

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

Pemodelan dan Simulasi Perpindahan Panas Konveksi pada Panel Surya Menggunakan Metode CFD dengan Pendingin Kipas DC

Muhammad Edgar Gazanata^{*}, Jojo Sumarjo, Deri Teguh Santoso

Fakultas Teknik, Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 18 April 2026
Revisi Akhir: 22 Juli 2026
Diterbitkan Online: 31 Juli 2026

KATA KUNCI

ANSYS Fluent
CFD
Kipas DC
Panel Surya
Perpindahan Panas

KORESPONDENSI^(*)

Phone: +62 815-1770-2192
E-mail: muhammadedgar26@gmail.com

A B S T R A K

Temperatur operasi yang tinggi menurunkan daya dan efisiensi modul fotovoltaik, sehingga diperlukan sistem pendinginan yang mampu meningkatkan pelepasan panas secara konvektif. Penelitian ini memodelkan distribusi suhu dan aliran udara pada panel surya berukuran $1,44 \text{ m} \times 0,77 \text{ m}$ yang didinginkan menggunakan kipas DC. Tiga geometri rongga pengarah aliran, yaitu kotak, setengah lingkaran, dan segitiga, dianalisis menggunakan ANSYS Fluent dengan intensitas radiasi rata-rata 614 W/m^2 . Model divalidasi terhadap data eksperimen dan menghasilkan mean absolute error sebesar $3,55 \text{ K}$ serta galat relatif $1,14\%$. Pada kecepatan inlet $7,92 \text{ m/s}$, rongga segitiga menghasilkan suhu rata-rata panel terendah sebesar $38,15^\circ\text{C}$ dan laju perpindahan panas tertinggi 202 W . Rongga setengah lingkaran menghasilkan suhu rata-rata $39,25^\circ\text{C}$ dan 185 W , sedangkan rongga kotak menghasilkan $40,35^\circ\text{C}$ dan 172 W . Variasi kecepatan menunjukkan bahwa $7,92 \text{ m/s}$ memberikan performa pendinginan terbaik, sedangkan 6 m/s masih mempertahankan aliran yang relatif merata. Hasil penelitian menegaskan bahwa optimasi geometri rongga dan kecepatan kipas dapat meningkatkan kinerja termal panel surya.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki sumber energi surya yang besar karena berada di wilayah tropis dengan penyinaran matahari sepanjang tahun. Meskipun demikian, pemanfaatan energi surya masih menghadapi kendala termal pada modul fotovoltaik. Efisiensi modul komersial umumnya berada pada kisaran $15\text{--}22\%$, sedangkan koefisien temperatur dayanya berkisar sekitar $-0,35\%$ hingga $-0,50\%$ per kenaikan 1°C di atas kondisi standar 25°C . Akumulasi panas karena radiasi tinggi dapat meningkatkan temperatur sel, menurunkan tegangan keluaran, dan mempercepat degradasi material modul [1].

Pengendalian temperatur dapat dilakukan melalui pendinginan pasif maupun aktif. Pendinginan pasif tidak memerlukan energi tambahan, tetapi kinerjanya bergantung pada kondisi angin alami, luas pelepas panas, serta perbedaan temperatur antara panel dan lingkungan [2]. Pendinginan aktif menggunakan kipas DC dipilih karena konstruksinya sederhana, mudah dikendalikan, tidak memerlukan sirkuit air, dan memiliki risiko kebocoran serta kebutuhan perawatan yang lebih rendah dibandingkan sistem pendingin cair [3]. Peningkatan kecepatan udara di belakang panel memperbesar koefisien perpindahan panas konveksi sehingga panas dapat dilepaskan lebih cepat.

Penelitian eksperimental dan numerik sebelumnya menunjukkan bahwa konveksi paksa mampu menurunkan temperatur panel serta meningkatkan daya keluaran [4]. Kajian CFD juga memperlihatkan bahwa bentuk saluran atau rongga pendingin memengaruhi pola aliran, zona stagnasi, dan keseragaman temperatur permukaan [5]. Studi lain

mengoptimalkan sumber pendingin, material penyimpan panas, atau konfigurasi sirip, tetapi belum secara khusus membandingkan bentuk rongga kotak, setengah lingkaran, dan segitiga pada sistem kipas DC dengan kondisi batas yang sama [6]. Celah tersebut menunjukkan perlunya analisis geometri pengarah aliran agar udara tidak hanya memiliki kecepatan tinggi di inlet, tetapi juga terdistribusi secara efektif di seluruh bagian belakang panel.

Penelitian ini bertujuan memvalidasi model Computational Fluid Dynamics (CFD) terhadap data eksperimen, menganalisis pengaruh tiga bentuk rongga pengarah aliran terhadap distribusi kecepatan dan temperatur, serta mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan kipas sebesar 2, 4, 6, dan 7,92 m/s. Hasil analisis digunakan untuk menentukan konfigurasi pendinginan aktif yang menghasilkan temperatur panel terendah dan laju perpindahan panas tertinggi.

TINJAUAN PUSTAKA

Kajian terbaru mengenai pendinginan modul fotovoltaik membagi metode pengendalian panas menjadi sistem pasif, aktif, dan hibrida. Sistem aktif memiliki kemampuan penurunan temperatur yang lebih konsisten karena debit fluida dapat dikendalikan, tetapi memerlukan energi tambahan untuk mengoperasikan kipas atau pompa [2].

Hussien, Eltayesh, dan El-Batsh melakukan eksperimen serta simulasi CFD pada panel fotovoltaik dengan konveksi paksa. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaturan aliran udara berpengaruh terhadap distribusi temperatur dan peningkatan efisiensi listrik, sekaligus menegaskan pentingnya validasi model numerik menggunakan data eksperimen [4].

Antara dkk. membandingkan beberapa geometri saluran PV/T menggunakan CFD dan menemukan bahwa bentuk saluran memengaruhi tahanan aliran, koefisien perpindahan panas, serta keseragaman temperatur [5]. Temuan tersebut menjadi dasar pemilihan variasi rongga dalam penelitian ini, sedangkan kontribusi penelitian terletak pada perbandingan bentuk kotak, setengah lingkaran, dan segitiga serta evaluasi variasi kecepatan kipas pada geometri terbaik.

Panel Surya

Panel surya tersusun atas sel fotovoltaik berbahan semikonduktor yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Daya keluaran ditentukan oleh irradiansi, luas aktif, karakteristik material, temperatur sel, dan kondisi lingkungan. Temperatur operasi yang meningkat menurunkan tegangan rangkaian terbuka dan daya maksimum, sehingga pengendalian panas menjadi bagian penting dalam desain sistem fotovoltaik [10].



Gambar 1. Panel Surya Tipe Monocrystalline

Klasifikasi Panel Surya

Sel surya terbuat dari material semikonduktor dan dirangkai menjadi modul untuk memperoleh daya keluaran yang lebih besar. Secara umum, modul silikon dikelompokkan menjadi monokristalin, polikristalin, dan amorf. Perbedaan struktur kristal tersebut memengaruhi efisiensi konversi, biaya produksi, luas modul, dan respons terhadap kondisi penyinaran [3].

1. Tipe monokristalin, terbuat dari silikon kristal tunggal, memiliki efisiensi tertinggi (12–20%) namun mahal dan kurang optimal pada kondisi minim cahaya.



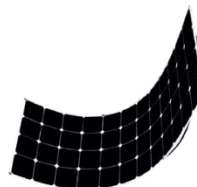
Gambar 2. Solar Cell Monocrystalline

2. Tipe polikristalin terbuat dari silikon dengan kristal tidak beraturan dan memiliki efisiensi konversi 10–15%, lebih rendah dari monokristalin namun lebih tinggi dari amorf. Meski tampilannya tidak merata, modul ini lebih terjangkau dan tetap efektif dalam kondisi cahaya redup, menjadikannya pilihan populer.



Gambar 3. Solar Cell Polycrystalline

3. Tipe amorf terbuat dari silikon non-kristalin berbentuk lembaran tipis dengan efisiensi konversi terendah, sekitar 8–12%. Karena efisiensinya rendah, modul ini berukuran lebih besar untuk daya setara. Meski dahulu kurang diminati, teknologi terbaru membuatnya lebih stabil dan andal. Modul amorf merupakan pilihan paling ekonomis di antara ketiga tipe.



Gambar 4. Solar Cell Amorf

Prinsip Kerja Panel Surya

Sel surya bekerja berdasarkan sambungan p-n antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Ketika foton dengan energi yang cukup mengenai material semikonduktor, pasangan elektron-lubang terbentuk dan dipisahkan oleh medan listrik internal pada sambungan. Pergerakan pembawa muatan tersebut menghasilkan arus searah melalui kontak logam sel [3].

Pendingin Kipas DC

Pentingnya Sistem Pendinginan Aktif pada Panel Surya

Kenaikan temperatur sel terjadi karena sebagian besar radiasi yang tidak dikonversi menjadi listrik berubah menjadi panas. Pendinginan aktif dengan kipas DC meningkatkan kecepatan udara di belakang panel dan memperbesar konveksi paksa. Metode ini relatif sederhana, mudah dikendalikan, dan sesuai untuk sistem skala kecil hingga menengah [3].

Konfigurasi dan Efektivitas Kipas DC pada Pendinginan Panel Surya

Efektivitas kipas DC tidak hanya ditentukan oleh kecepatan inlet, tetapi juga oleh bentuk rongga, posisi kipas, luas penampang, dan jalur keluarnya udara. Geometri yang tidak tepat dapat membentuk zona stagnasi sehingga sebagian permukaan panel tetap panas. Sebaliknya, rongga yang mengarahkan aliran secara bertahap dapat meningkatkan keseragaman kecepatan dan temperatur [5].

Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah proses aliran energi termal dari suhu tinggi ke rendah hingga tercapai kesetimbangan. Terdapat tiga mekanisme utama: konduksi, konveksi, dan radiasi, yang masing-masing mentransfer panas berdasarkan perbedaan suhu antar objek atau area.

Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan energi panas melalui material tanpa perpindahan massa. Laju konduksi satu dimensi dinyatakan dengan Hukum Fourier:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA(dT/dx) \quad (1)$$

di mana:

Q = Laju perpindahan panas (Watt, W)

k = Konduktivitas termal bahan ($W/m \cdot K$)

A = Luas penampang bahan yang dilalui panas (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradien suhu, yaitu perubahan suhu per satuan panjang (K/m)

Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan panas antara permukaan padat dan fluida yang bergerak. Laju konveksi dihitung menggunakan hukum pendinginan Newton:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

di mana:

- $\dot{Q}$ = Laju perpindahan panas (W)
 h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot K$)
 A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)
 ΔT = Perbedaan suhu antara permukaan dan fluida (K)

Terdapat dua jenis konveksi, yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Konveksi bebas terjadi karena perbedaan temperatur yang memicu perbedaan densitas fluida, menghasilkan sirkulasi alami udara di sekitar panel surya. Namun, efisiensinya terbatas, terutama saat suhu tinggi. Sebaliknya, konveksi paksa memanfaatkan alat seperti kipas DC untuk mempercepat aliran udara, meningkatkan perpindahan panas dan menurunkan suhu panel. Dalam penelitian ini, kipas DC dengan kecepatan 7,92 m/s digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi panel melalui kontrol suhu yang lebih baik [9].

Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan energi melalui gelombang elektromagnetik dan tidak memerlukan medium. Pertukaran radiasi bersih antara permukaan dan lingkungan dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3)$$

di mana:

- $\dot{Q}$ = Laju perpindahan panas (W)
 ϵ = Emisivitas permukaan ($0 \leq \epsilon \leq 1$)
 σ = Konstanta Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)
 A = Luas permukaan (m^2)
 T = Suhu permukaan (K)
 T_8 = Suhu lingkungan sekitarnya (K)

Koefisien Perpindahan Panas

Koefisien perpindahan panas (h) menunjukkan efektivitas transfer panas antara permukaan dan fluida melalui konveksi. Parameter ini penting dalam desain termal seperti penukar panas dan pendinginan elektronik, dan biasanya dihitung menggunakan bilangan Nusselt, Reynolds, dan Prandtl.

$$h = \text{Nu} \cdot k/D \quad (4)$$

di mana:

- h = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot K$)
 Nu = Bilangan nusselt
 k = Konduktivitas termal fluida
 D = Diameter hidraulik pipa/saluran

Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt adalah bilangan tak berdimensi yang membandingkan perpindahan panas konveksi dengan konduksi dalam fluida. Nilainya mencerminkan efisiensi perpindahan panas dan bergantung pada jenis aliran (laminar atau turbulen) serta geometri sistem.

Rumus umum untuk bilangan Nusselt:

$$\text{Nu} = hL/k \quad (5)$$

di mana:

- Nu = Bilangan nusselt
 h = Koefisien perpindahan panas konvektif ($W/m^2 \cdot K$)
 L = Panjang karakteristik (m)
 K = Konduktivitas termal fluida ($W/m^2 \cdot K$)

Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos dalam aliran fluida, digunakan untuk menentukan apakah aliran bersifat laminar atau turbulen.

Rumus umum untuk bilangan *Reynolds*:

$$Re = \rho v D h / \mu = v D h / \nu \quad (6)$$

di mana:

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s) D = Diameter hidraulik (m)

μ = Viskositas dinamis fluida ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ atau $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)

Parameter Aliran :

Laminar = Bilangan Reynolds kurang dari < 2300

Turbulen = Bilangan Reynolds lebih dari > 4000

Transisi = Bilangan Reynolds antara $2300 < Re < 4000$

Software Desain

Geometri panel dan rongga pengarah aliran dibuat dalam SolidWorks 2023. Pemodelan parametrik digunakan agar dimensi dasar panel tetap sama pada ketiga variasi rongga, sehingga perbedaan hasil simulasi terutama berasal dari perubahan bentuk jalur aliran.

Software Simulasi

Analisis numerik adalah metode untuk menyelesaikan masalah matematika kontinu secara pendekatan, khususnya dalam kasus kompleks dan non-linear. Dalam penelitian ini, pemodelan 3D dilakukan dengan SolidWorks, sedangkan simulasi CFD menggunakan ANSYS. ANSYS sendiri adalah perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang digunakan untuk analisis mekanis, termal, fluida, dan elektromagnetik, memungkinkan simulasi tanpa prototipe fisik guna menghemat waktu dan biaya.

Computational Fluid Dynamics (CFD) menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi secara numerik. Tahap analisis terdiri atas pra-pemrosesan berupa impor geometri dan pembentukan mesh, pemrosesan berupa penetapan model fisik serta kondisi batas, dan pasca-pemrosesan berupa evaluasi kontur kecepatan, temperatur, serta laju perpindahan panas [5].

Ansys Fluent adalah perangkat lunak CFD komersial yang memanfaatkan persamaan Navier-Stokes untuk mensimulasikan aliran fluida dan perpindahan panas, baik pada geometri sederhana maupun kompleks.

Persamaan Navier-Stokes sendiri merupakan dasar utama dalam mekanika fluida, digunakan untuk memodelkan berbagai fenomena aliran, termasuk yang diteliti dalam studi ini, seperti aliran udara dalam rongga.

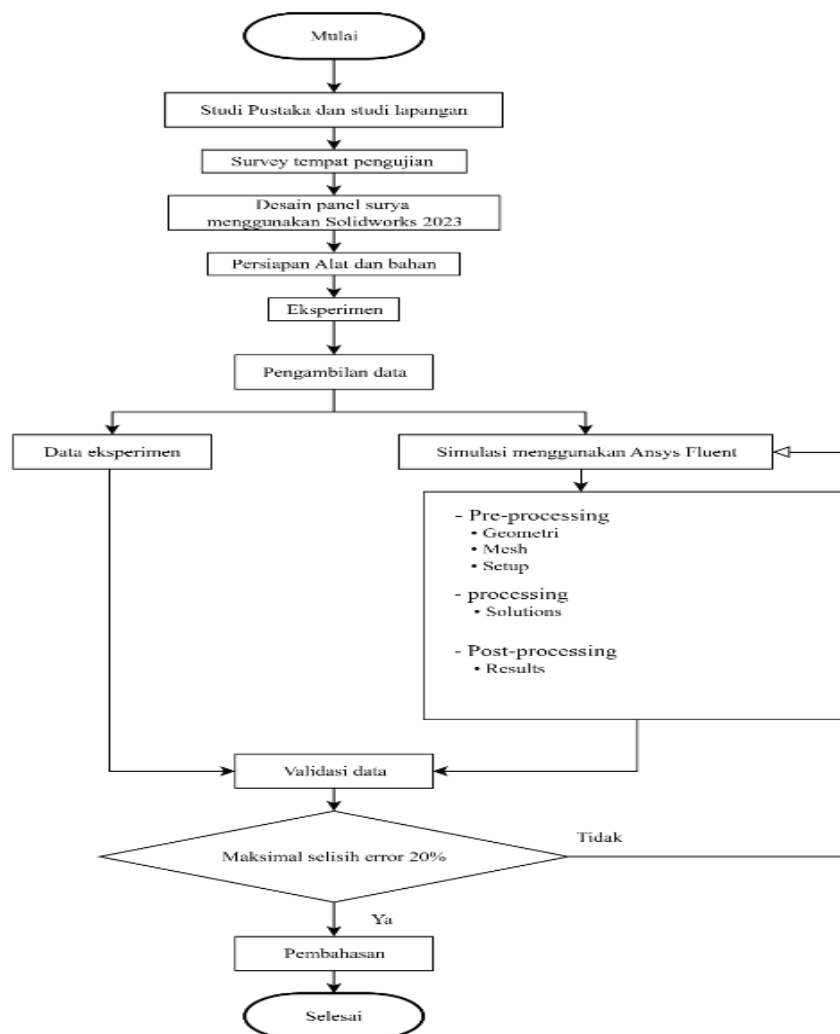
METODOLOGI

Penelitian ini menggabungkan eksperimen lapangan dan simulasi numerik. Model tiga dimensi dibuat menggunakan SolidWorks 2023, kemudian dianalisis dengan ANSYS Fluent 2025 R1. Panel surya berukuran $1,44 \text{ m} \times 0,77 \text{ m} \times 0,035 \text{ m}$, sedangkan rongga pengarah aliran berukuran $1,5836 \text{ m} \times 0,78 \text{ m} \times 0,3556 \text{ m}$ dan dilengkapi enam kipas DC berukuran $0,12 \text{ m} \times 0,12 \text{ m}$. Tiga geometri rongga yang dibandingkan adalah kotak, setengah lingkaran, dan segitiga. Semua variasi menggunakan dimensi panel, sumber panas, temperatur inlet, dan luas inlet yang sama agar pengaruh geometri dapat dievaluasi secara langsung.

Simulasi menggunakan solver pressure-based dalam kondisi transien dengan formulasi kecepatan absolut dan persamaan energi diaktifkan. Model turbulensi yang digunakan adalah realizable $k-\epsilon$. Mesh dibentuk dengan metode Multizone dan pemetaan elemen hexa/prism dengan ukuran elemen 2 mm. Kondisi batas terdiri atas velocity inlet pada temperatur 305,69 K ($32,54^\circ\text{C}$) dengan kecepatan awal 7,92 m/s, kemudian divariasikan menjadi 6, 4, dan 2 m/s; pressure outlet; serta dinding no-slip. Panel diberi sumber panas volumetrik 15.000 W/m^3 , koefisien perpindahan panas $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$,

temperatur free-stream 305,69 K, dan ketebalan dinding 0,03 m. Pressure–velocity coupling menggunakan skema Coupled dan inisialisasi Hybrid. Pengaturan transien yang tercatat pada tugas akhir adalah 192 time step, ukuran time step 12 s, dan maksimum 100 iterasi per time step.

Data eksperimen dikumpulkan selama lima hari, yaitu 22, 24, 25, 26, dan 27 Juli, pada pukul 08.00–16.00 WIB dengan interval 10 menit sehingga diperoleh 49 titik data per hari untuk setiap parameter. Temperatur permukaan panel diukur pada bagian tengah belakang modul menggunakan termometer digital, kecepatan udara diukur menggunakan anemometer sekitar 2 cm dari permukaan panel, dan irradiansi matahari diukur menggunakan solar power meter. Nilai irradiansi rata-rata 614 W/m² digunakan sebagai dasar penentuan sumber panas. Validasi CFD dilakukan pada kondisi rongga kotak dan kipas 7,92 m/s dengan membandingkan 13 titik temperatur pada rentang 11.00–13.00 WIB. Kesesuaian model dievaluasi menggunakan mean absolute error (MAE) dan galat relatif. Jumlah elemen, jumlah node, parameter kualitas mesh, dan hasil grid independence test tidak dicantumkan dalam tugas akhir; karena itu, data tersebut tidak direkonstruksi dan dinyatakan sebagai keterbatasan penelitian.



Gambar 5. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Parameter utama simulasi CFD

Parameter	Nilai/kondisi	Keterangan
Perangkat lunak	SolidWorks 2023; ANSYS Fluent 2025 R1	Pemodelan geometri dan simulasi CFD
Geometri utama	Panel 1,44 × 0,77 × 0,035 m; rongga 1,5836 × 0,78 × 0,3556 m	Enam kipas DC berukuran 0,12 × 0,12 m

Parameter	Nilai/kondisi	Keterangan
Jenis solver	Pressure-based; transien; absolute velocity; energy on	Aliran dan perpindahan panas tak tunak
Model turbulensi	Realizable k- ϵ	Dipilih untuk aliran turbulen; $Re \approx 67.200$
Mesh	Multizone; mapped hexa/prism; element size 2 mm	Jumlah elemen/node dan kualitas mesh tidak terdokumentasi
Inlet	Velocity inlet; 305,69 K; 7,92 m/s	Variasi lanjutan 6, 4, dan 2 m/s
Outlet	Pressure outlet	Tekanan gauge mengikuti pengaturan default/proyek
Dinding/panel	No-slip; tebal 0,03 m; $h = 25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	Free-stream temperature 305,69 K
Sumber panas	15.000 W/m ³	Diterapkan pada solid panel
Kopling dan inisialisasi	Coupled; Hybrid Initialization	Flow Courant number 15; energy 0,8
Pengaturan transien	192 time step; $\Delta t = 12 \text{ s}$; maks. 100 iterasi/time step	Reporting interval 60
Uji independensi mesh	Tidak dicantumkan pada tugas akhir	Keterbatasan; perlu diuji pada penelitian lanjutan

Sumber: Data penelitian pada tugas akhir Muhammad Edgar Gazanata (2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Menghitung Luas Permukaan Panel Surya

$$A = L \times W = 1,44 \times 0,77 = 1,1088 \text{ m}^2$$

Volume Panel:

$$V = L \times W \times T = 1,44 \times 0,77 \times 0,035 = 0,0388 \text{ m}^3$$

Estimasi Heat Source

Berdasarkan pengukuran irradiansi pada 22 Juli pukul 08.00–16.00 WIB, diperoleh intensitas radiasi rata-rata sebesar 614 W/m². Nilai tersebut digunakan sebagai input energi termal. Dengan luas panel 1,1088 m² dan efisiensi konversi 14,5%, panas bersih yang diserap dihitung menggunakan persamaan energi.

$$Q_{\text{panas}} = (1 - \eta)GA = (1 - 0,145)(614)(1,1088) = 582 \text{ W}$$

Untuk simulasi numerik, panas bersih dikonversi menjadi sumber panas volumetrik berdasarkan volume ekuivalen panel:

$$q''' = Q_{\text{panas}}/V = 582/0,0388 = 15.000 \text{ W/m}^3.$$

$$\dot{q} = \frac{Q_{\text{panas}}}{(1 - \eta) \cdot A} = \frac{582}{0,0388} = 15000 \text{ W/m}^3$$

Perpindahan Panas Konduksi Ekuivalen pada Panel

Perhitungan konduksi dilakukan sebagai pendekatan ekuivalen menggunakan lapisan aluminium. Nilai ini menggambarkan kemampuan maksimum penghantaran panas material dan tidak digunakan sebagai pengganti hasil CFD karena panel fotovoltaik nyata tersusun atas beberapa lapisan dengan sifat termal yang berbeda.

Parameter perhitungan:

1. Konduktivitas termal aluminium: $k = 205 \text{ W/m}$
2. Ketebalan panel: $d = 0,035$
3. Luas permukaan: $A = 1,1088 \text{ m}^2$
4. Selisih suhu permukaan atas dan bawah panel:

$$\Delta T = 37,1^\circ \text{C} - 32,7^\circ \text{C} = 4,4^\circ \text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{konduksi}} = kA(\Delta T/d) = 205 \times 1,1088 \times (4,4/0,035) = 28,57 \text{ kW}$$

Perpindahan Panas Konveksi oleh Kipas

Pada kondisi eksperimen dengan kipas aktif, terjadi pendinginan aktif pada panel surya. Perhitungan konveksi dilakukan menggunakan suhu rata-rata panel selama dua hari, yaitu $37,27^\circ \text{C}$, guna meningkatkan akurasi hasil [3].

Luas permukaan panel $A = 1,44 \times 0,77 = 1,1088 \text{ m}^2$

Volume panel sebesar $V = 1,44 \times 0,77 \times 0,035 = 0,0388 \text{ m}^3$.

Kecepatan udara (V) = $7,92 \text{ m/s}$

Diameter hidraulik rongga dihitung dari luas penampang aliran dan keliling basah:

$$D_h = 4A_c/P$$

A = luas penampang aliran (m^2)

P = keliling basah atau total panjang permukaan dinding yang bersentuhan dengan fluida (m)

$$D_h = \frac{4 \cdot 0,0388}{1,1088} = 0,14 \text{ m}$$

Bilangan Reynolds kemudian dihitung menggunakan kecepatan inlet dan viskositas kinematik udara:

$$Re = vD_h/\nu$$

Gunakan ν (viskositas kinematik udara pada 35°C) adalah $1,655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} = \frac{7,92 \cdot 0,14}{1,655 \times 10^{-5}} = 67200 \text{ (Turbulen)}$$

Nilai Pr dihitung menggunakan data properti udara pada suhu 35°C dari literatur termodinamika.

$$Pr = \mu C_p/k$$

μ = viskositas dinamis udara ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

C_p = kapasitas panas spesifik udara ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

k = konduktivitas termal udara ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

$$Pr = \frac{1,872 \times 10^{-5} \cdot 1007}{0,0267} = 0,7057 = 0,704$$

Bilangan Nusselt untuk aliran turbulen dihitung menggunakan korelasi Dittus–Boelter:

Konduktivitas termal udara yang digunakan pada evaluasi koefisien konveksi adalah $k = 0,0262 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

bilangan Prandtl udara adalah $Pr = 0,704$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Berdasarkan korelasi turbulen dan pembulatan properti udara pada pengolahan data, digunakan $Nu = 158,3$. Setelah Re , Pr , dan Nu diperoleh, koefisien konveksi dihitung sebagai berikut:

$$h = Nuk/Dh$$

$$k = \text{konduktivitas termal udara } 0,0263 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$h = \frac{158,3 \cdot 0,0263}{0,14} = \frac{4,148}{0,14} = 29,63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Laju perpindahan panas konveksi selanjutnya dihitung menggunakan hukum pendinginan Newton:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

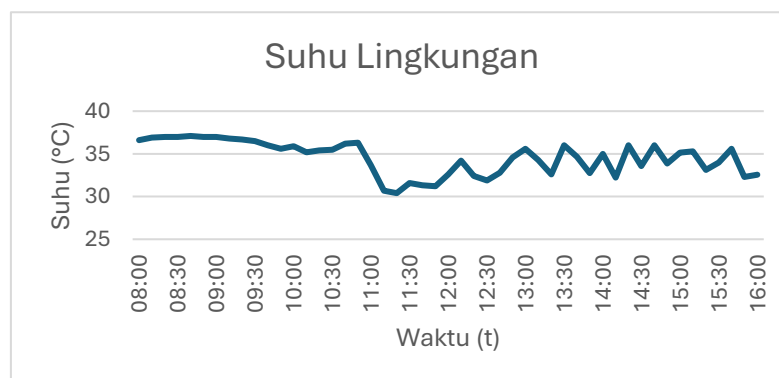
$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{\text{panel}} - T_{\infty} \\ &= 37,27^{\circ}\text{C} - 32,54^{\circ}\text{C} = 4,73^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T = 29,63 \cdot 1,1088 \cdot 4,73 = 155,6 \text{ W}$$

Data Eksperimen

Kondisi Lingkungan selama Eksperimen

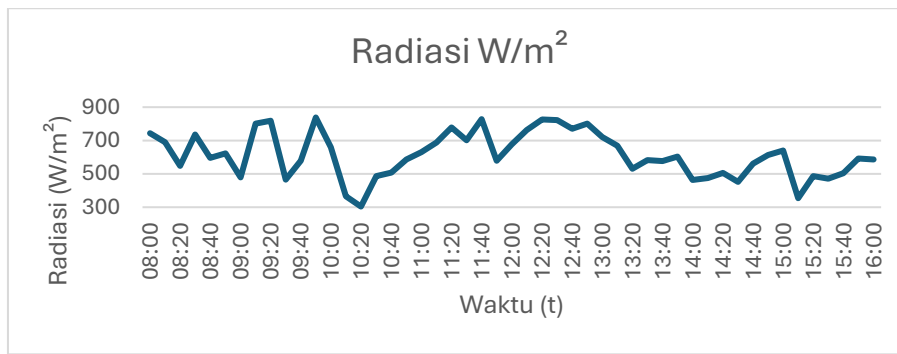
Profil kondisi lingkungan pada Gambar 6 berasal dari pengujian 22 Juli pukul 08.00–16.00 WIB dengan interval 10 menit. Suhu udara ambien tertinggi tercatat $37,1^{\circ}\text{C}$, terendah $30,4^{\circ}\text{C}$ pada pukul 11.20 WIB, dan rata-rata $34,33^{\circ}\text{C}$. Penurunan temperatur sekitar pukul 11.20 WIB berkaitan dengan kondisi berawan. Rentang 11.00–13.00 WIB digunakan untuk validasi karena mewakili periode beban termal tinggi sekaligus kondisi aliran kipas yang relatif stabil.



Gambar 6. Grafik Kondisi Lingkungan Eksperimen

Radiasi Matahari pada Panel Surya

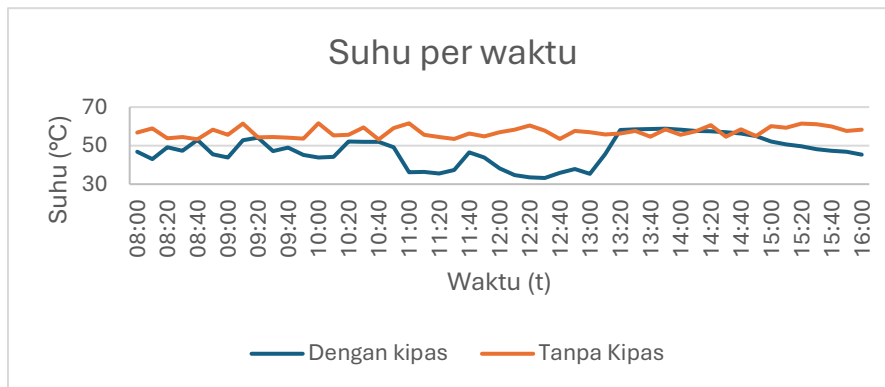
Pengukuran intensitas radiasi dilakukan selama 8 jam (08.00–16.00 WIB) dengan interval 10 menit menggunakan solar power meter di atas permukaan panel. Radiasi bervariasi antara $304\text{--}838 \text{ W/m}^2$, dengan rata-rata harian $614 \pm 136 \text{ W/m}^2$. Radiasi meningkat tajam hingga pukul 09.50 WIB, sempat menurun akibat awan, lalu stabil pada $600\text{--}830 \text{ W/m}^2$ hingga tengah hari, dan menurun kembali setelah pukul 14.00 WIB. Untuk simulasi CFD, diambil data pukul 11.00–13.00 WIB dengan rerata 614 W/m^2 sebagai input beban panas konstan guna validasi distribusi temperatur panel.



Gambar 7. Grafik Radiasi di Dalam Rongga Aliran

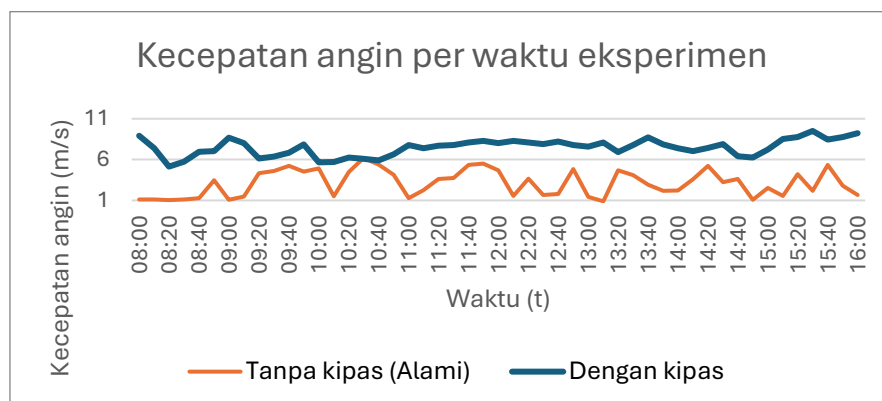
Perbandingan Eksperimen Panel Surya Tanpa dan Dengan Kipas DC

Subbab ini membandingkan kondisi panel surya tanpa kipas dan dengan kipas DC berdasarkan suhu panel dan kecepatan angin. Grafik yang ditampilkan menunjukkan perbedaan kedua kondisi pada beberapa titik waktu selama pengamatan, dengan fokus pada parameter suhu panel dan aliran udara.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Suhu dengan dan Tanpa Kipas

Eksperimen dilaksanakan selama lima hari, sedangkan grafik pada Gambar 8 menampilkan profil representatif tanggal 22 Juli. Pada hari tersebut, suhu rata-rata panel tanpa kipas sebesar 56,61°C dan dengan kipas sebesar 47,26°C, sehingga terjadi penurunan rata-rata 9,35°C. Suhu maksimum tanpa kipas mencapai 61,58°C, sedangkan suhu maksimum dengan kipas sebesar 58,8°C. Penurunan sesaat terbesar terjadi pukul 12.20 WIB, yaitu 26,9°C. Pada periode validasi 11.00–13.00 WIB, suhu rata-rata panel tanpa kipas sebesar 56,8°C dan dengan kipas 37,3°C, atau berbeda sekitar 19,5°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kipas DC paling efektif saat beban termal mencapai puncak.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Kecepatan Angin dengan dan Tanpa Kipas

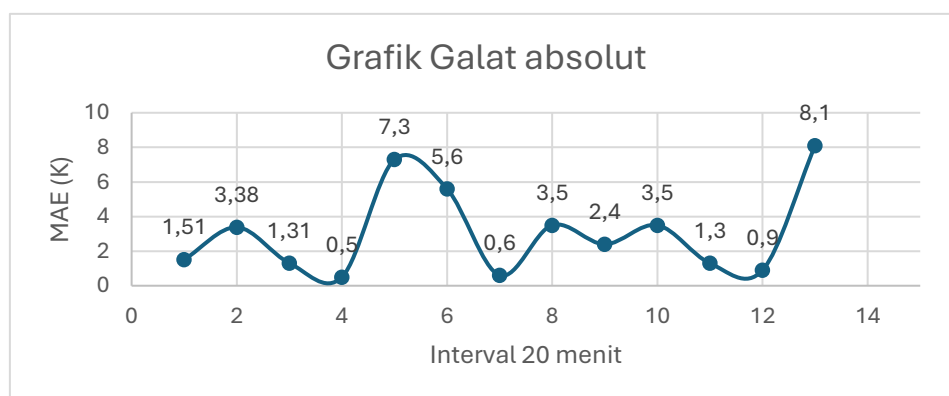
Pada pengujian 22 Juli, kecepatan udara rata-rata dengan kipas mencapai 7,48 m/s dengan rentang 5,14–9,51 m/s, sedangkan kecepatan angin alami tanpa kipas rata-rata 3,11 m/s dengan rentang 0,89–6,20 m/s. Selisih kecepatan tersebut meningkatkan perpindahan panas konveksi. Selama periode kritis 11.00–13.00 WIB, aliran kipas relatif stabil pada 7,6–8,3 m/s, sedangkan angin alami berada pada 1,45–5,50 m/s. Data tersebut menjadi dasar penetapan velocity inlet 7,92 m/s pada model validasi CFD.

Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan

Tabel 2. Parameter validasi eksperimen dan simulasi

Rongga aliran kotak biasa lama pengujian = 2 jam, interval = 20 menit	
T_c (°C) Suhu Panel	37,27 °C
T_{in} (°C) Suhu Inlet	32,54 °C
V_{out} (m/s) Kecepatan aliran Outlet Eksperimen	7,8 m/s
V_{out} (m/s) Kecepatan aliran outlet simulasi	9,72 m/s
ΔT (Perbedaan Suhu panel dan Inlet)	4,73 °C
Laju Perpindahan Panas Q (Eksperimen)	155,6 W
Laju Perpindahan Panas Q (Simulasi)	172 W
Galat (Nilai error)	1,14%
MAE (<i>mean average error</i>)	3,55 K
Kecepatan Udara (v)	7.92 m/s
Densitas Fluida (ρ)	1,225 kg/m ³
Viskositas Dinamis Fluida (μ)	1,87 x 10 ⁻⁵ kg/m.s
Konduktivitas termal udara (k)	0,0263 W/(m·K)
Kapasitas panas udara (C_p)	1007 J/(kg·K)

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.



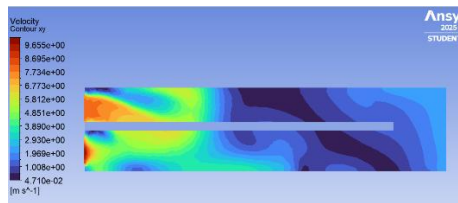
Gambar 10. Grafik Galat Absolut

Analisis Variasi Bentuk Rongga Pengarah Aliran

Setelah simulasi tervalidasi, dilakukan analisis pengaruh variasi bentuk rongga pengarah aliran di belakang panel surya terhadap performa termal. Tiga desain kotak, segitiga, dan setengah lingkaran disimulasikan dengan kecepatan kipas konstan 7,92 m/s. Hasil simulasi membandingkan profil aliran udara dan distribusi suhu untuk menentukan desain paling efektif dalam meningkatkan pendinginan panel.

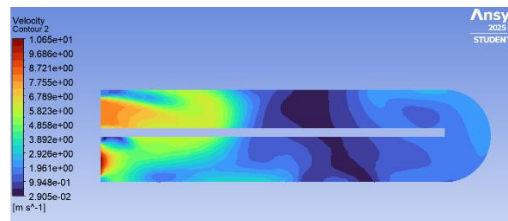
Profil Aliran Udara pada Berbagai Bentuk Rongga

Bagian ini menganalisis karakteristik aliran udara di sekitar panel surya untuk tiap bentuk rongga pengarah aliran menggunakan kontur kecepatan dan vektor aliran. Fokus utama adalah pengaruh geometri terhadap kelancaran aliran, pembentukan daerah stagnasi, serta potensi percepatan aliran yang mendukung peningkatan konveksi dan pendinginan panel.



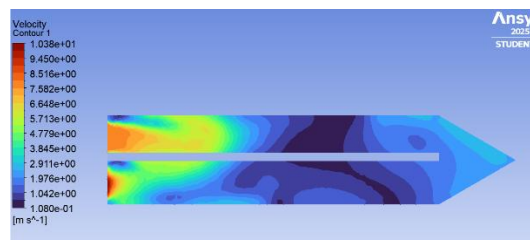
Gambar 11. Kontur Kecepatan Bentuk Kotak

Pada desain kotak, aliran udara awal mencapai 9,66 m/s namun menurun drastis setelah melewati panel, membentuk zona stagnasi luas di belakang dengan kecepatan minimum 0,047 m/s. Dominasi warna biru tua menunjukkan udara tertahan dan tidak mengalir efektif, dengan aliran terputus dan turbulensi kecil di sisi bawah panel. Akibatnya, proses pendinginan menjadi kurang optimal.



Gambar 12. Kontur Kecepatan Bentuk Setengah Lingkaran

Pada konfigurasi setengah lingkaran, kecepatan aliran maksimum meningkat hingga 10,65 m/s akibat efek akselerasi di inlet. Aliran mengikuti kontur rongga lebih halus, terutama di sisi atas, namun zona stagnasi masih muncul di tengah hingga belakang dengan kecepatan minimum 0,029 m/s. Meskipun terdapat peningkatan kecepatan di sekitar panel dibanding desain kotak, area berkecepatan rendah (<2 m/s) masih cukup luas, sehingga peningkatan performa pendinginan bersifat minor dan belum optimal.



Gambar 13. Kontur Kecepatan Bentuk Segitiga

Desain segitiga menunjukkan performa terbaik dengan kecepatan maksimum 10,38 m/s dan minimum meningkat signifikan menjadi 0,108 m/s, menandakan aliran tetap aktif hingga bagian belakang rongga. Geometri lancip mengarahkan aliran lebih terfokus, memperkecil zona stagnasi, dan menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih merata. Ini menunjukkan peningkatan efektivitas konveksi paksa dan pendinginan termal panel yang lebih efisien.

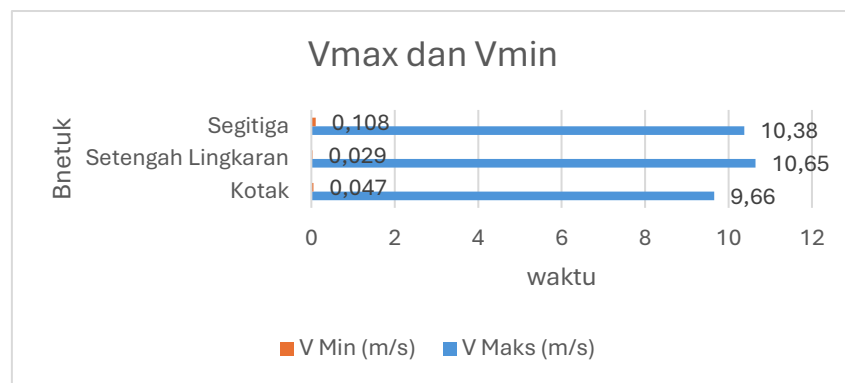
Tabel 3. Perbandingan kecepatan maksimum dan minimum

Bentuk Rongga	V_{Maks} (m/s)	V_{Min} (m/s)	Zona Stagnasi Dominan	Distribusi Kecepatan
Kotak	9.66	0.047	Sangat luas (0–2 m/s)	Terputus, melambat di belakang

Bentuk Rongga	V_{Maks} (m/s)	V_{Min} (m/s)	Zona Stagnasi Dominan	Distribusi Kecepatan
Setengah Lingkaran	10.65	0.029	Cukup luas (0–2 m/s)	Sedikit lebih halus, aliran melengkung
Segitiga	10.38	0.108	Kecil (0–2 m/s)	Terarah, menyempit ke ujung, distribusi lebih merata

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

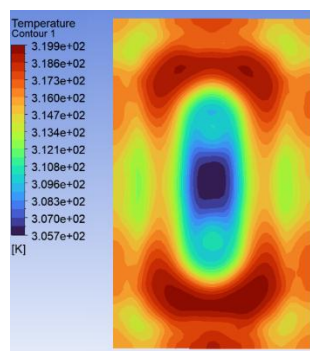
Tabel 3 menunjukkan bahwa desain segitiga memberikan performa terbaik dengan kecepatan maksimum 10,38 m/s dan minimum 0,108 m/s, menghasilkan aliran udara yang merata dan zona stagnasi kecil. Desain setengah lingkaran memiliki kecepatan maksimum tertinggi (10,65 m/s) namun minimum terendah (0,029 m/s), dengan zona stagnasi masih cukup besar. Desain kotak menunjukkan performa terlemah, dengan kecepatan minimum 0,047 m/s dan distribusi aliran tidak merata serta zona stagnasi luas. Rongga segitiga paling efektif meningkatkan konveksi paksa karena menghasilkan kecepatan minimum tertinggi dan zona stagnasi terkecil.



Gambar 14. Visualisasi Kecepatan Maksimum dan Minimum

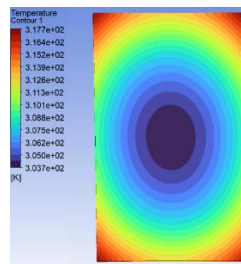
Distribusi Suhu pada Berbagai Bentuk Rongga

Perbedaan bentuk rongga pengarah aliran berpengaruh langsung terhadap distribusi suhu permukaan panel. Gambar 15–17 menunjukkan kontur suhu hasil simulasi, dengan rentang suhu antara 305,7 K (32,55 °C) hingga 319,9 K (46,75 °C). Warna merah menandakan suhu tertinggi, sedangkan biru tua terendah. Urutan desain kotak, setengah lingkaran, dan segitiga memperlihatkan variasi efisiensi pendinginan sesuai karakteristik aliran masing-masing.



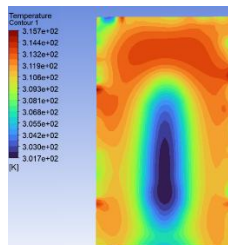
Gambar 15. Distribusi suhu bentuk kotak

Pada desain kotak (Gambar 15), suhu maksimum tercatat 319,9 K (46,75 °C) dan minimum 305,7 K (32,55 °C). Distribusi suhu memperlihatkan zona panas luas di bagian atas dan bawah panel secara simetris, menandakan adanya area stagnasi udara yang menghambat pelepasan panas, sehingga efisiensi pendinginan kurang optimal.



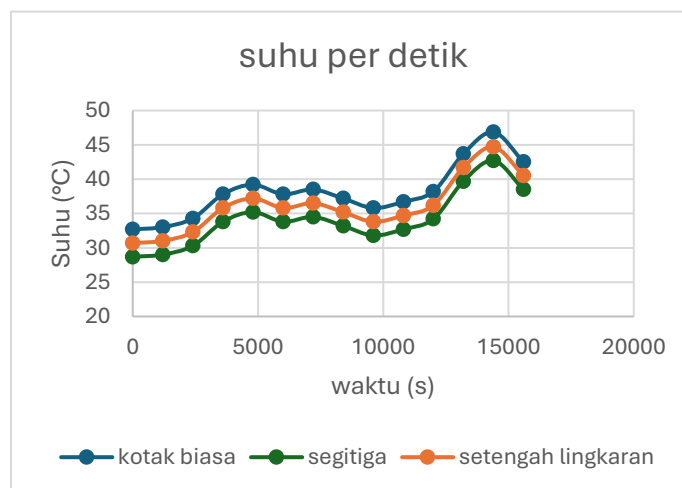
Gambar 16. Distribusi Suhu Bentuk Setengah Lingkaran

Desain setengah lingkaran (Gambar 16) memiliki suhu maksimum 317,7 K (44,55 °C) dan minimum 303,7 K (30,55 °C), dengan pola suhu yang lebih terpusat dan transisi yang halus secara radial. Penyebaran aliran udara lebih merata dibanding desain kotak, meskipun masih terdapat area panas di tepi luar namun dengan luas yang lebih kecil.



Gambar 17. Distribusi Suhu Bentuk Segitiga

Desain segitiga (Gambar 17) menunjukkan efisiensi termal terbaik dengan suhu maksimum 315,7 K (42,55 °C) dan minimum 301,7 K (28,55 °C). Distribusi suhu lebih merata, dengan zona dingin memanjang di tengah dan area panas yang sempit di pinggir, mencerminkan aliran udara yang terarah dan efektif. Kesimpulannya, desain segitiga memberikan kinerja pendinginan paling optimal dibanding desain kotak dan setengah lingkaran.



Gambar 18. Grafik Suhu per Waktu dari Simulasi

Gambar 18 menunjukkan tren temperatur panel selama simulasi transien empat jam untuk tiga bentuk rongga. Rongga kotak menghasilkan kenaikan temperatur tertinggi hingga 46,85°C. Rongga setengah lingkaran memberikan temperatur yang lebih stabil, sedangkan rongga segitiga mempertahankan temperatur terendah dan tidak melebihi sekitar 43°C. Kurva

meningkat secara bertahap karena kondisi batas simulasi dibuat konstan. Temuan ini memperkuat bahwa rongga segitiga paling efektif dalam membatasi akumulasi panas pada panel.

Analisis Performa Termal Berdasarkan Bentuk Rongga

Tabel 4. Kinerja Termal pada Variasi Bentuk Rongga

Data	Rongga Kotak	Rongga Setengah Lingkaran	Rongga Segitiga
Tin (°C) Suhu Inlet	32,54 °C	32,54 °C	32,54 °C
Tout (°C) Suhu Outlet	43,20 °C	41,50 °C	39,70 °C
$\Delta T = Tout - Tin$ (°C)	10,66	8,96	7,16
Kecepatan Udara inlet (v)	7,92 m/s	7,92 m/s	7,92 m/s
Kecepatan Udara maksimal (Vmax)	9,66 m/s	10,65 m/s	10,38 m/s
Kecepatan Udara minimal (Vmin)	0,047 m/s	0,029 m/s	0,108 m/s
Laju Perpindahan Panas Q	172 W	185 W	202 W

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

Analisis performa termal menunjukkan bahwa geometri rongga memengaruhi efisiensi pendinginan panel melalui distribusi konveksi paksa. Rongga kotak memiliki performa terendah dengan zona stagnasi luas, temperatur rata-rata 40,35°C, dan laju perpindahan panas 172 W. Rongga setengah lingkaran memperbaiki distribusi aliran sehingga temperatur rata-rata turun menjadi 39,25°C dan laju perpindahan panas meningkat menjadi 185 W. Rongga segitiga menghasilkan distribusi paling merata, temperatur rata-rata terendah 38,15°C, serta laju perpindahan panas tertinggi 202 W. Hasil ini konsisten dengan penelitian geometri saluran PV/T yang menunjukkan bahwa bentuk saluran mengendalikan zona stagnasi dan koefisien perpindahan panas [5].

Analisis Efisiensi Termal dan Efisiensi Listrik Variasi Model

Pada kecepatan inlet 7,92 m/s, rongga segitiga memberikan kinerja terbaik dengan laju perpindahan panas 202 W, efisiensi termal 34,7%, temperatur rata-rata panel 38,15°C, dan efisiensi listrik 13,64%. Rongga setengah lingkaran menghasilkan efisiensi termal 31,8% dan efisiensi listrik 13,57%, sedangkan rongga kotak menghasilkan efisiensi termal 29,5% dan efisiensi listrik 13,50%. Tren ini menunjukkan bahwa peningkatan konveksi menurunkan temperatur operasi dan mempertahankan efisiensi listrik panel [12].

Tabel 5. Efisiensi Termal dan Listrik Variasi Bentuk Rongga

Bentuk	Tavg (°C)	Qconv (W)	η_{th} (%)	η_{el} (%)
Kotak	40,35	172	29,5	13,50
Setengah lingkaran	39,25	185	31,8	13,57
Segitiga	38,15	202	34,7	13,64

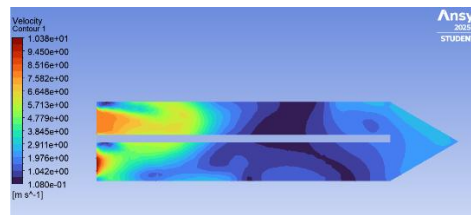
Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

Analisis Variasi Kecepatan Udara pada Model Segitiga

Penelitian lanjutan difokuskan pada model rongga segitiga dengan variasi kecepatan udara kipas sebesar 7,92; 6; 4; dan 2 m/s. Tujuannya untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan aliran terhadap distribusi suhu panel dan efektivitas perpindahan panas konvektif. Parameter yang diamati meliputi suhu maksimum, suhu rata-rata panel, distribusi kecepatan udara, dan kontur suhu dari setiap skenario simulasi.

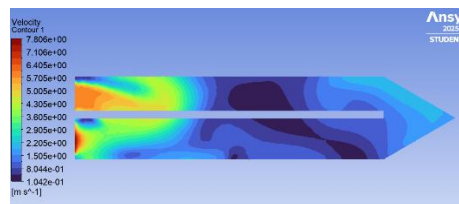
Pola aliran udara dan kontur variasi kecepatan

Visualisasi pola aliran udara dan distribusi kecepatan di sekitar permukaan panel surya ditampilkan dalam bentuk kontur kecepatan berdasarkan hasil simulasi CFD. Gambar berikut memperlihatkan empat variasi kecepatan inlet kipas DC, masing-masing sebesar 7,92 m/s, 6 m/s, 4 m/s, dan 2 m/s.



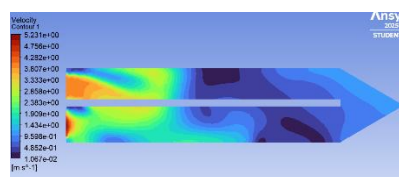
Gambar 19. Kecepatan 7,92 m/s Rongga Segitiga

Pada kecepatan tertinggi (7,92 m/s), aliran udara menunjukkan distribusi kecepatan yang lebih merata dan intens pada permukaan panel. Hal ini ditunjukkan oleh dominasi warna merah hingga oranye pada area atas dan bawah panel, mengindikasikan efisiensi pendinginan yang tinggi. Kecepatan maksimum aliran mencapai 10,38 m/s, sedangkan minimum sekitar 0,108 m/s.



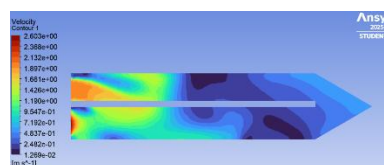
Gambar 20. Kecepatan 6 m/s Rongga Segitiga

Ketika kecepatan diturunkan menjadi 6 m/s, distribusi aliran tetap cukup kuat meskipun terlihat sedikit pengurangan pada intensitas di area hulu panel. Kecepatan maksimum tercatat sebesar 7,80 m/s, dan minimum sebesar 0,104 m/s.



Gambar 21. Kecepatan 4 m/s Rongga Segitiga

Pada kecepatan 4 m/s, distribusi kecepatan udara mulai melemah secara signifikan, ditandai dengan dominasi warna hijau hingga biru yang menunjukkan area dengan kecepatan rendah. Kecepatan maksimum sebesar 5,23 m/s, dan minimum sekitar 0,011 m/s.



Gambar 22. Kecepatan 2 m/s Rongga Segitiga

Sedangkan pada kecepatan terendah yaitu 2 m/s, aliran udara menunjukkan penetrasi yang sangat terbatas terhadap permukaan panel. Warna biru pekat mendominasi, menandakan performa konveksi paksa yang sangat rendah. Kecepatan maksimum hanya 2,60 m/s, dan minimum mencapai 0,013 m/s.

Tabel 6. Distribusi Kecepatan pada Variasi Inlet Rongga Segitiga

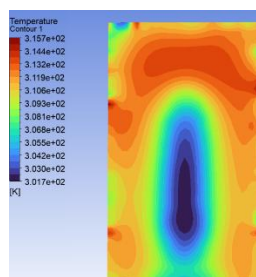
Kecepatan inlet	Vmaks (m/s)	Vmin (m/s)	Zona stagnasi dominan	Distribusi kecepatan
7,92 m/s	10,38	0,108	Sangat kecil ($\approx 0-0,5$ m/s)	Aliran terarah, distribusi merata, dan hampir tidak terdapat daerah mati.
6 m/s	7,80	0,104	Kecil ($\approx 0-2$ m/s)	Aliran tetap terfokus; vortex kecil tidak membentuk stagnasi luas.
4 m/s	5,23	0,011	Sedang ($\approx 0-2$ m/s)	Zona kecepatan rendah mulai muncul di sisi rongga.
2 m/s	2,60	0,013	Cukup luas ($\approx 0-2$ m/s)	Aliran melemah dan area kecepatan rendah terbentuk di tengah-belakang.

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

Berdasarkan hasil visualisasi kontur dan tabel kecepatan, dapat disimpulkan bahwa kecepatan aliran udara sebesar 7,92 m/s merupakan yang paling optimal dalam mendistribusikan dan memaksimalkan penetrasi udara di atas permukaan panel surya. Kecepatan ini menghasilkan aliran yang merata dan kuat, sehingga secara signifikan meningkatkan efektivitas pendinginan panel melalui mekanisme konveksi paksa.

Distribusi Suhu pada Variasi Kecepatan

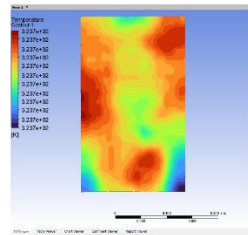
Analisis efisiensi termal dilakukan dengan membandingkan distribusi suhu pada permukaan panel surya terhadap variasi kecepatan aliran udara dari kipas. Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan kecepatan aliran udara memberikan dampak signifikan terhadap penurunan suhu panel, yang mencerminkan peningkatan efisiensi perpindahan panas melalui mekanisme konveksi paksa.



Gambar 23. Suhu panel kecepatan 7,92 m/s Rongga Segitiga

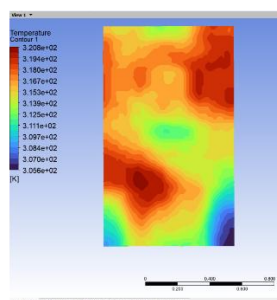
Pada kecepatan aliran tertinggi, yaitu 7,92 m/s, suhu panel tercatat dalam rentang 301.7 K (28.55°C) hingga 315.7 K (42.55°C), dengan rata-rata suhu sekitar 311.3 K (38.15°C). Pola distribusi suhu pada kondisi ini menunjukkan

pendinginan yang lebih merata dan optimal, dengan area temperatur rendah tersebar secara konsisten di seluruh permukaan panel.



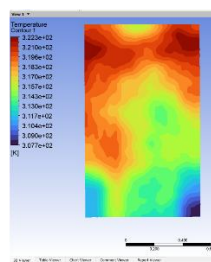
Gambar 24. Suhu panel Kecepatan 6 m/s Rongga Segitiga

Untuk kecepatan aliran 6 m/s, suhu panel berada pada kisaran 307.7 K (34.55°C) hingga 322.3 K (49.15°C), dengan rata-rata suhu sekitar 314.2 K (41.05°C). Meskipun perpindahan panas masih berlangsung secara efektif, efisiensi termalnya sedikit menurun dibandingkan kondisi sebelumnya.



Gambar 25. Suhu Panel Kecepatan 4 m/s Rongga Segitiga

Pada variasi kecepatan 4 m/s, suhu panel menunjukkan nilai minimum sebesar 305.6 K (32.45°C) dan maksimum sebesar 320.8 K (47.65°C), dengan suhu rata-rata sekitar 313.5 K (40.35°C). Distribusi suhu memperlihatkan adanya konsentrasi panas di beberapa area panel, yang menandakan penurunan efektivitas aliran udara dalam menyerap panas dari permukaan.



Gambar 26. Suhu Panel Kecepatan 2 m/s Rongga Segitiga

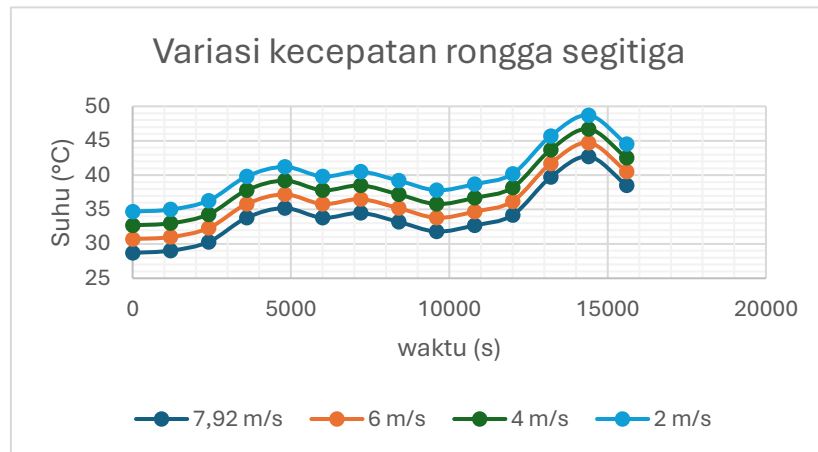
Sementara itu, kecepatan terendah 2 m/s menghasilkan performa pendinginan yang paling rendah, dengan suhu maksimum mencapai 323.7 K (50.55°C), minimum 307.7 K (34.55°C), dan suhu rata-rata sekitar 316.6 K (43.45°C). Pola suhu pada kecepatan ini menunjukkan bahwa udara tidak mampu mendistribusikan pendinginan secara optimal, sehingga suhu cenderung lebih tinggi dan terakumulasi di beberapa bagian.

Dengan membandingkan hasil simulasi antara kecepatan aliran udara 7,92 m/s dan 2 m/s, terlihat perbedaan yang signifikan dalam distribusi dan penurunan suhu permukaan panel surya. Pada kecepatan 7,92 m/s, suhu panel berkisar antara 301.7 K (28.55°C) hingga 315.7 K (42.55°C) dengan suhu rata-rata sekitar 311.3 K (38.15°C), sedangkan pada kecepatan 2 m/s, suhu panel meningkat tajam ke kisaran 307.7 K (34.55°C) hingga 323.7 K (50.55°C), dengan suhu rata-rata sekitar 316.6 K (43.45°C).

Perbedaan suhu rata-rata sebesar 5.3 K antara kedua kondisi ini menunjukkan bahwa aliran udara dengan kecepatan lebih tinggi mampu meningkatkan laju perpindahan panas secara signifikan. Secara akademik, fenomena ini dapat dijelaskan

melalui teori konveksi paksa, di mana laju perpindahan panas (Q) meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan *Nusselt* (Nu), yang secara langsung dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds* (Re). Semakin besar kecepatan fluida, semakin tinggi nilai Re , yang pada akhirnya meningkatkan Nu dan memperbesar efisiensi konvektif.

Oleh karena itu, kecepatan 7,92 m/s terbukti secara numerik dan teoritis lebih efektif dalam mendinginkan permukaan panel surya, menjadikannya kondisi paling optimal dalam rangka meningkatkan efisiensi termal sistem pendinginan berbasis kipas.



Gambar 27. Grafik variasi kecepatan rongga segitiga

Analisis Kinerja Termal Variasi Kecepatan pada Rongga Segitiga

Tabel 7. Kinerja termal variasi kecepatan pada rongga segitiga

Rongga segitiga	$v = 7,92 \text{ m/s}$	$v = 6 \text{ m/s}$	$v = 4 \text{ m/s}$	$v = 2 \text{ m/s}$
Tin (°C) Suhu Inlet	32,54 °C	32,54 °C	32,54 °C	32,54 °C
Tout (°C) Suhu Outlet	39,70 °C	41,50 °C	43,64 °C	45,83 °C
$\Delta T = Tout - Tin$ (°C)	7,16	8,96	11,10	13,29
Kecepatan Udara maksimal (V_{max})	10,38 m/s	7,80 m/s	5,23 m/s	2,60 m/s
Kecepatan Udara minimal (V_{min})	0,108 m/s	0,104 m/s	0,011 m/s	0,013 m/s
Laju Perpindahan Panas Q	202 W	187 W	175 W	163 W

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

Analisis efisiensi termal dilakukan terhadap variasi kecepatan aliran udara sebesar 7,92 m/s, 6 m/s, 4 m/s, dan 2 m/s pada desain rongga berbentuk segitiga. Desain ini telah terbukti sebagai bentuk rongga terbaik dalam mendistribusikan aliran udara berdasarkan hasil analisis pada subbab sebelumnya. Parameter yang diamati dalam analisis ini meliputi suhu udara masuk (inlet), suhu rata-rata panel, beda suhu (ΔT) antara suhu panel dan suhu inlet, kecepatan aliran maksimum dan minimum, serta laju perpindahan panas (Q).

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada kecepatan 7,92 m/s, suhu inlet tercatat sebesar 32,54 °C, suhu rata-rata panel sebesar 39,70 °C, dan beda suhu (ΔT) sebesar 7,16 °C. Pada kecepatan 6 m/s, suhu rata-rata panel meningkat menjadi 41,50 °C dengan ΔT sebesar 8,96 °C. Selanjutnya, pada kecepatan 4 m/s dan 2 m/s, suhu rata-rata panel masing-masing mencapai 43,64 °C dan 45,83 °C dengan nilai ΔT sebesar 11,10 °C dan 13,29 °C. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin rendah kecepatan aliran udara, semakin tinggi perbedaan suhu antara panel dengan udara

masuk. Hal ini mengindikasikan bahwa perpindahan panas secara konvektif menjadi kurang efektif akibat terbentuknya lapisan batas termal yang lebih tebal pada permukaan panel.

Distribusi kecepatan aliran juga turut memberikan pengaruh terhadap efisiensi termal sistem pendinginan. Pada kecepatan 7,92 m/s, kecepatan maksimum dan minimum masing-masing tercatat sebesar 10,38 m/s dan 0,108 m/s. Sementara itu, pada kecepatan 6 m/s, nilai V_{max} adalah 7,80 m/s dan V_{min} sebesar 0,104 m/s. Pada kecepatan 4 m/s dan 2 m/s, nilai V_{min} menurun drastis menjadi 0,011 m/s dan 0,013 m/s, yang menandakan adanya zona stagnan pada aliran. Zona stagnan ini menyebabkan penurunan efektivitas pendinginan karena udara tidak mengalir secara merata ke seluruh permukaan panel.

Dari segi laju perpindahan panas, nilai Q pada kecepatan 7,92 m/s adalah sebesar 202 W, dan menurun menjadi 187 W pada kecepatan 6 m/s, 175 W pada kecepatan 4 m/s, serta 163 W pada kecepatan 2 m/s. Meskipun nilai ΔT meningkat seiring penurunan kecepatan aliran, namun hal tersebut tidak diimbangi dengan peningkatan laju perpindahan panas karena koefisien perpindahan panas (h) menurun pada kecepatan rendah. Oleh karena itu, aliran udara dengan kecepatan tinggi lebih efektif dalam menyerap dan membawa panas dari permukaan panel menuju lingkungan sekitar.

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa efisiensi termal paling optimal dicapai pada kecepatan 7,92 m/s, dengan nilai ΔT terendah yaitu 7,16 °C dan nilai Q tertinggi sebesar 202 W. Kecepatan 6 m/s masih dapat dipertimbangkan karena menghasilkan nilai Q sebesar 187 W dan ΔT sebesar 8,96 °C, yang merupakan kompromi yang baik antara efisiensi termal dan konsumsi energi dari kipas DC. Sebaliknya, kecepatan 4 m/s dan 2 m/s memberikan ΔT di atas 11 °C dan Q yang lebih rendah dari 175 W, yang berpotensi menyebabkan penurunan efisiensi kerja panel surya serta percepatan degradasi termal. Oleh karena itu, kecepatan kipas minimum yang direkomendasikan untuk menjaga stabilitas suhu panel adalah sebesar 6 m/s.

Analisis Efisiensi Termal dan Listrik pada Variasi Kecepatan

Pada desain rongga segitiga, variasi kecepatan inlet udara menunjukkan pengaruh yang konsisten terhadap performa termal-listrik panel surya. Ketika kipas dioperasikan pada 7,92 m/s, panel mencapai suhu rata-rata terendah 38,15 °C dan laju perpindahan panas paling besar 202 W, sehingga efisiensi termal menyentuh 34,7 %; suhu sel yang lebih dingin ini turut mengerek efisiensi listrik ke 13,64 %. Penurunan kecepatan ke 6 m/s menyebabkan suhu rata-rata naik menjadi 41,05 °C dan Q_{conv} turun ke 187 W, sehingga efisiensi termal merosot ke 32,1 % dan efisiensi listrik menjadi 13,45 %. Tren serupa berlanjut pada 4 m/s: meskipun suhu menurun sedikit dibanding kondisi 6 m/s (40,35 °C), laju konveksi hanya 175 W, mendorong efisiensi termal turun lebih lanjut ke 30,1 %; efisiensi listrik stabil di 13,50 % karena perubahan suhu relatif kecil.

Pada kecepatan terendah 2 m/s, perpindahan panas anjlok ke 163 W, suhu rata-rata melonjak ke 43,45 °C, dan efisiensi termal jatuh ke 28,0 % tertinggi dari sisi kerugian panas sekaligus menurunkan efisiensi listrik ke 13,30 %. Korelasi linier antara bertambahnya debit udara, peningkatan Q_{conv} , dan penurunan suhu panel menegaskan bahwa laju aliran merupakan parameter kunci dalam mengoptimalkan pendinginan aktif. Secara praktis, kecepatan ≥ 6 m/s sudah memberikan efisiensi termal di atas 32 % dengan efisiensi listrik sekitar 13,5 %, sedangkan kecepatan 7,92 m/s menawarkan margin termal terbesar, cocok diterapkan saat fluks radiasi puncak untuk menjaga kestabilan suhu sel, meningkatkan output fotovoltaik, dan meminimalkan degradasi termal jangka panjang.

Tabel 8. Efisiensi termal dan listrik variasi kecepatan

Kecepatan inlet (m/s)	T_{avg} (°C)	Q_{conv} (W)	η_{th} (%)	η_{el} (%)
7,92	38,15	202	34,7	13,64
6	41,05	187	32,1	13,45
4	40,35	175	30,1	13,50
2	43,45	163	28,0	13,30

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian.

Kesimpulan Komparatif Pengaruh Pendinginan Paksa dan Desain Rongga

Pendinginan paksa menggunakan kipas DC meningkatkan laju aliran udara dan menurunkan temperatur panel. Pada profil eksperimen 22 Juli, kecepatan rata-rata meningkat dari 3,11 m/s pada kondisi tanpa kipas menjadi 7,48 m/s saat kipas aktif, sedangkan suhu rata-rata panel turun dari 56,61°C menjadi 47,26°C. Pada periode 11.00–13.00 WIB, selisih suhu rata-rata mencapai sekitar 19,5°C. Model CFD dibandingkan dengan 13 titik data eksperimen pada periode tersebut dan menghasilkan MAE 3,55 K serta galat relatif 1,14%, sehingga layak digunakan untuk membandingkan variasi geometri pada kondisi penelitian.

Analisis tiga bentuk rongga pengarah aliran—kotak, setengah lingkaran, dan segitiga—menunjukkan bahwa geometri segitiga memberikan efek pendinginan terbaik. Pada kecepatan kipas 7,92 m/s, desain segitiga menurunkan suhu maksimum panel hingga 42,55 °C (dibandingkan 44,55 °C untuk setengah lingkaran dan 46,75 °C untuk kotak) serta mencapai laju perpindahan panas tertinggi 202 W. Efisiensi termal naik ke 34,7 %, sedangkan efisiensi listrik meningkat menjadi 13,64 %, menegaskan bahwa optimasi geometri rongga berpengaruh langsung pada kinerja fotovoltaiik.

Variasi kecepatan aliran pada rongga segitiga memperlihatkan hubungan linier antara debit udara dan efektivitas pendinginan. Saat kecepatan kipas dinaikkan bertahap dari 2 m/s ke 7,92 m/s, suhu rata-rata panel turun dari 43,45 °C menjadi 38,15 °C, sementara efisiensi termal meningkat dari 28,0 % menjadi 34,7 %. Peningkatan suhu panel yang rendah juga memperbaiki efisiensi listrik modul dari 13,30 % ke 13,64 %. Data ini menegaskan bahwa selain bentuk rongga, kecepatan aliran ≥ 6 m/s dibutuhkan untuk menjaga suhu panel di bawah ambang 42 °C pada kondisi radiasi puncak ($\approx 614 \text{ W/m}^2$).

Secara keseluruhan, kombinasi desain rongga segitiga dan kecepatan kipas tinggi ($\approx 7\text{--}8$ m/s) merupakan konfigurasi paling efektif untuk mempercepat pelepasan panas secara konvektif, menstabilkan suhu operasi, dan meningkatkan efisiensi konversi energi panel surya. Temuan ini memberikan dasar teknis bagi pengembangan sistem pendinginan aktif berbasis kipas DC yang adaptif, khususnya untuk aplikasi panel surya di lingkungan tropis dengan intensitas radiasi tinggi

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian, dapat disimpulkan bahwa: Model CFD menghasilkan MAE 3,55 K dan galat relatif 1,14%, sehingga dapat digunakan untuk membandingkan variasi geometri dalam rentang kondisi penelitian. Rongga segitiga menghasilkan aliran paling merata, temperatur rata-rata terendah 38,15°C, temperatur maksimum 42,55°C, dan laju perpindahan panas tertinggi 202 W. Peningkatan kecepatan inlet meningkatkan pelepasan panas. Kecepatan 7,92 m/s memberikan performa terbaik, sedangkan 6 m/s tetap mempertahankan distribusi aliran yang relatif baik dengan konsumsi kipas yang berpotensi lebih rendah.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk:

1. Penambahan titik ukur suhu dan kecepatan untuk data yang lebih representatif;
2. Pengujian fisik pada desain rongga segitiga dan setengah lingkaran untuk validasi simulasi;
3. Analisis energi menyeluruh guna mengevaluasi efisiensi sistem;
4. Pelaksanaan uji independensi mesh tiga tingkat serta pelaporan jumlah elemen, node, skewness, orthogonal quality, dan residual konvergensi; serta
5. Penerapan kontrol otomatis berbasis mikrokontroler untuk pengaturan kipas yang adaptif dan efisien terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Pambudi, R. A. Firdaus, R. Rizkiana, D. K. Ulfa, M. S. Salsabila, Suharno, and Sukatiman, "Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, art. 2342, 2023, doi: 10.3390/su15032342.

- [2] I. O. Harmailil, S. M. Sultan, C. P. Tso, A. Fudholi, M. Mohammad, and A. Ibrahim, "A Review on Recent Photovoltaic Module Cooling Techniques: Types and Assessment Methods," *Results in Engineering*, vol. 22, art. 102225, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102225.
- [3] Y. E. Ahmed, M. R. Maghami, J. Pasupuleti, S. H. Danook, and F. B. Ismail, "Overview of Recent Solar Photovoltaic Cooling System Approach," *Technologies*, vol. 12, no. 9, art. 171, 2024, doi: 10.3390/technologies12090171.
- [4] A. Hussien, A. Eltayesh, and H. M. El-Batsh, "Experimental and Numerical Investigation for PV Cooling by Forced Convection," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 64, pp. 427–440, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.09.006.
- [5] I. G. F. B. Antara, M. Sucipta, K. Astawa, I. K. G. Wirawan, and M. Sukrawa, "CFD Simulation of Photovoltaic Thermal (PV/T) Cooling System with Various Channel Geometries," *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 11, no. 2, pp. 297–306, 2024, doi: 10.22075/jhmtr.2024.33787.1551.
- [6] E. J. Mahdi, S. Algburi, N. Al-Abadi, O. K. Ahmed, and A. K. Ahmed, "Photovoltaic Panel Cooling Using Ground Source Energy: CFD Simulation," *Results in Engineering*, vol. 22, art. 102144, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102144.
- [7] N. Badi et al., "Improved Cooling of Photovoltaic Panels by Natural Convection Using an Inclined Chimney," *PLOS ONE*, vol. 19, art. e0302326, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0302326.
- [8] F. Selimefendigil, D. Okulu, and H. F. Öztöp, "Photovoltaic Thermal Management by Combined Utilization of Thermoelectric Generator and Power-Law-Nanofluid-Assisted Cooling Channel," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, art. 5424, 2023, doi: 10.3390/su15065424.
- [9] M. M. Farag, A.-K. Hamid, M. N. AlMallahi, and M. Elgendi, "Towards Highly Efficient Solar Photovoltaic Thermal Cooling by Waste Heat Utilization: A Review," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 23, art. 100671, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100671.
- [10] M. A. Rahman, S. K. Gupta, N. Akyzbekov, R. Zhapparbergenov, S. M. M. Hasnain, and R. R. Zairov, "Comprehensive Overview of Heat Management Methods for Enhancing Photovoltaic Thermal Systems," *iScience*, vol. 27, no. 10, art. 110950, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.110950.
- [11] S. N. Razali, A. Ibrahim, A. Fazlizan, M. F. Fauzan, R. K. Ajeel, E. Z. Ahmad, W. E. Ewe, and H. A. Kazem, "Performance Enhancement of Photovoltaic Modules with Passive Cooling Multidirectional Tapered Fin Heat Sinks," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 50, art. 103400, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103400.
- [12] B. Menacer et al., "Efficiency Enhancement of Photovoltaic Panels via Air, Water, and Porous Media Cooling Methods: Thermal-Electrical Modeling," *Sustainability*, vol. 17, no. 14, art. 6559, 2025, doi: 10.3390/su17146559.
- [13] M. I. Yusoff, S. Y. Jun, M. H. Mat, N. H. A. Wahab, et al., "The Development of Hybrid Cooling Photovoltaic Panel by Using Active and Passive Cooling System," *CFD Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 107–120, 2024, doi: 10.37934/cfdl.16.5.107120.
- [14] A. Rollo, V. Ferraro, and P. Bevilacqua, "Photovoltaic Cooling Techniques' Effect on the Average Monthly Performance," *Acta IMEKO*, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2024, doi: 10.21014/actaimeko.v13i1.1660.
- [15] ASME, *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*, ASME V&V 20-2009, New York, NY, USA, 2009.