

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk Optimalisasi Proses Perekatan pada Oven Bambu Laminasi

Galuh Bahari^{1*}, Inggar Septhia Irawati², Ignatius Aris Hendaryanto³, Ilham Ayu Putri Pratiwi⁴, Radhian Krisnaputra⁵, Sugiyanto⁶, Joannes Bimo Wijoyo⁷

^{1,3-7}Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

^{1,3-7}Jl. Yacarana Sekip Unit IV Yogyakarta 55281

²Jl. Grafika Kampus No.2, Sendowo, Sinduadi, Mlati, Sleman, Yogyakarta 55284

E-mail: galuh.bahari@ugm.ac.id¹, inggar_septhia@ugm.ac.id², aris.hendaryanto@ugm.ac.id³, ilhamayu94@ugm.ac.id⁴, radhian_kp@ugm.ac.id⁵, sugiyanto@ugm.ac.id⁶, joannesbimowijoyo@mail.ugm.ac.id⁷

Abstrak

Pemanfaatan bambu dalam industri arsitektur dan konstruksi sebagai material ramah lingkungan pengganti kayu terus berkembang. Meskipun oven merupakan salah satu alat penting dalam proses produksi bambu laminasi, terutama untuk pemanasan selama proses perekatan, penelitian mengenai oven untuk proses laminasi bambu masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan desain oven bambu laminasi menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mencapai distribusi panas yang merata dan efisiensi termal optimal. Tiga model iterasi desain diuji dalam simulasi, yaitu Iterasi 1 dengan kecepatan aliran udara 4 m/s, Iterasi 2 dengan kecepatan 1,5 m/s, dan Iterasi 3 dengan kecepatan 3 m/s. Hasil menunjukkan bahwa Model Iterasi 1 menghasilkan distribusi panas yang tidak merata dengan suhu awal tinggi (1175 K) yang menurun drastis hingga 800 K. Iterasi 2 menunjukkan pemanasan awal lebih lambat dengan suhu akhir mencapai 360 K, namun distribusi panas tetap tidak merata. Iterasi 3 memberikan hasil terbaik, dengan distribusi suhu yang merata dan stabil mendekati target 473 K (200 °C). Secara keseluruhan, Model Iterasi 3 menunjukkan kinerja termal yang paling optimal, tidak hanya mencapai target suhu dengan distribusi panas yang merata, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanasan oven.

Abstract

The utilization of bamboo in architecture and construction as an eco-friendly alternative to wood is steadily increasing. While ovens are crucial tools in the production of laminated bamboo, particularly for heating during the bonding process, research on ovens specifically designed for bamboo lamination remains scarce. This study aims to optimize the design of laminated bamboo ovens using *Computational Fluid Dynamics* (CFD) simulations to achieve uniform heat distribution and maximize thermal efficiency. Three design iterations were tested: Iteration 1 with an air velocity of 4 m/s, Iteration 2 with 1.5 m/s, and Iteration 3 with 3 m/s. The results revealed that Iteration 1 exhibited uneven heat distribution, with initial temperatures reaching 1175 K before dropping sharply to 800 K. Iteration 2 showed slower initial heating, achieving a final temperature of 360 K, but heat distribution remained suboptimal. Iteration 3 delivered the best performance, achieving uniform and stable heat distribution near the target temperature of 473 K (200 °C). Overall, Iteration 3 demonstrated the most efficient thermal performance, not only meeting the target temperature with consistent heat distribution but also enhancing the overall heating efficiency of the oven.

Info Naskah:

Naskah masuk: 4 Desember 2024

Direvisi: 23 Desember 2024

Diterima: 17 Januari 2024

Keywords:

laminated bamboo;

CFD;

oven;

thermal heating;

temperature distribution

*Penulis korespondensi:

Galuh Bahari

E-mail: galuh.bahari@ugm.ac.id

1. Pendahuluan

Bambu menjadi salah satu material yang dipertimbangkan penggunaannya dalam industri arsitektur, teknik, dan konstruksi sebagai alternatif yang berkelanjutan terhadap bahan bangunan konvensional seperti kayu [1], [2]. Bambu memiliki sejumlah keunggulan, di antaranya adalah waktu panen yang relatif singkat, keberagaman spesies, hasil produksi yang tinggi, serta usia panen yang cepat. Bambu dapat mencapai ketinggian maksimum, sekitar 15–30 meter dalam waktu 2–4 bulan saja. Selain itu, berdasarkan hasil penilaian siklus hidup, bambu termasuk dalam kategori "faktor 20", yang berarti dampaknya terhadap lingkungan 20 kali lebih rendah dibandingkan dengan alternatif material lain [3].

Indonesia merupakan salah satu negara dengan keragaman spesies bambu yang tinggi, setelah China dan India [4], [5]. Pada tahun 2019, jumlah spesies bambu yang teridentifikasi mencapai 176 spesies dari 25 genera. Selain itu, total produksi bambu Indonesia pada tahun 2020 tercatat mencapai 11,3 juta batang, dan pada tahun 2021 angka ini meningkat menjadi 50,1 juta batang [4], [6].

Berdasarkan studi-studi sebelumnya, bambu memiliki sifat mekanik yang setara dengan baja, besi cor, paduan aluminium, dan kayu [7], [8]. Sebagai contoh, kekuatan bambu Moso (*Phyllostachys pubescens*) dengan arah sejajar serat dapat mencapai 309 MPa dan 27.397 GPa untuk beban tarik, 48–114 MPa dan 3,6–11 GPa untuk beban kompresi, 50–132 MPa dan 7,1–18,2 GPa untuk beban lentur, dan 15–20 MPa beban geser [9]. Namun, karena penampang melingkar, bambu sulit diaplikasikan dalam aplikasi yang memerlukan adanya bidang datar, sehingga banyak *engineering bamboo* dikembangkan. Beberapa contoh dari *engineering bamboo* adalah *Laminated Bamboo Lumber* (LBL), *Parallel Strand Bamboo* (PSB), *Cross Laminated Bamboo* (CLB), dan *Glued Laminated Bamboo* (glulam), yang dapat digunakan dalam berbagai bentuk dan ukuran, dengan sifat fisik dan mekanik yang setara dengan produk olahan kayu [10], [11], [12].

Mechanical properties dari produk berbasis bambu sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis perekat yang digunakan [13], [14]. Untuk aplikasi luar ruangan, *Phenol Formaldehyde* (PF) menjadi opsi yang sering digunakan karena daya tahan dan ketahanan air yang lebih tinggi [15]. Dengan struktur bambu yang berpori, resin PF dapat menembus lumen dan lubang penghubung sel bambu untuk membentuk ikatan utama, sekaligus meresap ke dalam dinding sel untuk membentuk penguncian secara nanomekanik [16]. Untuk dapat merekatkan bambu dengan baik, proses perekat dilakukan dengan pengepresan dan kemudian dipanaskan pada suhu sekitar 150°C [16]. Selain itu, perlu dicatat bahwa pada aplikasinya, terutama pada aplikasi luar ruangan, produk berbasis bambu rentan terhadap serangan jamur, rayap, dan jamur, yang dapat menurunkan kekuatannya. Selain itu, sinar matahari langsung dapat menyebabkan perubahan sifat pada papan bambu laminasi, yang akan mengurangi umur pakainya. Oleh karena itu, perlakuan termal pada bambu laminasi dapat menjadi solusi untuk meningkatkan ketahanan terhadap faktor cuaca [17]. Wang dkk. menyebutkan bahwa perlakuan panas pada temperatur 180 °C memberikan efek signifikan

terhadap sifat fisik, kimia, dan mekanik dari bambu [18]. Oleh karena itu, untuk proses perekatan dan perlakuan panas bambu laminasi, penggunaan oven sangat diperlukan.

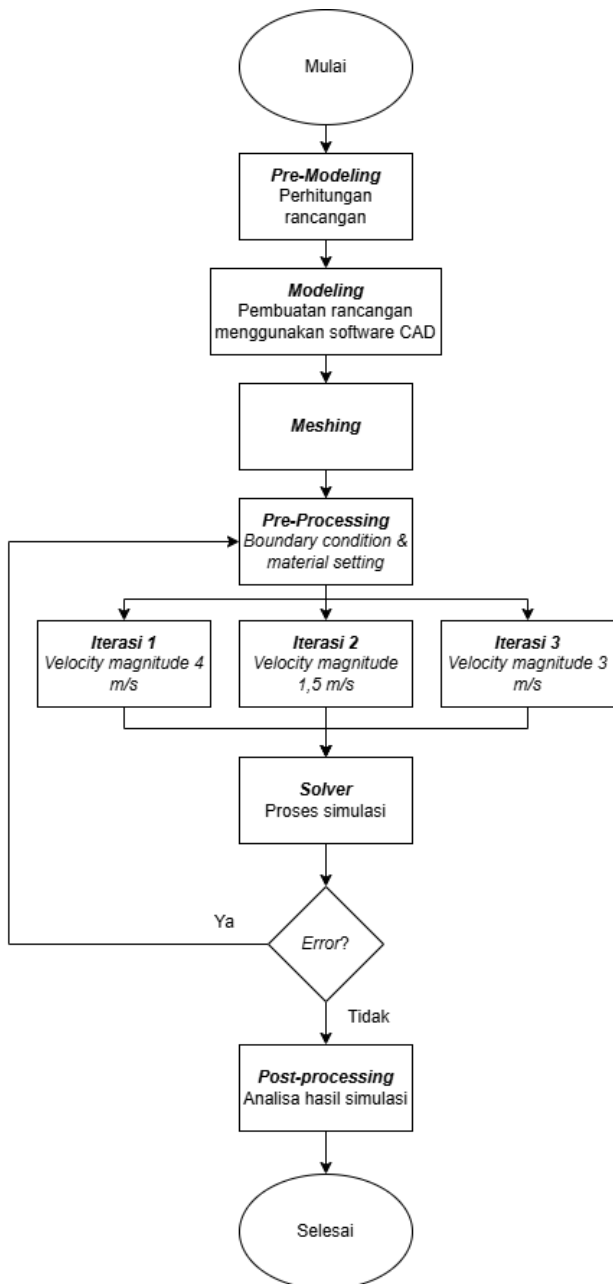
Sayangnya, penelitian mengenai oven untuk produksi bambu laminasi masih sangat terbatas. Banyak penelitian yang membahas oven dalam aplikasi lain, seperti pemanggang roti. Penelitian yang dilakukan oleh Al-Nasser dkk. [19] menyajikan model numerik pemanggang roti untuk aplikasi industri, yang mencakup perpindahan panas dan massa, ekspansi roti, serta perubahan porositas. Hasil simulasi kemudian divalidasi dengan eksperimen dan dapat digunakan untuk mengoptimalkan kinerja oven serta proses pemanggangan. Penelitian lain yang dilakukan oleh Khatibi dkk. [20] mengembangkan model numerik transien 3D untuk mensimulasikan oven listrik skala rumah tangga. Penelitian ini fokus pada distribusi suhu, gelatisasi pati, serta pengaruh pola daya input terhadap konsumsi energi dan kualitas roti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi daya yang divariasikan dengan waktu dapat mengoptimalkan kinerja pemanggangan. Penelitian lain yang dilakukan oleh Mansour dkk. [21] mengembangkan model numerik tiga dimensi untuk oven roti bersuhu tinggi, menggunakan prototipe oven tipe *tunnel* dengan sensor suhu dan perangkat pengukur fluks panas. Model CFD menunjukkan heterogenitas suhu (450–1000 °C) dan dinamika aliran udara yang kompleks, dengan validasi eksperimen mencapai akurasi 91%. Studi ini dilakukan pada pembuatan roti Lebanon mengungkapkan efisiensi energi oven sekitar 16%. Penelitian lainnya oleh Constantin dkk. [22] menganalisis aliran udara dan distribusi suhu di dalam oven tipe *tunnel* menggunakan simulasi numerik CFD untuk memastikan kualitas produk roti dan efisiensi operasional. Simulasi menghasilkan distribusi suhu pada bidang longitudinal dan transversal, yang kemudian divalidasi secara eksperimental dengan kesalahan maksimum 7,6%. Hasil ini mendukung penerapan CFD dalam perancangan oven untuk meningkatkan performa dan konsistensi produk. Penelitian lain yang dilakukan oleh Dhamaraj dkk. [23] menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk dalam menganalisis distribusi suhu dan aliran uap pada oven pembuat *idly*, makanan khas India Selatan dan Sri Lanka. Studi ini mengevaluasi sirkulasi udara panas, kondisi pemasakan, dan efisiensi termal di dalam oven, termasuk proses transformasi air menjadi uap.

Penelitian-penelitian tersebut fokus pada penerapan simulasi CFD dalam oven pemanggang roti, dengan meneliti perpindahan panas dan massa, distribusi suhu, serta optimasi proses, yang memiliki kesamaan dengan penelitian ini dalam hal penggunaan CFD untuk menganalisis proses termal. Hal yang membuat penelitian yang dilakukan berbeda adalah, pemanggang roti menekankan pada fenomena gelatisasi pati, penguapan kelembaban, dan perubahan porositas. Sementara itu, proses laminasi bambu lebih menitikberatkan pada proses pengeringan dan pengikatan, dengan perpindahan panas dan perilaku bahan yang dipengaruhi oleh sifat anisotropik bambu. Adapun kebaruan dari penelitian ini adalah penggunaan simulasi CFD untuk menganalisis oven yang spesifik digunakan untuk industri bambu laminasi. Hal ini memperluas aplikasi CFD dari sektor pangan ke industri material berbasis alam, dengan kontribusi signifikan

terhadap efisiensi dan kualitas laminasi bambu. Berbeda dengan oven roti, industri bambu memerlukan analisis CFD untuk aplikasi perekatan. Penelitian ini bertujuan melakukan optimasi model dari oven bambu laminasi menggunakan simulasi CFD untuk mendapatkan pemanasan yang optimal.

2. Metode

Diagram alir proses simulasi dapat dilihat pada Gambar 1. Simulasi dinamika fluida komputasional (CFD) dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Fluent*, yang memiliki kapabilitas untuk menganalisis aliran fluida dan perpindahan panas secara mendetail. Model oven dirancang menggunakan perangkat lunak CAD dan diimpor ke ANSYS untuk analisis lebih lanjut. Desain CAD dari oven dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram alir proses simulasi

Geometri oven dibagi menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*) untuk meningkatkan akurasi simulasi. Jumlah dan kualitas *mesh* yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan pada Tabel 1. Udara di dalam oven diatur sebagai fluida kerja dengan sifat termal yang disesuaikan untuk mencapai suhu target sebesar 473 K. Pengaturan *boundary conditions* meliputi suhu pada permukaan pemanas serta kecepatan aliran udara pada *inlet* dan *outlet* ventilasi oven. Sifat material, baik untuk komponen padat maupun fluida, ditunjukkan pada Tabel 2.

Model turbulensi k-epsilon digunakan untuk memodelkan aliran udara turbulen di dalam oven, mengingat sifat aliran yang kompleks pada perangkat ini. Simulasi diuji hingga mencapai konvergensi hasil, memastikan stabilitas dan akurasi solusi. Setelah simulasi selesai, hasil distribusi suhu dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas desain oven dalam mencapai distribusi suhu yang merata. Analisis ini juga digunakan untuk mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan guna meningkatkan efisiensi termal.



Gambar 2. Desain 3D dari oven pemanas bambu yang digunakan dalam simulasi

Tabel 1. Mesh size

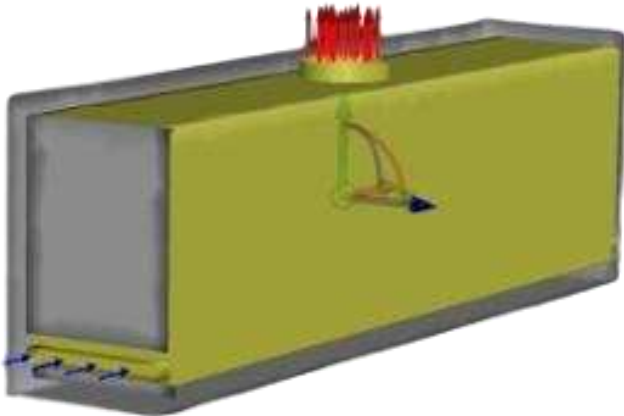
<i>Nodes</i>	100
<i>Elements</i>	10

Tabel 2. Sifat material (padat dan fluida)

No	Material	Material Density (kg.m ⁻³)	Specific Heat (J/Kg.K)	Thermal Conductivity (W/m.K)
1	Steel (Solid)	8030	502,48	16,27
2	Air (Fluid)	1,225	1006,43	0,0242

3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 3 menunjukkan posisi *inlet* (ditunjukkan dengan panah biru) dan *outlet* (ditunjukkan dengan panah merah) pada sistem oven. *Outlet* berfungsi sebagai saluran *exhaust*, dimana udara yang dipanaskan dikeluarkan dari dalam oven. Pengaturan kecepatan *inlet* diatur berdasarkan kecepatan aliran pada *outlet*, yang berfungsi untuk menciptakan sirkulasi udara yang optimal dalam oven. Dengan pengaturan ini, aliran udara dapat dipastikan terdistribusi dengan merata untuk mencapai distribusi suhu yang diinginkan di seluruh ruang oven. Gambar tersebut juga menunjukkan posisi pembacaan grafik waktu vs temperatur, ditunjukkan sebagai titik pusat koordinat sumbu x, y, dan z.



Gambar 3. Posisi inlet dan outlet pada simulasi oven pemanas bambu

Tabel 3 menunjukkan *boundary condition* untuk masing-masing model iterasi. *Velocity specification* diatur sebagai *magnitude, normal to boundary*. *Initial gauge pressure* untuk semua model diatur 0 Pa. *Turbulent intensity* diatur 5% untuk semua model, dengan *turbulent viscosity ratio* sebesar 10. Perbedaan untuk masing-masing model iterasi terletak pada pengaturan *velocity magnitude* yang berbeda, untuk model iterasi 1, 2, dan 3 *velocity magnitude* secara berurutan adalah 4 m/s, 1,5 m/s, dan 3 m/s.

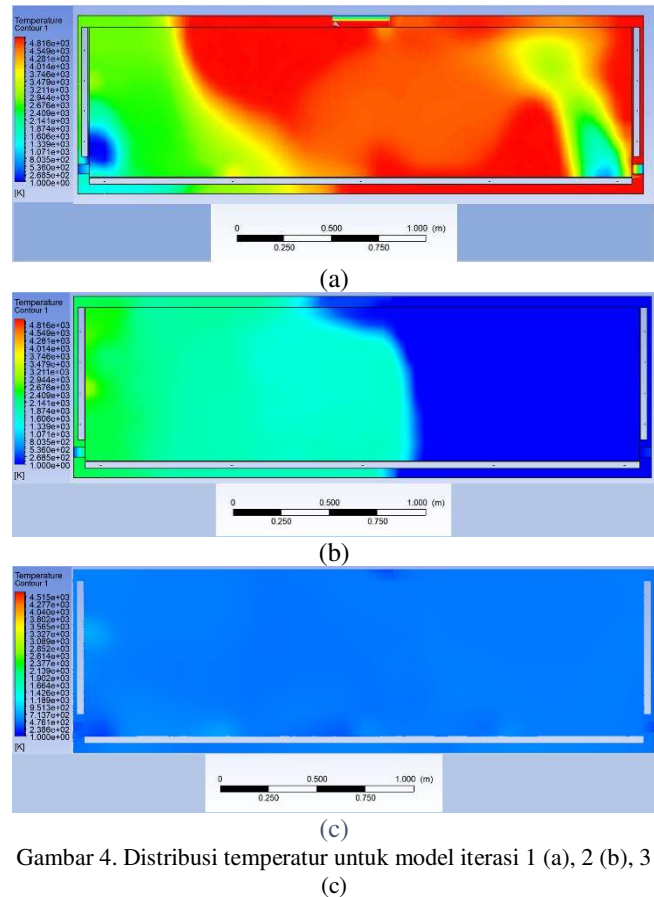
Tabel 3. *Boundary condition* dari masing-masing model iterasi yang disimulasikan

No.	Parameter	Nilai		
		Model 1	Model 2	Model 3
1	<i>Velocity specification</i>	<i>Magnitude, normal to boundary</i>		
2	<i>Velocity magnitude (m/s)</i>	4	1,5	3
3	<i>Initial gauge pressure (Pa)</i>	0	0	0
4	<i>Turbulent intensity (%)</i>	5	5	5
5	<i>Turbulent viscosity ratio</i>	10	10	10

Perbedaan temperatur pada *burner* ditunjukkan pada Tabel 4. Model iterasi 1 memiliki temperatur yang paling tinggi 1473 K, sedangkan model iterasi 3 menunjukkan pembacaan temperatur yang paling rendah sebesar 773K.

Tabel 4. Temperatur pada *burner* untuk masing-masing model iterasi

No.	Model	Temperatur (K)		
		<i>Burner kanan</i>	<i>Burner tengah</i>	<i>Burner kiri</i>
1	Model 1	1473	1173	1473
2	Model 2	1173	1173	1173
3	Model 3	773	773	773



Gambar 4. Distribusi temperatur untuk model iterasi 1 (a), 2 (b), 3 (c)

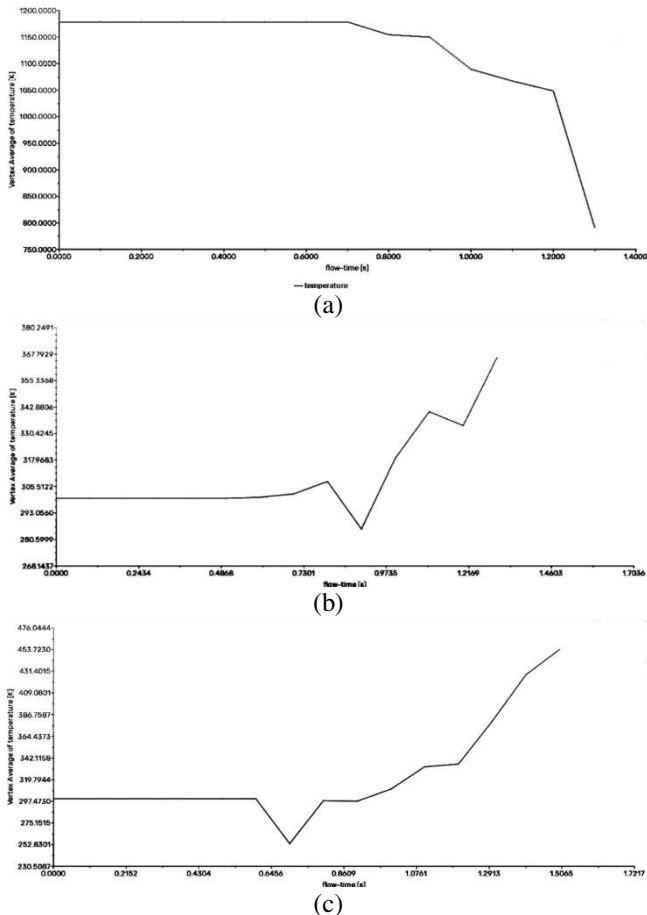
Tabel 5. Distribusi temperatur untuk model iterasi 1, 2, dan 3

No.	Iterasi	Temperatur (K)	
		Dekat inlet	Jauh dari inlet
1	Iterasi 1	± 2400 K	± 4800 K
2	Iterasi 2	±2100 K	±270 K
3	Iterasi 3	±470 K	±470 K

Simulasi distribusi temperatur dalam oven dilakukan dengan tujuan untuk mencapai target suhu sebesar 473 K (200°C) secara merata di seluruh ruang oven. Hasil simulasi pada tiga model iterasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 5, menunjukkan perbedaan signifikan dalam distribusi suhu dan efisiensi pemanasan. Pada model iterasi pertama, distribusi suhu menunjukkan ketidakseimbangan yang cukup besar, dengan suhu di bagian jauh dari inlet melebihi dari target 473 K, suhu tertinggi dari hasil simulasi adalah sebesar ± 4800 K, sementara di bagian dekat dari inlet suhu yang tercatat jauh lebih rendah. Temperatur terlalu tinggi, dan sebaran temperatur yang tidak merata ini mengindikasikan adanya gradien suhu yang cukup tajam, yang berpotensi mempengaruhi konsistensi dan kualitas produk yang dipanaskan. Pada model iterasi kedua, meskipun distribusi suhu sedikit membaik, zona yang dekat dari inlet menunjukkan temperatur yang masih terlalu tinggi (±2100 K), sementara zona yang jauh dari inlet menunjukkan temperatur yang lebih mendekati target 473 K.

Ketidaksempurnaan dalam aliran udara dan distribusi panas pada model ini masih cukup jelas, sehingga memerlukan perbaikan lanjut. Model iterasi ketiga menunjukkan hasil terbaik, di mana distribusi suhu lebih merata dan mendekati target 573 K di hampir seluruh area

oven. Perubahan kecepatan fluida di ventilasi dan pengaturan posisi pemanas pada model ini berhasil mengurangi gradien suhu yang sebelumnya ada, menghasilkan distribusi panas yang lebih seragam dan meningkatkan efisiensi termal oven secara keseluruhan. Dengan demikian, model iterasi ketiga menunjukkan potensi terbesar untuk mencapai target suhu secara optimal, yang dapat meningkatkan konsistensi hasil pemanasan dan efisiensi operasional oven.



Gambar 5. Grafik temperatur vs waktu untuk model iterasi 1 (a), 2 (b), 3 (c)

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara waktu dan temperatur untuk masing-masing model iterasi. Pada Model Iterasi 1, temperatur di titik pembacaan menunjukkan suhu yang sangat tinggi pada awal simulasi, mencapai 1175 K. Namun, setelah detik ke 0,6, temperatur mulai turun perlahan dari 1175 K menjadi 1050 K pada detik ke 1,2. Penurunan temperatur yang terjadi pada fase ini disebabkan oleh aliran udara yang relatif lambat dalam sistem oven. Dengan kecepatan aliran yang rendah, proses konveksi yang berfungsi untuk mendistribusikan panas dari *burner* ke seluruh ruang oven berjalan dengan tidak efisien. Akibatnya, udara yang dipanaskan di sekitar *burner* tidak dapat tersebar dengan baik, dan distribusi suhu menjadi tidak merata. Setelah detik ke 1,2, temperatur mengalami penurunan yang lebih drastis, dari 1050 K menjadi 800 K. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun suhu pada *burner* cukup tinggi, aliran udara yang lambat tidak mampu mempertahankan panas dengan efektif di seluruh bagian

oven. Proses perpindahan panas yang tidak optimal ini menyebabkan distribusi suhu yang tidak merata dan penurunan temperatur yang signifikan di seluruh sistem. Pada titik ini, ketidakseimbangan antara produksi panas dari *burner* dan kemampuan aliran udara untuk menyebarkannya dengan merata menjadi sangat jelas, yang mengarah pada penurunan drastis pada temperatur oven.

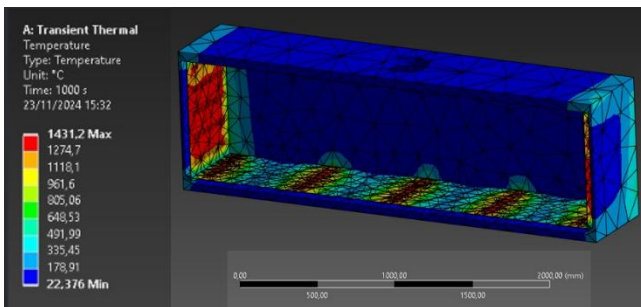
Untuk model iterasi 2, pada awal simulasi, temperatur di titik pembacaan berada di sekitar 293 K, yang mencerminkan suhu awal udara di dalam oven. Hingga detik ke 0,8, temperatur relatif stabil dengan kenaikan yang sangat kecil. Setelah detik ke 0,8, temperatur menunjukkan penurunan sementara hingga mencapai nilai minimum di sekitar 280 K. Penurunan ini dapat disebabkan oleh pencampuran udara panas dengan udara dingin yang tidak terdistribusi dengan baik, yang mengakibatkan fluktuasi temperatur pada titik pembacaan. Fenomena ini menunjukkan bahwa aliran fluida dalam oven belum sepenuhnya stabil, dan distribusi panas masih belum merata. Setelah melewati detik ke 1,0, temperatur mulai meningkat secara bertahap hingga mencapai 360 K pada akhir simulasi. Kenaikan ini menunjukkan bahwa aliran udara akhirnya mulai membawa panas dari sumber pemanas ke seluruh ruang oven. Dengan kecepatan aliran udara 4 m/s, udara bergerak lebih cepat, yang menyebabkan pemanasan awal lebih cepat. Namun, udara yang bergerak terlalu cepat tidak memiliki cukup waktu untuk mendistribusikan panas secara merata di seluruh ruang oven. Kecepatan aliran yang tinggi mengarah pada pemindahan panas yang kurang efisien, di mana panas tidak terdistribusi dengan baik ke seluruh volume udara di dalam oven. Walaupun suhu udara di sekitar *burner* mencapai titik tinggi lebih cepat, distribusi panas yang tidak merata menyebabkan penurunan suhu yang drastis, karena udara panas tidak cukup lama berada dalam oven untuk mempertahankan suhu tersebut dan membuat temperatur pada titik dekat dengan *exhaust* menunjukkan nilai yang relatif rendah.

Untuk model Iterasi 3 dengan *velocity magnitude* 3 m/s, dapat dilihat bahwa pada awal simulasi, temperatur di titik pembacaan berada di sekitar 293 K, yang merupakan suhu awal udara dalam oven. Pada fase awal, temperatur meningkat secara perlahan seiring dengan meningkatnya aliran udara yang membawa panas dari sumber *burner*. Pada detik ke 0,6, temperatur sedikit menurun dan mencapai nilai sekitar 250 K. Setelah itu temperatur meningkat secara stabil hingga mendekati target suhu yang diinginkan, yaitu 473 K. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kecepatan aliran udara sedikit lebih rendah dari model iterasi 2, aliran udara dengan *velocity magnitude* 3 m/s cukup optimal dalam mengatur distribusi panas secara lebih merata. Kecepatan aliran yang moderat (3 m/s) memungkinkan udara untuk memiliki cukup waktu untuk menyerap panas dari *burner* dan mendistribusikan panas secara lebih merata ke seluruh ruang oven. Kecepatan ini juga cukup efisien untuk menjaga suhu dalam rentang yang stabil, menghindari fluktuasi suhu yang drastis seperti pada model iterasi sebelumnya. Secara keseluruhan, Model Iterasi 3 menunjukkan performa yang lebih baik dalam mencapai suhu yang stabil dan mendekati target 473 K. Kecepatan aliran udara yang optimal (3 m/s) memungkinkan pemanasan yang lebih merata, dengan suhu

yang terdistribusi lebih efisien di seluruh oven tanpa menyebabkan fluktuasi yang signifikan. Model ini berhasil menciptakan kondisi pemanasan yang lebih stabil dibandingkan dengan model iterasi 1 dan 2.

Gambar 6 menunjukkan distribusi temperatur di dalam oven untuk masing-masing posisi, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6. Pada gambar ini, dapat terlihat bahwa di sekitar area *burner*, temperatur relatif lebih tinggi, yang mencerminkan bahwa sumber panas utama menghasilkan suhu yang sangat tinggi pada titik tersebut. Hal ini sesuai dengan harapan karena *burner* merupakan sumber utama panas, dan udara yang berada di dekatnya menerima lebih banyak panas melalui proses konveksi. Namun, yang menarik adalah pada posisi *burner* yang berada di bawah *exhaust*, temperatur cenderung lebih rendah dibandingkan dengan area sekitarnya. Hal ini dapat dijelaskan oleh pengaruh aliran udara dari *exhaust* yang mengeluarkan udara panas dari dalam oven. Udara yang lebih panas akan cenderung terangkat ke atas dan keluar melalui *exhaust*, meninggalkan area bawah oven dengan suhu yang lebih rendah. Selain itu, proses pemindahan panas di sekitar area bawah *burner* lebih terbatas karena adanya sirkulasi udara yang tidak optimal di bagian tersebut, yang menyebabkan distribusi panas menjadi tidak merata. Secara keseluruhan,

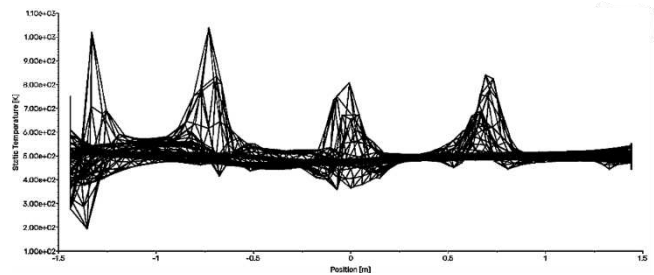
Gambar 7 menunjukkan bahwa meskipun suhu tinggi tercatat di sekitar *burner*, area yang terletak tepat di bawah *exhaust* memiliki suhu yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari aliran udara yang bergerak keluar melalui *exhaust*, yang menarik udara panas dan menyebabkan penurunan temperatur di area tersebut. Keberadaan *exhaust* yang berfungsi untuk mengeluarkan udara panas dapat menciptakan ketidakseimbangan distribusi panas di dalam oven, dengan bagian bawah yang lebih rendah suhu dibandingkan bagian yang lebih tinggi atau lebih jauh dari *exhaust*.



Gambar 6. *Transient thermal temperature* dari model iterasi 3

Gambar 7 menunjukkan distribusi sumber panas dari masing-masing *burner*. Pada gambar ini, posisi temperatur tinggi mencerminkan lokasi *burner*, di mana panas yang dihasilkan oleh burner menyebar ke seluruh bagian oven. Proses pemindahan panas dimulai dengan konveksi, di mana panas dari *burner* menyebar ke bagian bawah oven. Selanjutnya, panas yang telah mencapai bagian bawah oven menyebar lebih lanjut melalui konduksi ke permukaan dinding oven, yang bertindak sebagai media penghantar panas. Setelah mencapai dinding oven, panas kembali menyebar melalui proses konveksi, di mana aliran udara yang ada di dalam oven membantu mendistribusikan suhu ke seluruh ruang oven. Selain itu, distribusi panas ini juga

dibantu oleh aliran udara yang dikeluarkan melalui *exhaust* yang terletak di bagian atas oven. *Exhaust* berfungsi untuk mengeluarkan udara panas yang telah dipanaskan oleh burner, serta membantu sirkulasi udara di dalam oven untuk memastikan distribusi panas yang lebih merata di seluruh area oven. Dengan demikian, proses penyebaran panas di dalam oven terjadi melalui kombinasi konveksi, konduksi, dan peran *exhaust* dalam mengatur aliran udara, yang bersama-sama memastikan pengaturan suhu yang lebih efisien di seluruh ruang oven.



Gambar 7. Grafik distribusi temperatur pada oven pemanas bambu

Tabel 6. Distribusi temperatur untuk model iterasi 1, 2, dan 3

No.	Iterasi	Temperatur (K)	
		Awal	Akhir
1	Iterasi 1	1175 K	800 K
2	Iterasi 2	293 K	365 K
3	Iterasi 3	300 K	455 K

Hasil simulasi distribusi temperatur dalam oven pemanas bambu seperti ditunjukkan pada Tabel 6, menunjukkan perbedaan yang signifikan di antara ketiga model iterasi. Pada Model Iterasi 1, dengan kecepatan aliran udara 4 m/s, suhu awal di titik pembacaan mencapai 1175 K, namun temperatur menurun drastis setelah detik ke 1,2, mencapai 800 K. Hal ini disebabkan oleh distribusi panas yang tidak merata, di mana udara bergerak terlalu cepat, sehingga tidak cukup waktu untuk menyebarkan panas secara efisien ke seluruh ruang oven. Pada Model Iterasi 2, dengan kecepatan aliran udara 1,5 m/s, temperatur awal stabil di sekitar 293 K, dengan kenaikan yang sangat lambat. Meskipun pada akhirnya suhu meningkat hingga 365 K, distribusi panas dalam oven masih kurang efisien. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara yang lebih rendah memperlambat pemanasan, namun distribusi panas tetap tidak merata. Di sisi lain,

Model Iterasi 3 dengan kecepatan aliran udara 3 m/s menunjukkan hasil yang lebih baik. Pada awal simulasi, temperatur meningkat perlahan menuju target suhu 473 K (455 K). Meskipun terjadi sedikit penurunan suhu pada detik ke 0,6, temperatur akhirnya mencapai suhu yang lebih stabil dan mendekati target yang diinginkan. Model ini menunjukkan distribusi panas yang lebih merata, dengan efisiensi pemanasan yang lebih baik dibandingkan dengan model-model lainnya. Secara keseluruhan, Model Iterasi 3 memberikan hasil terbaik dalam mencapai suhu target dengan distribusi temperatur yang lebih stabil dan efisien, sementara Model Iterasi 1 dan Model Iterasi 2 menunjukkan keterbatasan dalam distribusi panas, baik akibat kecepatan aliran yang terlalu cepat atau lambat.

4. Kesimpulan

Simulasi distribusi temperatur dalam oven menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam efisiensi pemanasan dan keseragaman distribusi suhu di antara tiga model iterasi. Model Iterasi 1, dengan kecepatan aliran udara 4 m/s, menghasilkan suhu awal tinggi (1175 K) yang menurun drastis hingga 800 K. Distribusi panas tidak merata karena aliran udara yang terlalu cepat menyebabkan waktu kontak panas dengan udara di dalam oven menjadi tidak cukup, sehingga pemanasan menjadi tidak efisien. Model Iterasi 2, dengan kecepatan aliran 1,5 m/s, menunjukkan pemanasan awal yang lebih lambat dengan suhu akhir mencapai 360 K. Meskipun laju aliran udara lebih rendah, distribusi panas tetap kurang merata karena kecepatan udara tidak cukup untuk menyebarkan panas secara efektif ke seluruh ruang oven. Selain itu, fluktuasi temperatur masih terjadi akibat pencampuran udara panas dan dingin yang tidak stabil. Model Iterasi 3, dengan kecepatan aliran udara 3 m/s, memberikan hasil terbaik. Distribusi panas lebih merata dan stabil, dengan suhu yang mendekati target 473 K di hampir seluruh ruang oven. Kecepatan udara yang moderat memungkinkan waktu yang cukup untuk menyerap panas dari *burner* dan mendistribusikannya dengan efisien, mengurangi gradien suhu dan fluktuasi yang sebelumnya terlihat pada model lain. Secara keseluruhan, Model Iterasi 3 menunjukkan kinerja termal yang paling optimal, tidak hanya mencapai target suhu dengan distribusi panas yang merata, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanasan oven.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini dibiayai oleh Academic Excellent Research Grant (Skema C) Universitas Gadjah Mada dengan no. kontrak 6530/UN1.P1/PT.01.03/2024.

Daftar Pustaka:

- [1] K. A. Harries, P. Morrill, C. Gauss, C. Flower, Y. Akinbade, and D. Trujillo, "Screw withdrawal capacity of full-culm *P. edulis* bamboo," *Constr Build Mater*, vol. 216, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.009.
- [2] A. Daultbek, H. Li, and R. Lorenzo, "A review on mechanical behavior of laminated bamboo lumber connections," 2023. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116898.
- [3] P. Gholizadeh, H. Z. Hosseinabadi, D. E. Hebel, and A. Javadian, "Investigation of mechanical, physical and thermoacoustic properties of a novel light-weight dense wall panels made of bamboo *Phyllostachys Bambusides*," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-45515-3.
- [4] R. Hartono *et al.*, "Physical, Chemical, and Mechanical Properties of Six Bamboo from Sumatera Island Indonesia and Its Potential Applications for Composite Materials," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2022, doi: 10.3390/polym14224868.
- [5] E. A. Widjaja, *The Spectacular Indonesian Bamboos*, vol. 56, no. 4. 2019.
- [6] A. H. Iswanto *et al.*, "Chemical, Physical, and Mechanical Properties of Belangke Bamboo (*Gigantochloa pruriens*) and Its Application as a Reinforcing Material in Particleboard Manufacturing," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 15, 2022, doi: 10.3390/polym14153111.
- [7] F. Xiao, Y. Wu, Y. Zuo, L. Peng, W. Li, and X. Sun, "Preparation and bonding performance evaluation of bamboo veneer/foam aluminum composites," *Journal of Forestry Engineering*, vol. 6, no. 3, 2021, doi: 10.13360/i.issn.2096-1359.202009024.
- [8] J. Liu, A. Zhou, B. Sheng, Y. Liu, and L. Sun, "Effect of temperature on short-term compression creep property of bamboo scrimber," *Journal of Forestry Engineering*, vol. 6, no. 2, 2021, doi: 10.13360/j.issn.2096-1359.202006003.
- [9] R. Lorenzo, M. Godina, L. Mimendi, and H. Li, "Determination of the physical and mechanical properties of moso, guadua and oldhamii bamboo assisted by robotic fabrication," *Journal of Wood Science*, vol. 66, no. 1, 2020, doi: 10.1186/s10086-020-01869-0.
- [10] J. Deng, X. Wei, H. Zhou, G. Wang, and S. Zhang, "Inspiration from table tennis racket: Preparation of rubber-wood-bamboo laminated composite (RWBLC) and its response characteristics to cyclic perpendicular compressive load," *Compos Struct*, vol. 241, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112135.
- [11] A. Chow, M. H. Ramage, and D. U. Shah, "Optimising ply orientation in structural laminated bamboo," *Constr Build Mater*, vol. 212, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.025.
- [12] L. Molari, L. Mentrasti, and M. Fabiani, "Mechanical characterization of five species of Italian bamboo," *Structures*, vol. 24, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2019.12.022.
- [13] W. N. Nkeuwa, J. Zhang, K. E. Semple, M. Chen, Y. Xia, and C. Dai, "Bamboo-based composites: A review on fundamentals and processes of bamboo bonding," 2022. doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109776.
- [14] Y. Sewar, M. Amran, S. Avudaiappan, Y. Gamil, and R. S. M. Rashid, "Bonding strength performance of bamboo-based composite materials: An in-depth insight for sustainable construction applications," *Heliyon*, vol. 10, no. 13, p. e32155, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32155>.
- [15] Y. He, X. Jin, J. Li, and D. Qin, "Mechanical and Fire Properties of Flame-Retardant Laminated Bamboo Lumber Glued with Phenol Formaldehyde and Melamine Urea Formaldehyde Adhesives," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 6, 2024, doi: 10.3390/polym16060781.
- [16] Y. Huang, Q. Lin, C. Yang, G. Bian, Y. Zhang, and W. Yu, "Multi-scale characterization of bamboo bonding interfaces with phenol-formaldehyde resin of different molecular weight to study the bonding mechanism," *J R Soc Interface*, vol. 17, no. 162, 2020, doi: 10.1098/rsif.2019.0755.
- [17] W. N. S. N. Z. Abidin *et al.*, "Properties of Phenol Formaldehyde-Bonded Layered Laminated Woven Bamboo Mat Boards Made from *Gigantochloa scortechinii*," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.3390/app13010047.
- [18] Q. Wang, X. Wu, C. Yuan, Z. Lou, and Y. Li, "Effect of saturated steam heat treatment on physical and chemical properties of bamboo," *Molecules*, vol. 25, no. 8, 2020, doi: 10.3390/molecules25081999.
- [19] M. Al-Nasser, I. Fayssal, and F. Moukalled, "Numerical simulation of bread baking in a convection oven," *Appl Therm Eng*, vol. 184, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116252.
- [20] M. Khatibi, H. Zamani, and S. M. Mirzababae, "Flatbread baking process under time-varying input power in a home-scale electric oven: 3D CFD simulation with experimental validation," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 46, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.102129.
- [21] Y. Mansour, O. Rouaud, R. Slim, and P. Rahmé, "Thermal characterization of a high-temperature industrial bread-baking oven: A comprehensive experimental and numerical study," *Appl Therm Eng*, vol. 236, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121467.

- [22] G. A. Constantin, M. G. Munteanu, G. Voicu, G. Paraschiv, and E. M. Ștefan, "An Analysis of Air Flow in the Baking Chamber of a Tunnel-Type Electric Oven," *Computation*, vol. 11, no. 12, 2023, doi: 10.3390/computation11120236.
- [23] M. Dharmaraj, K. V. S. Kumar, S. Vikram, and K. A. Srikishore, "The computational fluid dynamics (CFD) investigation of steam flow and temperature distribution in a small scale idly-baking oven," in *AIP Conference Proceedings*, 2021. doi: 10.1063/5.0069092.