

ANALISIS DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA MESIN *RETORT* STERILISASI MENGGUNAKAN CFD DENGAN VARIASI TEMPERATUR DAN KECEPATAN ALIRAN UAP

Amrijal Anshori¹, Muhamad Safi'i², Hisyam Ma'mun³

^{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 : 2 Juli 2026

Disetujui : 22 Juli 2026

Kata Kunci :

Computational Fluid Dynamics (CFD), Mesin *Retort*, Sterilisasi Termal, Distribusi Temperatur, Uap Jenuh.

ABSTRAK

Sterilisasi termal menggunakan mesin *retort* berperan penting dalam menjaga keamanan, mutu, dan daya simpan produk pangan. Keberhasilan proses ini dipengaruhi oleh keseragaman distribusi temperatur di dalam ruang sterilisasi yang menentukan efektivitas perpindahan panas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi temperatur *inlet* dan kecepatan aliran uap jenuh terhadap karakteristik termal mesin *retort* menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Geometri mesin *retort* memiliki ukuran $1800 \times 750 \times 950$ mm dengan variasi temperatur *inlet* sebesar 115°C , 117°C , 119°C , 121°C , dan 123°C serta variasi kecepatan aliran sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s pada kondisi tunak. Hasil simulasi terhadap 25 skenario menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *inlet* dan kecepatan aliran uap memengaruhi pola distribusi temperatur, bilangan Reynolds, dan karakteristik perpindahan panas di dalam ruang *retort*. Kombinasi temperatur *inlet* 123°C dan kecepatan aliran 10 m/s menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan panas lokal sebesar 12% dibandingkan kondisi awal pengujian serta menghasilkan karakteristik termal yang paling baik dibandingkan variasi lainnya. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi dalam menentukan kondisi operasi mesin *retort* yang sesuai untuk mendukung proses sterilisasi termal produk pangan.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : Jul 2, 2026

Accepted : Jul 22, 2026

Keywords:

Computational Fluid Dynamics (CFD), Retort Machine, Thermal Sterilization, Temperature Distribution, Saturated Steam.

ABSTRACT

Thermal sterilization using a retort machine plays an important role in maintaining food safety, quality, and shelf life. The effectiveness of this process is strongly influenced by temperature distribution uniformity and heat transfer characteristics within the sterilization chamber. This study investigates the effects of inlet temperature and saturated steam flow velocity variations on the thermal performance of a retort machine using Computational Fluid Dynamics (CFD). The retort geometry was developed with dimensions of $1800 \times 750 \times 950$ mm. Numerical simulations were performed under steady-state conditions by considering five inlet temperature variations (115°C , 117°C , 119°C , 121°C , and 123°C) and five saturated steam velocity variations (2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, and 10 m/s), resulting in 25 simulation scenarios. The simulation results indicate that variations in inlet temperature and steam velocity significantly influence temperature distribution, flow characteristics, and heat

transfer behavior within the retort chamber. The combination of an inlet temperature of 123°C and a steam velocity of 10 m/s produced the highest local heat transfer coefficient, with an improvement of approximately 12% compared with the initial operating condition. These findings provide insight into the influence of operating parameters on the thermal characteristics of retort machines and can serve as a reference for selecting suitable operating conditions to support effective food sterilization processes.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri pangan menuntut kualitas, keamanan, dan masa simpan produk yang diproses. Salah satu teknologi yang sering digunakan untuk menjaga keamanan makanan adalah proses sterilisasi termal dengan menggunakan mesin *retort* (Simpson et al., 2020). Proses *retort* adalah cara menghancurkan mikroba dengan menghangatkan wadah tertutup menggunakan uap, air panas, atau campuran keduanya pada suhu yang cukup tinggi, biasanya di atas 115°C (Yang et al., 2022). Teknologi ini sering digunakan di berbagai produk makanan kaleng, kantong *retort*, makanan siap santap, dan produk makanan komersial karena mampu menghilangkan mikroorganisme berbahaya serta spora yang merugikan kesehatan (Giraldo Gil et al., 2020). Keberhasilan proses sterilisasi tidak hanya bergantung pada suhu tinggi yang digunakan, tetapi juga pada seberapa merata suhu tersebar di ruang *retort* (Jimenez et al., 2024). Ketidakmerataan suhu menyebabkan munculnya *cold spot* atau area dengan suhu paling rendah yang mengakibatkan kegagalan sterilisasi. Di sisi lain, bagian yang menerima terlalu banyak panas dapat mengalami penurunan kualitas produk karena kerusakan nutrisi, perubahan warna, tekstur, atau rasa (Giraldo Gil et al., 2020). *Retort* berperan krusial dalam pemanasan makanan karena dapat membunuh kuman pada temperatur dan tekanan yang tinggi sehingga memiliki standar keamanan yang tinggi (Nofrizal Fajar Satria Pratama & Saputro, 2024). Metode sterilisasi menggunakan uap dan udara dalam *retort* terdiri atas pengisian keranjang produk kemasan dan menempatkan ke dalam *retort*, tahap mengeluarkan udara, memanaskan *retort* dengan uap (tahap pemanasan awal) hingga mencapai suhu yang sudah ditentukan, menjaga suhu yang ditetapkan di dalam *retort* (tahap penahanan), dan tahap pendinginan (Raits, Pinte, Kirse-ozolina, et al.,

2021). Dalam pengoperasian mesin *retort* ditinjau dari nilai efektivitas, umumnya dinyatakan melalui nilai F_0 (ukuran kecukupan proses termal) yang didefinisikan sebagai waktu ekuivalen dalam satuan menit pada suhu referensi 121,1°C dengan nilai z sebesar 10°C, yang digunakan untuk menggambarkan tingkat destruksi termal spora *Clostridium botulinum* (Numuang, 2022). Fakta tersebut menjadikan penelitian tentang performa termal mesin *retort* dengan basis eksperimen dan numerik sangat menarik untuk dibahas (Pletzer et al., 2023).

Dalam beberapa tahun terakhir, studi numerik menggunakan perangkat CFD (*Computational Fluid Dynamics*) banyak digunakan untuk menganalisis fenomena termal dan hidrolik pada sistem sterilisasi (Pletzer et al., 2023). Perangkat CFD (*Computational Fluid Dynamics*) membantu teknisi dalam desain dan optimasi mesin *retort* (Szpicier et al., 2025). Alasannya adalah, CFD mampu menyelesaikan persoalan matematika dalam menggambarkan aliran fluida dan membantu dalam merancang proses industri dengan lebih baik serta menurunkan biaya produksi dan penggunaan mesin dan peralatan (Paz-Paredes et al., 2025). Kelebihan dari metode ini terletak pada kemampuannya untuk menggambarkan profil suhu, distribusi kecepatan aliran, serta sifat perpindahan panas dengan cara tiga dimensi dan akurasi yang tinggi (Hashemian Nik et al., 2023). Pemodelan numerik bisa dimanfaatkan untuk menunjukkan bagaimana temperatur, laju aliran panas, dan tingkat sterilisasi berubah selama proses termal. Dengan begitu, CFD berfungsi sebagai metode analitis untuk memahami perilaku pemindahan panas dengan lebih mendalam jika dibandingkan dengan pengamatan langsung dari eksperimen (Wang et al., 2023). Berbagai penelitian menggunakan pendekatan CFD telah menunjukkan bahwa performa distribusi temperatur pada sistem

autoclave dan *retort* ditentukan oleh beberapa faktor utama, yaitu geometri ruang pemanasan, dinamika sirkulasi fluida, dan kecepatan aliran media pemanas yang memengaruhi efektivitas perpindahan panas selama proses sterilisasi (Zhu et al., 2021).

Simulasi CFD yang diterapkan pada mesin *retort* dilakukan dengan berbagai pertimbangan. Salah satunya adalah kinerja perpindahan panas pada sistem *retort* dipengaruhi oleh berbagai parameter, termasuk desain geometris ruang sterilisasi, tata letak produk, jenis media pemanas yang digunakan, serta karakteristik aliran fluida di dalam ruang proses. Interaksi antarparameter tersebut berperan penting dalam menentukan efektivitas distribusi panas dan keseragaman temperatur selama proses sterilisasi (Raits, Pinte, Kirse-Ozolina, et al., 2021). Pemanasan makanan pada mesin *retort* dilakukan dan diamati secara eksperimen dan numerik dengan mempertimbangkan operasi suhu sebesar 95°C dan 121°C pada interval waktu sebesar 20, 40, 60, 80, dan 100 menit. Hasil riset menunjukkan bahwa penerapan profil suhu *retort* variabel (*Variable Retort Temperature/VRT*) pada selama 25 menit yang dilanjutkan dengan 121°C selama 15 menit menghasilkan nilai sterilitas (*F*) sebesar 6,58. Kondisi tersebut 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 durasi proses sterilisasi sebesar 26,07% (Ates et al., 2016). Selaras dengan temuan tersebut, studi numerik efek waktu pemanasan yang dikembangkan sebesar 35,0 menit, 41,5 menit, dan 47,5 menit dilakukan terhadap kemasan dengan berat masing-masing 100 g, 150 g, dan 200 g produk dengan mempertimbangkan temperatur operasi konstan sebesar 121°C. Hasil riset mengungkapkan bahwa waktu sterilisasi produk sebesar 41,5 menit memiliki hasil terbaik ditinjau dengan meratanya sebaran koefisien perpindahan panas pada mesin *retort* dengan nilai 340 W/m².K. (Jung et al., 2023).

Dalam konteks teknologi pangan, pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) semakin banyak dimanfaatkan karena mampu memberikan gambaran yang lebih detail mengenai sebaran temperatur, pola kecepatan

aliran, dan mekanisme perpindahan panas. Aspek tersebut dipertimbangkan dengan operasi temperatur sterilisasi sebesar 75°C dan 130°C dan hasilnya masing-masing variasi tersebut mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas sebesar 12% dan 18% (Alexandersson & Ristinmaa, 2021). Pada sterilisasi produk pangan kaleng, simulasi numerik telah terbukti dapat merepresentasikan medan temperatur, aliran panas, serta nilai sterilitas, sehingga berpotensi digunakan untuk mengoptimalkan parameter proses sekaligus meminimalkan risiko penurunan mutu akibat perlakuan panas yang berlebihan. Dalam hal ini waktu pemanasan sebesar 40 menit, 60 menit, 80 menit, dan 100 menit diusulkan. Hasil terbaik dalam penelitian ini ditemukan bahwa waktu pemanasan sebesar 80 menit memiliki distribusi temperatur *retort* rata-rata sebesar 120°C hingga 125°C (Alonso et al., 2021). Penelitian pada produk *ready-to-eat* berbasis kemasan *pouch* juga menunjukkan bahwa dimensi kemasan dan kondisi pemanasan berpengaruh terhadap nilai *F₀*, karakteristik tekstur, serta efektivitas sterilisasi. Target *retort-temperatures* sebesar 120°C, 130°C, 140°C, dan 150°C dikembangkan. Hasilnya, peningkatan temperatur sekitar 7°C di setiap uji memberikan data kinerja disetiap variasi target temperatur sehingga mampu memanaskan produk dengan baik (Su et al., 2023).

Selain itu, kajian mengenai distribusi temperatur dan penetrasi panas pada steam-air *retort* memperlihatkan bahwa jenis kemasan dan pola penyusunan produk juga menentukan lama pemanasan, titik pemanasan paling lambat, serta total durasi proses sterilisasi (Raits, Pinte, Kirse-Ozolina, et al., 2021). 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 (Alonso et al., 2021). Dari sisi pemodelan numerik, uji independensi *mesh* merupakan tahapan penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi perpindahan panas telah mencapai tingkat akurasi yang memadai tanpa menimbulkan beban komputasi yang tidak perlu (Zhu et al., 2021). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengkaji hubungan antara jumlah *grid* dan variasi

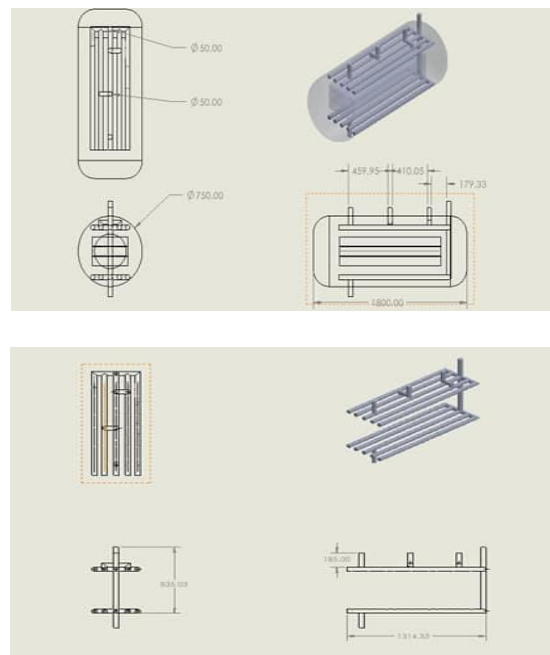
temperatur operasi terhadap performa termal mesin *retort* makanan, sehingga hasil yang diperoleh dapat menjadi landasan dalam penentuan konfigurasi simulasi yang stabil, efisien, dan relevan bagi optimasi proses sterilisasi. Berbagai penelitian mengenai performa mesin *retort* telah dilakukan melalui pendekatan eksperimen maupun simulasi numerik dengan mempertimbangkan parameter operasi seperti temperatur pemanasan, waktu proses, jenis kemasan, konfigurasi produk, serta karakteristik aliran fluida. Namun, sebagian besar penelitian tersebut lebih berfokus pada evaluasi efektivitas sterilisasi dan penetrasi panas pada produk, sedangkan kajian mengenai pengaruh kombinasi temperatur *inlet* dan kecepatan aliran uap terhadap karakteristik distribusi temperatur di dalam ruang *retort* masih perlu dikaji lebih lanjut. Namun, berdasarkan kajian literatur yang dilakukan, penelitian mengenai karakteristik distribusi temperatur pada mesin *retort* dengan pendekatan CFD yang mengevaluasi pengaruh simultan antara variasi temperatur *inlet* uap jenuh dan kecepatan aliran pada konfigurasi geometri tertentu masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur *inlet* 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 mesin *retort*. Rentang temperatur *inlet* 115°C hingga 123°C dipilih berdasarkan kondisi operasi umum proses sterilisasi termal *retort* untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan energi panas terhadap distribusi temperatur dan perpindahan panas. Variasi kecepatan aliran uap 2–10 m/s digunakan untuk menganalisis pengaruh perubahan karakteristik aliran, mulai dari momentum rendah hingga sirkulasi yang lebih tinggi, terhadap penyebaran panas di dalam ruang sterilisasi. Studi numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat komputer *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan operasi kondisi *steady* dan memilih model *viscous* berupa *Realizable k-ε*. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa analisis numerik mengenai hubungan antara temperatur *inlet*, kecepatan aliran uap, karakteristik aliran, dan perpindahan panas pada mesin *retort*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan

pemahaman mengenai pengaruh parameter operasi terhadap performa termal mesin *retort* serta menjadi referensi untuk pengembangan studi lanjutan terkait simulasi CFD pada sistem sterilisasi termal.

2. METODE

2.1. Model Fisik

Desain mesin *retort* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil pengembangan dari rancangan eksperimen sebelumnya dengan mempertimbangkan konfigurasi rak penyimpanan produk dan tata letak saluran keluaran uap sebagai parameter utama. Geometri dan dimensi mesin *retort* secara rinci disajikan pada Gambar 1. *Software* Gambar *Solidworks* diterapkan guna memodelkan geometri tersebut.



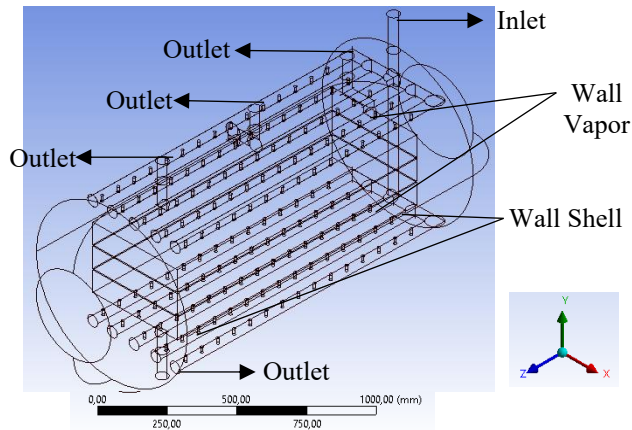
Gambar 1. Geometri *Retort* dan Ukurannya.

2.2. Material

Stainless steel grade AISI 304 digunakan sebagai material utama pada dinding mesin *retort* karena memiliki ketahanan korosi yang baik, stabil pada temperatur proses sterilisasi, dan umum digunakan pada peralatan industri pangan. Sifat termofisik material yang digunakan dalam simulasi meliputi densitas (ρ) sebesar 7900 kg/m³, panas jenis (C_p) sebesar 500 J/kg.K, dan konduktivitas termal (k) sebesar 15,1 W/m.K.

2.3. Domain Komputasi

Domain komputasi pada penelitian ini berupa ruang fluida di dalam tabung *retort* dengan dimensi 1800 mm × 750 mm × 950 mm. Domain terdiri atas area aliran uap jenuh sebagai fluida kerja dan permukaan dinding *retort* sebagai media perpindahan panas. Kondisi batas yang digunakan meliputi *inlet* sebagai lokasi masuknya uap jenuh, *outlet* sebagai jalur keluarnya aliran, *wall vapor* sebagai permukaan kontak antara fluida uap dan dinding bagian dalam *retort*, serta *wall shell* sebagai permukaan luar material *retort*. Definisi masing-masing kondisi batas ditentukan berdasarkan karakteristik fisik proses perpindahan panas dalam sistem *retort*. Model turbulensi *realizable k-ε* digunakan karena mampu memprediksi aliran turbulen pada geometri tertutup berbentuk silinder serta menghasilkan estimasi distribusi kecepatan dan temperatur yang sesuai untuk analisis perpindahan panas berbasis fluida.



Gambar 2. Domain Komputasi dan Penentuan Kondisi Batas.

Persamaan kontinuitas, momentum dan energi saat studi numerik:

Persamaan kontinuitas:

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

Di mana u , v , dan w adalah komponen kecepatan fluida pada arah x , y , dan z . Persamaan momentum:

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

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

$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(\rho - \rho_\infty) \quad (4)$$

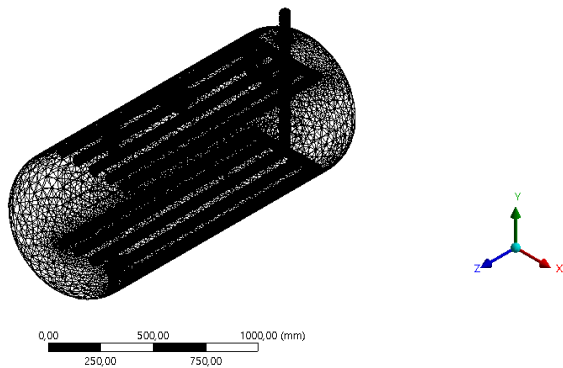
Persamaan energi:

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

2.4. Meshing

Proses *meshing* pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *automatic topology* dengan elemen *tetrahedral* dan *cell sizing* 250 mm, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. *Meshing* bertujuan membagi domain komputasi menjadi elemen-elemen kecil agar aliran fluida dan perpindahan panas dapat diselesaikan secara numerik dengan lebih akurat. Refinement diterapkan pada area *inlet*, *outlet*, dinding tabung, dan rak produk karena berperan penting terhadap pola aliran serta distribusi temperatur. *Mesh* yang dihasilkan terdiri atas 3.012.679 elemen, dengan kualitas yang dinilai melalui parameter *skewness* dan *orthogonal*

quality. Simulasi kemudian dilakukan untuk mengkaji distribusi temperatur dan pola aliran fluida dalam ruang *retort* menggunakan skema *first-order upwind* guna memperoleh solusi yang stabil.



Gambar 3. Struktur Mesh Tetrahedral

2.5. Set Up Simulasi

Penentuan parameter simulasi mengacu pada data eksperimen yang telah diperoleh dari penelitian sebelumnya. Fluida kerja yang digunakan adalah uap jenuh dengan variasi temperatur 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C, serta variasi kecepatan aliran sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s. Uap tersebut dialirkan melalui pipa *inlet* dan disebarkan ke seluruh jaringan pipa pada mesin *retort* sebagai media utama perpindahan panas selama proses sterilisasi termal. Sifat termofisik uap yang diterapkan dalam simulasi meliputi densitas sebesar 0,0000122 kg/m³, panas spesifik 2071 J/kg·°C, dan konduktivitas termal 18,0087 W/m·°C. Simulasi numerik dijalankan menggunakan CFD *Fluent* dengan mengaktifkan *Energy Equation* untuk memperhitungkan proses perpindahan panas. Model turbulensi *Realizable k-ε* digunakan karena mampu merepresentasikan karakteristik aliran turbulen pada ruang tertutup, seperti ruang *retort*. Selanjutnya, material *Water Vapor* dimasukkan melalui menu *Materials* dan ditetapkan sebagai fluida kerja pada domain komputasi melalui pengaturan *Cell Zone Conditions*. Kondisi batas *inlet* ditentukan menggunakan tipe *Velocity Inlet* dengan variasi kecepatan aliran sebesar 2–10 m/s dan temperatur *inlet* sebesar 115°C hingga 123°C sesuai skenario simulasi yang diuji. Kondisi *outlet* didefinisikan menggunakan tipe *Pressure Outlet* dengan tekanan relatif 0 Pa untuk merepresentasikan keluarnya aliran uap

dari ruang *retort*. Permukaan *wall vapor* diterapkan sebagai dinding tanpa slip (*no-slip condition*) yang mempertimbangkan perpindahan panas konveksi antara uap jenuh dan permukaan bagian dalam *retort*. Sementara itu, *wall shell* dimodelkan sebagai dinding solid menggunakan material *stainless steel* AISI 304 dengan mekanisme perpindahan panas secara konduksi melalui material dinding. Seluruh kondisi batas ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi operasi mesin *retort* selama proses sterilisasi termal. Variasi temperatur dan kecepatan pada *inlet* digunakan untuk mengevaluasi pengaruh energi termal dan karakteristik aliran terhadap distribusi temperatur. Pendekatan *pressure outlet* dipilih karena aliran keluar tidak memiliki tekanan balik yang signifikan, sedangkan kondisi *wall* digunakan untuk menggambarkan interaksi perpindahan panas antara fluida uap dan material *retort*. Nilai referensi perhitungan diperoleh melalui opsi *Compute From Inlet*. Proses penyelesaian numerik dilakukan dengan algoritma PISO, sedangkan diskretisasi persamaan pengendali menggunakan skema *First Order Upwind* untuk menjaga kestabilan hasil simulasi. Parameter keluaran dipantau melalui *Surface Report* dengan metode *Area Weighted Average*, khususnya terhadap nilai rata-rata tekanan dan temperatur pada permukaan *Wall Vapor*. Sebelum iterasi dilakukan, simulasi diinisialisasi menggunakan *Standard Initialization* dengan *inlet* sebagai kondisi awal perhitungan. Perhitungan dijalankan hingga 1000 iterasi sampai residual memenuhi kriteria konvergensi, sehingga diperoleh solusi numerik yang stabil dalam menggambarkan distribusi temperatur dan pola aliran fluida di dalam mesin *retort*.

2.6. Measurement Method

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran dan temperatur *inlet* terhadap temperatur permukaan yang dihasilkan dari simulasi numerik. Kecepatan aliran divariasikan sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s, sedangkan temperatur *inlet* ditetapkan pada 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C. Proses pengambilan data temperatur dan tekanan.

Dimulai melalui menu *Results* dengan menggunakan fitur *Location* untuk membentuk beberapa bidang potong. *Plane 1* dibuat dengan metode *YZ Plane*, *Plane 2* menggunakan metode *ZX Plane* pada koordinat $Y = -0,15$ m, *Plane 3* menggunakan metode *XY Plane*, dan *Plane 4* menggunakan metode *ZX Plane* pada koordinat $Y = 0,26$ m. Setelah bidang potong ditentukan, hasil simulasi divisualisasikan melalui fitur *Insert Contour*. *Contour 1* digunakan untuk menampilkan distribusi temperatur pada *Plane 1*, *Contour 2* digunakan untuk menampilkan distribusi tekanan pada *Plane 2*, sedangkan *Contour 3* digunakan untuk menampilkan distribusi kecepatan pada *Plane 3*. Setiap kontur menggunakan pengaturan *Range Local* dengan jumlah kontur sebanyak 100 agar pola distribusi hasil simulasi dapat diamati secara lebih jelas. Pengambilan data numerik dilakukan melalui menu *Calculators* dengan memilih *Function Calculator*. Nilai temperatur rata-rata diperoleh menggunakan fungsi *areaAve* pada *Plane 1* dengan variabel *Temperature*. Sementara itu, tekanan masuk dihitung menggunakan fungsi *areaAve* pada lokasi *Inlet* dengan variabel *Pressure*, sedangkan tekanan keluar diperoleh melalui fungsi *areaAve* pada *Plane 4* dengan variabel *Pressure*. Data tersebut digunakan untuk menganalisis keterkaitan antara variasi kecepatan aliran, temperatur *inlet*, tekanan, serta distribusi temperatur di dalam ruang *retort*.

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 Karakteristik aliran dalam ruang *retort* dianalisis menggunakan bilangan Reynolds untuk menentukan kondisi aliran fluida berdasarkan rasio gaya inersia terhadap gaya viskos:

Bilangan Reynolds dapat dihitung dengan persamaan 6:

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

Luas permukaan *retort* dapat dihitung dengan persamaan 7:

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

Koefisien perpindahan panas dapat dihitung menggunakan persamaan 8:

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

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

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

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

2.8. Uji Grid Independent

Uji independensi *grid* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi CFD tidak mengalami perubahan signifikan akibat peningkatan jumlah elemen *mesh*. Pengujian dilakukan menggunakan empat variasi jumlah elemen, yaitu 1.145.681, 2.073.340, 3.012.679, dan 4.027.933 elemen pada kondisi operasi yang sama dengan kecepatan aliran 2 m/s dan temperatur *inlet* 121°C. Parameter temperatur permukaan digunakan sebagai indikator konvergensi karena berkaitan langsung dengan karakteristik perpindahan panas pada domain *retort*. Hasil pengujian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa peningkatan jumlah elemen dari 3.012.679 menjadi 4.027.933 menghasilkan perubahan temperatur permukaan dari 180,759°C menjadi 180,279°C. Berdasarkan perhitungan *relative error*, perubahan temperatur antara kedua *grid* tersebut sebesar 0,266%. Nilai perubahan yang relatif kecil menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mendekati kondisi konvergen. Selain itu, evaluasi menggunakan *Grid Convergence Index (GCI)* dilakukan untuk memastikan tingkat independensi hasil terhadap ukuran *mesh*. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, *mesh* dengan jumlah 3.012.679 elemen dipilih sebagai *mesh* final karena memberikan keseimbangan antara akurasi hasil dan kebutuhan komputasi.

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	181,28
3012679,00	2	121	180,75
4027933,00	2	121	180,27

2.9. Validasi

Validasi dilakukan untuk menilai kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan data eksperimen menggunakan mesh final sebesar 3.012.679 elemen pada kecepatan aliran 2 m/s. Jumlah elemen tersebut digunakan karena telah memenuhi kriteria independensi *grid* berdasarkan hasil pengujian sebelumnya. Variasi temperatur *inlet* yang digunakan meliputi 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C, dengan *surface temperature* sebagai parameter pembanding karena merepresentasikan kemampuan model dalam memprediksi distribusi panas pada mesin *retort* yang dijelaskan pada Tabel 2. Tingkat kesesuaian dianalisis melalui persentase *error* antara hasil simulasi dan eksperimen. Hasil validasi menunjukkan nilai *error* yang relatif kecil pada seluruh variasi temperatur, dengan *error* terendah sebesar 1,50% pada temperatur 121 °C. Hasil ini menunjukkan bahwa model numerik memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap kondisi eksperimen.

Tabel 2. Data Hasil Validasi

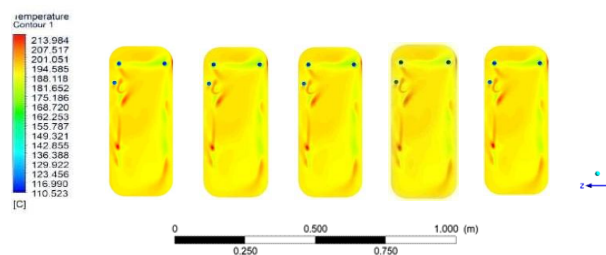
<i>Tempera- ture Inlet Experim- ental Study (C)</i>	<i>Tempera- ture Inlet Numeric al Study (C)</i>	<i>Surface Tempera- ture Experim- ental Study (C)</i>	<i>Surface Tempera- ture Numeric al Study (C)</i>	<i>Error %</i>
115	115	173,12	175,97	1,61
117	117	176,48	179,36	1,60
121	121	183,34	186,15	1,50
123	123	186,24	189,55	1,74

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Variasi Temperatur

Studi numerik pengaruh temperatur operasi sebesar 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C dan kecepatan aliran fluida uap sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s dilakukan guna untuk mengetahui performa termal dan hidrolis pada mesin *retort*. distribusi panas (*heat distribution*) pada tabung mesin

retort. Hasil berupa perubahan distribusi temperatur yang terjadi di dalam ruang *retort* dapat dievaluasi secara lebih objektif terhadap pengaruh temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang diberikan. Hasilnya, peningkatan temperatur operasi secara umum diikuti oleh kenaikan temperatur permukaan (*surface temperature*) pada tabung *retort*. Pada kondisi kecepatan aliran 2 m/s, temperatur permukaan meningkat dari 175,965°C pada temperatur operasi 115°C menjadi 189,545°C pada temperatur operasi 123°C. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi menyebabkan bertambahnya energi termal yang dibawa oleh uap pemanas, sehingga kemampuan transfer panas ke area *retort* menjadi lebih besar dan menghasilkan temperatur permukaan yang lebih tinggi. Variasi kecepatan aliran juga memberikan pengaruh yang terhadap distribusi temperatur di dalam ruang *retort*. Pada kecepatan aliran yang relatif rendah, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, momentum uap yang masuk ke dalam tabung masih terbatas sehingga proses perpindahan dan penyebaran panas berlangsung lebih lambat.



Gambar 4. Kontur Distribusi Temperatur Mesin Retort pada Variasi Temperatur Operasi 123°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

Kondisi ini dapat mengakibatkan terbentuknya ketidakseragaman temperatur, terutama antara daerah yang berada di sekitar *inlet* dengan daerah yang terletak lebih jauh dari lintasan utama aliran uap. Sementara itu, peningkatan kecepatan aliran menjadi 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s menyebabkan momentum uap bertambah sehingga penyebaran panas ke seluruh bagian ruang *retort* menjadi lebih efektif. Akibatnya, distribusi temperatur cenderung lebih cepat dan merata. Kecepatan aliran yang lebih tinggi juga berpotensi memunculkan fenomena hidrodinamika tertentu, seperti terbentuknya pusaran (*vortex*) maupun

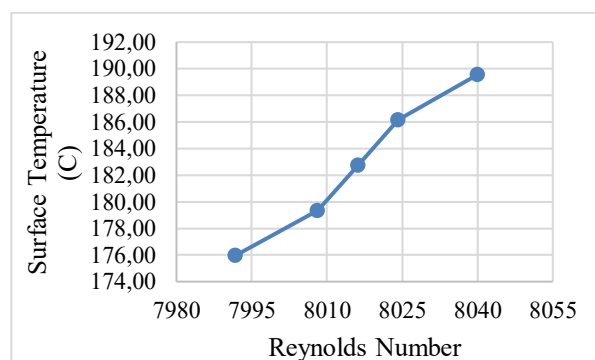
separasi aliran, yang dapat memengaruhi pola distribusi panas di dalam sistem.

Gambar 4 merupakan kontur distribusi temperatur mesin *retort* dengan variasi temperatur operasi sebesar 123°C dengan variasi kecepatan aliran 2 m/s. Rata-rata nilai temperatur berkisar dari nilai minimum 110,523°C (biru) hingga maksimum 213,984°C. *Hotspots* (titik panas) terdapat pada area berwarna merah di bagian kiri atas dan sedikit di sisi samping setiap objek. Ini menunjukkan konsentrasi panas tertinggi (mendekati 214°C). Area ini kemungkinan merupakan lokasi terminal listrik atau sumber panas utama. Konsistensi gambar kontur temperatur menunjukkan pola karakter yang sangat serupa. Hal ini menandakan bahwa beban panas atau kondisi pendinginan yang diterima oleh setiap unit relatif seragam, sehingga gradien suhu terlihat tidak merata di permukaan. Area tengah cenderung lebih panas (oranye), sementara bagian pinggir bawah terlihat sedikit lebih dingin (kuning terang). Pada aspek perpindahan panas, hasil studi numerik memperlihatkan kecenderungan peningkatan koefisien perpindahan panas seiring dengan kenaikan temperatur operasi. Pada temperatur 115°C, nilai koefisien perpindahan panas berada dalam rentang 5,88–5,99 W/m²C, sedangkan pada temperatur 123°C nilainya meningkat menjadi sekitar 6,67–6,74 W/m²C.

Kondisi ini menunjukkan bahwa temperatur operasi yang lebih tinggi mampu meningkatkan kemampuan transfer energi panas dari uap sebagai media pemanas ke permukaan tabung *retort*. Peningkatan serupa juga terlihat pada laju perpindahan panas, yang bertambah dari sekitar 1320 W/m² menjadi 1371 W/m² pada temperatur 123°C. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kenaikan temperatur operasi berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi proses pemanasan, sehingga dapat mempercepat pencapaian temperatur sterilisasi dan mendukung efektivitas proses sterilisasi secara keseluruhan. Pada Gambar 5 peningkatan bilangan Reynolds dari sekitar 7990 ke 8040 bertepatan dengan kenaikan suhu permukaan dari 176°C menjadi sekitar 189,5°C. Hasil simulasi juga memperlihatkan adanya ketidakteraturan distribusi panas pada kondisi kecepatan aliran 6 m/s dan temperatur operasi

117°C, dengan nilai *surface temperature* sebesar 178,65°C. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan kondisi temperatur operasi 119°C pada kecepatan yang sama, yaitu 182,14°C. Perbedaan ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi tidak selalu menghasilkan distribusi panas yang sepenuhnya merata apabila pola aliran uap di dalam tabung masih mengalami gangguan.

Dengan demikian, pola aliran uap jenuh memiliki peran penting dalam menentukan efektivitas distribusi panas di dalam mesin *retort*. Temperatur operasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan energi termal fluida, tetapi pemerataan panas tetap dipengaruhi oleh kecepatan *inlet*, arah penyebaran aliran, serta kemungkinan terbentuknya pusaran dan daerah stagnasi. Kecepatan aliran yang terlalu rendah dapat memperlambat penyebaran panas, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan ketidakteraturan aliran. Oleh karena itu, pemilihan temperatur operasi dan kecepatan aliran uap perlu dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan perpindahan panas, keseragaman distribusi temperatur, dan peningkatan tekanan aliran agar proses sterilisasi berlangsung efektif.



Gambar 5. Hubungan Bilangan Reynolds dan Temperatur Permukaan.

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 5, kenaikan temperatur *inlet* menunjukkan kecenderungan peningkatan nilai Reynolds number dan temperatur permukaan secara konsisten. Pada temperatur *inlet* 115°C, nilai Reynolds number berada pada kisaran 7991 dengan temperatur permukaan sebesar 175,97°C. Ketika temperatur *inlet* dinaikkan menjadi 117°C, Reynolds number meningkat menjadi sekitar 8008 dengan temperatur permukaan sebesar 179,36°C. Selanjutnya, pada

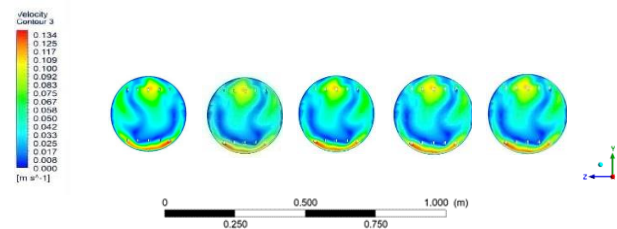
temperatur *inlet* 119°C, nilai Reynolds number mencapai sekitar 8016 dengan temperatur permukaan sebesar 182,74°C. Peningkatan temperatur permukaan yang lebih besar terlihat pada temperatur *inlet* 121°C dan 123°C. Pada temperatur *inlet* 121°C, Reynolds number berada pada kisaran 8024 dengan temperatur permukaan sebesar 186,15°C, sedangkan pada temperatur *inlet* 123°C, Reynolds number mencapai sekitar 8040 dengan temperatur permukaan tertinggi sebesar 189,55°C. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *inlet* berpengaruh terhadap bertambahnya energi panas yang dibawa oleh uap jenuh. Semakin tinggi temperatur operasi yang digunakan, semakin besar energi termal yang tersedia untuk proses perpindahan panas.

Akibatnya, temperatur permukaan di dalam ruang *retort* mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan temperatur *inlet*. Secara keseluruhan, hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa temperatur operasi berpengaruh nyata terhadap kinerja termal mesin *retort*. Peningkatan nilai Reynolds number yang disertai dengan kenaikan temperatur permukaan mengindikasikan bahwa mekanisme perpindahan panas berlangsung lebih intensif pada kondisi temperatur operasi yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan temperatur *inlet* menjadi faktor penting dalam mempercepat kenaikan temperatur permukaan sekaligus mendukung pemerataan distribusi panas secara lebih efektif di dalam ruang sterilisasi.

3.2. Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran

Variasi kecepatan aliran fluida sangat menentukan efisiensi perpindahan panas (aspek termal). Secara umum, jika kecepatan aliran ditingkatkan, laju perpindahan panas konveksi juga akan meningkat karena koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan kecepatan fluida. Distribusi kecepatan aliran fluida di dalam ruang *retort* menunjukkan pola sebaran yang relatif stabil, meskipun masih terdapat perbedaan kecepatan pada beberapa area tertentu. Berdasarkan kontur *velocity*, nilai kecepatan aliran berada pada kisaran sekitar 0 hingga 0,134 m/s dan Area berwarna hijau dan kuning menunjukkan kecepatan menengah

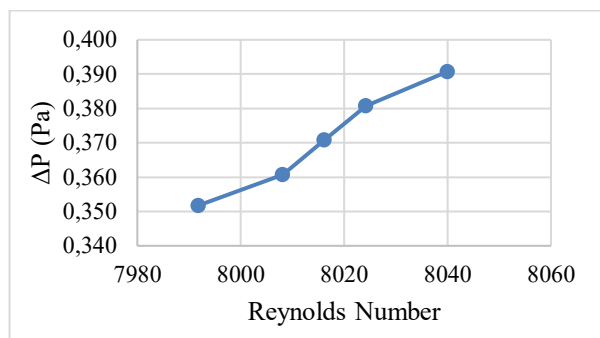
(sekitar 0,06 - 0,10 m/s), yang mendominasi bagian tengah atas penampang. Area tersebut menunjukkan zona dengan kecepatan lebih rendah, kemungkinan akibat perubahan arah aliran atau terbentuknya daerah resirkulasi. Sementara itu, kecepatan yang lebih tinggi terlihat pada bagian tepi, terutama di sisi kanan atas dan bagian bawah ruang *retort*. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun pola aliran secara umum cukup stabil, masih terdapat ketidakseragaman lokal yang dapat memengaruhi pemerataan perpindahan panas selama proses sterilisasi termal.



Gambar 6. Kontur Distribusi *Velocity* Mesin *Retort* pada Variasi Temperatur Operasi 123°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

Pada Gambar 6, hasil simulasi numerik memperlihatkan bahwa variasi kecepatan aliran berpengaruh terhadap pola sirkulasi fluida panas di dalam ruang *retort*. Peningkatan kecepatan aliran dapat mendukung proses perpindahan panas yang lebih cepat menuju produk maupun rak di dalam ruang sterilisasi. Akan tetapi, distribusi kecepatan yang belum sepenuhnya seragam masih memungkinkan terbentuknya zona dengan aliran rendah atau *dead zone*, terutama pada bagian tengah ruang *retort* yang menunjukkan kecepatan aliran lebih rendah. Oleh karena itu, pemerataan distribusi kecepatan aliran menjadi aspek penting untuk menunjang penyebaran panas yang lebih optimal selama proses sterilisasi termal di dalam mesin *retort*. Ketidakseragaman aliran tidak bersifat simetris sempurna atau parabolik (seperti aliran laminar standar). Terdapat pola "dua lobus" atau bentuk menyerupai huruf 'U' terbalik yang asimetris. Zona kecepatan rendah di bagian dasar dan pinggiran pipa (warna biru), kecepatan mendekati nol. Hal ini sesuai dengan *no-slip condition* di mana fluida yang bersentuhan dengan dinding diam. Zona kecepatan tinggi terkonsentrasi di area atas-tengah, menunjukkan adanya gaya dorong atau pengaruh geometri

yang menyebabkan aliran lebih cepat di sisi tersebut. Akibatnya, perbedaan tekanan (ΔP) menjadi pertimbangan dalam bahasan ini. Hasil menunjukkan bahwa studi numerik menghasilkan variasi tekanan yang relatif kecil pada temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C. Nilai bilangan Reynolds berada pada rentang sekitar 7991 hingga 8040, sementara nilai perbedaan tekanan (ΔP) cenderung konstan di sekitar 0,352 Pa



Gambar 7. Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dan Perbedaan Tekanan

Pada Gambar 7, grafik tersebut memperlihatkan kecenderungan peningkatan perbedaan tekanan seiring bertambahnya nilai bilangan Reynolds. Namun, peningkatan yang terjadi relatif kecil sehingga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kenaikan temperatur *inlet* berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida di dalam ruang *retort* melalui perubahan sifat termofisik fluida, terutama densitas dan viskositas, yang turut memengaruhi nilai bilangan Reynolds. Meskipun demikian, pengaruh variasi temperatur *inlet* terhadap perbedaan tekanan masih tergolong rendah. Pengaruh pola aliran uap terhadap distribusi panas di dalam tabung *retort* juga dapat ditinjau melalui perubahan nilai tekanan. Pada kecepatan aliran 2 m/s, nilai *pressure drop* relatif rendah, yaitu berkisar antara 0,352–0,391 Pa seperti yang dijelaskan oleh Gambar 7. Sementara itu, pada kecepatan 10 m/s, nilai *pressure drop* meningkat hingga sekitar 4,272–4,309 Pa. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan aliran, semakin tinggi perbedaan tekanan antara sisi *inlet* dan *outlet*. Perbedaan tekanan yang meningkat mengindikasikan adanya kenaikan energi kinetik aliran serta interaksi yang lebih kuat antara

fluida dan dinding tabung. Dalam kaitannya dengan distribusi panas, kondisi ini dapat mendukung penyebaran uap panas ke area yang lebih luas. Namun, peningkatan tekanan dan kecepatan aliran juga berpotensi menimbulkan ketidakteraturan aliran pada bagian tertentu di dalam ruang *retort*.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Hasil studi numerik menunjukkan bahwa temperatur operasi sebesar 123°C pada kecepatan 2 m/s menunjukkan hasil yang lebih baik ditinjau dari nilai temperatur permukaan rata-rata sebesar 189,55°C disertai dengan kenaikan nilai koefisien perpindahan panas lokal sebesar 12%. Hasil ini dapat menjadi dasar optimasi operasi temperatur dan kecepatan uap pada mesin *retort* agar distribusi panas berlangsung lebih merata, stabil, dan efektif dalam mendukung sterilisasi produk pangan dan berpotensi dapat diterapkan secara praktis di lapangan.

4.2. Saran

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi temperatur operasi 123°C dan kecepatan aliran uap 10 m/s memberikan kinerja termal terbaik. Oleh karena itu, kondisi tersebut dapat dijadikan acuan awal dalam pengoperasian mesin *retort* untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, keseragaman distribusi temperatur, serta efektivitas proses sterilisasi, dengan tetap mempertimbangkan karakteristik produk, ukuran kemasan, dan standar keamanan pangan yang berlaku. Secara praktis, pengaturan ulang parameter operasi seperti temperatur *inlet* dan kecepatan aliran uap perlu dilakukan guna meminimalkan terbentuknya zona dingin (*cold spot*) yang berpotensi menurunkan mutu sterilisasi. Selain itu, aspek desain seperti konfigurasi saluran masuk-keluar serta tata letak rak produk perlu dievaluasi karena berpengaruh terhadap pola distribusi aliran dan pemerataan panas di dalam ruang *retort*. Dari sisi konseptual, temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan model optimasi perpindahan panas berbasis hubungan antara temperatur, kecepatan aliran, bilangan Reynolds, tekanan, dan koefisien perpindahan panas untuk mendukung perancangan sistem yang lebih efisien. Untuk

penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan simulasi kondisi transien agar dinamika proses pemanasan hingga pendinginan dapat diamati secara lebih komprehensif. Kajian juga perlu diperluas dengan mempertimbangkan variasi jenis produk, bentuk kemasan, konfigurasi rak, serta validasi eksperimental pada kondisi operasi optimal guna memastikan kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi aktual di lapangan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Alexandersson, M., & Ristinmaa, M. (2021). Coupled heat, mass and momentum transport in swelling cellulose based materials with application to retorting of paperboard packages. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 848–883. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.11.041>
- Alonso, A. A., Pitarch, J. L., Antelo, L. T., & Vilas, C. (2021). Event-based dynamic optimization for food thermal processing: High-quality food production under raw material variability. *Food and Bioprocess Technology*, 127, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.02.013>
- Ates, M. B., Skipnes, D., Rode, T. M., & Lekang, O. I. (2016). Comparison of spore inactivation with novel agitating retort, static retort and combined high pressure-temperature treatments. *Food Control*, 60, 484–492. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.033>
- Giraldo Gil, A., Ochoa González, O. A., Cardona Sepúlveda, L. F., & Alvarado Torres, P. N. (2020). Venting stage experimental study of food sterilization process in a vertical retort using temperature distribution tests and energy balances. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22(August). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100736>
- Hashemian Nik, E., Pletzer, S., & Hochenauer, C. (2023). Numerically efficient two-step CFD simulation model of flow regime and heat transfer for hot water shower sterilizers. *Applied Thermal Engineering*, 230(PA), 120649. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120649>
- Jimenez, P. S., Bangar, S. P., Suffern, M., & Whiteside, W. S. (2024). Understanding retort processing: A review. *Food Science and Nutrition*, 12(3), 1545–1563. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3912>
- Jung, H., Lee, Y. J., & 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). <https://doi.org/10.3390/pr11010035>
- Nofrizal Fajar Satria Pratama, & Saputro, D. D. (2024). Design and Validation of Horizontal Steam Retort with Capacity of 100 kg Presto milkfish Using Finite Element Method (FEM). *Jurnal Inovasi Mesin*, 6(2), 18–24. <https://doi.org/10.15294/jim.v6i2.12160>
- Numuang, C. (2022). ISSN: 2286-8615 VOLUME 10 EDISI 1. 10(April).
- Paz-Paredes, I., Jiménez, F., Muñoz, J. A. D., Trejo, F., & Ancheyta, J. (2025). Computational Fluid Dynamics for Modeling of Hydrotreating Fixed-Bed Reactors: A Review. *Processes*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/pr13030894>
- Pletzer, S., Miranda, M., Lucchesi, M., Magno, M., & Hochenauer, C. (2023). Numerical modelling of the evaporative cooling effect on solid walls in steam sterilisers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 214, 124396. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124396>
- Raits, E., Pinte, L., Kirse-ozolina, A., & Muizniece-brasava, S. (2021). Studi Kasus: Distribusi Suhu dan Penetrasi Panas dalam Uap-Udara. 46(341). <https://doi.org/10.2478/plus-2021-0020>
- Raits, E., Pinte, L., Kirse-Ozolina, A., & Muizniece-Brasava, S. (2021). A Case-study: Temperature Distribution and Heat Penetration in Steam-air Retort, Using Glass Jars and Retort Pouches. *Rural Sustainability Research*, 46(341), 90–96. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0020>
- Simpson, R., Jiménez, D., Almonacid, S., Nuñez, H., Pinto, M., Ramírez, C., Vega-Castro, O., Fuentes, L., & Angulo, A. (2020). Assessment and outlook of variable retort temperature profiles for the thermal processing of packaged foods: Plant

- productivity, product quality, and energy consumption. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 275). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109839>
- Su, S., Han, Y., Ahn, S., & Hee, S. (2023). Heat penetration and quality analysis of retort processed vegetables for home meal replacement foods. *Food Science and Biotechnology*, 32(8), 1057–1065. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01247-8>
- Szpicer, A., Bińkowska, W., Stelmasiak, A., Zalewska, M., Wojtasik-Kalinowska, I., Piwowarski, K., Piepiórka-Stepuk, J., & Półtorak, A. (2025). Computational Fluid Dynamics Simulation of Thermal Processes in Food Technology and Their Applications in the Food Industry. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(1), 1–33. <https://doi.org/10.3390/app15010424>
- Wang, W., Wu, J., Zheng, J., Wu, Z., Huang, J., Lu, Y., Peng, X., & Huang, L. (2023). Simulation and optimization of the thermal sterilization process of puree cans using the production of chestnut puree as an example. *Frontiers in Microbiology*, 14(April), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1135700>
- Yang, X., Li, Y., Wang, P., Luan, D., Sun, J., Huang, M., Wang, B., & Zheng, Y. (2022). Quality changes of duck meat during thermal sterilization processing caused by microwave, stepwise retort, and general retort heating. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1016942>
- Zhu, J., Frerich, T., & 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), 2469–2487. <https://doi.org/10.1177/0021998320979043>