

SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR DAN EVALUASI KESERAGAMAN PEMANASAN PADA RETORT STERILISASI MAKANAN MENGGUNAKAN CFD

¹⁾Risqyka Imanuddin, ²⁾Hisyam Ma'mun, ^{3*)}Muhamad Safi'i

^{1,2,3)} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang.

Corresponding author : muhamadsafii@upgris.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 13 Juli 2026

Disetujui : 23 Juli 2026

Kata Kunci :

Retort, Computational Fluid Dynamics (CFD), Sterilisasi Pangan, Heat Distribution.

ABSTRAK

Distribusi suhu yang tidak merata dalam *retort* dapat mengurangi efektivitas sterilisasi dan berpotensi menimbulkan titik-titik dingin yang memengaruhi keamanan dan kualitas produk pangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi suhu, karakteristik aliran uap jenuh, distribusi tekanan, dan keseragaman pemanasan dalam *retort* sterilisasi pangan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Model *retort* horizontal dengan panjang 1800 mm dan diameter 750 mm disimulasikan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan mesh tetrahedral optimum sebanyak 3.028.451 elemen berdasarkan hasil uji independensi grid. Model turbulensi *realizable k-ε* digunakan untuk merepresentasikan karakteristik aliran turbulen dan perpindahan panas pada sistem *retort*. Variasi suhu masuk yang digunakan adalah 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C, dengan kecepatan aliran uap 2–10 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan suhu masuk memiliki pengaruh dominan terhadap peningkatan suhu permukaan, dari 175,25°C pada suhu masuk 115°C menjadi 188,81°C pada 123°C. Koefisien perpindahan panas juga meningkat dari sekitar 6,70 W/m²°C menjadi 7,48 W/m²°C seiring kenaikan suhu operasi. Hasil tersebut berpotensi untuk direkomendasikan dan diterapkan secara praktis di lapangan.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : Jul 13, 2026

Accepted : Jul 23, 2026

Keywords:

Retort, Computational Fluid Dynamics (CFD), temperatur, Heat Distribution.

ABSTRACT

Non-uniform temperature distribution in retorts can reduce sterilization effectiveness and potentially create cold spots that compromise food safety and product quality. This study aims to analyze temperature distribution, saturated steam flow characteristics, pressure distribution, and heating uniformity in a food sterilization retort using Computational Fluid Dynamics (CFD). A horizontal retort model with a length of 1800 mm and a diameter of 750 mm was simulated using the CFD approach with an optimized tetrahedral mesh consisting of 3,028,451 elements based on a grid independence test. The realizable k-ε turbulence model was applied to represent turbulent flow characteristics and heat transfer behavior within the retort system. The inlet temperature variations investigated were 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, and 123°C, with steam flow velocities ranging from 2 to 10 m/s. The simulation results indicate that increasing the inlet temperature has a dominant effect on surface temperature enhancement, increasing from 175.25°C at an inlet temperature of 115°C to 188.81°C at 123°C. The heat transfer coefficient also increased from approximately 6.70 W/m²·°C to 7.48 W/m²·°C as the operating temperature increased. These findings demonstrate that higher steam inlet temperatures improve heat transfer performance and temperature uniformity within the retort system. The simulation results provide valuable insights for optimizing retort sterilization processes and have potential practical applications in improving industrial food sterilization operations.

1. PENDAHULUAN

Sterilisasi termal merupakan salah satu metode pengawetan pangan yang paling banyak diterapkan dalam industri pengolahan makanan (Jimenez *et al.*, 2024). Sterilisasi termal dilakukan melalui pengaturan kombinasi suhu dan waktu pemanasan yang tepat untuk menurunkan jumlah mikroorganisme patogen pada pangan hingga batas aman, termasuk bakteri pembentuk spora yang memiliki ketahanan panas lebih tinggi (Soni *et al.*, 2020). Penerapan sterilisasi yang tepat tidak hanya menjamin keamanan mikrobiologis produk, tetapi juga berkontribusi langsung pada perpanjangan masa simpan tanpa ketergantungan pada bahan pengawet kimiawi (Nasrulloh *et al.*, 2024). Dengan meningkatnya permintaan konsumen terhadap produk pangan kemasan yang aman, bergizi, dan tahan lama, teknologi sterilisasi termal terus mengalami perkembangan dalam aspek desain peralatan maupun pengendalian proses (Chiozzi, Agriopoulou and Varzakas, 2022) dan mesin *retort* merupakan peralatan utama dalam sistem sterilisasi termal, yang bekerja dengan menggunakan uap jenuh bertekanan sebagai medium pemanas. Pemanasan berlangsung di dalam ruang bertekanan (*pressure vessel*) pada kisaran temperatur 115–130°C, bergantung pada karakteristik produk dan target nilai sterilisasi yang ditentukan oleh nilai F_0 (Pursito *et al.*, 2020). Efektivitas sterilisasi sangat bergantung pada kemampuan *retort* dalam mendistribusikan panas secara merata ke seluruh bagian ruang sterilisasi. Apabila terdapat area yang tidak mendapatkan pasokan panas memadai, maka zona tersebut dapat menjadi *cold spot* yang berisiko terhadap keberhasilan proses sterilisasi (Raits *et al.*, 2021).

Evaluasi keseragaman distribusi panas di dalam *retort* secara konvensional dilakukan melalui uji penetrasi panas menggunakan thermocouple yang ditempatkan pada titik-titik tertentu di dalam ruang *retort* maupun di dalam produk yang dikemas (Raits *et al.*, 2021), (Cardona *et al.*, 2020). Meskipun metode eksperimental ini sudah terbukti andal, pendekatan tersebut memiliki keterbatasan dalam hal jangkauan pengukuran, biaya pengujian, serta kemampuan untuk

memvisualisasikan distribusi temperatur secara menyeluruh (Kalinke *et al.*, 2022). Di sinilah peran pendekatan numerik menjadi sangat relevan, khususnya metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yang mampu mensimulasikan fenomena aliran fluida dan perpindahan panas secara tiga dimensi dengan tingkat detail yang tidak mungkin dicapai melalui pengujian eksperimental biasa (Oyinloye and Yoon, 2021). Uji dengan metode CFD telah banyak dimanfaatkan dalam industri pangan, terutama untuk menganalisis proses sterilisasi dalam kemasan dan mengidentifikasi *slowest heating zone* (SHZ) atau zona yang mengalami laju pemanasan paling lambat (Soleymani Serami, Ramezan and Khashehchi, 2021). Pemodelan CFD memungkinkan peneliti dan insinyur untuk mengamati profil temperatur, distribusi kecepatan aliran, serta pola tekanan di dalam ruang *retort* secara virtual, sehingga berbagai skenario operasi dapat diuji tanpa perlu melakukan percobaan fisik yang memakan waktu dan biaya tinggi (Szpicer *et al.*, 2025), (Jung, Lee and Yoon, 2022).

Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa distribusi temperatur di dalam *retort* sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti geometri ruang *retort*, konfigurasi rak produk, ukuran dan jenis kemasan, kondisi operasi (temperatur dan tekanan), serta kecepatan aliran medium pemanas (Jimenez *et al.*, 2024). Studi numerik mengenai pengaruh kondisi operasi pada mesin *retort* dilakukan dengan mempertimbangkan variasi temperatur uap sebesar 1°C dan 2°C serta kecepatan aliran sebesar 1 m/s dan 2 m/s untuk mengevaluasi kinerja efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi diperoleh pada kondisi operasi dengan temperatur uap 2°C dan kecepatan aliran 2 m/s, dengan nilai efisiensi yang mencapai 98%. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur uap dan kecepatan aliran memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan performa termal mesin *retort* (Pursito *et al.*, 2020). Proses pemanasan makanan pada mesin *retort* dianalisis secara eksperimental dan numerik dengan mempertimbangkan variasi suhu operasi sebesar 95°C dan 121°C pada interval waktu 20, 40, 60, 80, dan 100 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan profil suhu

retort variabel (*Variable Retort Temperature/VRT*), yaitu 95°C selama 25 menit yang kemudian dilanjutkan pada suhu 121°C selama 15 menit, menghasilkan nilai sterilitas (*F*) sebesar 6,58. Kondisi tersebut juga mampu menurunkan nilai pemasakan permukaan (*surface cook value*, *C_s*) dan nilai pemasakan rata-rata volume (*average cook value*, *C_{avg}*) lebih dari 42%, serta mengurangi waktu proses sterilisasi sebesar 26,07% (Raits *et al.*, 2021). Sejalan dengan temuan tersebut, kajian numerik mengenai pengaruh waktu pemanasan dilakukan pada produk dengan massa 100 g, 150 g, dan 200 g menggunakan durasi sterilisasi masing-masing 35,0 menit, 41,5 menit, dan 47,5 menit pada temperatur operasi konstan sebesar 121°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu sterilisasi selama 41,5 menit memberikan kinerja termal yang paling optimal, yang ditunjukkan oleh distribusi koefisien perpindahan panas yang lebih seragam di dalam mesin *retort* dengan nilai sebesar 340 W/m²·K. Sejalan dengan temuan tersebut, kajian numerik mengenai pengaruh waktu pemanasan dilakukan pada produk dengan massa 100 g, 150 g, dan 200 g menggunakan durasi sterilisasi masing-masing 35,0 menit, 41,5 menit, dan 47,5 menit pada temperatur operasi konstan sebesar 121°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu sterilisasi selama 41,5 menit memberikan kinerja termal yang paling optimal, yang ditunjukkan oleh distribusi koefisien perpindahan panas yang lebih seragam di dalam mesin *retort* dengan nilai sebesar 340 W/m²·K. (Jung, Leef and Yoon, 2022).

Dalam bidang teknologi pangan, pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) semakin banyak diterapkan karena mampu memberikan informasi yang lebih rinci mengenai distribusi temperatur, karakteristik aliran fluida, dan mekanisme perpindahan panas. Analisis tersebut dilakukan pada kondisi operasi dengan temperatur sterilisasi sebesar 75°C dan 130°C, yang masing-masing menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan panas sebesar 12% dan 18% (Szpicer *et al.*, 2025). Pada proses sterilisasi produk pangan kaleng, simulasi numerik telah terbukti mampu merepresentasikan distribusi temperatur, karakteristik perpindahan panas, serta nilai sterilitas, sehingga berpotensi dimanfaatkan

untuk mengoptimalkan parameter proses sekaligus meminimalkan penurunan mutu akibat perlakuan termal yang berlebihan. Dalam penelitian tersebut, variasi waktu pemanasan yang diterapkan meliputi 40, 60, 80, dan 100 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pemanasan selama 80 menit memberikan kinerja termal yang paling optimal, yang ditandai dengan distribusi temperatur rata-rata di dalam mesin *retort* berada pada kisaran 120°C hingga 125°C (Azar, Ramezan and Khashehchi, 2020). Penelitian pada produk *ready-to-eat* yang dikemas dalam *pouch* menunjukkan bahwa dimensi kemasan dan kondisi pemanasan memiliki pengaruh terhadap nilai sterilitas (*F₀*), karakteristik tekstur, serta efektivitas proses sterilisasi. Dalam penelitian tersebut, temperatur *retort* yang dikembangkan meliputi 120°C, 130°C, 140°C, dan 150°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur sekitar 7°C pada setiap variasi target temperatur menghasilkan kinerja termal yang berbeda pada masing-masing kondisi operasi, sehingga proses pemanasan produk dapat berlangsung secara efektif (Jung, Lee and Yoon, 2023).

Kajian mengenai karakteristik distribusi temperatur dan penetrasi panas pada sistem *steam-air retort* menunjukkan bahwa konfigurasi pengemasan dan tata letak produk di dalam ruang sterilisasi berperan penting dalam menentukan dinamika perpindahan panas. Variasi pada kedua faktor tersebut dapat memengaruhi laju pemanasan produk, posisi daerah dengan laju pemanasan terendah (*slowest heating point*), serta durasi yang diperlukan untuk mencapai kondisi sterilisasi yang diinginkan (Su *et al.*, 2023). Pendekatan optimasi dinamis dalam proses termal pangan juga menegaskan pentingnya pengendalian profil temperatur operasi guna menjaga keseimbangan antara keamanan mikrobiologis, mutu produk, dan efisiensi proses. parafrasekan dengan profesional dengan tidak hanya merubah kata dengan sinonim dan menggunakan bahasa yg akademik (Pursito *et al.*, 2020). Dari perspektif pemodelan numerik, uji independensi *mesh* merupakan tahap krusial untuk menjamin bahwa hasil simulasi perpindahan panas tidak dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran dan jumlah elemen *grid*, sehingga solusi yang diperoleh telah mencapai tingkat akurasi yang

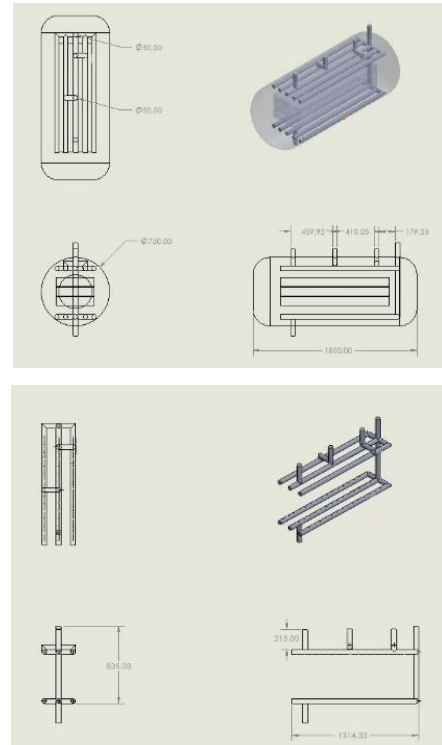
stabil tanpa menimbulkan beban komputasi yang berlebihan (Zhu, Frerich and Herrmann, 2021). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengkaji pengaruh variasi temperatur operasi terhadap performa termal dan hidrolis mesin *retort* makanan, sehingga hasil yang diperoleh dapat menjadi landasan dalam penentuan konfigurasi simulasi yang stabil, efisien, dan relevan bagi optimasi proses sterilisasi. Berbagai macam penelitian tentang performa mesin *retort* baik eksperimen maupun numerik telah banyak dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai macam variasi seperti operasi suhu, kecepatan aliran fluida uap, waktu pemanasan, dan lain sebagainya. Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji karakteristik perpindahan panas pada sistem *retort* melalui pendekatan eksperimental maupun numerik. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi temperatur rata-rata, waktu sterilisasi, atau nilai sterilitas produk tanpa melakukan analisis komprehensif terhadap hubungan antara distribusi temperatur, pola aliran, lokasi *cold spot*, dan keseragaman pemanasan dalam ruang *retort*. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan model CFD tervalidasi untuk mengevaluasi pengaruh interaksi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap terhadap karakteristik termal dan hidrodinamik *retort* melalui parameter distribusi temperatur, *temperature uniformity index*, *coefficient of variation*, *cold spot location*, pressure drop, serta indikator sterilitas F_0 di bidang sterilisasi termal berbasis CFD.

2. METODE

2.1. Model Fisik

Model geometri mesin *retort* yang digunakan dalam penelitian ini dirancang berdasarkan dimensi tabung *retort* horizontal dengan panjang 1800 mm dan diameter 750 mm. Di dalam ruang *retort*, ditempatkan tiga susunan rak bertingkat yang disusun secara simetris guna mensimulasikan kondisi operasi aktual saat produk pangan ditempatkan di dalamnya. Material utama yang digunakan adalah baja tahan karat (*stainless steel*) dengan sifat termofisik berupa densitas (ρ) sebesar 7,90 kg/m³, panas spesifik (C_p) sebesar 500 J/kg·°C, dan konduktivitas termal (k) sebesar 15,1

W/m·°C. Komponen-komponen mesin *retort* yang dimodelkan meliputi jalur distribusi uap jenuh, saluran pembuangan fluida, dan dudukan rak produk.



Gambar 1. Geometri *Retort* dan Ukurannya

2.2. Material

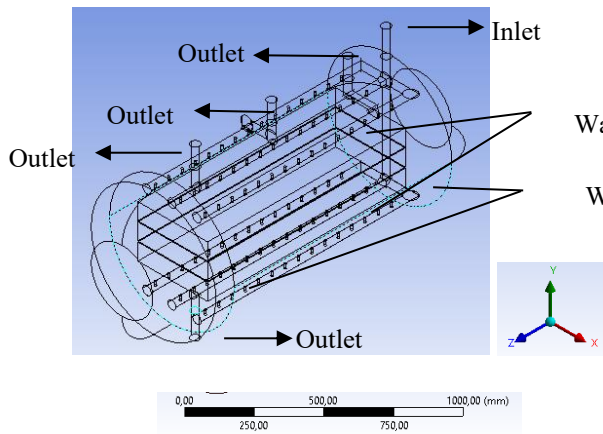
Paduan *stainless steel* dipilih sebagai material utama karena memiliki karakteristik termofisika yang mendukung proses perpindahan panas. Material utama yang digunakan adalah *stainless steel* dengan sifat termofisik berupa densitas sebesar 7900 kg/m³, panas spesifik 500 J/kg·K, dan konduktivitas termal 15,1 W/m·K. Sehingga sesuai untuk aplikasi sterilisasi termal pada mesin *Retort*.

2.3. Domain komputasi

Domain komputasi pada penelitian ini didefinisikan sebagai ruang fluida yang berada di dalam tabung *retort* horizontal dengan dimensi 1800 × 750 × 900 mm. Model numerik mencakup area distribusi uap, ruang pemanasan, jalur *inlet*, *outlet*, serta permukaan dinding *retort* sebagai batas perpindahan panas. Kondisi batas (*boundary conditions*) diterapkan untuk merepresentasikan fenomena aliran uap jenuh dan proses perpindahan panas selama operasi sterilisasi.

Model turbulensi yang digunakan dalam simulasi ini adalah *realizable k-ε model* dengan

pendekatan *standard wall function*. Pemilihan model ini didasarkan pada karakteristik aliran dalam ruang *retort* yang memiliki geometri tertutup, perubahan arah aliran, serta kemungkinan terbentuknya daerah resirkulasi (*recirculation zone*) akibat interaksi antara aliran uap dengan dinding dan rak produk. Model *realizable k-ε* memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan model *standard k-ε* dalam memprediksi aliran dengan gradien tekanan, separasi aliran, serta perpindahan panas konveksi pada konfigurasi kompleks. Oleh karena itu, model ini dipilih untuk memperoleh prediksi distribusi temperatur dan karakteristik aliran uap yang lebih akurat pada sistem *retort*.



Gambar 2. Domain Komputasi dan Penentuan Kondisi Batas

Persamaan kontinuitas, momentum dan energi saat studi numerik dan persamaan kontinuitas dijelaskan oleh Persamaan 1:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Dimana T adalah temperatur rata-rata permukaan *Retort* dekat rak, dan Persamaan momentum dijelaskan oleh persamaan 2, 3, dan 4:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) &= \frac{\partial P}{\partial x} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Wall Vapor } \rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} + \frac{\partial uw^2}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \\ \text{Wall Shell } \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &+ g(\rho - \rho_\infty) \end{aligned} \quad (4)$$

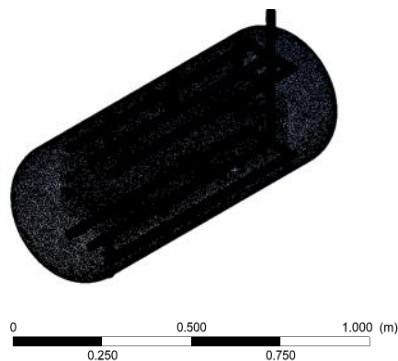
Persamaan energi:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial uT_a}{\partial x} + \frac{\partial vT_a}{\partial y} + \frac{\partial wT_a}{\partial z} \right) &= \frac{k}{C_p} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 T_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

2.4. Meshing

Proses pembuatan mesh dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode *automatic meshing* dengan elemen berbentuk tetrahedral serta pengaturan *cell sizing* sebesar 200 mm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Tahapan meshing ini bertujuan untuk mendiskretisasi domain komputasi menjadi elemen-elemen berukuran lebih kecil sehingga fenomena aliran fluida dan perpindahan panas dapat direpresentasikan secara lebih akurat, khususnya pada area *inlet*, *outlet*, dinding tabung, serta rak produk. Model *mesh* yang digunakan terdiri dari 3.028.451 elemen, yang kemudian dievaluasi kualitasnya berdasarkan parameter *mesh metric skewness* dengan nilai

0,25 (*very good*) dan *orthogonal quality* dengan nilai 0,95 (*very good*) serta nilai $Y^{+1} = 1$. Selanjutnya, simulasi numerik dilakukan untuk menganalisis distribusi temperatur serta pola aliran fluida di dalam ruang *Retort*. Pada tahap diskretisasi persamaan, digunakan skema *first order upwind* guna memperoleh solusi yang stabil dalam simulasi perpindahan panas dan aliran fluida.



2.5. Set up Simulasi

Parameter simulasi ditentukan berdasarkan data eksperimen dari penelitian terdahulu. Fluida kerja yang digunakan berupa uap jenuh dengan variasi temperatur 115, 117, 119, 121, dan 123°C serta kecepatan aliran 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s. Uap dialirkan melalui pipa *inlet* dan didistribusikan ke seluruh jaringan pipa *retort* sebagai media perpindahan panas selama proses sterilisasi. Sifat termofisik uap yang digunakan meliputi densitas 0,000122 kg/m³, kalor jenis 2071 J/kg·°C, dan konduktivitas termal 18,0087 W/m·C. Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS *Fluent* dengan mengaktifkan *Energy Equation* dan model turbulensi *k-ε Standard* untuk memodelkan aliran turbulen di dalam ruang *retort*. Material *Water Vapor* ditetapkan sebagai fluida kerja pada domain komputasi. Kondisi batas *inlet* menggunakan tipe *Velocity Inlet* dengan temperatur awal 388,15 K (115 °C) dan kecepatan aliran 2 m/s. Penyelesaian numerik dilakukan menggunakan algoritma PISO dan skema diskretisasi *First Order Upwind* dengan kriteria konvergensi 10⁻⁵ untuk persamaan kontinuitas dan momentum serta 10⁻⁵ untuk persamaan energi. Sebelum iterasi, simulasi diinisialisasi dengan *Standard Initialization*, kemudian dijalankan hingga 1000 iterasi atau

sampai residual memenuhi kriteria konvergensi, sehingga diperoleh solusi numerik yang stabil untuk menggambarkan distribusi temperatur dan karakteristik aliran fluida di dalam mesin *retort*.

2.6. Measurement Method

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan aliran dan temperatur inlet terhadap temperatur permukaan yang diperoleh dari hasil simulasi numerik. Variasi kecepatan aliran yang digunakan meliputi 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s, sedangkan temperatur *inlet* divariasikan pada 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C. Tahapan pengambilan data hasil simulasi diawali melalui menu *Results* dengan memilih fitur *Location* untuk membentuk bidang potong (*plane*). Plane 1 dibuat pada bagian *Geometry* dengan metode *YZ Plane*, kemudian pengaturan diterapkan melalui perintah *Apply*. Selanjutnya, Plane 2 dibentuk menggunakan metode *ZX Plane* dengan koordinat Y sebesar -0,15 m, kemudian dilakukan *Apply*. Plane 3 dibuat dengan metode *XY Plane*, sedangkan Plane 4 dibentuk menggunakan metode *ZX Plane* dengan koordinat Y sebesar 0,38 m dan pengaturan diterapkan melalui perintah *Apply*. Setelah seluruh bidang potong terbentuk, visualisasi hasil simulasi dilakukan melalui fitur *Insert Contour* pada menu *Results*. *Contour* 1 dibuat pada Plane 1 dengan variabel temperatur, pengaturan *Range* menggunakan opsi *Local*, serta jumlah kontur ditetapkan sebanyak 100. Selanjutnya, *Contour* 2 dibuat pada Plane 2 dengan variabel tekanan dan jumlah kontur sebanyak 100, sedangkan *Contour* 3 dibuat pada Plane 3 dengan variabel kecepatan serta jumlah kontur yang sama. Setelah proses visualisasi selesai, data temperatur rata-rata, tekanan masuk, dan tekanan keluar diperoleh melalui menu *Calculators* dengan memilih *Function Calculator*. Nilai temperatur rata-rata dihitung menggunakan fungsi *areaAve* pada Plane 1 dengan variabel temperatur. Tekanan masuk diperoleh menggunakan fungsi *areaAve* pada lokasi *Inlet* dengan variabel tekanan, sedangkan tekanan keluar dihitung menggunakan fungsi yang sama pada Plane 4 dengan variabel tekanan. Seluruh nilai yang diperoleh kemudian

digunakan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan aliran dan temperatur *inlet* terhadap karakteristik termal dan hidrodinamik sistem.

2.7.Reduksi data numerik

Kondisi operasi simulasi mesin *retort* mengacu pada arah aliran udara *inlet* ke *outlet* pada pada sumbu vertikal ZX *Software* CFD dan bilangan *Reynolds* didefinisikan atas persamaan 6:

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

Area permukaan *retort* dihitung dengan persamaan 7:

$$A = 2\pi r(r+t) \quad (7)$$

Koefisien perpindahan panas dapat dihitung menggunakan persamaan 9:

$$h = \frac{Q}{A_b(T_{s\ ave} - T_{\infty})} \quad (8)$$

Tahanan termal dan Bilangan *Nusselt* didefinisikan untuk membandingkan nilai antara perpindahan panas konveksi dan konduksi yang dapat dihitung dengan persamaan 9 dan 10:

$$R_{th} = \frac{T_{ave}-T_{\infty}}{Q} \quad (9)$$

$$Nu = \frac{h \cdot L}{K} \quad (10)$$

Uji *Grid Independent*

Uji independensi *grid* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi CFD tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah elemen *mesh* yang digunakan. Pengujian dilakukan pada empat variasi *grid*, yaitu 1.145.681, 2.073.340, 3.063.355, dan 4.027.933 elemen dengan kondisi operasi yang sama, yakni kecepatan aliran 2 m/s dan temperatur *inlet* 121°C. Temperatur permukaan digunakan sebagai parameter evaluasi karena merepresentasikan distribusi panas pada domain simulasi. Berdasarkan hasil pada Tabel 1, *grid*

dengan 3.028.451 elemen menghasilkan temperatur permukaan sebesar 180,759°C, sedangkan *grid* dengan 4.027.933 elemen menghasilkan 180,279°C dengan margin *error* sebesar 0,03%. Oleh karena itu, *grid* dengan 3.028.451 elemen dipilih sebagai *grid* optimum untuk proses validasi dan simulasi numerik selanjutnya.

Tabel 1. Data Hasil Uji *Grid*

<i>Grid Number</i>	<i>Velocity (m/s)</i>	<i>Temperature Inlet (C)</i>	<i>Temperature Surface (C)</i>
1145681,00	2	121	181,27
2073340,00	2	121	181,284
3063355,00	2	121	180,759
4027933,00	2	121	180,279

Validasi

Tabel 2. Data Hasil Validasi.

<i>Temper ature Inlet Experim ental Study (C)</i>	<i>Temper ature Inlet Numeri cal Study (C)</i>	<i>Surface Temper ature Experim ental Study (C)</i>	<i>Surface Temper ature Numeri cal Study (C)</i>	<i>Error %</i>
115	115	173,12	172,58	0,00003135
117	117	176,48	175,93	0,00003086
121	121	183,34	182,60	0,00004031
123	123	186,24	185,85	0,00002099

Validasi dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan data eksperimen menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.028.451 elemen pada kecepatan aliran 2 m/s. Variasi temperatur *inlet* yang diterapkan meliputi 115, 117, 121, dan 123°C, dengan temperatur permukaan (*surface temperature*) digunakan sebagai parameter pembanding karena mampu merepresentasikan distribusi panas pada mesin *retort* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Tingkat kesesuaian model dianalisis berdasarkan persentase *error* antara hasil simulasi dan data eksperimen. Hasil validasi menunjukkan bahwa seluruh variasi temperatur menghasilkan nilai *error* yang relatif rendah, dengan *error* minimum sebesar 0,00015127% pada temperatur 121°C. Temuan ini mengindikasikan bahwa model numerik yang digunakan memiliki tingkat akurasi dan

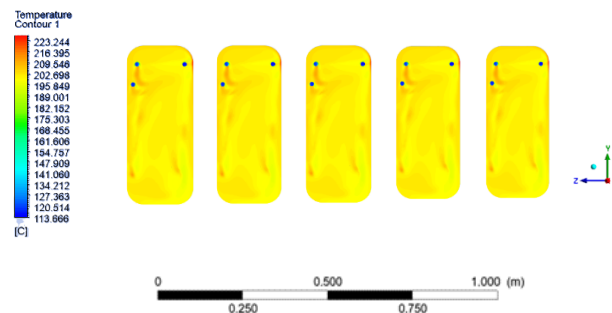
kesesuaian yang baik terhadap kondisi eksperimen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Variasi Temperatur

Studi numerik dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur operasi sebesar 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C serta kecepatan aliran uap sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s terhadap karakteristik termal dan hidrolis pada mesin *retort*. Analisis difokuskan pada distribusi panas (*heat distribution*) di dalam tabung *retort*, sehingga perubahan distribusi temperatur yang terjadi di dalam ruang sterilisasi dapat dievaluasi secara kuantitatif berdasarkan variasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang diterapkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi secara konsisten diikuti oleh kenaikan temperatur permukaan (*surface temperature*) tabung *retort*. Pada kecepatan aliran 2 m/s, temperatur permukaan meningkat dari 175,542°C pada temperatur operasi 115°C menjadi 188,805°C pada temperatur operasi 123°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur operasi meningkatkan energi termal yang dibawa oleh uap jenuh, sehingga laju perpindahan panas ke dinding *retort* menjadi lebih besar dan menghasilkan temperatur permukaan yang semakin tinggi. Selain temperatur operasi, kecepatan aliran uap juga merupakan parameter yang berperan penting dalam menentukan karakteristik distribusi temperatur di dalam ruang *retort*. Pada kecepatan aliran rendah, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, momentum uap yang memasuki ruang *retort* masih relatif kecil sehingga proses transport energi termal dan perpindahan panas berlangsung kurang optimal. Kondisi tersebut menyebabkan penyebaran panas berlangsung lebih lambat dan berpotensi menghasilkan distribusi temperatur yang tidak seragam, terutama antara wilayah di sekitar *inlet* dan area yang berada di luar jalur utama aliran uap. Sebaliknya, peningkatan kecepatan aliran menjadi 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s meningkatkan momentum aliran uap, sehingga proses konveksi menjadi lebih efektif dan distribusi panas ke seluruh ruang *retort* berlangsung lebih cepat serta lebih merata. Meskipun demikian, kecepatan aliran yang lebih tinggi juga dapat

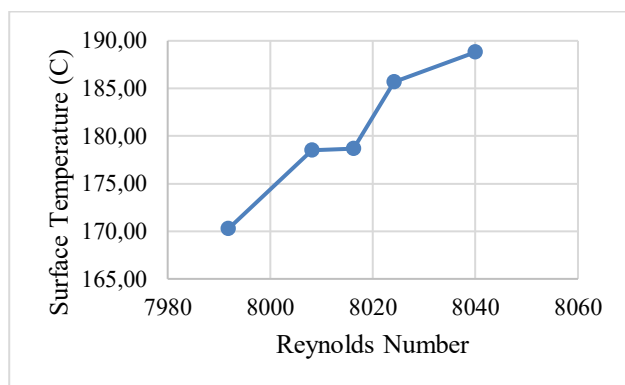
memicu terbentuknya pusaran (*vortex*) dan separasi aliran (*flow separation*), yang berpotensi mengubah pola aliran serta memengaruhi distribusi temperatur di dalam sistem.



Gambar 4. Kontur Distribusi Temperatur Mesin *Retort* pada Variasi Temperatur Operasi 117°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

Gambar 4 memperlihatkan kontur distribusi temperatur pada mesin *retort* dengan temperatur operasi 123°C dan kecepatan aliran uap 2 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur di dalam domain komputasi berada pada rentang 113,666°C hingga 223,244°C. Zona dengan temperatur tertinggi (*hotspot*) ditunjukkan oleh kontur berwarna merah yang terkonsentrasi pada bagian kiri atas serta sebagian sisi samping setiap objek, dengan temperatur mendekati 224°C. Area tersebut diduga merupakan lokasi yang menerima suplai energi panas paling besar atau berada paling dekat dengan sumber panas. Di sisi lain, kontur temperatur pada seluruh domain memperlihatkan pola distribusi yang relatif konsisten, mengindikasikan bahwa setiap unit di dalam ruang *retort* menerima beban panas yang hampir seragam. Meskipun demikian, gradien temperatur masih terlihat, dengan bagian tengah didominasi temperatur yang lebih tinggi (oranye), sedangkan area tepi bawah menunjukkan temperatur yang relatif lebih rendah (kuning terang). Dari aspek perpindahan panas, hasil simulasi memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur operasi diikuti oleh kenaikan koefisien perpindahan panas. Pada temperatur operasi 115°C, koefisien perpindahan panas berada pada kisaran 6,67–6,83 W/m²·°C, sedangkan pada temperatur 123°C meningkat menjadi 7,55–7,79 W/m²·°C. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa temperatur operasi yang lebih tinggi

meningkatkan kemampuan uap jenuh dalam mentransfer energi panas ke permukaan tabung *retort*. Tren yang sama juga terlihat pada laju perpindahan panas, yang meningkat dari sekitar 1320 W/m^2 menjadi 1371 W/m^2 pada temperatur operasi 123°C . Temuan ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur operasi mampu meningkatkan intensitas perpindahan panas, sehingga proses pencapaian temperatur sterilisasi berlangsung lebih cepat dan efektivitas proses sterilisasi dapat ditingkatkan.



Gambar 5. Hubungan Bilangan Reynolds dan Temperatur Permukaan.

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan bilangan *Reynolds* dari sekitar 7990 menjadi 8040 diikuti oleh kenaikan temperatur permukaan dari sekitar 170°C menjadi $189,0^\circ\text{C}$. Secara umum, kondisi tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan karakteristik aliran berkorelasi dengan meningkatnya temperatur permukaan pada mesin *retort*. Namun demikian, hasil simulasi juga menunjukkan adanya penyimpangan pola distribusi panas pada kondisi kecepatan aliran 6 m/s dengan temperatur operasi 117°C , yang menghasilkan nilai *surface temperature* sebesar $178,65^\circ\text{C}$. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan kondisi temperatur operasi 119°C pada kecepatan aliran yang sama, yaitu $182,14^\circ\text{C}$. Kondisi ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur operasi tidak selalu menghasilkan distribusi panas yang lebih seragam apabila karakteristik aliran uap di dalam tabung belum berkembang secara optimal. Fenomena tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas distribusi panas tidak hanya ditentukan oleh besarnya temperatur operasi, tetapi juga dipengaruhi oleh pola aliran uap jenuh di dalam ruang *retort*.

Meskipun temperatur yang lebih tinggi meningkatkan energi termal fluida, keseragaman perpindahan panas tetap bergantung pada kecepatan aliran di *inlet*, arah penyebaran uap, serta fenomena hidrodinamika seperti pembentukan pusaran (*vortex*) dan daerah stagnasi (*stagnation zone*). Kecepatan aliran yang terlalu rendah cenderung menghambat penyebaran energi panas, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan ketidakstabilan pola aliran yang berdampak pada distribusi temperatur. Oleh karena itu, pemilihan kombinasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang tepat menjadi faktor penting untuk menghasilkan distribusi panas yang lebih merata, stabil, dan efektif dalam mendukung proses sterilisasi produk pangan.

Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan temperatur inlet menunjukkan hubungan yang konsisten dengan kenaikan *Reynolds number* dan temperatur permukaan (*surface temperature*) pada mesin *retort*. Pada temperatur inlet 115°C , diperoleh *Reynolds number* sekitar 7991 dengan temperatur permukaan sebesar $170,97^\circ\text{C}$. Ketika temperatur inlet ditingkatkan menjadi 117°C , nilai *Reynolds number* meningkat menjadi sekitar 8008, diikuti kenaikan temperatur permukaan menjadi $178,32^\circ\text{C}$. Tren serupa juga terlihat pada temperatur inlet 119°C , yang menghasilkan *Reynolds number* sekitar 8017 dan temperatur permukaan sebesar $178,76^\circ\text{C}$. Peningkatan yang lebih signifikan terjadi pada temperatur inlet 121°C dan 123°C , dengan *Reynolds number* masing-masing sekitar 8022 dan 8040, serta temperatur permukaan berturut-turut sebesar $185,10^\circ\text{C}$ dan $188,60^\circ\text{C}$. Pola tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur inlet berkontribusi terhadap bertambahnya energi termal yang dibawa oleh uap jenuh sebagai media pemanas. Semakin tinggi temperatur operasi, semakin besar energi panas yang tersedia untuk ditransfer ke dinding dan ruang *retort*, sehingga temperatur permukaan mengalami peningkatan secara bertahap. Secara keseluruhan, hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa temperatur operasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik termal mesin *retort*. Kenaikan *Reynolds number* yang diikuti oleh peningkatan temperatur permukaan menunjukkan bahwa

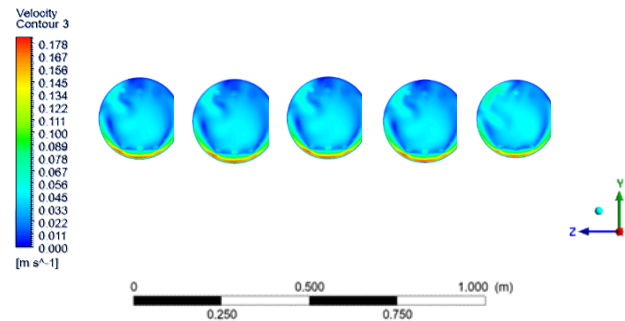
proses perpindahan panas berlangsung lebih intensif pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Dengan demikian, pengaturan temperatur *inlet* menjadi salah satu parameter operasi yang menentukan dalam meningkatkan laju pemanasan serta mendukung distribusi panas yang lebih merata di dalam ruang sterilisasi.

3.2. Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran

Variasi kecepatan aliran fluida merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap kinerja perpindahan panas secara konvektif pada mesin *retort*. Secara umum, peningkatan kecepatan aliran akan meningkatkan koefisien perpindahan panas, sehingga laju transfer energi termal dari uap jenuh ke permukaan *retort* menjadi lebih efektif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi kecepatan aliran di dalam ruang *retort* membentuk pola yang relatif stabil, meskipun masih dijumpai variasi kecepatan pada beberapa lokasi tertentu. Berdasarkan kontur *velocity*, kecepatan aliran berada pada kisaran 0 hingga 0,178 m/s. Area yang didominasi warna hijau dan kuning menunjukkan kecepatan aliran menengah, yaitu sekitar 0,04 - 0,08 m/s, dan tersebar pada bagian tengah atas ruang *retort*. Dibandingkan dengan area di dekat dinding *retort* yang memiliki kecepatan lebih tinggi, zona tersebut menunjukkan kecepatan yang relatif lebih rendah. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh perubahan arah aliran maupun terbentuknya daerah resirkulasi (*recirculation zone*), sehingga distribusi kecepatan pada area tersebut menjadi lebih kecil. Sebaliknya, kecepatan aliran yang lebih tinggi teramati pada bagian tepi, terutama di sisi kanan atas dan bagian bawah ruang *retort*. Perbedaan distribusi kecepatan ini menunjukkan bahwa meskipun karakteristik aliran secara keseluruhan relatif stabil, masih terdapat ketidakseragaman lokal yang berpotensi memengaruhi keseragaman perpindahan panas selama proses sterilisasi termal.

Gambar 6 menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran berpengaruh terhadap karakteristik sirkulasi fluida panas di dalam ruang *retort*. Peningkatan kecepatan aliran cenderung meningkatkan efektivitas perpindahan panas melalui mekanisme konveksi, sehingga proses pemanasan menuju

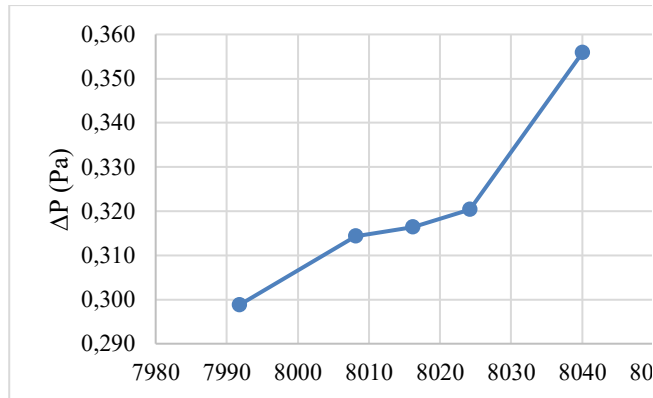
produk maupun rak sterilisasi berlangsung lebih cepat. Meskipun demikian, hasil simulasi masih memperlihatkan ketidakseragaman distribusi kecepatan aliran, terutama pada bagian tengah ruang *retort* yang membentuk zona berkecepatan rendah (*dead zone*), sehingga pemerataan aliran masih menjadi faktor penting dalam mendukung distribusi panas yang lebih optimal selama proses sterilisasi termal.



Gambar 6. Kontur Distribusi *Velocity* Mesin *Retort* pada Variasi Temperatur Operasi 117°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

Kontur *velocity* menunjukkan bahwa pola aliran tidak membentuk distribusi yang simetris maupun profil parabolik seperti karakteristik aliran laminar, melainkan menyerupai dua lobus atau huruf U terbalik yang bersifat asimetris. Zona berwarna biru yang berada di bagian dasar dan di dekat dinding pipa menunjukkan kecepatan aliran yang mendekati nol, sesuai dengan kondisi *no-slip*, yaitu keadaan ketika kecepatan fluida pada permukaan dinding bernilai nol akibat pengaruh viskositas. Sebaliknya, kecepatan aliran tertinggi terkonsentrasi pada bagian atas-tengah ruang *retort*, yang mengindikasikan adanya pengaruh geometri sistem maupun gaya dorong aliran sehingga fluida bergerak lebih cepat pada area tersebut. Perbedaan distribusi kecepatan tersebut turut memengaruhi karakteristik tekanan di dalam sistem, meskipun hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi temperatur inlet 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C hanya menghasilkan perubahan tekanan yang relatif kecil. Pada kondisi tersebut, nilai *Reynolds number* berada pada kisaran 7991–8040, sedangkan nilai selisih (ΔP) cenderung konstan di sekitar 0,352 Pa. Kondisi ini memperlihatkan bahwa peningkatan temperatur operasi pada rentang yang dikaji tidak memberikan pengaruh

yang signifikan terhadap *pressure drop*, namun tetap berkontribusi terhadap perubahan karakteristik aliran dan efektivitas perpindahan panas di dalam ruang *retort*.



Gambar 7. Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dan Perbedaan Tekanan.

Grafik pada Gambar 7 menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan selisih tekanan seiring dengan bertambahnya bilangan *Reynolds*, meskipun kenaikan yang terjadi relatif kecil sehingga tidak memberikan perubahan yang signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur *inlet* memengaruhi karakteristik aliran fluida di dalam ruang *retort* melalui perubahan sifat termofisik fluida, khususnya densitas dan viskositas, yang selanjutnya berkontribusi terhadap nilai bilangan *Reynolds*. Akan tetapi, pengaruh variasi temperatur *inlet* terhadap selisih tekanan masih tergolong rendah. Ditinjau dari distribusi panas, pengaruh pola aliran uap di dalam tabung *retort* juga dapat dievaluasi melalui perubahan nilai tekanan. Pada kecepatan aliran 2 m/s, nilai *pressure drop* relatif kecil, yaitu berkisar antara 0,352–0,391 Pa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, sedangkan pada kecepatan 10 m/s terjadi peningkatan *pressure drop* hingga sekitar 4,272–4,309 Pa. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran, semakin besar selisih tekanan antara sisi *inlet* dan *outlet*. Kondisi tersebut mengindikasikan meningkatnya energi kinetik aliran serta interaksi fluida dengan dinding tabung yang semakin kuat. Dalam konteks distribusi panas, fenomena ini dapat berkontribusi terhadap peningkatan penyebaran uap panas ke area yang lebih luas di dalam ruang *retort*. Namun demikian, peningkatan tekanan dan kecepatan aliran juga berpotensi memunculkan

ketidakteraturan pola aliran pada beberapa area tertentu dalam sistem.

4.1 PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terhadap mesin *retort* sterilisasi makanan dengan variasi temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C serta kecepatan aliran uap 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s, dapat disimpulkan bahwa temperatur operasi merupakan faktor yang paling dominan dalam menentukan kinerja termal *retort*, di mana peningkatan temperatur *inlet* dari 115°C menjadi 123°C pada kecepatan aliran 2 m/s meningkatkan temperatur permukaan dari 175,25°C menjadi 188,81°C serta menaikkan koefisien perpindahan panas dari kisaran 6,67–6,83 W/m²·°C menjadi 7,55–7,79 W/m²·°C, sejalan dengan kenaikan bilangan *Reynolds* dari sekitar 7991 menjadi 8040; sementara itu, kecepatan aliran uap berperan penting dalam keseragaman distribusi panas, karena kecepatan rendah (2–4 m/s) menghasilkan momentum aliran yang kurang optimal sehingga berpotensi membentuk zona mati (*dead zone*) dan titik dingin (*cold spot*), sedangkan kecepatan yang lebih tinggi (6–10 m/s) memperbaiki proses konveksi meskipun dapat memicu pusaran (*vortex*) dan separasi aliran yang menyebabkan ketidakteraturan pemanasan lokal, yang juga tercermin dari peningkatan *pressure drop* secara signifikan dari sekitar 0,352–0,391 Pa pada kecepatan 2 m/s menjadi 4,272–4,309 Pa pada kecepatan 10 m/s, sehingga temuan ini dapat dijadikan acuan dalam menentukan kombinasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang optimal guna meningkatkan efektivitas dan keseragaman proses sterilisasi termal pada industri pengolahan pangan.

4.2. Saran

Berdasarkan temuan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap terhadap karakteristik termal serta hidrodinamika mesin *retort*, diperlukan pengembangan penelitian lanjutan dengan mempertimbangkan variasi parameter operasi yang lebih luas, seperti tekanan kerja, konfigurasi distribusi uap, bentuk dan susunan

produk, serta karakteristik material kemasan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap mekanisme perpindahan panas. Selain itu, validasi eksperimental secara langsung menggunakan pengukuran temperatur pada beberapa titik kritis di dalam ruang *retort* disarankan untuk meningkatkan keakuratan model *CFD* yang dikembangkan. Dari aspek implementasi, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam menentukan kombinasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang optimal guna meningkatkan keseragaman distribusi panas, mengurangi potensi terbentuknya *cold spot* maupun *dead zone*, serta meningkatkan efisiensi energi selama proses sterilisasi. Pengembangan model numerik dengan pendekatan turbulensi atau metode optimasi lanjutan juga diperlukan untuk mendukung perancangan mesin *retort* yang lebih efisien, stabil, dan sesuai dengan kebutuhan industri pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Azar, A.B., Ramezan, Y. and Khashehchi, M. (2020) “Numerical simulation of conductive heat transfer in canned celery stew and retort program adjustment by computational fluid dynamics (CFD),” *International Journal of Food Engineering*, 16(9). Available at: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0303>.
- Cardona, L.F. *et al.* (2020) “Case Studies in Thermal Engineering Venting stage experimental study of food sterilization process in a vertical retort using temperature distribution tests and energy balances,” 22(April). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100736>.
- Chiozzi, V., Agriopoulou, S. and Varzakas, T. (2022) “Advances, Applications, and Comparison of Thermal Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing,” *Applied sciences*, 12, pp. 1–40.
- Jimenez, P.S. *et al.* (2024) “Understanding retort processing: A review,” *Food Science and Nutrition*, 12(3), pp. 1545–1563. Available at: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3912>.
- Jung, H., Lee, Y.J. and Yoon, W.B. (2022) “Using Numerical Analysis to Develop a Retort Process to Enhance Antioxidant Activity and Physicochemical Properties of White Radish (*Raphanus sativus* L.) in Different-Sized Packages,” *Processes*, 10(12). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr10122589>.
- Jung, H., Lee, Y.J. and Yoon, W.B. (2023) “Effect of Pouch Size on Sterilization of Ready-to-Eat (RTE) Bracken Ferns: Numerical Simulation and Texture Evaluation,” *Processes*, 11(1). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr11010035>.
- Kalinke, I. *et al.* (2022) “Critical assessment of methods for measurement of temperature profiles and heat load history in microwave heating processes—A review,” *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), pp. 2118–2148. Available at: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12940>.
- Nasrulloh, N. *et al.* (2024) “Safety and Quality of Complementary Food (MPASI) as Disaster Emergency Rations Using Retort Pouch Packaging Technology Keamanan dan Kualitas Makanan Pendamping ASI (MPASI) Ransum Bencana dengan Teknologi Pengemasan Retort Pouch,” 8(3), pp. 200–207. Available at: <https://doi.org/10.20473/amnt.v8i3SP.2024.20>.
- Oyinloye, T.M. and Yoon, W.B. (2021) “Application of computational fluid dynamics (Cfd) simulation for the effective design of food 3d printing (a review),” *Processes*, 9(11). Available at: <https://doi.org/10.3390/pr9111867>.
- Pursito, D.J. *et al.* (2020) “Optimizing Steam Consumption of Mushroom Canning Process by Selecting Higher Temperatures and Shorter Time of Retorting,” *International Journal of Food Science*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/6097343>.
- Raits, E. *et al.* (2021) “A Case-study: Temperature Distribution and Heat Penetration in Steam-air Retort, Using Glass Jars and Retort Pouches,” *Rural Sustainability Research*, 46(341), pp.

- 90–96. Available at:
<https://doi.org/10.2478/plua-2021-0020>.
- Soleymani Serami, M., Ramezan, Y. and Khashehchi, M. (2021) “CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew,” *Food Science and Nutrition*, 9(2), pp. 1079–1087. Available at:
<https://doi.org/10.1002/fsn3.2083>.
- Soni, A. *et al.* (2020) “Microwave-induced thermal sterilization- A review on history, technical progress, advantages and challenges as compared to the conventional methods,” *Trends in Food Science and Technology*, 97(November 2019), pp. 433–442. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.030>.
- Su, S. *et al.* (2023) “Heat penetration and quality analysis of retort processed vegetables for home meal replacement foods,” *Food Science and Biotechnology*, 32(8), pp. 1057–1065. Available at:
<https://doi.org/10.1007/s10068-023-01247-8>.
- Szpicer, A. *et al.* (2025) “Computational Fluid Dynamics Simulation of Thermal Processes in Food Technology and Their Applications in the Food Industry,” *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(1), pp. 1–33. Available at:
<https://doi.org/10.3390/app15010424>.
- Zhu, J., Frerich, T. and Herrmann, A.S. (2021) “CFD modeling and validation of heat transfer inside an autoclave based on a mesh independency study,” *Journal of Composite Materials*, 55(18), pp. 2469–2487. Available at:
<https://doi.org/10.1177/0021998320979043>.