

Analisis Pengaruh Variasi Laju Aliran Air pada Sistem Pendinginan Modul Fotovoltaik dengan Simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Analysis of the Effect of Varying Water Flow Rates on Photovoltaic Module Cooling Systems using CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulations

¹Syafril Agustion Tomayahu, ¹M. Sya'banur Rozaq, ²Rahmat Romadhon*), ^{1,3}Justin Pradipta, ^{1,3}Irsyad N. Haq & ^{1,3}Edi Leksono

¹Laboratorium Manajemen Energi, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Kelompok Keahlian Rekayasa kinerja Lingkungan Binaan, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

³Kelompok Keahlian Teknik Fisika, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

*) corresponding e-mail : rromadhon@itb.ac.id

Abstrak

Pengembangan energi terbarukan merupakan salah satu strategi utama mengurangi emisi gas rumah kaca dan mencapai tujuan global untuk membatasi pemanasan global di atas suhu pra-industrial. Studi ini menganalisis pengaruh variasi laju aliran air pendinginan modul fotovoltaik polikristalin tipe MS100-36 melalui simulasi ANSYS Fluent 2024 R1 Student. Simulasi ini dijalankan dari pukul 08:00 hingga 17:00, dengan fokus pengaruh suhu air masuk terhadap distribusi suhu modul fotovoltaik. Hasil simulasi menunjukkan kondisi tunak termal pada iradiasi 463 W/m² dengan koefisien alami 5 W/m².K terjadi proses distribusi suhu modul fotovoltaik, pada kondisi *fluent* pengaruh suhu air masuk ke permukaan modul fotovoltaik untuk rentang suhu air adalah 20°C hingga 30°C dengan interval 5°C dengan kecepatan air masuk 0,05, 0,1, dan 0,2 kg/s. Gambar kontur menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran air dapat meningkatkan efek pendinginan modul PV. Suhu air masuk yang lebih tinggi mentransfer lebih sedikit panas, mengakibatkan suhu modul fotovoltaik yang lebih tinggi. Laju aliran air 0,2 kg/s dan suhu air masuk 20°C menghasilkan distribusi suhu yang lebih rendah dan merata pada modul fotovoltaik. Dengan demikian, peningkatan laju aliran air dan penurunan suhu air masuk terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja pendinginan modul fotovoltaik

Kata Kunci: Modul fotovoltaik, variasi laju aliran air, simulasi CFD.

Abstract

Developing renewable energy is one of the main strategies to reduce greenhouse gas emissions and achieve global goals to limit global warming above pre-industrial temperatures. This study analyzes the effect of varying the cooling water flow rate on MS100-36 type polycrystalline photovoltaic modules through ANSYS Fluent 2024 R1 Student simulation. This simulation was conducted from 08:00 to 17:00, focusing on the influence of inlet water temperature on the temperature distribution of photovoltaic modules. The simulation results indicate thermal steady-state conditions at an irradiation of 463 W/m² with a natural coefficient of 5 W/m². There is a temperature distribution process occurring in the photovoltaic module under fluent conditions, where the effect of the inlet water temperature on the surface of the PV module is examined for a water temperature range of 20°C to 30°C in 5°C intervals, with water flow rates of 0.05, 0.1, and 0.2 kg/s. The contour images indicate that an increase in water flow rate can enhance the cooling effect of the photovoltaic module. Higher inlet water temperatures transfer less heat, producing higher temperatures for the photovoltaic modules. A water flow rate of 0.2 kg/s and an inlet water temperature of 20°C produce a lower and more uniform temperature distribution on the photovoltaic modules. Thus, increasing the water flow rate and decreasing the inlet water temperature have proven effective in enhancing the cooling performance of photovoltaic modules.

Keywords: Photovoltaic modules, variation in water flow rate, CFD simulation.

Makalah diterima 12 Juli 2024 – makalah direvisi 17 September 2024 – disetujui 18 September 2024

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1 Pendahuluan

Pembangunan terus dilakukan oleh pemerintah dan mengembangkan sumber energi listrik untuk memenuhi kebutuhan. Sebagai salah satu upaya untuk mendukung pengurangan emisi gas karbon efek rumah kaca,

pembangunan sumber energi terbarukan sangat diperlukan dalam mendukung kegiatan tersebut. Presiden mengeluarkan Peraturan Presiden Nomor 112 tahun 2022 untuk mempercepat pengembangan energi terbarukan sebagai upaya memproduksi listrik di Indonesia. Berdasarkan data statistik energi dan ekonomi di Indonesia tahun 2021, Kapasitas pembangkit listrik Indonesia menurut Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030 khususnya yang bersumber dari energi terbarukan pada tahun 2025 meningkat sebesar 21,11 GW dari yang sebelumnya pada tahun 2021 sebesar 11,23 GW [1]. Pada akhir 2021, China memimpin dunia dalam instalasi fotovoltaik dengan kapasitas terpasang lebih dari 253 GW, diikuti oleh Amerika Serikat, Jepang, Jerman, dan India. Teknologi PV telah berkembang pesat, menjadikannya sumber energi yang kompetitif dengan efisiensi hingga 30% dan biaya di bawah \$0,50/W. Sejak 2001, produksi PV tumbuh pesat dengan tingkat pertumbuhan tahunan 40-90%, sementara harga sistem tenaga surya PV turun signifikan sebesar 40% antara 2001 dan 2017. Proyeksi menunjukkan konsumsi listrik global akan meningkat 2,4% per tahun hingga 2030 [2].

Energi surya dapat menyumbang setengah dari pengurangan emisi hingga tahun 2030 dalam perjalanan menuju emisi bersih nol. *International Renewable Energy Agency* (IRENA) mengakui bahwa elektrifikasi dan efisiensi merupakan faktor utama yang mendorong transisi energi yang dimungkinkan oleh energi terbarukan berkelanjutan [3]. Untuk mengurangi dampak negatif yang disebabkan oleh bahan bakar fosil, berdasarkan perjanjian Paris yang bertujuan untuk membatasi kenaikan suhu hingga 1.5°C diatas suhu di masa pra-industrialisasi. Sekarang, rencana untuk meningkatkan suplai energi baru terbarukan telah menjadi agenda global, termasuk penggunaan teknologi modul fotovoltaik [4]. Salah satu sumber energi bersih memiliki potensi dalam pengembangan secara global, termasuk di Indonesia adalah energi matahari yang selalu tersedia dalam bentuk foton dapat diubah menjadi bentuk listrik dengan menggunakan alat yang bernama modul fotovoltaik (PV) [5].

Energi listrik adalah sumber energi yang paling banyak digunakan oleh manusia, dengan penggunaan yang beragam mulai dari industri hingga konsumsi rumah tangga. Modul fotovoltaik dapat menghasilkan energi listrik dari cahaya matahari serta efisiensinya dipengaruhi oleh suhu modul [6]. Panel surya akan berfungsi dengan efektif pada suhu optimal, yaitu sekitar 25°C [7], [8]. Jika suhu modul surya meningkat melebihi batas normal, akan terjadi penurunan pada efektivitas sel surya. Selain itu, tegangan dan arus yang dihasilkan oleh modul surya dapat bervariasi, sesuai dengan perubahan intensitas cahaya matahari yang terpapar pada permukaan panel. Modul fotovoltaik hanya mengubah 11–24 % radiasi matahari menjadi listrik, dan yang tersisa diubah menjadi panas ini menghasilkan suhu sel fotovoltaik yang mencapai 40°C, lebih tinggi dari suhu lingkungan. Suhu tinggi ini memiliki efek pada modul fotovoltaik apakah itu dalam jangka pendek atau jangka panjang. Dalam jangka pendek, efisiensi fotovoltaik menurun, biasanya menjadi 0,4 % per °C. Dalam jangka panjang, tekanan termal siklik dapat menyebabkan kerusakan struktural pada sel fotovoltaik, yang mengurangi masa pakai fotovoltaik dengan mempercepat laju penuaan [9], [10], [11].

Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk mengurangi penurunan daya keluaran dan efisiensi listrik dari Modul fotovoltaik. Salah satu metodenya adalah dengan penerapan perangkat pendingin pada modul PV [12]. Perangkat pendingin ini digunakan untuk menurunkan suhu modul PV ketika modul tersebut menghadapi radiasi matahari yang lebih tinggi dan suhu lingkungan yang lebih tinggi. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa modul PV dapat menghasilkan daya keluaran yang lebih tinggi saat suhu modul PV turun. Dalam konteks ini, sistem pendingin air merupakan salah satu jenis sistem pendingin untuk menghilangkan panas dari modul fotovoltaik [13].

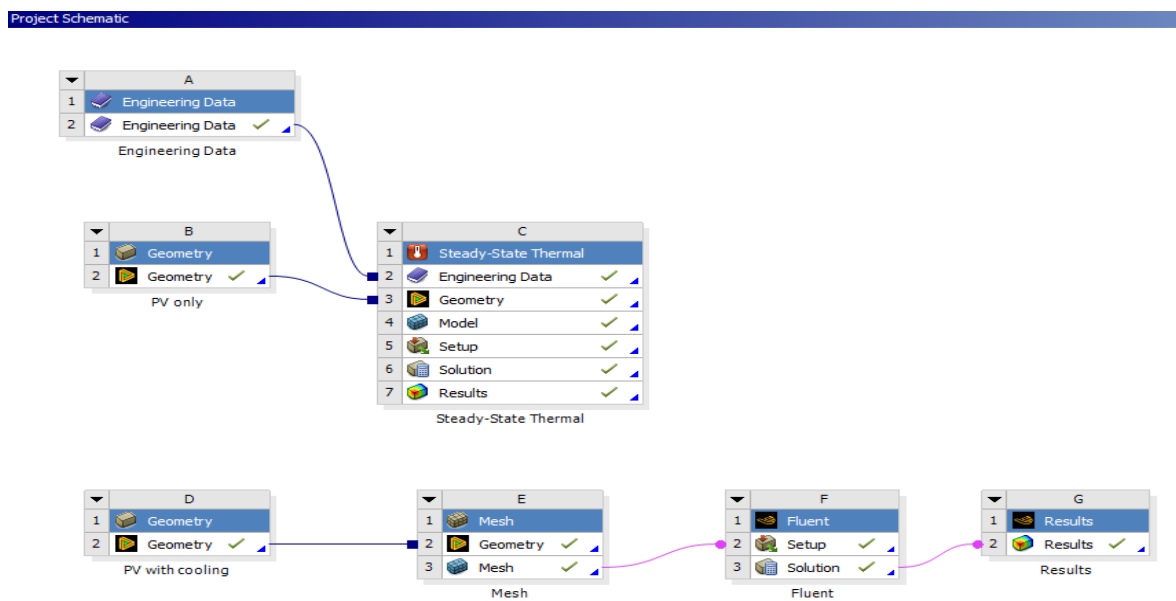
Dalam penelitian ini, bagaimana distribusi panas pada modul PV menggunakan simulasi CFD yang dilengkapi dengan sistem pendingin air. Sistem tersebut berfungsi sebagai penukar panas dan diimplementasikan pada modul PV komersial. Tujuannya untuk melihat pengaruh variasi laju aliran air pada sistem pendinginan modul PV. Model tiga dimensi dari modul PV yang telah dibuat menggunakan ANSYS fluent. Performa termal dari kedua skenario modul PV tersebut dibandingkan dalam penelitian ini. Kontribusi dari paper ini adalah untuk menjawab tantangan melihat distribusi temperatur secara lebih menyeluruh yang bisa dilakukan secara komputasi menggunakan simulasi CFD.

2 Metodologi

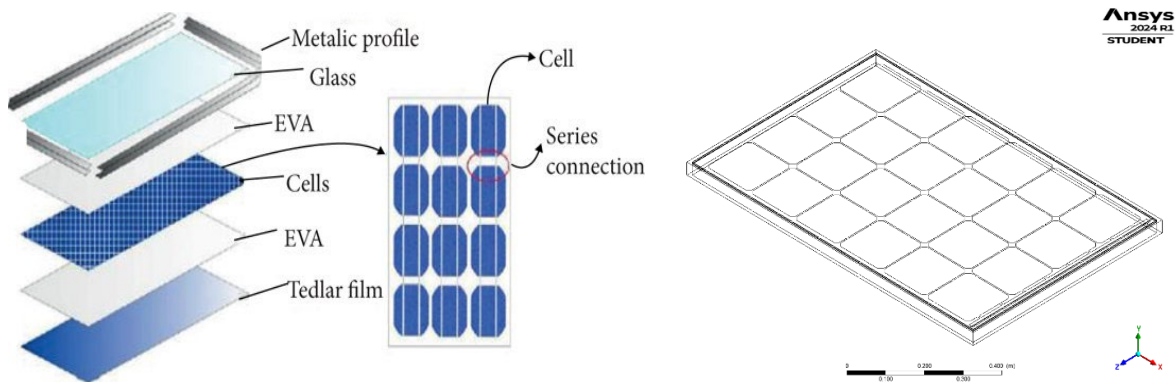
Perangkat lunak Ansys Fluent 2024 R1 Student digunakan untuk membuat model geometri tiga dimensi dari modul PV. Model ini dibuat sesuai dengan spesifikasi modul PV polikristalin MS100-36 yang tersedia di pasaran, dengan daya puncak maksimum 100 Watt, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Tampilan awal menu ANSYS Workbench, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, dan Sketsa model geometri modul PV sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Spesifikasi modul PV.

Modul Surya	
Parameter	Spesifikasi
Daya maksimum Modul	100 Wp
Tipe / Merk	MS100-36 / Maysun Solar
Voc/Isc	23,18 V / 5,21 A
Vmp/Imp	20,16 V / 4,97 A
Operating Temperature	-40 °C + 85 °C
Dimensi (mm)	1020 x 670 x 35 mm



Gambar 1. Tampilan awal menu ANSYS Workbench.



Gambar 2. Sketsa model geometri modul surya [14].

Setiap lapisan memiliki ketebalan yang berbeda dengan kapasitas panas spesifik yang berbeda, densitas serta konduktivitas termal seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, material dari masing-masing lapisan dalam model geometri modul PV tersebut.

Tabel 2. Data untuk ketebalan modul PV yang digunakan dalam proses pemodelan 3D. [15], [16], [17].

Lapisan	Ketebalan (m)	Konduktivitas Termal (W/m K)	Kepadatan (kg/m ³)	Kapasitas panas spesifik (J/kg K)
Metallic profil	2	60.5	7850	434
Glass	0.003	2	3000	500
Eva	0.0005	0.35	960	2090
Solar Cell	0.003	148	2330	667
Tedlar	0.0005	0.2	1200	1250

ANSYS Fluent adalah salah satu perangkat lunak dinamika fluida komputasi (CFD) yang telah digunakan untuk studi simulasi ini. Dalam prosedur simulasi, langkah pertama adalah mendefinisikan sifat material dari setiap lapisan dalam modul PV di Data Teknik. Setelah itu, setiap lapisan panel PV dinamai dalam bagian geometri. ANSYS Mechanical digunakan untuk memecah model geometri menjadi elemen yang disebut sebagai proses *meshing*, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Rekomendasi kualitas *mesh* secara umum yaitu *skewness* dan *orthogonal* yang disarankan untuk menjaga kualitas ortogonal minimum > 0,1, atau kemiringan minimum < 0,95. Namun, nilai-nilai ini mungkin berbeda tergantung pada fisik modul PV [10].

Spektrum metrik *mesh* kemiringan

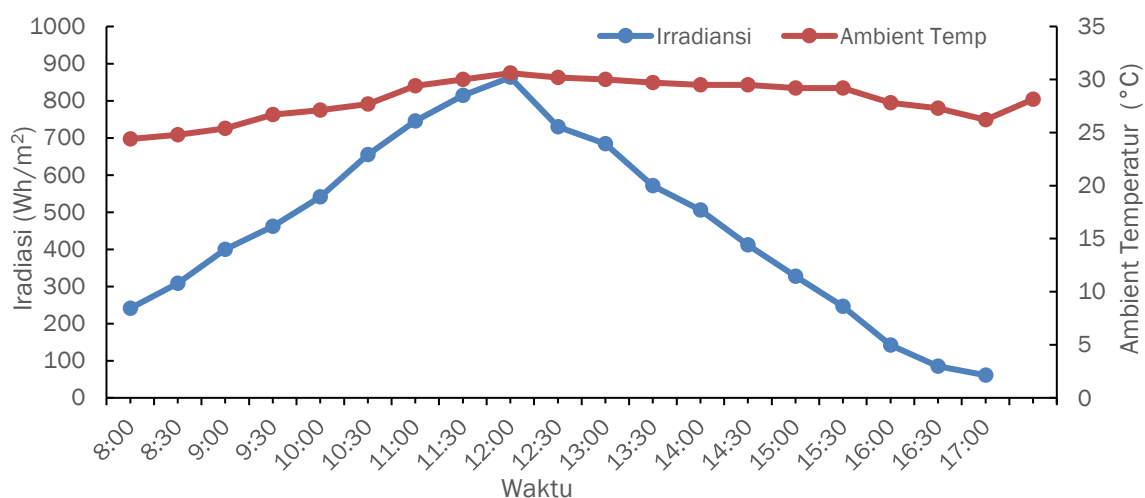
Bagus Sekali	Sangat Bagus	Bagus	Dapat diterima	Buruk	Tidak dapat diterima
0 – 0.25	0.25 – 0.50	0.50 – 0.80	0.80 – 0.94	0.95 – 0.97	0.98 – 1.00

Spektrum metrik *mesh* kualitas ortogonal

Tidak dapat diterima	Buruk	Dapat diterima	Bagus	Sangat Bagus	Bagus Sekali
0 – 0.001	0.001 – 0.14	0.15 – 0.20	0.20 – 0.69	0.70 – 0.95	0.95 – 1.00

Gambar 3. Spektrum metrik *mesh*.

Data kondisi lingkungan diperoleh dari lokasi pengukuran menggunakan stasiun Cuaca DAVIS Vantage Pro2 yang terpasang di laboratorium manajemen energi ITB. Hari kondisi cuaca yang dipilih dalam penelitian dimulai tanggal 6 – 11 Mei 2024 dengan mengambil rata-rata iradiasi terhadap waktu untuk menyelidiki efek pendinginan pada kinerja modul PV. Simulasi dari model modul PV dimulai pukul 08:00 pagi hingga pukul 17:00 sore seperti yang ditampilkan di Gambar 4 mencatat bahwa iradiasi surya tertinggi pada hari itu adalah 863 W/m² dan yang terendah adalah 61 W/m², dengan rata-rata iradiasi surya sebesar 463 W/m². Ini menjadikan hari tersebut ideal untuk mengevaluasi efek sistem pendinginan air pada performa modul PV.



Gambar 4. Grafik pengukuran cuaca iradiasi terhadap waktu.

Berdasarkan pada data aktual yang diambil di laboratorium manajemen energi, ITB. Data diambil dari pukul 8.00 pagi hingga 17.00 sore. Suhu lingkungan tertinggi dan iradiasi surya yang telah tercatat adalah 31,1°C dan 863 W/m². Transfer panas konveksi dijelaskan sebagai transfer energi antara permukaan padat dan

fluida di sekitar permukaan tersebut [19]. Jika permukaan kaca (*glass*) berada pada suhu T_s , dan fluida (udara sekitar) memiliki suhu T_∞ yang lebih rendah dari suhu permukaan, maka persamaan yang digunakan untuk menggambarkan transfer panas tersebut adalah sebagai berikut:

$$Q_{conv} = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Persamaan (1) dikenal sebagai hukum pendinginan Newton karena permukaannya didinginkan oleh fluida. Jika fluidanya panas dan memanaskan permukaan yang lebih dingin, maka persamaannya adalah sebagai berikut:

$$Q_{conv} = h \cdot A_s (T_\infty - T_s) \quad (2)$$

Persamaan (2) dikenal sebagai hukum pemanasan Newton. Dalam bentuk umum, hukum konveksi Newton dapat ditulis sebagai berikut:

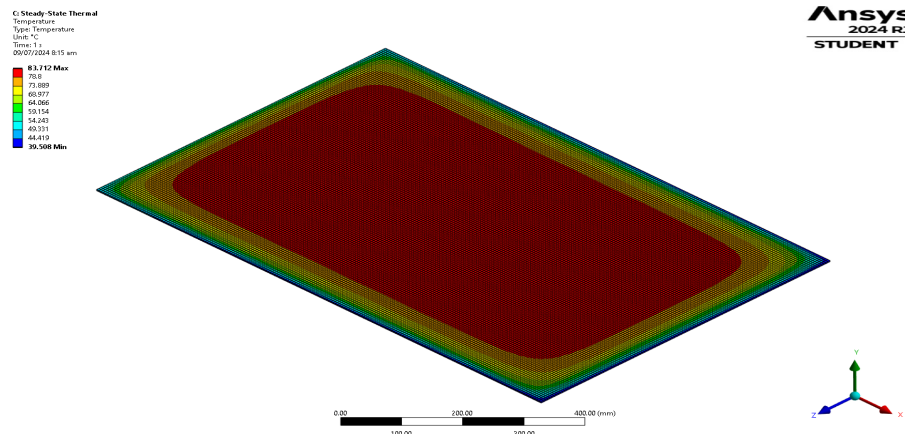
$$Q_{conv} = h \cdot A_s (\Delta T) \quad (3)$$

ΔT merepresentasikan selisih suhu antara bahan padat (*glass*) dan suhu rata-rata fluida di sekitarnya. Luas permukaan area A (m^2) dan h menandakan koefisien transfer panas konvektif udara (W/m^2K).

3 Hasil dan Pembahasan

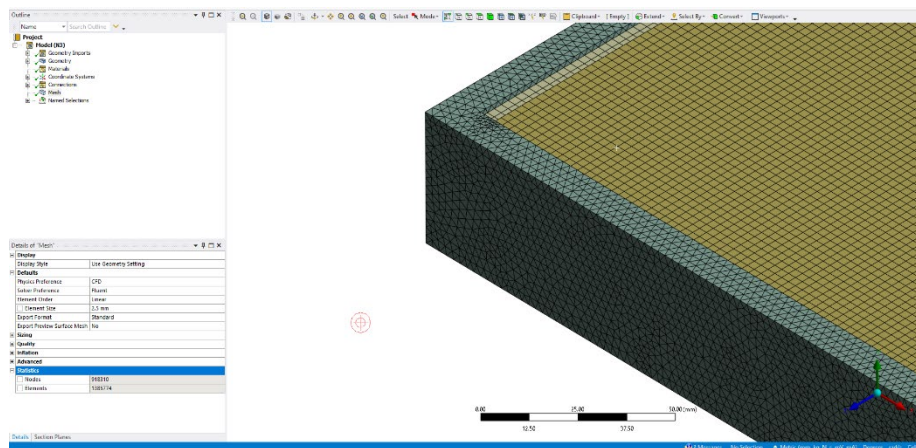
3.1 Hasil

Dalam penelitian ini, hasil simulasi modul PV didapatkan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 2024 R1 Student, di mana kondisi cuaca dipilih dengan mengambil data iradiasi terhadap waktu untuk menyelidiki efek pendinginan pada kinerja modul PV. Simulasi dari pemodelan modul PV dimulai pukul 08:00 pagi hingga pukul 17:00 sore. Gambar 5 menunjukkan kondisi tunak termal iradiasi solar 463 W/m^2 dengan koefisien alami 5 $W/m^2 \cdot K$, dan modul PV mengalami suhu maksimum sebesar 83,712 °C dan suhu minimum sebesar 39,508 °C.



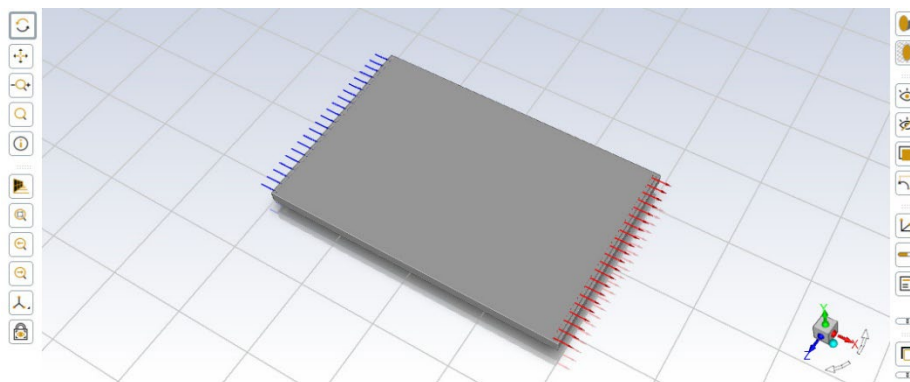
Gambar 5. Kondisi tunak termal.

Pengujian kemudian dilakukan pada kondisi *fluent* dengan mempertahankan geometri data teknis (*engineering data*) yang dilanjutkan pada tahap *mesh* dengan memperhatikan batas rekomendasi kualitas *mesh* secara umum yaitu kemiringan (*skewness*) dan kualitas *orthogonal quality*, dengan menjaga kualitas ortogonal sebesar 0.90, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Jenis elemen heksahedral didapatkan pada lapisan-lapisan modul PV, sehingga keunggulan seperti waktu komputasi yang lebih rendah mampu dicapai karena jumlah elemen yang digunakan sebanyak 1385774 dengan kerapatan nodal 918310, lebih sedikit dibanding penggunaan jenis elemen lain seperti tetrahedral. Selain itu, kerapatan nodal dari elemen heksahedral juga dapat ditingkatkan pada bagian-bagian geometri yang melengkung dengan tetap memastikan hasil yang akurat.



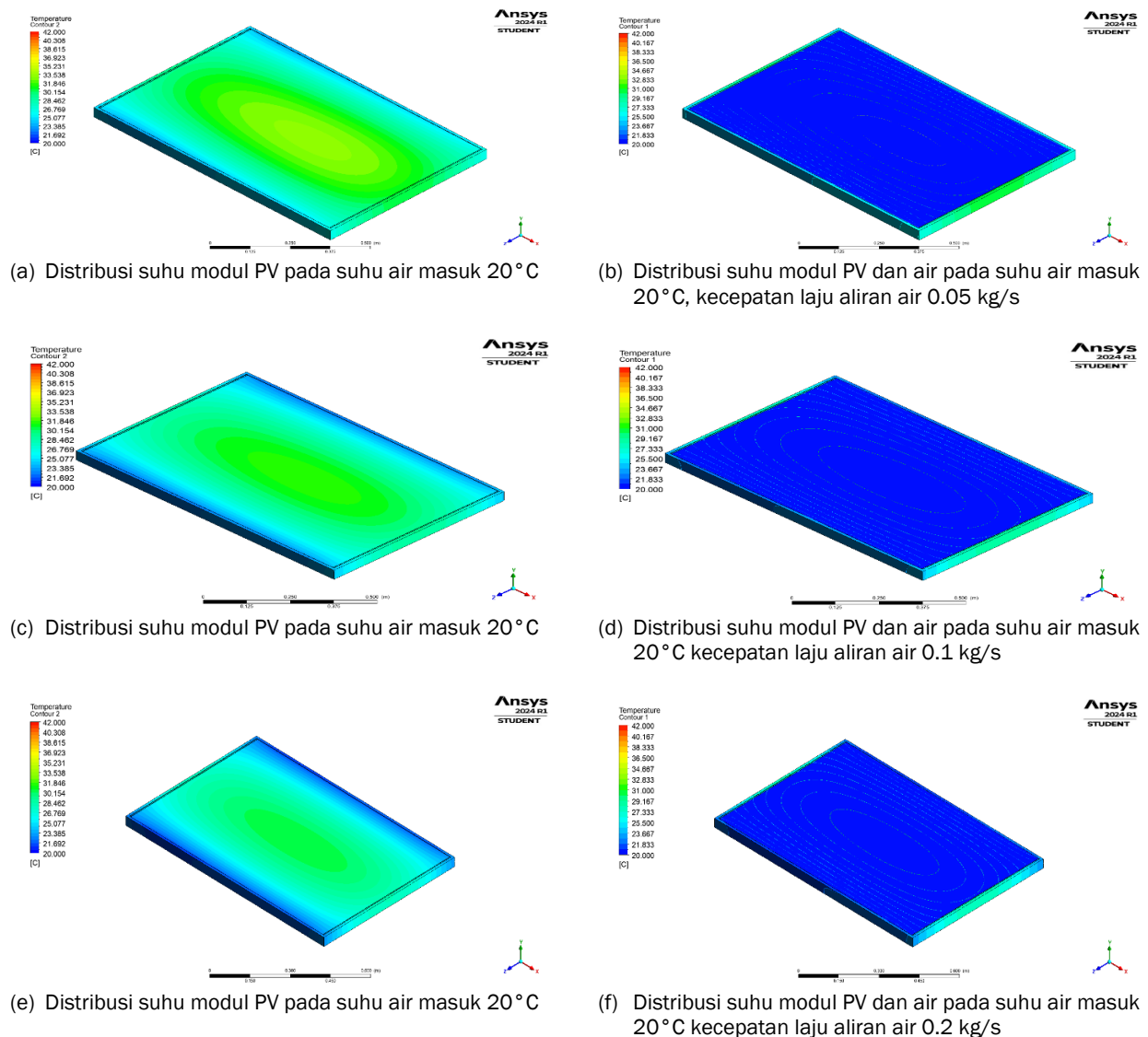
Gambar 6. Modul PV di mesh menggunakan ANSYS.

Setelah itu, dilakukan penambahan kondisi batas ke model geometri. Kondisi batas konveksi diterapkan pada permukaan depan modul PV dengan sistem pendingin air. Untuk sistem pendingin air, kondisi batas *inlet* (biru) didefinisikan oleh kecepatan seragam yang diterapkan pada permukaan depan panel PV dan kondisi batas *outlet* (merah) diatur menjadi tekanan nol seperti yang ditampilkan pada Gambar 7. Jumlah iterasi pada simulasi dilakukan selama 9 jam atau 540 menit. Satu langkah waktu (*time step*) diatur untuk memiliki periode sebesar 5 menit, sehingga terdapat 108 kali langkah waktu. Dengan iterasi per satu langkah waktu adalah sebanyak 10 iterasi, maka total iterasi yang dibutuhkan adalah total langkah waktu dikali iterasi per satu langkah waktu, yaitu sebesar 1080 kali iterasi dengan nilai residual 0,001.



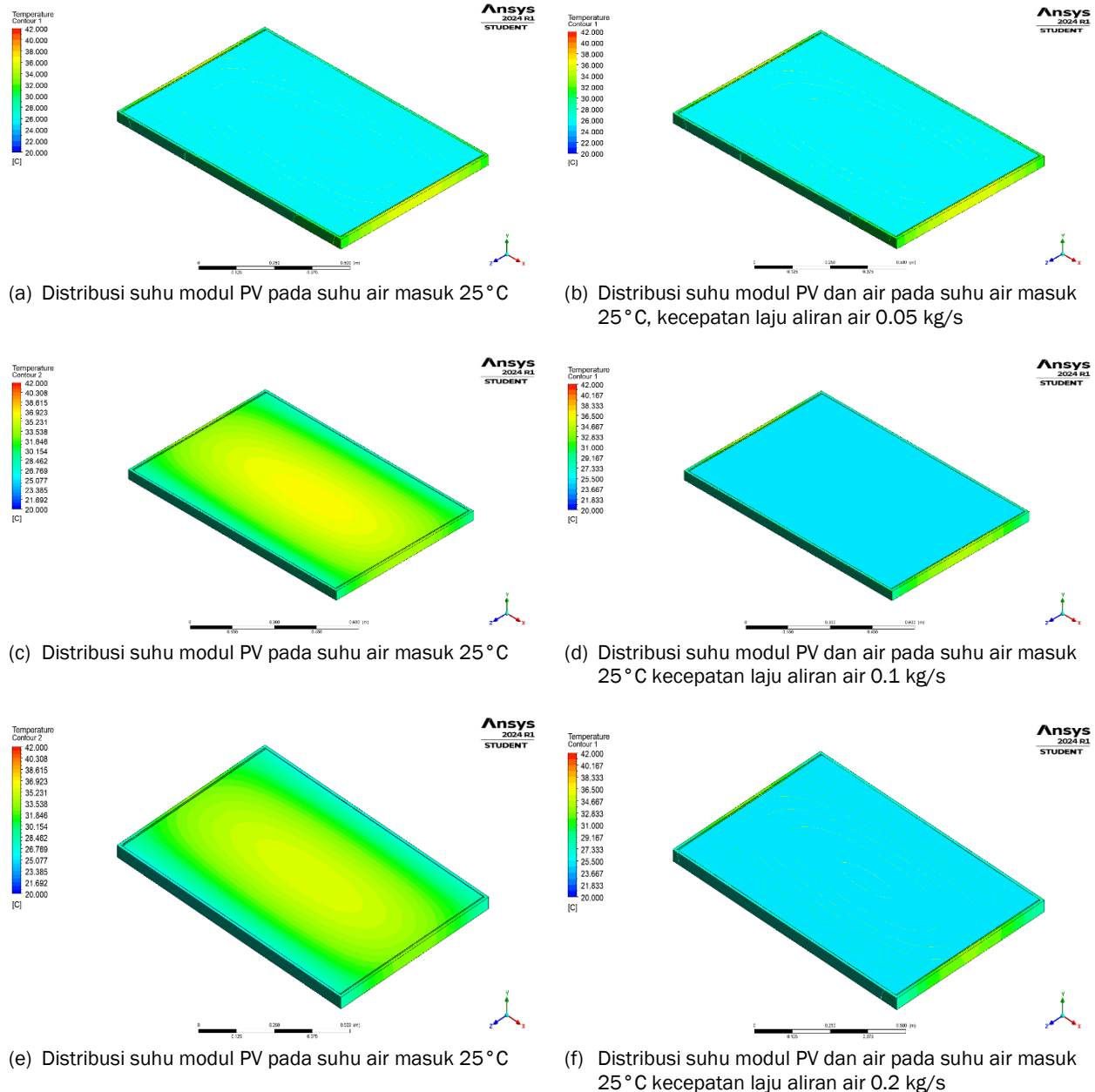
Gambar 7. Setup *inlet* dan *outlet* sistem pendingin air.

Selanjutnya, perilaku termal modul PV akan dipengaruhi oleh parameter operasi dari sistem pendingin air. Hasil simulasi kondisi *fluent* ini berfokus pada variasi laju aliran air dan suhu air masuk. Rentang suhu air masuk adalah dari 20°C hingga 30°C dengan interval 5°C dan kecepatan air masuk divariasikan sebesar 0,05, 0,1, dan 0,2 kg/s. Dalam Ansys Fluent, sensor temperatur ditempatkan di bagian belakang modul PV untuk mengukur distribusi suhu modul PV. Gambar 8 hingga Gambar 10 menunjukkan plot kontur distribusi suhu pada permukaan modul PV dengan berbagai laju aliran air pada suhu air masuk tertentu, dengan jangkauan temperatur untuk seluruh gambar kontur diatur konstan berkisar 20° – 42°C.



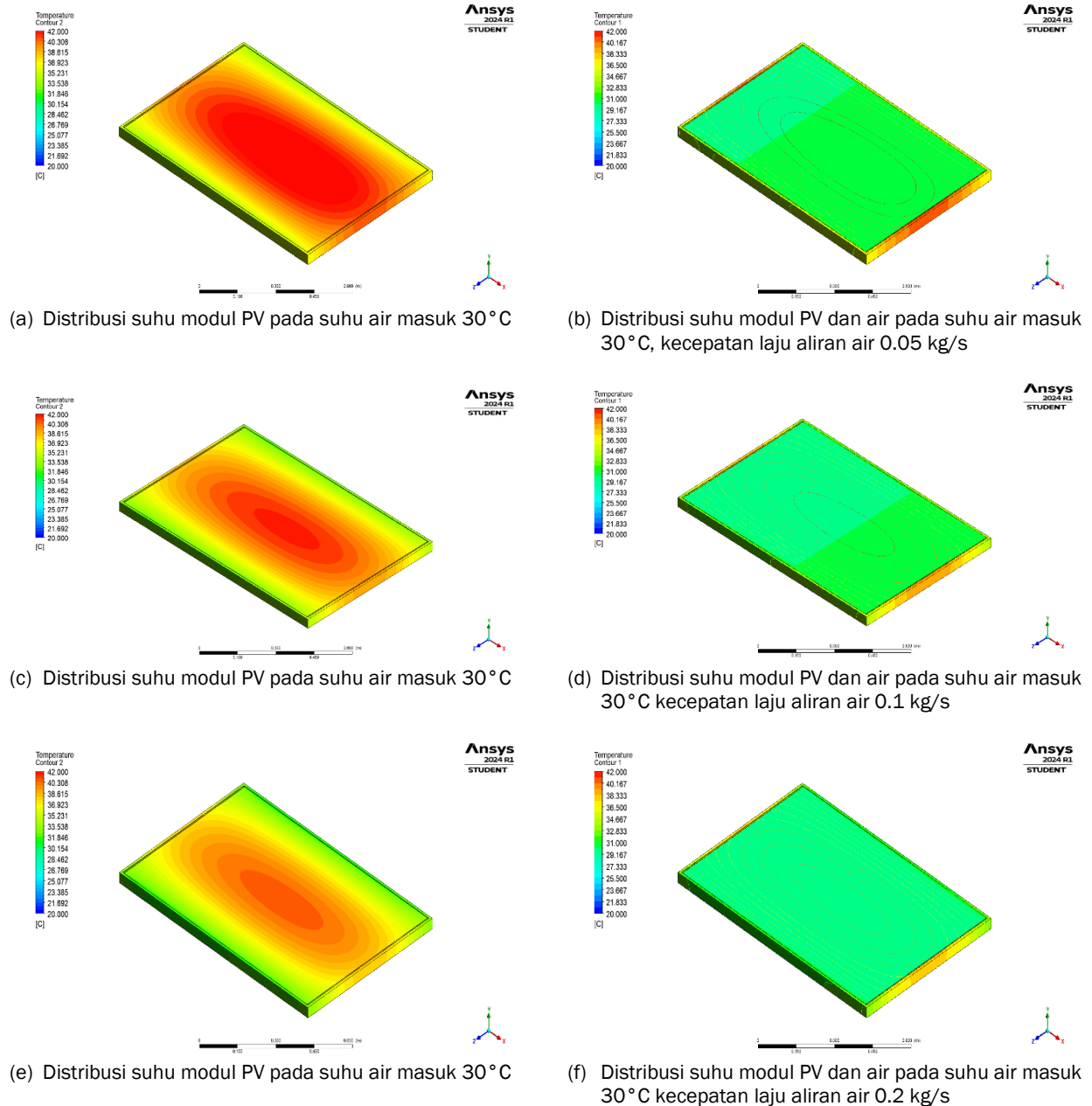
Gambar 8. Distribusi suhu modul PV 20 °C dan variasi laju aliran air masuk.

Berdasarkan Gambar 8 hingga Gambar 10, jelas ditunjukkan bahwa permukaan terdingin dari modul PV ditutupi oleh warna biru paling banyak pada suhu air masuk 20 °C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Sementara modul PV yang dioperasikan pada suhu air masuk 30 °C adalah yang terpanas, dengan permukaan modul PV yang ditutupi oleh warna orange kekuningan paling banyak, seperti yang ditampilkan pada Gambar 10. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa suhu air masuk yang lebih tinggi mentransfer lebih sedikit panas dari modul PV dibandingkan dengan suhu air masuk yang lebih rendah. Ini mengakibatkan suhu modul PV yang lebih tinggi. Dengan kata lain, semakin rendah suhu air masuk, semakin baik efek pendinginannya untuk modul PV. Dengan demikian, perbedaan kontur temperatur dari tiap-tiap variasi laju aliran massa air pendingin dan temperatur masukan air pendingin dapat terlihat dengan jelas akibat adanya perbedaan warna dari tiap-tiap kontur.

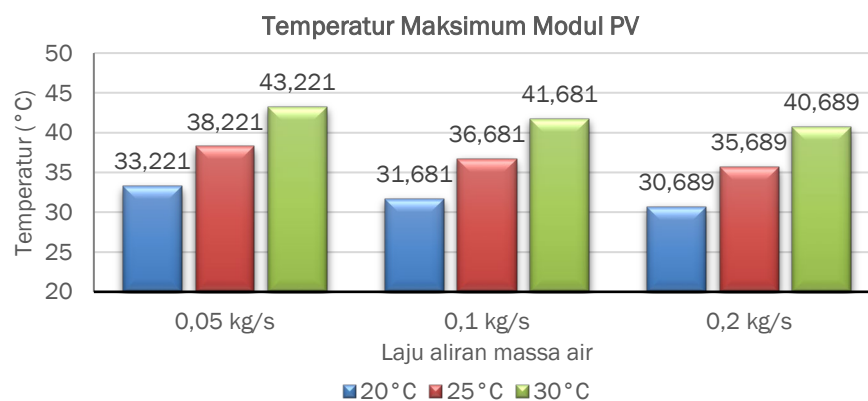


Gambar 9. Distribusi suhu modul PV 25 °C dan variasi laju aliran air masuk.

Perbandingan nilai temperatur maksimum modul PV terhadap variasi laju aliran air dan temperatur masukan air dapat dilihat pada Gambar 11. Nilai temperatur maksimum modul PV yang terendah dicapai ketika modul PV mengalami pendinginan dengan laju aliran sebesar 0,2 kg/s dan temperatur masukan air sebesar 20 °C. Oleh karena itu, efek penyerapan panas pada modul PV dapat ditingkatkan tidak hanya dengan mengubah temperatur masukan air yang berperan sebagai fluida pendingin, namun juga dapat dilakukan dengan meningkatkan laju aliran air.



Gambar 10. Distribusi suhu modul PV 30 °C dan variasi laju aliran air masuk.



Gambar 11. Temperatur maksimum modul PV

3.2 Diskusi

Dari pengujian simulasi dapat dikatakan bahwa dengan menggunakan data pengukuran iradiasi terhadap waktu beserta suhu udara pada kondisi alami, simulasi Ansys Fluent menunjukkan kinerja terbaik untuk distribusi termal pada modul PV dengan memvariasikan laju aliran air. Penggunaan simulasi ini memungkinkan nilai distribusi suhu termal dapat diperoleh langsung pada saat pengukuran. Mengingat besaran yang ingin diukur adalah iradiasi terhadap periode waktu maka metode *fluent* dipilih untuk melihat hasil pendinginan tersebut.

4 Kesimpulan

Model termal tiga dimensi dari modul PV tanpa dan dengan sistem pendingin air telah dianalisis menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent 2024 R1 Student. Tujuan utama dari analisis simulasi ini adalah untuk melihat pengaruh variasi laju aliran air pada sistem pendinginan modul PV. Analisis simulasi ini telah memberikan kontribusi signifikan dalam sistem pendinginan pada modul PV. Dengan memperhatikan kondisi lingkungan dan operasional, distribusi suhu modul PV tanpa sistem pendingin lebih tinggi daripada modul PV dengan sistem pendingin air. Selain itu, sistem pendingin air juga telah dianalisis dalam pengaruh suhu air masuk terhadap kinerja efek pendinginan. Dapat disimpulkan bahwa suhu air masuk 20°C dengan laju aliran air 0,2 kg/s menghasilkan distribusi suhu yang lebih rendah dan merata pada modul PV. Dengan demikian, peningkatan laju aliran air dan penurunan suhu air masuk terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja pendinginan modul fotovoltaik.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dilakukan secara mandiri tanpa dibiayai oleh pihak lembaga atau institusi manapun.

Referensi

- [1] F. L. Agus Cahyono Adi, "Handbook of energy and economic statistics of Indonesia," *Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia*, 2022.
- [2] A. C. Lazaroïu, M. Gmal Osman, C. V. Strejoiu, and G. Lazaroïu, "A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su152316297.
- [3] I. Renewable Energy Agency, *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway - Executive Summary*. 2022. [Online]. Available: www.irena.org
- [4] A. D. Sakti *et al.*, "Multi-Criteria Assessment for City-Wide Rooftop Solar PV Deployment: A Case Study of Bandung, Indonesia," *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/rs14122796.
- [5] E. Tarigan, "The Effect of Dust on Solar PV System Energy Output under Urban Climate of Surabaya, Indonesia," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Nov. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1373/1/012025.
- [6] T. Rahajoeningroem and I. Jatnika, "Sistem Pendingin Otomatis Panel Surya Untuk Peningkatan Daya Output Berbasis Mikrokontroler Solar Panel Automatic Cooling System to Increase the Output Power Based on The Microcontroller," *TELEKONTRAN*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.34010/telekontran.v10i1.4712.
- [7] G. R. Cahyono, P. R. Ansyah, and N. Q. Awaly, "Pendinginan panel surya menggunakan kotak pendingin dan sirip pendingin," *Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, vol. 13, no. 1, May 2021, doi: 10.28989/angkasa.v13i1.947.
- [8] R. Lazzarin, "Heat pumps and solar energy: A review with some insights in the future," Aug. 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.03.031.
- [9] S. Almoatham, A. Chiasson, R. Mulford, and M. Moreno-Pena, "Development of experimentally-validated models for nocturnal cooling of thermal systems with photovoltaic thermal (PVT) modules," *Solar Energy*, vol. 268, p. 112279, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2023.112279.
- [10] M. M. Rahman, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Effects of various parameters on PV-module power and efficiency," *Energy Convers Manag*, vol. 103, pp. 348–358, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.06.067.
- [11] W. Woon Lee Meng Lee Lian Seng, "Solar PV Cell Cooling with cool water circulation system Design of closed-loop cool water re-circulatory system," 2021. [Online]. Available: www.globalscientificjournal.com

- [12] Y. M. Irwan *et al.*, "Comparison of solar panel cooling system by using dc brushless fan and dc water," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2015. doi: 10.1088/1742-6596/622/1/012001.
- [13] Z. Syafiqah, N. A. M. Amin, Y. M. Irwan, M. Z. Shobry, and M. S. A. Majid, "Analysis of photovoltaic with water pump cooling by using ANSYS," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Oct. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/908/1/012083.
- [14] M. Huot, L. Kumar, J. Selvaraj, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Performance Investigation of Tempered Glass-Based Monocrystalline and Polycrystalline Solar Photovoltaic Panels," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/2335805.
- [15] B. Sutanto, Y. S. Indartono, A. T. Wijayanta, and H. Iacovides, "Enhancing the performance of floating photovoltaic system by using thermosiphon cooling method: Numerical and experimental analyses," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 180, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107727.
- [16] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, and R. Wennersten, "Power generation efficiency and prospects of floating photovoltaic systems," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 1136–1142. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.483.
- [17] B. Sutanto *et al.*, "Design and analysis of passively cooled floating photovoltaic systems," *Appl Therm Eng*, vol. 236, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121801.
- [18] N. M. Adam, O. H. Attia, A. O. Al-Sulttani, H. A. Mahmood, A. As'array, and K. A. M. Rezali, "Numerical analysis for solar panel subjected with an external force to overcome adhesive force in desert areas," *CFD Letters*, vol. 12, no. 9, pp. 60–75, 2020, doi: 10.37934/cfdl.12.9.6075.
- [19] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th edition. Wiley, 2011.