

ANALISIS DISTRIBUSI SUHU DAN ALIRAN UDARA GREENHOUSE SATU BENTANG MENGGUNAKAN CFD

Octavia Monika^{*1}, Hendrix Noviyanto Firmansyah²

¹Departemen Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

e-mail: ^{*1}octaviamonika12@students.unnes.ac.id

Abstrak

Perubahan iklim mendorong pengembangan teknologi pertanian yang lebih adaptif, salah satunya melalui penggunaan greenhouse. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan desain ventilasi pada greenhouse satu bentang untuk meningkatkan distribusi suhu dan aliran udara. Tiga skenario ventilasi (U1, U2, dan U3) disimulasikan menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD), dengan tanaman dimodelkan sebagai media berpori untuk mendekati kondisi nyata. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi ventilasi sangat memengaruhi kinerja termal dan sirkulasi udara di dalam greenhouse. Desain U1, yang mengandalkan kipas dan ventilasi samping, menghasilkan suhu rata-rata 31,95 °C dan kecepatan udara 0,38 m/s. Desain U2, dengan ventilasi tidak simetris serta bukaan tambahan, menunjukkan suhu 30,37 °C dan kecepatan 0,33 m/s. Desain U3, yang sepenuhnya mengandalkan ventilasi alami dari dinding samping, memberikan performa terbaik dengan suhu terendah sebesar 30,12 °C dan kecepatan udara tertinggi 1,09 m/s. Dibandingkan desain awal, desain U3 menunjukkan penurunan suhu sebesar 5,8% dan peningkatan kecepatan udara hingga 186%. Aliran udara pada U3 juga terdistribusi lebih merata. Validasi hasil menunjukkan bahwa error antar mesh pada ketiga desain berada di bawah 1% (masing-masing 0,779%, 0,294%, dan 0,007%), jauh di bawah ambang batas 5% untuk mesh independence. Hasil ini menegaskan bahwa ventilasi alami dengan bukaan penuh dapat menjadi strategi pasif yang efektif untuk meningkatkan efisiensi pendinginan tanpa ketergantungan pada ventilasi mekanis.

Kata kunci—Greenhouse, ventilasi alami, CFD, suhu, aliran udara

Abstract

Climate change has driven the advancement of adaptive agricultural technologies, among which the use of greenhouses is a key example. This study aims to optimize the ventilation design of a single-span greenhouse to improve temperature distribution and airflow performance. Three ventilation configurations (U1, U2, and U3) were evaluated using Computational Fluid Dynamics (CFD), with crops represented as porous media to approximate real cultivation conditions. The simulation results reveal that ventilation configuration significantly affects the thermal behavior and airflow characteristics within the greenhouse. Design U1, which employs fans and side vents, produced an average temperature of 31.95 °C and an airflow velocity of 0.38 m/s. Design U2, featuring asymmetrical side vents and an additional opening adjacent to the fan, resulted in an average temperature of 30.37 °C and a velocity of 0.33 m/s. Design U3, relying entirely on natural ventilation through fully open sidewalls, exhibited the most favorable performance, achieving the lowest temperature (30.12 °C) and the highest airflow velocity (1.09 m/s). Compared with the baseline configuration, U3 achieved a 5.8% reduction in temperature and a 186% increase in airflow rate. Moreover, U3 demonstrated a more uniform airflow distribution throughout the greenhouse space. Mesh validation indicated that the discrepancies between medium and fine meshes across all three configurations were below 1% (0.779%, 0.294%, and 0.007%), well within the generally accepted 5% threshold for mesh independence. These results confirm that fully natural ventilation can serve as an effective passive cooling strategy to enhance both thermal regulation

and airflow uniformity in greenhouse environments, thereby reducing reliance on mechanical ventilation systems.

Keywords—*Greenhouse, natural ventilation, CFD, temperature, airflow*

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim yang ditandai dengan ketidakpastian pola cuaca menjadi tantangan utama global, khususnya di sektor pertanian. Isu lingkungan seperti cuaca ekstrem dan perubahan iklim sebagai risiko utama dalam satu dekade terakhir, serta menjadi perhatian kedua terbesar dunia pada tahun ini [1]. Fenomena El Niño dan La Niña sebagai bagian dari El Niño-Southern Oscillation (ENSO) merupakan representasi nyata dari perubahan iklim. Kedua anomali ini menyebabkan ketidakstabilan cuaca global, seperti kekeringan atau hujan berlebih, yang berdampak pada produktivitas pertanian. ENSO terjadi setiap 2–7 tahun dengan durasi 9–12 bulan [2]. Ketidakpastian cuaca akibat ENSO menjadi tantangan besar bagi ketahanan pangan global.

Pertanian konvensional dinilai kurang adaptif, sehingga teknologi seperti *greenhouse* makin dibutuhkan. *Greenhouse* menjaga iklim mikro dari gangguan cuaca ekstrem dan meningkatkan hasil produksi [3,4]. Namun, tanpa sistem ventilasi yang baik, struktur tertutup *greenhouse* justru dapat menyebabkan akumulasi panas yang merugikan pertumbuhan tanaman [5]. Sirkulasi udara dalam *greenhouse* sangat dipengaruhi oleh desain, sistem ventilasi, dan keberadaan tanaman [6]. Selain itu, kondisi iklim mikro di dalam *greenhouse* dapat sangat bervariasi tergantung pada lokasi geografis dan karakteristik lingkungan sekitarnya [7], sehingga desain *greenhouse* harus disesuaikan dengan kondisi setempat.

Menganalisis distribusi suhu dan pola aliran udara di dalam *greenhouse* menjadi aspek penting dalam menciptakan kondisi optimal bagi pertumbuhan tanaman. Salah satu metode yang efektif untuk analisis ini adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Metode ini memungkinkan visualisasi distribusi suhu secara mendetail, termasuk pada area yang sulit dijangkau secara langsung [8,9].

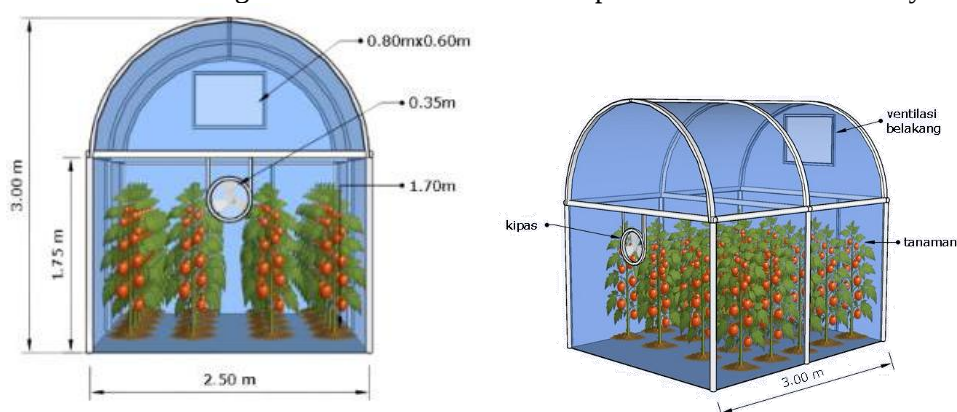
Pada penelitian sebelumnya, suhu di dalam *greenhouse* masih relatif tinggi dengan nilai rata-rata sebesar 35.95°C. Nilai ini diperoleh dari hasil simulasi yang telah divalidasi menggunakan data pengukuran di beberapa titik dalam *greenhouse* [10]. Hasil validasi menunjukkan nilai *error* relatif sebesar 1,49%, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi memiliki kesesuaian yang baik dengan kondisi nyata [11]. Meskipun demikian, rancangan *greenhouse* pada penelitian tersebut hanya mengandalkan kipas mekanis tanpa dukungan ventilasi alami, sehingga distribusi suhu di dalam *greenhouse* masih belum optimal dan cenderung tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem ventilasi pada desain sebelumnya belum mampu menurunkan suhu secara efektif.

Dengan mempertimbangkan peluang pengembangan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan desain ventilasi *greenhouse* melalui penerapan variasi bukaan ventilasi alami guna mengevaluasi pengaruhnya terhadap distribusi suhu dan pola aliran udara di dalam mini *greenhouse* satu bentang, menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Keberadaan tanaman disertakan dalam pemodelan untuk menyerupai kondisi nyata di dalam *greenhouse*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis terkait sistem ventilasi yang lebih efisien dan adaptif terhadap kebutuhan pertumbuhan tanaman. Selain itu, simulasi dilakukan dengan menggunakan data cuaca aktual Kota Semarang, sehingga hasil yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi iklim setempat secara lebih akurat dan aplikatif.

2. METODE PENELITIAN

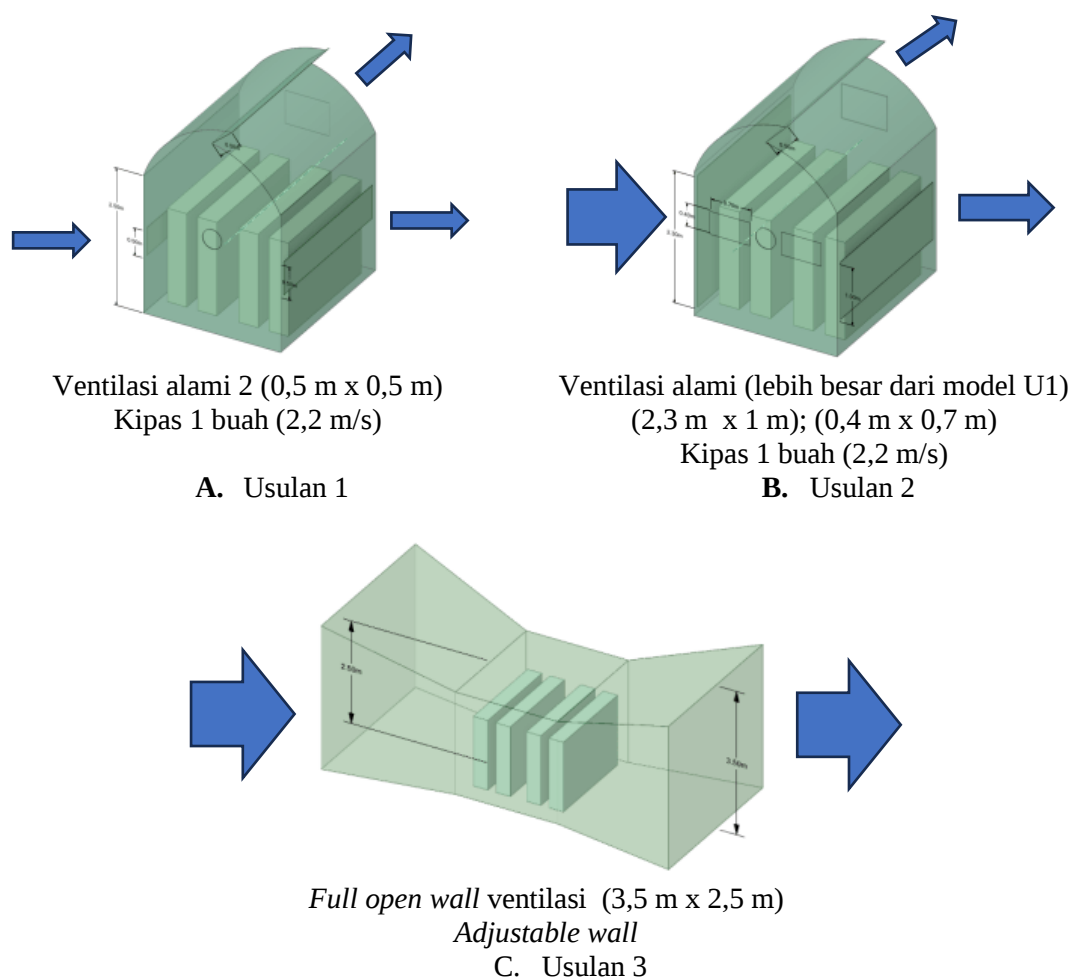
2.1 Pengembangan Desain

Desain awal berupa mini *greenhouse* berukuran total 2.5m x 3m x 3m (tinggi dari lantai ke rangka plafon 1,75m dan tinggi lengkungan atap 1.25m) bermodelkan *tunnel* yang dimodelkan pada gambar 1. Terdapat 4 baris tanaman tomat yang kondisinya sudah mendekati panen dengan tinggi 1.7m. Diameter kipas 0.35 m dan luas ventilasi belakang 0.8m x 0.6m. Udara lingkungan diasumsikan sebagai fluida yang masuk melalui ventilasi. Waktu pengamatan ditetapkan pada pukul 13.00 WIB, yaitu saat temperatur udara luar mencapai titik ekstrem harian, guna merepresentasikan kondisi terberat yang mungkin terjadi di dalam *greenhouse*. Simulasi dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memvisualisasikan dan mengevaluasi distribusi suhu serta pola aliran udara didalamnya.



Gambar 1 *Greenhouse* awal

Terdapat 3 usulan model optimasi desain *greenhouse*. Model kemudian disederhanakan guna memudahkan proses simulasi [6]. Tanaman dimodelkan sebagai balok persegi panjang [12]. Kipas dimodelkan sebagai *inlet* dan ventilasi belakang sebagai *exhaust*. Optimasi dilakukan dengan memodifikasi tinggi, atap, dan ventilasi *greenhouse*. Semakin tinggi dinding *greenhouse*, maka aliran udara di sekitar tanaman cenderung menurun [13]. Oleh karena itu, pada penelitian ini, tinggi dinding *greenhouse* ditingkatkan menjadi 2,5 meter, atau lebih tinggi sekitar 0,75 meter dibandingkan dengan desain *greenhouse* awal yang memiliki tinggi dinding 1,75 meter. Atap *greenhouse* dimodelkan sebagai arch dengan ventilasi diatapnya guna membuang udara panas dari dalam *greenhouse* [3]. Ventilasi alami diterapkan sebagai salah satu upaya optimasi karena bersifat ekonomis, hemat energi, dan memungkinkan pemanfaatan udara luar, yang pengaruhnya masih perlu dianalisis lebih lanjut [14]. Hal ini penting mengingat penelitian sebelumnya hanya mengandalkan kipas sebagai sistem ventilasi. Panjang ventilasi samping mengikuti lebar dinding samping *greenhouse*, sedangkan bukaan vertikalnya digambarkan menyerupai tirai yang dapat dibuka dan ditutup sesuai kebutuhan. Oleh karena itu, ukuran tinggi bukaan ventilasi dapat divariasikan sesuai skenario simulasi.



Gambar 2 Desain simulasi *greenhouse* (U1,U2,U3)

Ketiga desain *greenhouse* memiliki tinggi dinding yang seragam, yaitu 2,5 meter. Pada Desain 1, atap dilengkapi dengan bukaan ventilasi berukuran 0,5 meter. Selain itu, terdapat dua ventilasi samping di sisi kiri dan kanan dengan ukuran yang sama, yaitu setinggi 0,5 meter. Ventilasi 1:1

ini dirancang untuk menciptakan aliran udara silang (*cross ventilation*) antara sisi masuk (*inlet*) dan sisi keluar (*outlet*) sebagai langkah awal pengembangan ventilasi alami [15]. Desain 2 memiliki perbedaan utama berupa penambahan ventilasi alami pada bagian depan, yaitu dua bukaan ventilasi yang ditempatkan tepat di sebelah kipas, masing-masing berukuran $0,4 \times 0,7$ meter. Ventilasi samping pada desain ini dibuat tidak simetris, dengan tinggi bukaan sisi kiri sebagai *inlet* sebesar 2,3 meter dan sisi kanan sebagai *outlet* sebesar 1,0 meter. Sisi *inlet* dibuat lebih besar guna mempermudah udara segar masuk [16]. Sementara itu, Desain 3 menerapkan pendekatan yang berbeda dari dua desain sebelumnya. Model ini tidak menggunakan atap seperti pada desain lainnya, namun dinding samping dirancang dapat dibuka sepenuhnya untuk memungkinkan aliran udara masuk dan keluar secara alami tanpa bantuan kipas. Desain ini mengikuti prinsip ventilasi alami seperti pada struktur *tunnel greenhouse*, yang mampu menciptakan pola aliran udara dan distribusi suhu yang lebih merata dan efisien melalui pengaruh angin luar dan karakteristik aerodinamika bangunan [17].

2.2 Simulasi CFD Ansys Fluid Flow (Fluent)

2.2.1 Persamaan Dasar

Simulasi CFD merupakan pendekatan numerik untuk menyelesaikan persamaan dasar yang menggambarkan perilaku aliran fluida. Persamaan tersebut meliputi persamaan kontinuitas, momentum, dan energi yang merepresentasikan distribusi kecepatan dan suhu dalam ruang tiga dimensi, baik pada *grid* terstruktur maupun tidak terstruktur. Pada penelitian ini, digunakan persamaan *Navier-Stokes* sebagai dasar perhitungan, seperti ditunjukkan pada persamaan [6] :

$$\partial \frac{(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi U) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

dimana ϕ merepresentasikan variabel tak bebas yang dapat berupa variabel dalam persamaan konservasi massa, momentum, maupun energi. Simbol ρ menunjukkan densitas fluida dengan satuan kg/m^3 , sedangkan U adalah vektor kecepatan aliran fluida dalam satuan m/s . Koefisien difusi dari variabel ϕ dinyatakan dengan $\Gamma \phi$ dan memiliki satuan m^2/s . Adapun S_{ϕ} merupakan suku sumber (*source term*) dari variabel ϕ yang mewakili tambahan atau kehilangan energi, massa, atau momentum, dan memiliki satuan W/m^3 .

2.2.2 Permodelan dan Simulasi

Simulasi menggunakan Ansys Fluid dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

- Permodelan geometri
- Proses meshing
- Menentukan metode solver dan model simulasi
- Menentukan properti material
- Menentukan kondisi batas
- Menentukan metode penyelesaian numerik
- Melakukan proses perhitungan (iterasi)
- Menampilkan hasil *postprocessing* dengan menampilkan gambar kontur dan vektor

Pada tahap penentuan metode solver dan model simulasi, aliran udara di dalam *greenhouse* diasumsikan sebagai aliran turbulen, inkompresibel, dan tunak (*steady-state*). Untuk merepresentasikan karakteristik aliran tersebut, digunakan model turbulensi *k-ε* standar. Model ini merupakan model dua persamaan yang menghitung energi kinetik turbulen (*k*) dan laju disipasinya (*ε*) untuk memprediksi pengaruh turbulensi terhadap distribusi kecepatan dan suhu udara. Pemilihan model *k-ε* dilakukan karena model ini dikenal stabil secara numerik, efisien secara komputasi, serta telah banyak digunakan pada studi aliran udara dalam ruang tertutup seperti sistem ventilasi *greenhouse* [7,10].

2.2.3 Kondisi Batas

Ketiga skenario desain *greenhouse* yang akan disimulasikan menggunakan kondisi batas yang beragam. Data suhu lingkungan dan kecepatan aliran udara diperoleh dari data terkini di lokasi penelitian penulis [18], sedangkan data radiasi matahari diperoleh dari stasiun BMKG terdekat di Kota Semarang. Pemberian suhu dinding (*wall temperature*) mengacu pada suhu lingkungan maksimum, sebagaimana telah diterapkan dalam penelitian sebelumnya [10,19]. Selain itu, properti termal dari material penyusun *greenhouse* juga dimasukkan ke dalam model, di mana

pemilihan material didasarkan pada data material yang tersedia dalam *Ansys Granta MDS Materials*. Berdasarkan kondisi batas dan data material tersebut, masing-masing konfigurasi ventilasi akan disimulasikan untuk dianalisis dan dibandingkan kinerjanya dalam mengatur distribusi suhu serta pola aliran udara di dalam *greenhouse*.

Tabel 2 Input kondisi awal dan kondisi batas

Kondisi batas	Nilai
- Suhu Lingkungan	30°C
- Kecepatan Udara Lingkungan	0.7 m/s
- Radiasi Matahari	1056 W/m^2
- Kecepatan Kipas	2.2 m/s
- Suhu Dinding	38.5°C
Material <i>greenhouse</i>	
-Dinding	Plastic HDPE
-Lantai	Concrete
-Tanaman	Wood

Pada penelitian ini tanaman dimodelkan sebagai media berpori (*porous-media*) dengan nilai *viscous resistance* 59.1 m^{-2} , *inertial resistance* 1.31 m^{-2-1} , dan porositas 0.85 [20].

2.2.4 Studi Independensi Mesh

Studi independensi *mesh* merupakan tahap penting dalam simulasi CFD untuk memastikan bahwa hasil tidak terpengaruh signifikan oleh ukuran atau jumlah elemen *mesh*. Studi ini membandingkan hasil dari beberapa tingkat kehalusan *mesh* kasar (*coarse*), sedang (*medium*), dan halus (*fine*) dengan fokus pada parameter suhu [21]. Jika selisih antar hasil kurang dari 5%, maka model dianggap telah mencapai kondisi *mesh independent*, sehingga *mesh* optimal dapat dipilih tanpa mengorbankan akurasi maupun efisiensi komputasi [22]. Uji independensi *mesh* dilakukan dengan menggunakan tiga tingkat kehalusan *mesh*, yang semuanya menggunakan elemen tetrahedron. Pada desain U1 ukuran elemen yaitu 329,755, 732,200, dan 2,027,711. Desain U2 yaitu 329,619, 732,802, dan 2,025,573. Desain U3 yaitu 361,846, 965,522, dan 3,387,679. Dengan menguji berbagai ukuran *mesh* tersebut, penelitian ini memastikan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada resolusi *mesh*.

Tabel 3 Hasil uji independensi *mesh*

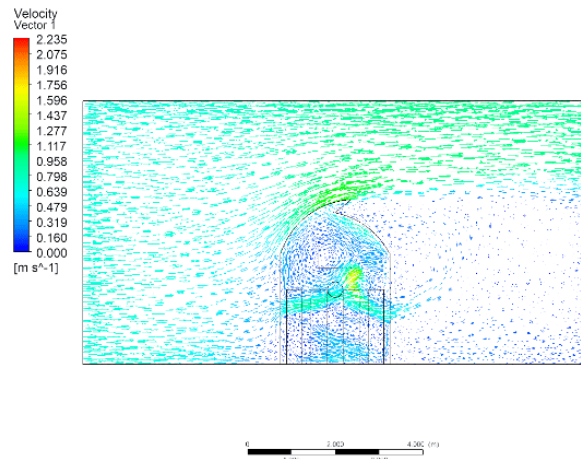
	Desain <i>Greenhouse</i>	Total Elemen	Average <i>Skewness</i>	Temperatur (°C)
<i>Coarse grid</i>	U1	329,755	0.22	31.11
	U2	329,619	0.22	30.35
	U3	361,846	0.22	30.13
<i>Medium grid</i>	U1	732,200	0.22	31.95
	U2	732,802	0.22	30.37
	U3	965,522	0.21	30.12
<i>Fine grid</i>	U1	2,027,711	0.22	31.70
	U2	2,025,573	0.22	30.28
	U3	3,387,679	0.21	30.12

Berdasarkan hasil perhitungan *error* antara *mesh medium* dan *fine* untuk ketiga desain (U1, U2, dan U3), diperoleh bahwa seluruh nilai *error* berada di bawah 1%, yaitu masing-masing sebesar 0.779%, 0.294%, dan 0.007%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah mencapai

kondisi *mesh independence*, di mana perbedaan hasil antar *mesh* atau *grid* tidak signifikan. Dengan demikian, *mesh medium* dapat dipilih sebagai konfigurasi optimal karena mampu menghasilkan hasil yang akurat tanpa beban komputasi sebesar *mesh fine* [22].

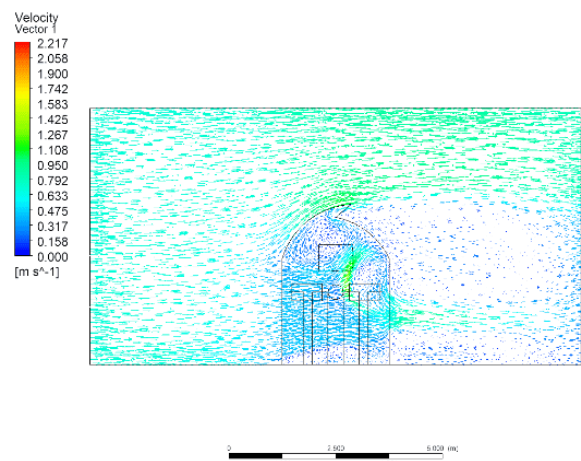
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Pola Aliran Udara pada Greenhouse



Gambar 3 Vektor hasil simulasi distribusi aliran udara pada Desain U1 (ms^{-1})

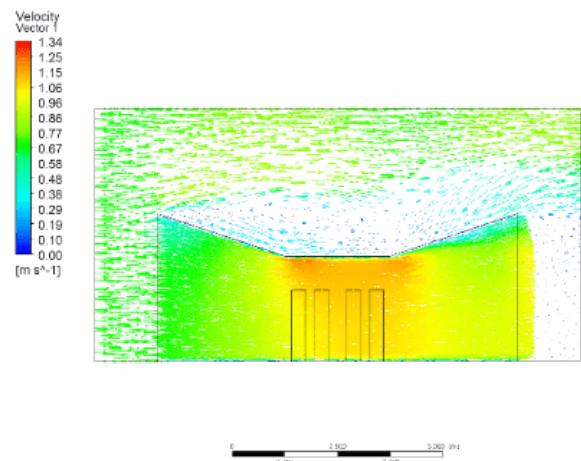
Karakteristik aliran pada Desain U1 yang ditampilkan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa distribusi aliran udara masih terkonsentrasi di area ventilasi samping dan di wilayah yang langsung terkena hembusan kipas. Pola vektor aliran mengindikasikan bahwa kipas belum mampu menyebarkan udara secara merata ke seluruh area *greenhouse*, melainkan hanya terbatas pada area di depan kipas. Rata-rata kecepatan udara di dalam *greenhouse* tercatat sebesar $0,38\ ms^{-1}$. Ventilasi atap turut berperan dalam membantu pembuangan udara panas, meskipun kepadatan vektor aliran pada area tersebut masih terlihat rendah.



Gambar 4 Vektor hasil simulasi distribusi aliran udara pada Desain U2 (ms^{-1})

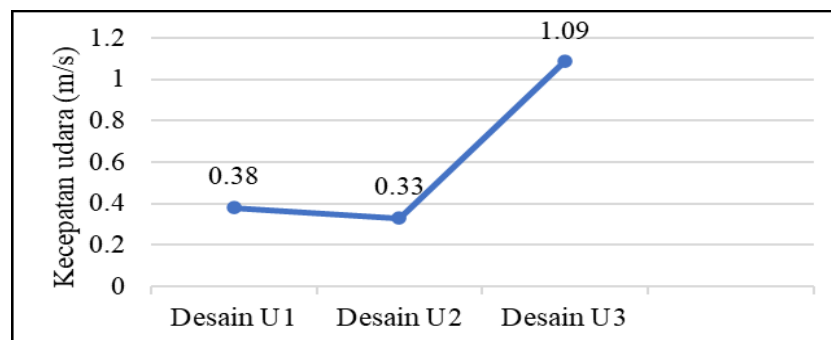
Sementara itu, pada Desain U2 yang disajikan di Gambar 4, distribusi aliran udara terlihat lebih merata, dipengaruhi oleh keberadaan ventilasi samping yang memungkinkan udara segar dari luar masuk dengan lebih baik ke dalam *greenhouse*. Hal ini berkontribusi terhadap penyebaran

aliran udara yang lebih seragam di dalam ruang. Rata-rata kecepatan udara di dalam *greenhouse* tercatat sebesar $0,33 \text{ ms}^{-1}$, sedikit lebih rendah dibandingkan Desain U1. Penurunan ini disebabkan oleh masuknya volume udara luar yang lebih besar, yang meskipun menghasilkan kecepatan yang lebih kecil, namun mampu menciptakan persebaran aliran udara yang lebih merata di seluruh ruang. Pengaruh kipas masih belum optimal karena alirannya cenderung terbatas pada area depan kipas saja. Ventilasi atap tetap memberikan kontribusi dalam membantu mengeluarkan udara panas dari dalam *greenhouse*, meskipun intensitas aliran udara di area tersebut relatif rendah.



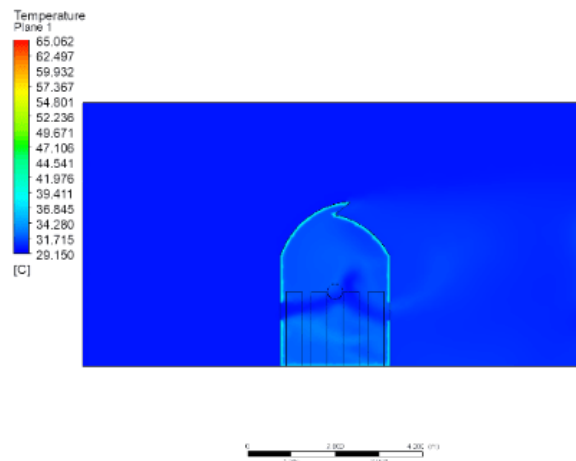
Gambar 5 Vektor hasil simulasi distribusi aliran udara pada Desain U3 (ms^{-1})

Desain U3 pada Gambar 5 mendapati hasil distribusi udara yang paling merata dari desain *greenhouse* sebelumnya. Seluruh ruang *greenhouse* memiliki vektor yang padat yang mengindikasikan persebaran udara yang baik dan merata. Desain aerodinamis ini memungkinkan area dalam *greenhouse* memiliki kecepatan aliran udara yang lebih besar dari udara luar yang masuk. Hal ini sejalan dengan penelitian [23] di mana geometri dirancang sedemikian rupa untuk memanfaatkan prinsip kontinuitas aliran ($A_1V_1 = A_2V_2$), sehingga area penampang yang lebih sempit menghasilkan kecepatan aliran yang lebih tinggi dan distribusi aliran yang lebih seragam pada ruang pengujian. Prinsip ini juga tercermin pada Desain U3, di mana bentuk struktur *greenhouse* yang ramping dan terbuka memfasilitasi percepatan aliran udara secara alami dan merata. Rata-rata kecepatan udara di dalam *greenhouse* pada desain ini tercatat sebesar $1,09 \text{ ms}^{-1}$, yang menunjukkan peningkatan sekitar 186,84% dibandingkan Desain awal U1. Grafik peningkatan kecepatan udara dapat dilihat pada Gambar 6.



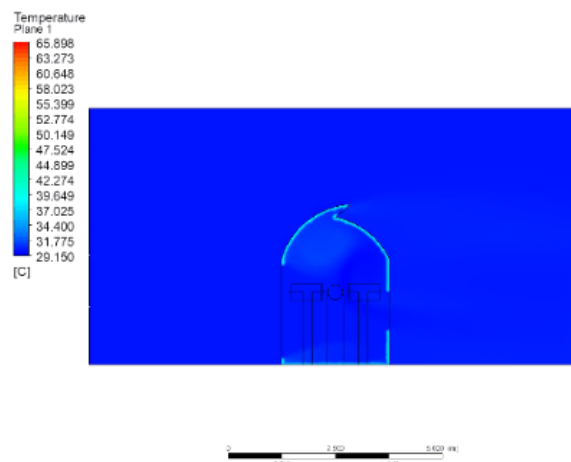
Gambar 6 Grafik tren kecepatan udara

3.2 Analisis Distribusi Suhu pada Greenhouse



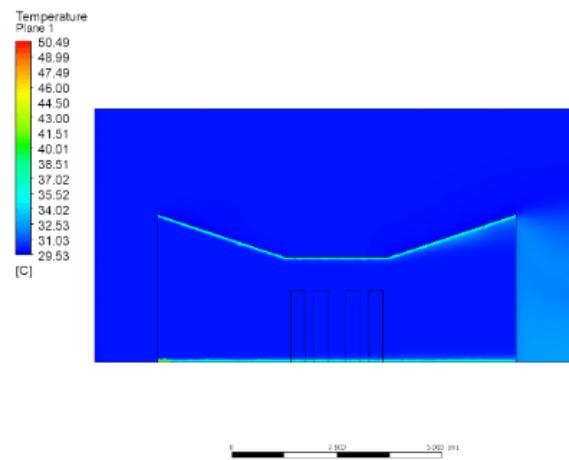
Gambar 7 Kontur hasil simulasi distribusi suhu pada Desain U1 (°C)

Perilaku termal di dalam *greenhouse* memiliki keterkaitan erat dengan pola distribusi dan pergerakan aliran udara [14]. Pada desain U1 yang dapat dilihat pada Gambar 7, efek pendinginan hanya terkonsentrasi pada area di sekitar ventilasi samping dan kipas. Sementara itu, area di dekat lantai dan atap *greenhouse* masih menunjukkan suhu yang relatif lebih tinggi. Suhu rata-rata di dalam *greenhouse* tercatat sebesar 31,95 °C. Ventilasi samping sebagai *outlet* dan ventilasi atap turut membantu pelepasan udara panas, meskipun kontribusinya masih belum terlalu signifikan.



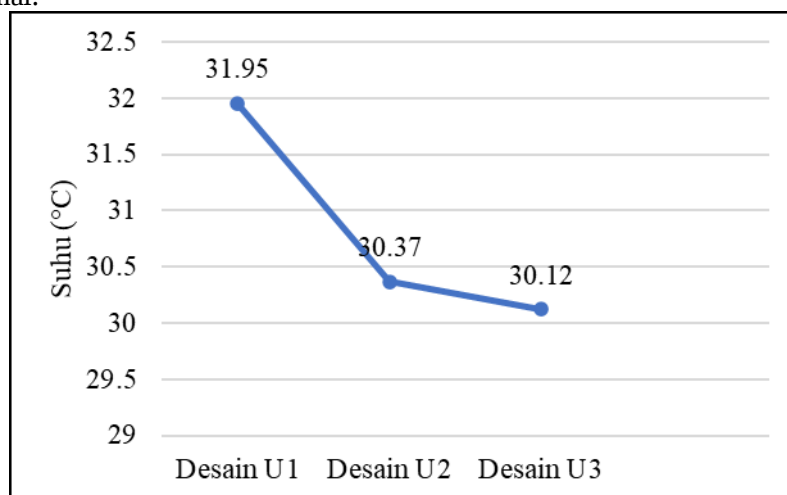
Gambar 8 Kontur hasil simulasi distribusi suhu pada Desain U2 (°C)

Kemudian pada desain U2 yang terdapat pada Gambar 8, aliran udara dari luar dapat masuk ke dalam *greenhouse* dengan volume yang lebih besar, sehingga menurunkan suhu udara di dalam ruang. Akumulasi udara panas lebih banyak terjadi di area atap, meskipun keberadaan ventilasi atap telah diupayakan untuk membantu proses pelepasan panas, efektivitasnya masih belum optimal. Suhu rata-rata yang tercatat sebesar 30,37 °C, menunjukkan penurunan sekitar 4,95% dibandingkan suhu rata-rata pada Desain U1.



Gambar 9 Kontur hasil simulasi distribusi suhu pada Desain U3 (°C)

Pada Desain U3 yang ditampilkan pada Gambar 9, distribusi suhu berlangsung secara merata di seluruh area dalam *greenhouse*. Udara segar yang masuk melalui *inlet* dapat tersalurkan dengan baik ke seluruh ruangan, sementara udara panas dikeluarkan melalui sisi *outlet*. Suhu rata-rata pada desain ini tercatat sebagai yang terendah, yaitu sebesar 30,12 °C. Tren penurunan suhu menunjukkan peningkatan efisiensi ventilasi pada setiap desain. Jika dibandingkan dengan desain U1 (31,95 °C), desain U2 mencatat penurunan suhu sebesar 1,58 °C atau sekitar 4,95%. Selanjutnya, perbandingan antara U2 (30,37 °C) dan U3 (30,12 °C) menunjukkan penurunan tambahan sebesar 0,25 °C atau 0,82%. Secara keseluruhan, suhu pada desain U3 mengalami penurunan tertinggi dibandingkan U1, yaitu sebesar 1,83 °C atau sekitar 5,73%. Grafik tren penurunan suhu dapat dilihat pada Gambar 10. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi ventilasi alami berperan signifikan dalam meningkatkan distribusi udara dan efektivitas pendinginan di dalam *greenhouse*, sebagaimana juga ditunjukkan oleh studi sebelumnya [24]. Penggunaan kipas terbukti kurang optimal dibandingkan dengan pemanfaatan ventilasi alami secara maksimal.



Gambar 10 Grafik tren suhu

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi ventilasi berpengaruh signifikan terhadap distribusi suhu dan aliran udara di dalam *greenhouse*. Dari ketiga desain yang diuji, desain U3 yang menerapkan ventilasi alami sepenuhnya melalui bukaan samping terbuka memberikan kinerja terbaik. Desain ini mampu menghasilkan suhu rata-rata terendah sebesar 30,12°C dan kecepatan aliran udara tertinggi sebesar 1,09 m/s. Jika dibandingkan dengan desain awal, terjadi penurunan suhu sebesar 5,8% dan peningkatan kecepatan aliran udara hingga 186%. Pola aliran udara pada desain U3 juga menunjukkan distribusi yang lebih merata di seluruh ruang *greenhouse*. Validasi hasil menunjukkan bahwa *error* mesh pada ketiga desain berada di bawah 1% (masing-masing 0,779%, 0,294%, dan 0,007%), yang berarti jauh di bawah ambang batas 5% untuk *mesh independence*. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan ventilasi alami dengan konfigurasi bukaan penuh dapat menjadi solusi pasif yang efektif untuk meningkatkan efisiensi pendinginan dan sirkulasi udara tanpa ketergantungan pada kipas. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar perancangan sistem ventilasi yang lebih adaptif terhadap kondisi iklim dan kebutuhan tanaman di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] World Economic Forum, "The Global Risks Report 2025 20th Edition," Forum Publishing, 2025.
- [2] Oceanic Niño Index (ONI), "El Niño and La Niña Years and Intensities," <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.
- [3] H. Li, Y. Li, X. Yue, X. Liu, S. Tian, and T. Li, "Evaluation of airflow pattern and thermal behavior of the arched greenhouses with designed roof ventilation scenarios using CFD simulation," *PLoS One*, vol. 15, no. 9 September, Sep. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0239851.
- [4] M. El Alaoui, L. O. Chahidi, M. Rougui, A. Mechaqrane, and S. Allal, "Evaluation of CFD and machine learning methods on predicting greenhouse microclimate parameters with the assessment of seasonality impact on machine learning performance," *Sci Afr*, vol. 19, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01578.
- [5] Q. Mao, H. Li, C. Ji, Y. Peng, and T. Li, "Experimental study of ambient temperature and humidity distribution in large multi-span greenhouse based on different crop heights and ventilation conditions," *Appl Therm Eng*, vol. 248, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123176.
- [6] X. Lyu, Y. Xu, M. Wei, C. Wang, G. Zhang, and S. Wang, "Effects of vent opening, wind speed, and crop height on microenvironment in three-span arched greenhouse under natural ventilation," *Comput Electron Agric*, vol. 201, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107326.
- [7] C. Mao and Y. Su, "CFD based heat transfer parameter identification of greenhouse and greenhouse climate prediction method," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 49, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.tsep.2024.102462.
- [8] I. N. Az-Zaky, E. Sumarni, and A. Hardanto, "Distribusi Suhu Udara pada Greenhouse dengan Aplikasi Air Conditioning (AC) Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation of Air Temperature Distribution in Greenhouse with Air Conditioning (AC) Application Using Computational Fluid Dynamics (CFD)," *JABER: Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Research*, vol. 1, no. 2, pp. 71–83, 2020, [Online]. Available: <http://jos.unsoed.ac.id/index.php/jaber/>
- [9] J. Yoon, H. Song, and E. S. Jang, "Computational fluid dynamics analysis of ventilation characteristics with various design parameters in single-span greenhouses," *Energy Sources*,

- Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1795318.
- [10] I. Putri, R. T. Aldi, and A. Hasan, "Enhancing Mini Greenhouse Design: A CFD Analysis of Temperature, Humidity, and Wind Flow Distribution," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, vol. 13, no. 2, p. 381, Apr. 2024, doi: 10.23960/jtep-l.v13i2.381-393.
- [11] M. Hou *et al.*, "Computational Fluid Dynamics Simulation and Quantification of Solar Greenhouse Temperature Based on Real Canopy Structure," *Agronomy*, vol. 15, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.3390/agronomy15030586.
- [12] H. Li, J. Lu, X. He, C. Zong, W. Song, and S. Zhao, "Effect of installation factors on the environment uniformity of multifunctional fan-coil unit system in Chinese solar greenhouse," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 60, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104818.
- [13] H. Abid, A. Ketata, M. Lajnef, H. Chiboub, and Z. Driss, "Impact of greenhouse roof height on microclimate and agricultural practices: CFD and experimental investigations," *J Therm Anal Calorim*, Jun. 2024, doi: 10.1007/s10973-024-13141-4.
- [14] E. A. Villagrán, E. J. Baeza Romero, and C. R. Bojacá, "Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate," *Biosyst Eng*, vol. 188, pp. 288–304, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026.
- [15] A. A Rizk, M. S ElMorsi, and M. M Elwan, "A Review on Wind - Driven Cross - Ventilation Techniques Inside Single Rooms," *International Journal of Scientific Engineering and Research*, vol. 6, no. 8, pp. 75–93, Aug. 2018, doi: 10.70729/ijser172409.
- [16] H. Demir and B. Aktepe, "Investigation on the Effect of Opening Size and Position on Wind-Driven Cross-Ventilation in an Isolated Gable Roof Building," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, Jun. 2025, doi: 10.3390/app15116190.
- [17] C. Lebbal, S. Bougoul, and S. Zeroual, "Simulation of natural ventilation inside tunnel greenhouse," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 752–757, Oct. 2020, doi: 10.18280/IJHT.380320.
- [18] Dinas Komunikasi Informatika Statistik dan Persandian Kota Semarang, "Info Prakiraan Cuaca Kota Semarang," <https://data.semarangkota.go.id/infoaktual/cuaca>.
- [19] S. A. Ould Khaoua, P. E. Bournet, C. Migeon, T. Boulard, and G. Chassériaux, "Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics," *Biosyst Eng*, vol. 95, no. 1, pp. 83–98, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.05.004.
- [20] K. Farber, P. Farber, J. Gräbel, S. Krick, and P. Ueberholz, "A computational fluid dynamics investigation of flow, solar radiation, heat transfer, transpiration and condensation in a greenhouse," in *Acta Horticulturae*, International Society for Horticultural Science, Jul. 2017, pp. 45–52. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.4.
- [21] Y. Zhang, W. Sun, L. Jin, H. Yang, J. Wang, and S. Shu, "Computational Fluid Dynamics-Based Simulation of Ventilation in a Zigzag Plastic Greenhouse," *Horticulturae*, vol. 11, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.3390/horticulturae11020175.
- [22] M. Hou *et al.*, "Computational Fluid Dynamics Simulation and Quantification of Solar Greenhouse Temperature Based on Real Canopy Structure," *Agronomy*, vol. 15, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.3390/agronomy15030586.
- [23] F. Pinna *et al.*, "Design, Validation and CFD Modeling of an Environmental Wind Tunnel," *Atmosphere (Basel)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/atmos15010077.
- [24] H. Yin, K. Wang, J. Zeng, and Z. Pang, "CFD Analysis and Optimization of a Plastic Greenhouse with a Semi-Open Roof in a Tropical Area," *Agronomy*, vol. 14, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/agronomy14040876.