ini memiliki keterbatasan dari segi biaya dan waktu, sehingga diperlukan alternatif yang lebih efisien untuk analisis aerodinamika panel surya (Assmus, 2012; Ghosh et al., 2013). Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menghadirkan solusi yang lebih efisien dengan kemampuannya dalam memodelkan interaksi antara fluida dan struktur secara akurat. Teknologi ini memungkinkan analisis aerodinamika yang lebih mendetail tanpa memerlukan eksperimen fisik yang mahal dan memakan waktu (Ioannidis et al., 2024). Namun, aplikasinya untuk sistem panel surya *ground-mounted* masih terbatas, terutama dalam mengeksplorasi pengaruh variasi arah angin.

TINJAUAN PUSTAKA

Gaya dorong (*drag force*) pada struktur terjadi karena adanya perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah yang terkena aliran fluida. Dalam konteks panel surya, besarnya gaya dorong sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin, sudut datang, serta bentuk dan konfigurasi geometrinya. Faktor-faktor ini menentukan bagaimana aliran udara berinteraksi dengan permukaan panel, yang pada akhirnya dapat memengaruhi stabilitas dan efisiensi sistem secara keseluruhan (Liu et al., 2021; Siva Apparao, 2014). Persamaan dasar gaya dorong dinyatakan sebagai:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (1)$$

di mana ρ adalah massa jenis udara, v kecepatan angin, C_D koefisien gaya dorong, dan A luas area proyeksi (Khan et al., 2022; Souza et al., 2017). Koefisien C_D sangat bergantung pada sudut kemiringan panel dan arah angin, yang menjadi fokus utama penelitian ini (Li et al., 2019; Siva Apparao, 2014).

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode numerik untuk memecahkan persamaan Navier-Stokes yang menggambarkan aliran fluida. Dalam konteks ini, simulasi CFD digunakan untuk memprediksi distribusi tekanan dan gaya dorong pada permukaan panel surya (Ioannidis et al., 2024). Sistem *ground-mounted* umumnya menggunakan konfigurasi tetap dengan kemiringan 25–35 derajat untuk optimisasi penyerapan radiasi matahari (Khan et al., 2022; Siva Apparao, 2014). Namun, variasi arah angin dapat mengubah sudut datang efektif (*effective angle of attack*), memengaruhi distribusi tekanan dan potensi *vortex shedding* (Ghosh et al., 2013; Liu et al., 2021).

Setiap titik pada permukaan memiliki koefisien tekanan angin (C_p) yang dihitung secara terpisah. Nilai positif mencerminkan tekanan yang mendorong ke arah permukaan, sementara nilai negatif menunjukkan gaya hisap yang mengarah menjauh dari permukaan.

$$C_p = \frac{P}{q(z)} \quad (2)$$

P : Tekanan angin (kPa)

$q(z)$: Tekanan dinamis yang terjadi akibat aliran bebas pada suatu ketinggian z (kPa)

z : Ketinggian (m)

Tekanan angin yang berasal dari aliran bebas diukur berdasarkan profil angin di bagian masuk terowongan angin pada ketinggian z . Nilai z ditentukan secara otomatis dengan mengambil titik tertinggi dari model yang tersedia.

$$q(z) = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

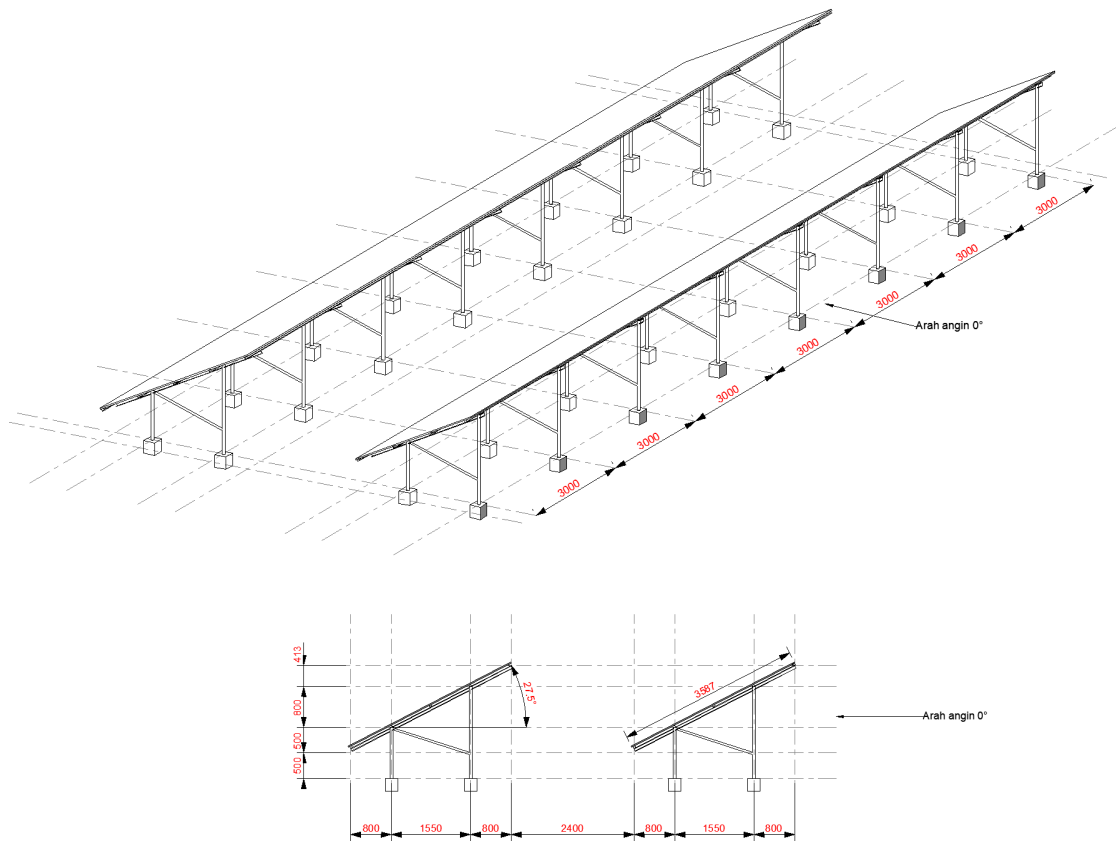
ρ : Densitas udara (kg/m³)

v : Kecepatan angin (m/s)

METODOLOGI PENELITIAN

1. Desain Model dan Variasi Simulasi

Model yang digunakan dalam analisis adalah solar panel dengan konfigurasi 2×18, dengan ukuran solar panel 1700 × 1200 mm. Simulasi dilakukan untuk kecepatan angin 30 m/s (pada ketinggian 10 m) dengan variasi arah 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° terhadap sumbu panel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi dan Konfigurasi Solar Panel

2. Kondisi Batas

Parameter fisik yang digunakan dalam simulasi adalah sebagai berikut:

- Kecepatan angin : 30 m/s (Pada ketinggian 10 m)
- Viskositas kinematik : $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Densitas udara : 1.25 kg/m^3

3. Distribusi Kecepatan Angin

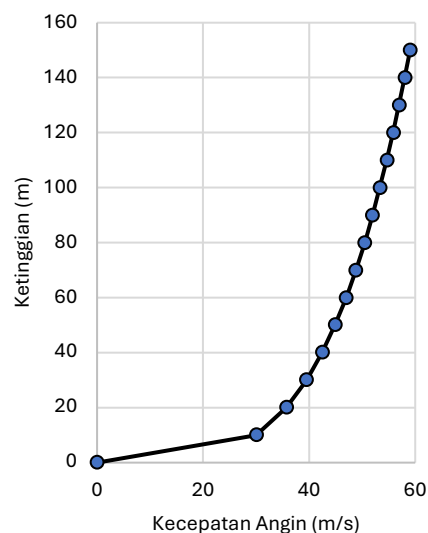
Penelitian ini menggunakan analisis aerodinamika terhadap panel surya *ground-mounted* dengan dua tipe model, yaitu *Original* dan *Simplified*. Model *Original*

merepresentasikan konfigurasi panel surya secara detail dengan mempertimbangkan elemen struktural dan geometri kompleks, termasuk rangka pendukung dan variasi sudut kemiringan. Sementara itu, model *Simplified* menggunakan pendekatan penyederhanaan dengan menghilangkan elemen non-esensial untuk fokus pada aspek aerodinamika utama, seperti distribusi tekanan dan gaya dorong. Pengujian dilakukan melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) guna mengevaluasi perbedaan gaya dorong dan tekanan permukaan yang dihasilkan oleh variasi arah angin pada kedua model tersebut. Data hasil simulasi kemudian dianalisis secara komparatif untuk menentukan efektivitas masing-masing konfigurasi terhadap stabilitas dan efisiensi panel surya.

Kecepatan angin pada ketinggian z , $v(z)$ yang bervariasi sesuai dengan ketinggian dari tanah, tidak diasumsikan tetap dalam simulasi. Nilai ini dihitung berdasarkan formula berikut (Wang & Jiang, 2022):

$$v(z) = v(10) \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (4)$$

dimana $v(10)$ adalah kecepatan rata-rata angin pada ketinggian 10 m. Parameter α merupakan eksponen hukum pangkat yang ditentukan oleh kategori medan. Dalam penelitian ini, α ditetapkan sebesar 0,25 untuk mensimulasikan kekasaran medan tipe B (daerah perkotaan dan pinggiran kota). Distribusi kecepatan angin yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kecepatan Angin

Nilai kecepatan udara masuk di setiap titik dalam grid struktur dihitung berdasarkan ketinggian masing-masing titik. Selain itu, penyesuaian parameter intensitas turbulensi menjadi bagian krusial dalam simulasi numerik. Metode evaluasi turbulensi dalam penelitian ini dilakukan dengan menetapkan intensitas turbulensi sebesar 1% dan menerapkan model $K - \varepsilon$ sebagai pendekatan optimal (Kawulok et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

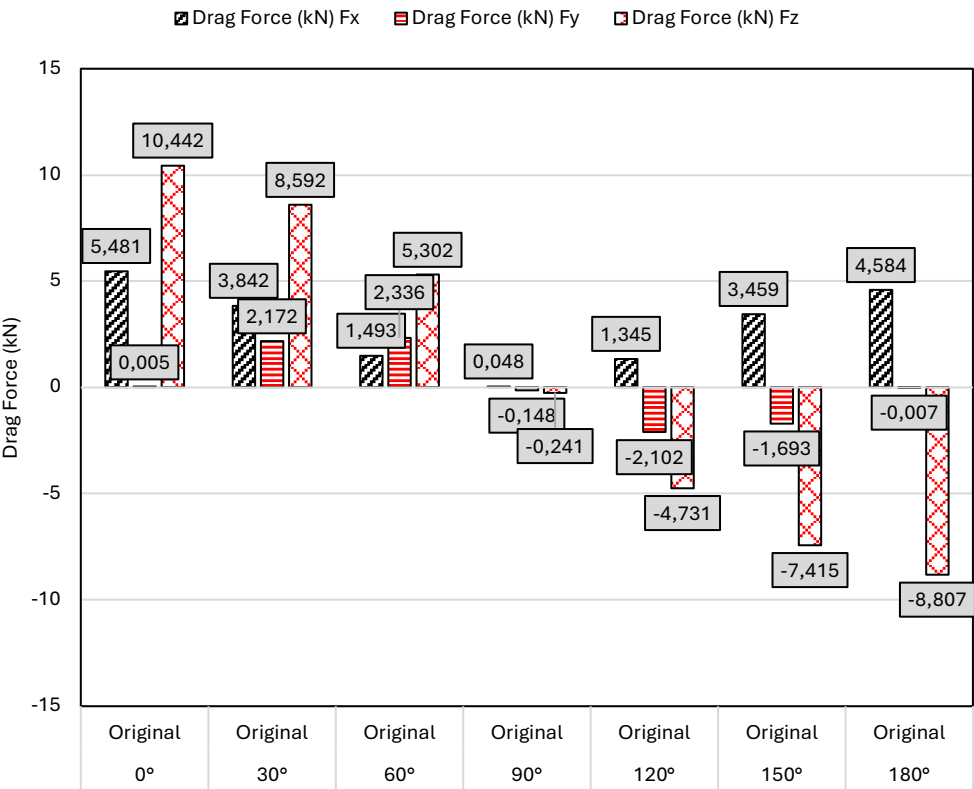
Tabel 1. Drag Force akibat gaya angin dari berbagai arah

Arah Angin (°)	Tipe Model	Drag Force (kN)		
		F_x	F_y	F_z
0°	<i>Original</i>	5.481	0.005	10.442
	<i>Simplified</i>	5.494	0.000	10.302
30°	<i>Original</i>	3.842	2.172	8.592
	<i>Simplified</i>	3.909	2.162	8.605
60°	<i>Original</i>	1.493	2.336	5.302
	<i>Simplified</i>	1.549	2.278	5.226
90°	<i>Original</i>	0.048	-0.148	-0.241
	<i>Simplified</i>	0.082	-0.124	-0.238
120°	<i>Original</i>	1.345	-2.102	-4.731
	<i>Simplified</i>	1.396	-2.081	-4.706
150°	<i>Original</i>	3.459	-1.693	-7.415
	<i>Simplified</i>	3.439	-1.920	-7.292
180°	<i>Original</i>	4.584	-0.007	-8.807
	<i>Simplified</i>	4.635	-0.001	-8.671

Dari Tabel 1 di atas, terlihat bahwa arah angin memiliki dampak signifikan terhadap gaya drag (*drag force*) pada panel surya yang dipasang di tanah dengan dua tipe model analisis, yaitu *Original* dan *Simplified*. Ketika angin datang dari depan langsung (0°), gaya drag terbesar terjadi pada arah F_x dan F_z , yang menunjukkan bahwa tekanan frontal dari angin memberikan pengaruh kuat terhadap panel. Saat sudut angin bergeser ke 30° dan 60°, gaya drag pada F_x berkurang, tetapi gaya lateral F_y meningkat, menandakan bahwa angin dari samping mulai berperan lebih dominan. Pada sudut 90°, gaya drag hampir tidak signifikan, yang mengindikasikan bahwa angin yang datang dari samping tidak memberikan tekanan frontal yang besar. Namun, saat sudut bertambah ke 120° hingga 180°, gaya drag kembali meningkat, tetapi dengan pola yang berlawanan dibandingkan saat angin datang dari depan, menunjukkan bahwa tekanan akibat angin dari belakang masih berdampak pada panel.

Perbandingan antara model *Original* dan *Simplified* (Gambar 3) menunjukkan pola yang mirip dalam respons terhadap arah angin, tetapi terdapat perbedaan kecil dalam

angka gaya dorong (*drag force*). Model *Simplified* cenderung menunjukkan nilai yang sedikit lebih tinggi dibandingkan model *Original* dalam beberapa sudut angin, seperti pada 30° dan 60°, yang bisa menjadi indikasi bahwa penyederhanaan dalam model mempengaruhi distribusi gaya.



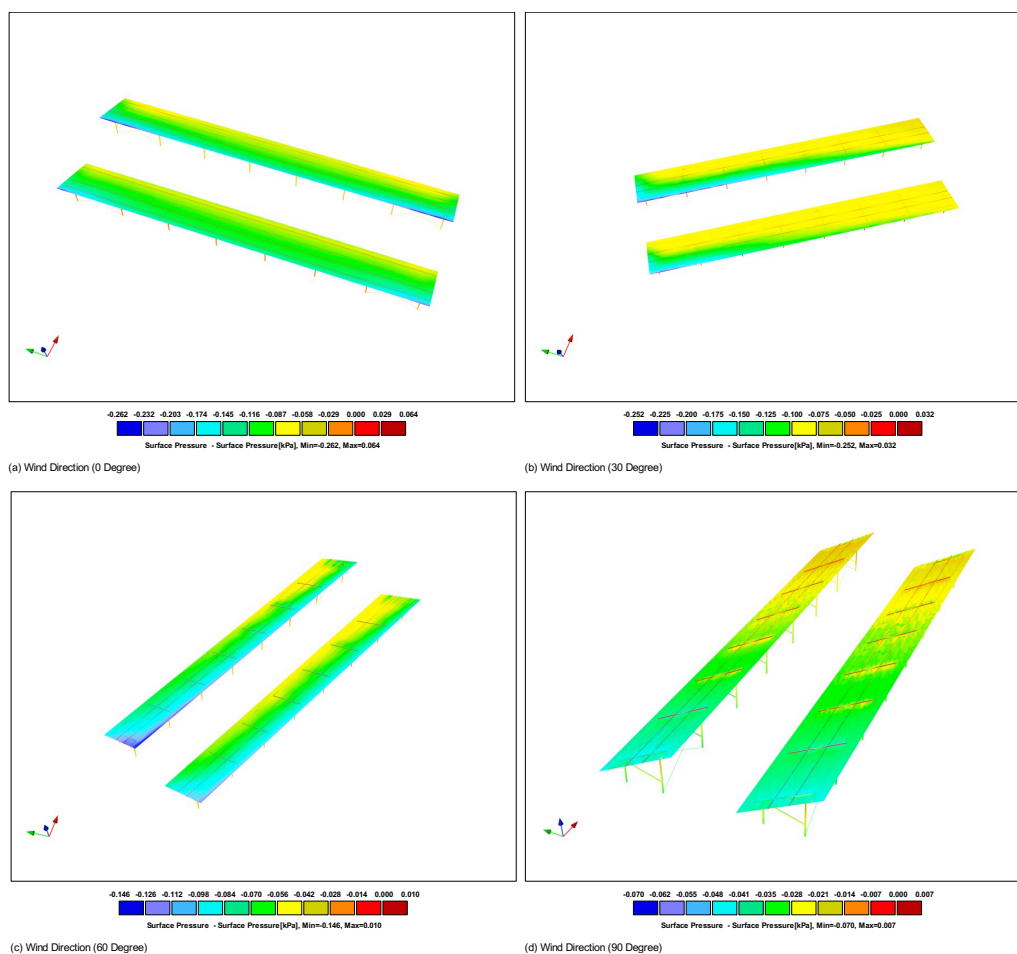
Gambar 3. Drag Force pada tipe model original

Pada sudut 90°, kedua model hampir serupa, mengindikasikan bahwa dalam kondisi angin tegak lurus, struktur aerodinamis dari kedua model tidak terlalu mempengaruhi hasil perhitungan. Perbedaan lainnya terlihat pada sudut 150° dan 180°, di mana model *Simplified* menunjukkan nilai F_y lebih besar dibandingkan model *Original*, yang bisa berarti bahwa model ini lebih sensitif terhadap efek lateral angin pada sudut tertentu. Secara keseluruhan, arah angin sangat berpengaruh terhadap gaya drag yang diterima panel surya, dan model *Simplified* cenderung menunjukkan nilai sedikit lebih tinggi dalam beberapa skenario. Pemahaman terhadap data ini bisa membantu dalam perancangan dan optimasi panel surya agar lebih efisien dalam menghadapi kondisi angin di lokasi pemasangan.

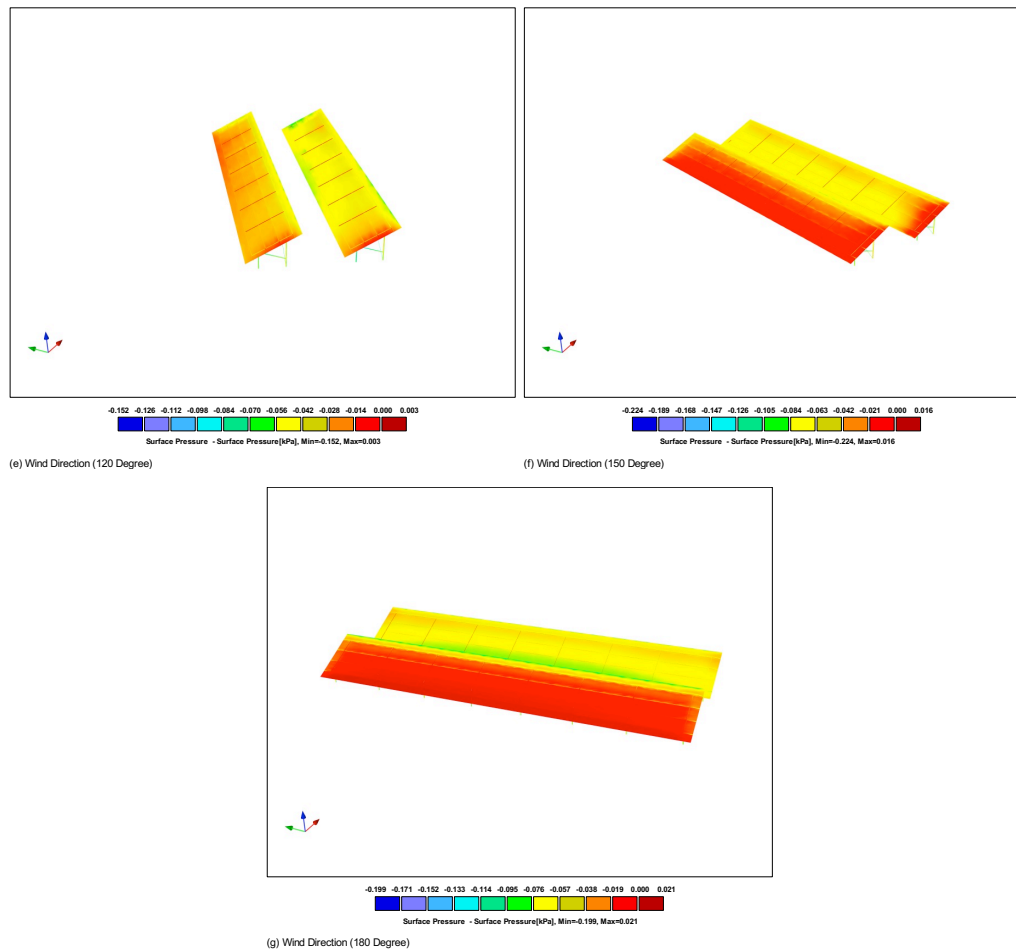
Tabel 2. Surface Pressure dan Surface Coefficient akibat gaya angin

Arah Angin (°)	Surface Pressure (kPa)		Surface Coefficient (C_p)	
	Min	Max	Min	Max
0°	-0.262	0.064	-9.479	2.323
30°	-0.252	0.032	-9.118	1.140
60°	-0.146	0.010	-5.279	0.349
90°	-0.070	0.007	-2.514	0.237
120°	-0.152	0.003	-5.511	0.101
150°	-0.224	0.016	-8.116	0.580
180°	-0.199	0.021	-7.184	0.748

Tabel 2 di atas menunjukkan, arah angin mempengaruhi *Surface Pressure* dan *Surface Coefficient* (C_p) pada panel surya *ground-mounted*. *Surface Pressure* mencerminkan tekanan akibat aliran udara yang mengenai permukaan panel, sedangkan *Surface Coefficient* (C_p) menunjukkan bagaimana tekanan relatif terhadap kondisi aerodinamis sistem.



Gambar 4. *Surface Pressure* akibat beban angin sesuai arah yang ditentukan: (a) 0°, (b) 30°, (c) 60°, (d) 90°, (e) 120°, (f) 150°, (g) 180°



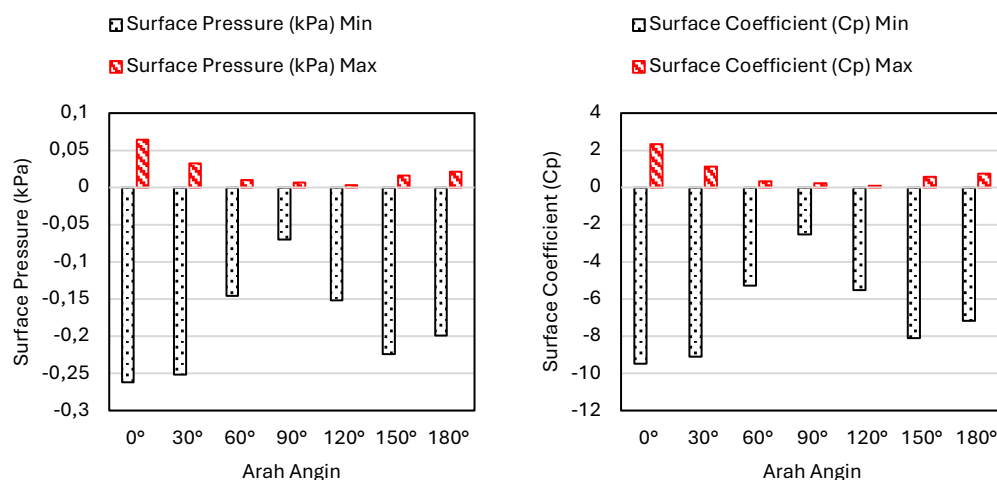
Gambar 4. *Surface Pressure* akibat beban angin sesuai arah yang ditentukan: (a) 0°, (b) 30°, (c) 60°, (d) 90°, (e) 120°, (f) 150°, (g) 180° (lanjutan)

Ketika angin datang dari 0° (arah depan langsung), tekanan permukaan minimum mencapai -0.262 kPa, sedangkan maksimum mencapai 0.064 kPa (Gambar 4a), dengan C_p berkisar antara -9.479 hingga 2.323. Nilai ini menunjukkan bahwa tekanan yang diterima oleh panel cukup besar akibat angin frontal, memberikan perbedaan tekanan tinggi antara bagian depan dan belakang panel. Akibat perubahan sudut datang angin dari 30° dan 60°, tekanan permukaan dan nilai C_p mengalami penurunan, hal ini menunjukkan dominasi aliran angin di sepanjang permukaan, mengurangi gaya aerodinamis dibanding kondisi frontal.

Pada sudut 90° (angin dari samping tegak lurus), tekanan minimum mencapai -0.070 kPa, dengan maksimum 0.007 kPa, serta C_p turun hingga -2.514. Ini menunjukkan bahwa dalam kondisi angin tegak lurus, distribusi tekanan di permukaan panel menjadi lebih merata, dan tidak ada perbedaan tekanan yang signifikan antara sisi depan dan belakang. Setelah melewati 90°, tekanan kembali meningkat saat angin datang dari

Analisis Pengaruh Arah Angin terhadap Gaya Dorong dan Tekanan pada Panel Surya Ground-Mounted belakang pada 120° hingga 180° , di mana nilai tekanan permukaan kembali bertambah, terutama pada sudut 150° dan 180° , dengan nilai C_p mencapai -8.116 hingga -7.184 , menunjukkan bahwa angin dari belakang memberikan efek tekanan aerodinamis yang signifikan, tetapi tidak sebesar angin dari depan.

Secara keseluruhan, tekanan permukaan dan koefisien aerodinamis dipengaruhi langsung oleh arah angin. Angin dari depan (0°) menghasilkan tekanan dan C_p tertinggi, sedangkan sudut 90° memiliki efek tekanan paling kecil karena aliran udara lebih menyebar tanpa memberikan tekanan frontal langsung, seperti terlihat pada Gambar 5 dibawah. Angin dari belakang tetap memberikan efek tekanan, tetapi dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan angin frontal. Pemahaman terhadap pola ini penting dalam desain dan optimasi panel surya agar lebih tahan terhadap efek aerodinamis akibat perubahan arah angin di lingkungan instalasi.



Gambar 5. *Surface Pressure* dan *Surface Coefficient* (C_p)

KESIMPULAN DAN SARAN

Arah angin memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik aerodinamis panel surya *ground-mounted*. Pada analisis gaya dorong (*drag force*), angin yang datang dari depan (0°) memberikan gaya tarik terbesar, sedangkan angin yang datang dari samping (90°) menghasilkan dampak yang paling kecil. Model *Simplified* menunjukkan nilai gaya dorong yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan model *Original* dalam beberapa sudut angin, yang mengindikasikan adanya perbedaan dalam distribusi gaya akibat penyederhanaan model.

Sementara itu, analisis *Surface Pressure* dan *Surface Coefficient* (C_p) menunjukkan bahwa tekanan permukaan terbesar terjadi saat angin datang dari depan (0°), dengan nilai C_p tertinggi, mengindikasikan perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi depan dan belakang panel. Pada sudut 90° , distribusi tekanan menjadi lebih merata, sehingga perbedaan tekanan dan efek aerodinamis terhadap panel lebih kecil. Saat sudut bertambah hingga 180° , tekanan dari belakang tetap berpengaruh, meskipun lebih rendah dibandingkan angin frontal.

Desain dan pemasangan panel surya harus mempertimbangkan efek aerodinamis dari arah angin untuk mengoptimalkan kestabilan dan efisiensi. Angin dari depan memberikan dampak terbesar terhadap gaya drag dan tekanan, sementara angin dari samping menghasilkan efek tekanan paling kecil. Pemahaman terhadap pola ini dapat membantu dalam strategi mitigasi untuk meningkatkan ketahanan terhadap angin dan optimasi penempatan panel surya agar lebih efisien dalam kondisi lingkungan tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Assmus, M. (2012). Experimental investigation of the mechanical behavior of photovoltaic modules at defined inflow conditions. *Journal of Photonics for Energy*, 2(1), 022002. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3349.0080>
- Ghosh, D., Mittal, A. K., Behera, S., & Gupta, A. (2013). Wind Flow Characteristics Around Rooftop Solar Array - A Numerical Study. *Proceedings of the Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, 674–681. https://doi.org/10.3850/978-981-07-8012-8_328
- Ioannidis, G., Li, C., Tremper, P., Riedel, T., & Ntziachristos, L. (2024). Application of CFD Modelling for Pollutant Dispersion at an Urban Traffic Hotspot. *Atmosphere*, 15(1), 113. <https://doi.org/10.3390/atmos15010113>
- Kawulok, M., Freiherrová, N., Hornáková, M., Juračka, D., & Krejsa, M. (2023). Hyperbolic Paraboloid Tensile Structure—Numerical CFD Simulation of Wind Flow in RWIND Software. *Buildings*, 13(3), 681. <https://doi.org/10.3390/buildings13030681>
- Khan, A. Y., Ahmad, Z., Sultan, T., Alshahrani, S., Hayat, K., & Imran, M. (2022). Optimization of Photovoltaic Panel Array Configurations to Reduce Lift Force Using Genetic Algorithm and CFD. *Energies*, 15(24), 9580. <https://doi.org/10.3390/en15249580>

- Li, J., Tong, L., Wu, J., & Pan, Y. (2019). Numerical Investigation of Wind Pressure Coefficients for Photovoltaic Arrays Mounted on Building Roofs. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(8), 3606–3615. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-2320-3>
- Liu, H., Zhang, P., Lai, Z., Dong, X., Wang, Z., & Zhou, S. (2021). Fluid structure interaction based structure stress and modal analysis of a flat type solar panel supporting system. *E3S Web of Conferences*, 248, 02018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124802018>
- Siva Apparao, K. V. (2014). Structural orientation optimization of the pole mount support of a solar panel for wind load by using CFD analysis. *International Journal of Advanced Research in Science and Technology*, 224–231. <https://doi.org/10.62226/ijarst20140445>
- Souza, P. V. S., Girardi, D., & de Oliveira, P. M. C. (2017). Drag force in wind tunnels: A new method. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 467, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.09.049>
- Tonkacheiev, V., Malyshko, D., & LAVRINENKO, L. (2024). Wind influence numerical simulations on stadium structures in RWIND module of the DLUBAL RFEM software. *Building Constructions. Theory and Practice*, 14, 89–101. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.89-101>
- Wang, F., & Jiang, G. (2022). Numerical Investigations of Wind Loads on Spherical Structures with Various Types of Configurations. *Buildings*, 12(11), 1832. <https://doi.org/10.3390/buildings12111832>