

Investigasi Numerik Efek Temperatur Operasi dan Kecepatan Aliran Uap terhadap Performa Termal Mesin *Retort* Makanan

Amrijal Anshori¹, Hisyam Ma'mun², Muhamad Safi'i³

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

Email Penulis Korespondensi: hisyam@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Cfd Pangan Panas Retort Sterilisasi	Proses sterilisasi pangan menggunakan mesin <i>retort</i> berperan penting dalam menjaga keamanan dan memperpanjang masa simpan produk, namun ketidakseragaman distribusi panas dan pengaruh parameter operasi menjadi aspek yang perlu dikaji guna untuk menemukan standar operasi yang ideal. Investigasi numerik efek temperatur operasi dan kecepatan aliran uap terhadap performa termal serta hidrodinamika mesin <i>retort</i> makanan menggunakan metode <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) di usulkan dalam riset ini. Variasi temperatur ditentukan sebesar 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C serta kecepatan aliran uap 2–10 m/s yang dilakukan dalam keadaan <i>steady</i> dengan mengusulkan <i>k-ε Realizable</i> sebagai model <i>viscous</i> . Hasilnya, peningkatan temperatur operasi menyebabkan kenaikan temperatur permukaan, <i>pressure drop</i> , dan koefisien perpindahan panas. Nilai koefisien perpindahan panas meningkat dari 5,88–5,99 W/m ² .°C pada 115°C menjadi 6,67–6,74 W/m ² .°C pada 123°C. Dengan demikian, hasil investigasi numerik ini dapat digunakan sebagai pertimbangan awal dalam mengevaluasi desain dan kondisi operasi mesin <i>retort</i> , khususnya yang berkaitan dengan perpindahan panas dan distribusi temperatur. Namun, penerapannya untuk menilai efektivitas sterilisasi pangan masih memerlukan pengujian lanjutan yang mencakup temperatur produk, nilai sterilitas <i>F₀</i> , waktu proses, dan tingkat inaktivasi mikroorganisme.
	Abstract
Keywords: Cfd Food Sterilization Thermal Thermal	The food sterilization process using a retort machine plays an important role in maintaining product safety and extending shelf life, but the non-uniformity of heat distribution and the influence of operating parameters are aspects that need to be studied in order to find the ideal operating standards. Numerical investigation of the effects of operating temperature and steam flow velocity on the thermal and hydrodynamic performance of a food retort machine using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method is proposed in this research. Temperature variations are determined at 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, and 123°C and steam flow velocity of 2–10 m/s which are carried out in a steady state by proposing <i>k-ε Realizable</i> as a viscous model. The results show that increasing operating temperature causes an increase in surface temperature, pressure drop, and heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient value increased from 5.88–5.99 W/m ² .°C at 115°C to 6.67–6.74 W/m ² .°C at 123°C. Thus, the results of this numerical investigation can be used as an initial consideration in evaluating the design and operating conditions of the retort machine, especially those related to heat transfer and temperature distribution. However, its application to assess the effectiveness of food sterilization still requires further testing that includes product temperature, <i>F₀</i> sterility value, process time, and the level of microorganism inactivation.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Proses *retort* merupakan teknik pengolahan termal yang banyak diterapkan dalam industri pangan untuk menghasilkan produk yang aman dikonsumsi, mencapai kondisi steril komersial, serta memiliki masa simpan yang lebih lama [1]. Prinsip kerja teknologi ini didasarkan pada penggunaan suhu tinggi yang dikombinasikan dengan tekanan tertentu untuk menginaktivasi mikroorganisme patogen maupun mikroorganisme penyebab kerusakan, khususnya pada produk pangan siap saji dan makanan dalam kemasan [2]. Teknologi *retort* banyak diterapkan dalam pengolahan makanan

kaleng, produk dalam kantong *retort*, makanan siap santap, dan berbagai produk pangan steril komersial. Penerapan teknologi ini bertujuan untuk membunuh bakteri berbahaya dan spora yang berpotensi menimbulkan risiko kesehatan bagi konsumen [3]. Permasalahan utama pada proses *retort* adalah ketidakmerataan distribusi temperatur di dalam ruang *retort* maupun pada produk. Kondisi ini dapat menyebabkan *under-processing* ketika pemanasan tidak mencapai standar sterilisasi, serta *over-processing* yang berpotensi menurunkan mutu produk akibat pemanasan berlebih [4]. Keberhasilan proses sterilisasi tidak semata-mata ditentukan oleh tingginya temperatur yang diterapkan, tetapi juga oleh tingkat keseragaman distribusi temperatur di dalam ruang *retort* [1]. Kinerja termal mesin *retort* sangat ditentukan oleh proses perpindahan panas yang berlangsung di dalam sistem, meliputi mekanisme konduksi, konveksi, serta interaksi antara fluida pemanas dengan permukaan produk atau bahan kemasan [5].

Kajian numerik diperlukan karena pengukuran langsung pada sistem termal yang melibatkan aliran fluida dan perpindahan panas sering menghadapi keterbatasan akses pengukuran, waktu, serta biaya pengujian [21]. Melalui pemodelan komputasi, distribusi temperatur, tekanan, dan kecepatan aliran dapat dianalisis pada seluruh domain, sehingga pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja termal sistem dapat dievaluasi secara lebih terperinci dan sistematis. Meskipun demikian, hasil simulasi tetap perlu dibandingkan dengan data eksperimen untuk memastikan bahwa model numerik mampu merepresentasikan kondisi fisik yang dianalisis [6]. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menganalisis fenomena tersebut ialah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dalam industri pangan, CFD digunakan untuk memprediksi medan kecepatan, tekanan, dan temperatur pada berbagai peralatan proses sehingga pengaruh perubahan geometri maupun kondisi operasi dapat dievaluasi sebelum pengujian eksperimental dilakukan. Metode ini digunakan untuk memprediksi distribusi aliran fluida, kecepatan, dan temperatur sehingga performa sistem dapat dianalisis secara lebih mendalam [7]. Hasil simulasi CFD sangat dipengaruhi oleh kualitas *mesh* atau *grid* yang digunakan. *Grid* yang terlalu sedikit menurunkan akurasi hasil, sedangkan *grid* yang terlalu banyak meningkatkan biaya komputasi dan kebutuhan sumber daya. Oleh karena itu, uji independensi *grid* diperlukan untuk memastikan hasil simulasi stabil dan tidak berubah secara signifikan terhadap peningkatan jumlah *grid* [8],[9].

Pada geometri mesin *retort* yang kompleks, resolusi *grid* menentukan kemampuan model numerik dalam menangkap gradien temperatur, perkembangan lapisan batas, serta perubahan pola aliran di sekitar komponen internal. Penggunaan *grid* yang terlalu kasar dapat mengaburkan perubahan lokal dan menurunkan ketelitian prediksi temperatur maupun koefisien perpindahan panas, sedangkan jumlah elemen yang terlalu besar meningkatkan beban komputasi tanpa selalu menghasilkan perubahan solusi yang berarti [22]. Uji independensi *grid* diperlukan untuk menentukan jumlah elemen yang menghasilkan solusi stabil sekaligus efisien secara komputasi. Oleh karena itu, analisis *grid* tidak hanya bersifat teknis dalam CFD, tetapi juga menjadi faktor penting dalam menyeimbangkan akurasi hasil dan efisiensi komputasi [9],[10]. Selain jumlah *grid*, temperatur operasi juga merupakan parameter penting dalam proses *retort* karena memengaruhi laju penetrasi panas dan kualitas produk pangan. Peningkatan temperatur dapat mempercepat sterilisasi, namun pemilihan yang tidak tepat dapat menyebabkan *overprocessing* serta ketidakseragaman distribusi panas. Oleh karena itu, pengaruh temperatur operasi perlu dianalisis secara numerik untuk mengevaluasi distribusi panas di dalam tabung *retort* [11]. Dalam beberapa tahun terakhir, metode simulasi numerik semakin luas diterapkan sebagai pendekatan untuk mengkaji fenomena perpindahan panas dan aliran fluida pada sistem sterilisasi [12]. Penelitian ini didasarkan pada kebutuhan industri pangan akan metode sterilisasi yang tidak hanya mampu menjamin keamanan mikrobiologis, tetapi juga memiliki efisiensi energi yang baik serta dapat mempertahankan mutu produk pangan [6]. Kajian numerik memiliki peran penting karena dapat meminimalkan ketergantungan terhadap pengujian eksperimen yang umumnya memerlukan biaya tinggi, waktu yang panjang, serta penggunaan bahan dalam jumlah besar. Selain itu, simulasi termal yang akurat dapat mendukung pengembangan sistem sterilisasi pangan yang lebih modern, efisien, dan berkelanjutan [13],[6].

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi numerik tiga dimensi menggunakan model SCRP. Variasi waktu pemanasan selama 15 dan 25 menit diterapkan untuk mengevaluasi efektivitas proses sterilisasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi profil suhu *retort* variabel atau *variable retort temperature* (VRT) pada suhu 95°C selama 25 menit, kemudian dilanjutkan pada suhu 121°C selama 15 menit, menghasilkan nilai F sebesar 6,58. Skenario tersebut juga mampu menurunkan nilai pemasakan pada permukaan (*Cs*) sebesar 42,95% dan nilai pemasakan rata-rata volume (*Cavg*) sebesar 42,05%, serta mengurangi waktu sterilisasi hingga 26,07% [14]. Penelitian ini menganalisis efektivitas penerapan profil suhu *retort* variabel (*Variable Retort Temperature*/VRT) dalam proses sterilisasi termal pangan. Simulasi menunjukkan bahwa skema pemanasan pada 95°C selama 25 menit yang dilanjutkan pada 121°C selama 15 menit menghasilkan nilai sterilitas (F) sebesar 6,58. Kondisi tersebut juga mampu menurunkan nilai pemasakan permukaan (*surface cook value*, *Cs*) dan nilai pemasakan rata-rata (*average cook value*, *Cavg*) lebih dari 42%, serta mengurangi waktu sterilisasi hingga 26,07%. Hasil ini mengindikasikan bahwa penerapan VRT dapat meningkatkan efisiensi proses sterilisasi termal. Selain itu, evaluasi terhadap variasi waktu pemanasan 20, 40, 60, 80, dan 100 menit menunjukkan bahwa durasi 80 dan 100 menit memberikan kinerja termal yang lebih optimal. Hal tersebut ditandai dengan peningkatan temperatur permukaan rata-rata produk dalam kemasan karton yang mencapai 40°C pada 80 menit dan 44°C pada 100 menit [15]. Penelitian ini mengkaji optimalisasi teknologi pengawetan pangan untuk mempertahankan mutu,

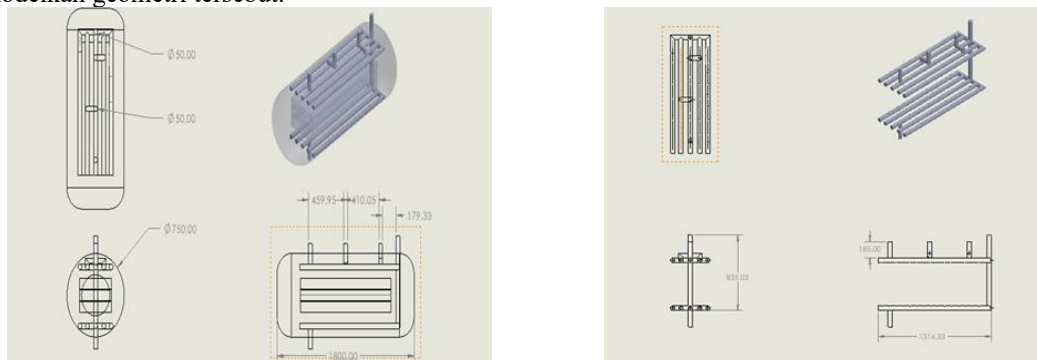
nilai gizi, meningkatkan efisiensi energi, serta mendukung keberlanjutan lingkungan. Fokus studi adalah inaktivasi spora *Bacillus subtilis* pada sup model pH 6,1 menggunakan *retort* berpengaduk, *retort* statis, serta kombinasi *high-pressure processing* (HPP) dan suhu. Hasil menunjukkan nilai D pada 95°C sebesar 4,67 menit dengan nilai z 8,65°C. Kinetika inaktivasi sesuai model *log-linear* dengan R^2_{adj} 0,94–0,97. Pengadukan intensif meningkatkan keseragaman distribusi panas, sedangkan kombinasi HPP 650 MPa pada 55–65°C selama 10 menit memberikan efek sinergis yang menurunkan spora hingga 4,5 log [16].

Proses termodinamika pada mesin *retort* berlangsung melalui fase pemanasan untuk mencapai keseragaman temperatur $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Waktu yang dibutuhkan adalah 28 menit pada kemasan stoples kaca dan 24 menit pada kantong *retort*. Pada fase penahanan, waktu untuk mencapai nilai sterilisasi F0 sebesar 3 menit adalah 67 menit (stoples kaca) dan 62 menit (kantong *retort*). Secara keseluruhan, terdapat selisih waktu sterilisasi sebesar 9 menit antara kedua jenis kemasan yang dianalisis [17]. Penelitian terdahulu mengenai sistem *retort* umumnya berfokus pada distribusi temperatur, penetrasi panas, waktu proses, jenis kemasan, dan pencapaian nilai sterilitas [18],[17]. Di sisi lain, penelitian mengenai independensi *grid* menunjukkan bahwa jumlah dan kualitas elemen memengaruhi stabilitas serta ketelitian prediksi perpindahan panas dalam simulasi CFD [19],[8]. Berdasarkan perbandingan tersebut, masih diperlukan kajian yang mengevaluasi stabilitas solusi numerik melalui uji independensi *grid* sekaligus menganalisis respons temperatur, perbedaan tekanan, dan perpindahan panas terhadap variasi temperatur *inlet* serta kecepatan aliran uap pada satu konfigurasi mesin *retort* [20],[19]. Penelitian ini bertujuan menginvestigasi efek temperatur operasi dan kecepatan aliran fluida uap dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Variasi temperatur ditentukan sebesar 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C serta kecepatan aliran uap 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s yang dilakukan dalam keadaan *steady* dengan mengusulkan *k-ε Realizable* sebagai model *viscous*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam menentukan aturan tepat agar simulasi menghasilkan data yang akurat, stabil, dan efisien secara komputasi serta dalam aspek lapangan respons termal dan hidrodinamika mesin *retort* terhadap perubahan temperatur *inlet* dan kecepatan aliran uap juga menjadi perhatian utama. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mendukung perancangan dan optimasi mesin *retort* makanan yang lebih efisien, hemat energi, aman secara mikrobiologis, serta tetap mampu menjaga mutu produk pangan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Model Fisik

Desain mesin *retort* dalam penelitian ini dikembangkan berdasarkan studi sebelumnya dengan mempertimbangkan konfigurasi rak produk dan posisi saluran keluaran uap sebagai dasar pembentukan geometri untuk mendukung distribusi panas yang optimal. Geometri dan dimensi mesin ditunjukkan pada Gambar 1, *Software* Gambar *Solidworks* diterapkan guna memodelkan geometri tersebut.



Gambar 1. Desain Mesin *Retort*

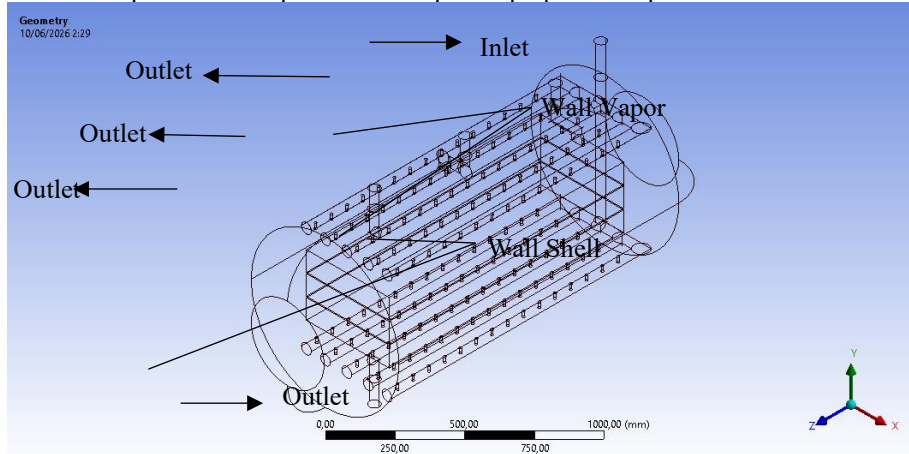
2.2. Material

Stainless steel dipilih sebagai material utama karena memiliki karakteristik termofisika yang mendukung proses perpindahan panas. Material ini memiliki densitas (ρ) sebesar 7900 kg/m³, kapasitas panas jenis (C_p) 500 J/kg.°C, serta konduktivitas termal (k) 15,1 W/m.K. Kombinasi sifat tersebut menjadikan *stainless steel* sesuai digunakan pada sistem yang melibatkan fenomena perpindahan panas.

2.3. Domain Komputasi

Domain komputasi pada penelitian ini mencakup ruang fluida di dalam tabung *retort* dengan dimensi 1800 mm × 750 mm × 950 mm. Simulasi menerapkan kondisi batas berupa *inlet*, *outlet*, *wall vapor*, dan *wall shell* (Gambar 2) untuk

merepresentasikan aliran uap jenuh di dalam ruang *retort*. Model turbulensi *realizable k-ε* dipilih karena mampu memberikan prediksi yang baik terhadap karakteristik aliran turbulen pada geometri silinder tertutup, sehingga sesuai untuk analisis distribusi kecepatan dan temperatur dalam proses perpindahan panas.



Gambar 2. Domain Komputasi dan Penentuan Kondisi Batas.

a. Persamaan kontinuitas, momentum dan energi saat studi numerik:

Persamaan kontinuitas:

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

Dimana T adalah temperatur rata-rata permukaan *retort* dekat rak.

1) Persamaan momentum:

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

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

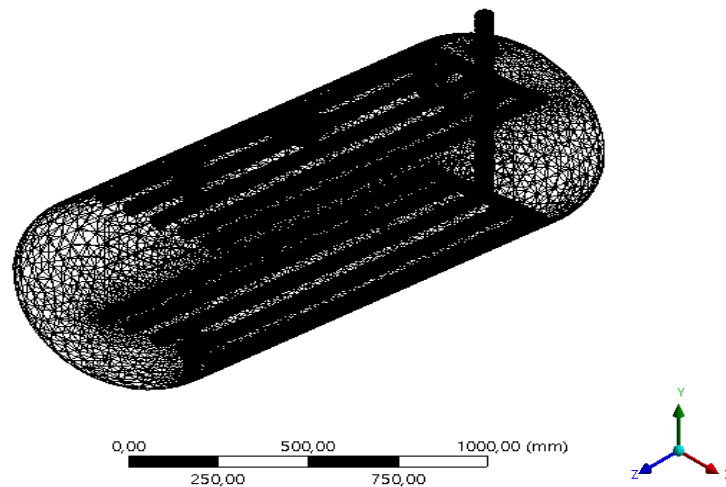
$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} + \frac{\partial uw^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(\rho - \rho_\infty)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

2) 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

Pembuatan *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan jenis topologi otomatis berbentuk tetrahedral serta ukuran *sizing cell* sebesar 250 mm, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Tahap *meshing* bertujuan untuk membagi domain simulasi menjadi elemen-elemen kecil sehingga proses perhitungan numerik dapat dilakukan dengan lebih akurat dan mampu merepresentasikan perubahan aliran serta perpindahan panas pada area *inlet*, *outlet*, dinding, dan rak produk secara lebih baik. *Mesh* optimum ditentukan berdasarkan hasil uji *grid* serta kualitas *mesh* yang dievaluasi melalui nilai *skewness* dan *orthogonal quality*. Selanjutnya, analisis numerik dilakukan untuk mengamati distribusi temperatur dan pola aliran fluida pada mesin *retort*. Pemodelan perpindahan panas dalam simulasi ini menggunakan skema *first-order upwind* untuk memperoleh hasil perhitungan yang stabil dan representatif.

Gambar 3. Struktur *Mesh* Tetrahedral.

2.5. Set Up Simulasi

Pengaturan simulasi dilakukan dengan mengacu pada hasil eksperimen yang telah dilaksanakan sebelumnya. Fluida kerja yang digunakan berupa uap jenuh bersuhu 121°C , yang dialirkan melalui saluran pipa *inlet* dan kemudian menyebar ke seluruh permukaan pipa tube pada mesin retort dengan kecepatan konstan sebesar 2 m/s. Uap jenuh tersebut berfungsi sebagai media pembawa panas dalam sistem, dengan sifat termofisik meliputi densitas (ρ) sebesar $0,0000122 \text{ kg/m}^3$, panas spesifik (C_p) sebesar $2071 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, dan konduktivitas termal (k) sebesar $18,0087 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Pada tahap Design Modeler, domain komputasi dibentuk pada setiap komponen mesin *retort* yang menjadi objek analisis. Setelah domain tersebut selesai dibuat, proses dilanjutkan ke tahap *meshing* dengan menentukan ukuran elemen atau *element size* agar diperoleh jumlah *grid* yang sesuai dengan kebutuhan simulasi. Tahap selanjutnya dilakukan pada menu *setup*, dimulai dengan mengaktifkan persamaan energi atau *energy equation* pada bagian *model*. Model viskos yang digunakan adalah model turbulensi *k-epsilon* karena dinilai sesuai untuk menganalisis karakteristik aliran fluida turbulen di dalam ruang *retort*. Pada bagian *material*, *water vapor* ditambahkan sebagai fluida kerja dalam simulasi. Selanjutnya, pada *cell zone condition*, zona fluida ditetapkan sebagai *vapor* dengan material *water vapor*. Pengaturan kemudian dilanjutkan pada *boundary condition* untuk menentukan parameter kecepatan aliran dan kondisi termal sesuai variasi pengujian yang telah dirancang. Pada bagian *reference values*, nilai acuan dihitung menggunakan opsi *compute from inlet*, sehingga parameter referensi yang digunakan berasal dari kondisi aliran pada sisi masuk. Pada bagian *methods*, skema penyelesaian yang diterapkan adalah PISO, sedangkan diskretisasi untuk parameter *pressure* hingga *energy* menggunakan metode *first-order upwind*. Setelah pengaturan metode numerik selesai, *report definition* dibuat dalam bentuk *surface report* dengan metode *area-weighted average*. *Report* yang disusun meliputi *pressure average* dan *temperature average* dengan pemilihan permukaan pada bagian *wall vapor*. Tahap berikutnya adalah *initialization* menggunakan *standard initialization* dengan opsi *compute from inlet*. Setelah seluruh parameter simulasi ditetapkan, proses perhitungan dijalankan melalui menu *run calculation* dengan jumlah iterasi sebanyak 1000. Simulasi dilakukan hingga nilai residual mencapai kondisi konvergen, sehingga hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis pada tahap berikutnya.

2.6. Measurement Method

Analisis data pada penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan aliran dan temperatur *inlet* terhadap distribusi temperatur permukaan yang diperoleh dari hasil simulasi numerik. Variasi kecepatan aliran yang diterapkan meliputi 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s, sedangkan temperatur inlet divariasikan pada 115, 117, 119, 121, dan 123°C . Pengambilan data temperatur dan tekanan dilakukan melalui menu *Results* pada CFD *Fluent* dengan memanfaatkan fitur *Location* untuk membentuk bidang potong (*plane*). *Plane 1* dibuat menggunakan metode *YZ Plane*, *Plane 2* menggunakan *ZX Plane* pada koordinat $Y = -0,15 \text{ m}$, *Plane 3* menggunakan *XY Plane*, dan *Plane 4* menggunakan *ZX Plane* pada koordinat $Y = 0,26 \text{ m}$. Selanjutnya, hasil simulasi divisualisasikan menggunakan fitur *Insert Contour*, yaitu *Contour 1* untuk menampilkan distribusi temperatur pada *Plane 1*, *Contour 2* untuk distribusi tekanan pada *Plane 2*, dan *Contour 3* untuk distribusi kecepatan pada *Plane 3*. Seluruh kontur diatur menggunakan *Range Local* dengan 100 level kontur agar pola distribusi hasil simulasi dapat diamati secara lebih jelas. Data numerik diperoleh melalui menu *Calculators* menggunakan *Function Calculator*, dengan temperatur rata-rata dihitung menggunakan fungsi *areaAve* pada *Plane 1* dengan variabel *Temperature*. Tekanan masuk ditentukan menggunakan fungsi *areaAve* pada lokasi *Inlet* dengan variabel

Pressure, sedangkan tekanan keluar dihitung menggunakan fungsi yang sama pada *Plane 4*. Seluruh data tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengkaji hubungan antara variasi kecepatan aliran, temperatur *inlet*, tekanan, dan 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 bilangan Reynolds didefinisikan atas Persamaan 6:

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

Area permukaan *retort* dihitung dengan Persamaan 7:

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

Koefisien perpindahan panas dapat dihitung menggunakan Persamaan 9:

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

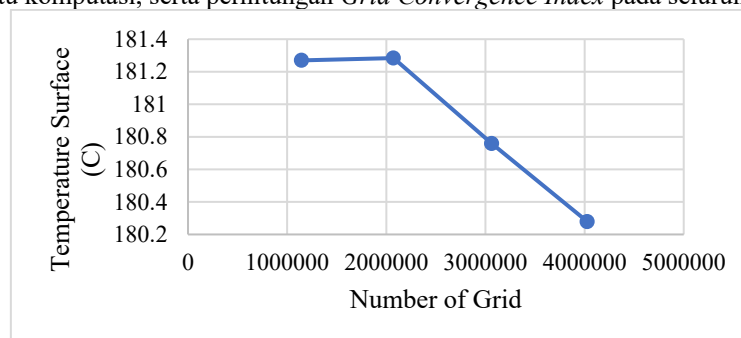
Tahanan termal dan Bilangan Nusselt didefinisikan untuk membandingkan nilai antara perpindahan panas konveksi dan konduksi yang dapat dihitung dengan Persamaan 10 dan 11:

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

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

2.8. Uji Grid Independent

Uji independensi *grid* merupakan tahap penting dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah elemen *mesh* yang digunakan. Pada penelitian ini, uji *grid* dilakukan dengan empat variasi jumlah elemen, yaitu 1.145.681, 2.073.340, 3.012.679, dan 4.027.933 elemen. Seluruh variasi *grid* diuji pada kondisi operasi yang sama, yaitu kecepatan aliran 2 m/s dan temperatur *inlet* 121°C, sehingga perbedaan hasil simulasi hanya disebabkan oleh variasi jumlah *grid*. Parameter pembanding yang digunakan adalah temperatur permukaan, karena parameter ini merepresentasikan distribusi panas pada permukaan domain yang dianalisis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *grid* dengan jumlah 3.012.679 elemen menghasilkan temperatur permukaan sebesar 180,759°C, sedangkan *grid* dengan jumlah 4.027.933 elemen menghasilkan temperatur permukaan sebesar 180,279°C. Peningkatan jumlah elemen dari 3.012.679 menjadi 4.027.933 mengubah temperatur permukaan dari 180,759°C menjadi 180,279°C. Selisih absolut sebesar 0,480°C tersebut setara dengan perubahan relatif sekitar 0,266%. Pada saat yang sama, jumlah elemen meningkat sekitar 33,70%. Oleh karena itu, *mesh* sebanyak 3.012.679 elemen dipilih sebagai konfigurasi komputasi dengan mempertimbangkan perubahan hasil yang relatif kecil dibandingkan penambahan jumlah elemen. Pemilihan tersebut masih didasarkan pada parameter temperatur permukaan. Analisis independensi *grid* yang lebih komprehensif memerlukan perbandingan perbedaan tekanan, koefisien perpindahan panas, waktu komputasi, serta perhitungan *Grid Convergence Index* pada seluruh variasi *mesh*.

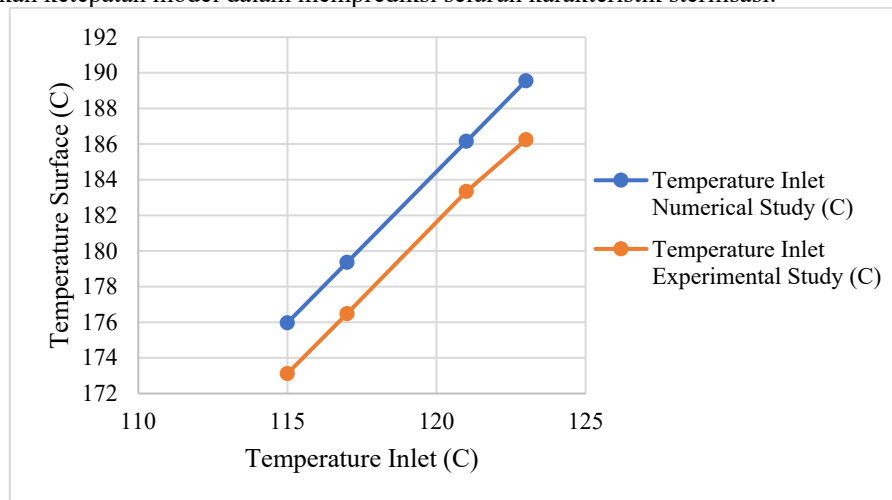


Gambar 4. Grafik Uji *Grid*.

2.9. Validasi

Validasi dilakukan untuk menilai tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan data eksperimen. Pada penelitian ini, proses validasi menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.012.679 elemen dengan kecepatan aliran 2 m/s.

Variasi temperatur *inlet* yang diterapkan meliputi 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Parameter pembanding yang digunakan adalah *surface temperature*, karena parameter ini dapat merepresentasikan kemampuan model numerik dalam memprediksi distribusi panas pada mesin *retort*. Perbandingan antara data eksperimen dan hasil simulasi numerik dilakukan melalui perhitungan persentase *error* untuk mengetahui besar penyimpangan hasil simulasi terhadap kondisi eksperimen. Semakin kecil nilai *error* yang diperoleh, semakin tinggi tingkat kesesuaian model numerik terhadap kondisi aktual. Berdasarkan empat variasi pengujian validasi, hasil eksperimen dan simulasi numerik menunjukkan nilai *error* yang relatif kecil meskipun temperatur operasi divariasikan. Berdasarkan data temperatur permukaan yang dilaporkan, penyimpangan relatif hasil numerik terhadap eksperimen masing-masing sekitar 1,65% pada 115°C, 1,63% pada 117°C, 1,53% pada 121°C, dan 1,78% pada 123°C. Penyimpangan terendah diperoleh pada temperatur *inlet* 121°C. Nilai penyimpangan tersebut menunjukkan bahwa hasil numerik mengikuti kecenderungan data eksperimen pada parameter yang dibandingkan. Namun, validasi ini terbatas pada temperatur permukaan dan koefisien perpindahan panas sehingga belum membuktikan ketepatan model dalam memprediksi seluruh karakteristik sterilisasi.



Gambar 5. Grafik Hasil Validasi.

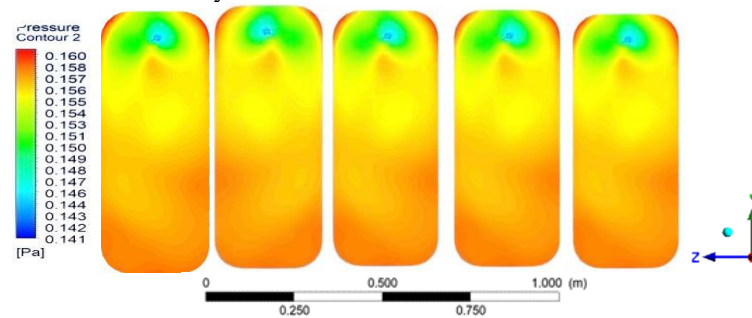
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Fluida Uap

Dalam studi numerik ini, analisis distribusi tekanan dan temperatur diperlukan untuk memastikan proses sterilisasi produk pangan berlangsung secara merata. Distribusi tekanan dianalisis untuk mengidentifikasi perubahan tekanan relatif antara bagian *inlet*, ruang utama, dan *outlet* akibat interaksi aliran uap dengan geometri internal mesin *retort*. Pada penggunaan jumlah *grid* yang lebih sedikit, kontur tekanan cenderung kurang merata, terutama pada area di sekitar *inlet* uap, akibat adanya pergerakan fluida serta hambatan dari susunan produk di dalam ruang *retort*. Tekanan tertinggi umumnya terjadi di sekitar pipa *inlet* uap atau pada area ketika aliran uap secara langsung mengenai produk maupun dinding *retort*. Sebaliknya, tekanan yang lebih rendah cenderung terbentuk pada area di belakang produk atau daerah *wake*, serta pada sudut-sudut ruang *retort* yang jauh dari arah aliran masuk. Kondisi tersebut berpotensi membentuk zona dingin apabila distribusi aliran dan panas tidak dikendalikan dengan baik. Peningkatan kecepatan *inlet* uap berpotensi memperbesar perbedaan tekanan di dalam ruang *retort*, sedangkan penggunaan kecepatan aliran uap yang konstan dapat membantu menjaga kestabilan pola aliran. Gambaran distribusi tekanan dan aliran tersebut disajikan pada Gambar 6.

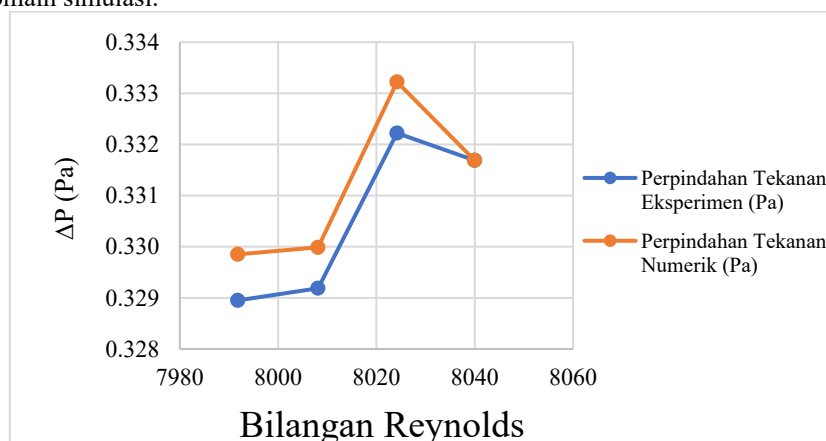
Berdasarkan Gambar 6, hasil simulasi menunjukkan distribusi tekanan pada mesin *retort* dengan variasi temperatur operasi 115°C hingga 123°C pada *grid* sebanyak 3.012.679 elemen yang memperlihatkan pola tidak seragam di seluruh domain aliran. Area berwarna hijau kebiruan menunjukkan tekanan relatif lebih tinggi, sedangkan area oranye menunjukkan tekanan lebih rendah, yang mengindikasikan terbentuknya gradien tekanan akibat interaksi fluida dengan geometri *retort*, termasuk perubahan arah aliran, hambatan, dan gesekan dinding. Kontur menunjukkan adanya perbedaan tekanan lokal di beberapa bagian domain. Akan tetapi, kontur tekanan saja belum cukup untuk memastikan terbentuknya zona stagnasi atau aliran tumbukan karena identifikasi mekanisme tersebut memerlukan dukungan *velocity vector*, *streamline*, atau parameter aliran lainnya. Secara kuantitatif, tekanan masuk meningkat dari 0,52 Pa menjadi 0,55 Pa seiring kenaikan temperatur, sementara tekanan keluar relatif stabil pada kisaran 0,159–0,168 Pa, sehingga menghasilkan peningkatan *pressure drop* dari 0,352 Pa menjadi 0,391 Pa yang menunjukkan bertambahnya resistansi aliran pada kondisi temperatur lebih tinggi. Perbedaan tekanan yang muncul pada beberapa bagian domain menunjukkan bahwa

konfigurasi internal mesin *retort* turut memengaruhi arah dan karakter aliran uap. Namun, keberadaan separasi aliran maupun pusaran belum dapat dipastikan karena penelitian ini belum menyajikan data pendukung berupa kontur vortisitas, vektor kecepatan, atau garis arus. Perbedaan tekanan yang diperoleh dalam simulasi ini digunakan untuk mengevaluasi karakteristik aliran, bukan untuk menilai kekuatan struktur. Evaluasi pembebanan dinding memerlukan tekanan operasi absolut dan analisis struktural yang berada di luar ruang lingkup penelitian. Secara keseluruhan, peningkatan temperatur operasi tidak hanya memengaruhi distribusi temperatur, tetapi juga meningkatkan *pressure drop* serta memperjelas ketidakseragaman distribusi tekanan di dalam sistem.



Gambar 6. Kontur Distribusi Tekanan Mesin *Retort* diberbagai Variasi Temperatur Operasi dengan Jumlah *Grid* sebesar 3.012.679.

Pada Gambar 7, hubungan antara Bilangan Reynolds dan selisih tekanan (ΔP) menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya nilai Reynolds, meskipun masih terdapat sedikit variasi pada beberapa titik pengamatan. Secara umum, pada rentang Bilangan Reynolds sekitar 7990 hingga 8040, nilai ΔP mengalami peningkatan dari sekitar 0,329 Pa hingga mencapai nilai maksimum sekitar 0,333 Pa, kemudian menunjukkan kecenderungan stabil pada kisaran 0,332 Pa. Peningkatan nilai ΔP tersebut mengindikasikan bahwa semakin besar Bilangan Reynolds, yang merepresentasikan meningkatnya laju aliran atau dominasi gaya inersia fluida, maka resistansi aliran di dalam sistem juga cenderung bertambah. Kondisi ini menunjukkan bahwa kebutuhan energi untuk mempertahankan aliran dalam sistem meningkat seiring dengan bertambahnya interaksi antara fluida dan permukaan saluran. Namun demikian, pada titik tertentu terlihat adanya kecenderungan bahwa nilai ΔP mulai mengalami stabilisasi, yang mengindikasikan bahwa setelah mencapai kondisi tertentu, sistem cenderung berada pada keadaan aliran yang lebih stabil meskipun Bilangan Reynolds terus meningkat. Fenomena ini menunjukkan bahwa aliran telah memasuki kondisi hidrodinamik yang relatif stabil, sehingga perubahan tekanan menjadi tidak terlalu signifikan. Secara keseluruhan, hasil grafik ini menunjukkan bahwa Bilangan Reynolds memiliki pengaruh terhadap perbedaan tekanan dalam sistem, di mana peningkatan Reynolds umumnya diikuti oleh kenaikan ΔP hingga mencapai kondisi yang mendekati stabil, yang mencerminkan karakteristik aliran fluida pada domain simulasi.



Gambar 7. Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dan Perbedaan Tekanan

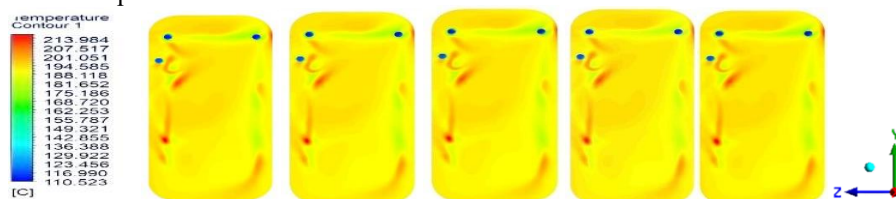
Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 7, pengujian dilakukan menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.012.679 elemen dengan variasi temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Hasil menunjukkan bahwa nilai perbedaan tekanan (ΔP) terendah terjadi pada temperatur 115°C sebesar 0,329 Pa, diikuti oleh kondisi 117°C dengan nilai yang sedikit meningkat, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada temperatur 121°C dan 123°C yang masing-masing mencapai

sekitar 0,332 Pa. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur operasi cenderung meningkatkan nilai ΔP , meskipun perubahan yang terjadi relatif kecil. Peningkatan ΔP tersebut disebabkan oleh kenaikan temperatur *inlet* yang meningkatkan energi termal fluida, sehingga pergerakan aliran di dalam ruang *retort* menjadi lebih dinamis dan memengaruhi pola distribusi aliran. Kondisi ini kemudian menyebabkan perbedaan tekanan antara daerah *inlet* dan *outlet*. Selanjutnya, perbandingan temperatur operasi antara data eksperimen dan hasil simulasi numerik juga menunjukkan kecenderungan yang konsisten, di mana peningkatan temperatur *inlet* menghasilkan kenaikan temperatur permukaan pada kedua metode. Pada temperatur 115°C, temperatur permukaan eksperimen sebesar 173,12°C dan numerik 175,97°C dengan selisih 2,85°C. Pada 117°C, nilai eksperimen menjadi 176,48°C dan numerik 179,36°C dengan selisih 2,88°C. Pada 121°C, temperatur permukaan eksperimen sebesar 183,34°C dan numerik 186,15°C dengan selisih 2,81°C, sedangkan pada 123°C masing-masing mencapai 186,24°C dan 189,55°C dengan selisih 3,31°C. Peningkatan temperatur *inlet* secara keseluruhan menunjukkan bahwa energi termal yang dibawa oleh uap jenuh semakin besar, sehingga proses perpindahan panas dari fluida menuju permukaan dalam ruang *retort* berlangsung lebih intensif dan efektif.

3.2 Pengaruh Variasi Temperatur

Studi numerik ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur operasi sebesar 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C serta variasi kecepatan aliran uap sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s terhadap performa termal dan hidrolis pada mesin *retort*, khususnya dalam evaluasi distribusi panas pada tabung *retort*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan distribusi temperatur di dalam ruang *retort* dapat dianalisis secara lebih objektif terhadap pengaruh kombinasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang diberikan. Secara umum, peningkatan temperatur operasi diikuti oleh kenaikan temperatur permukaan 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. Berdasarkan kecenderungan hasil simulasi, kenaikan temperatur *inlet* diikuti oleh peningkatan temperatur permukaan yang dihitung pada domain mesin *retort*. Kondisi ini menunjukkan adanya perubahan intensitas perpindahan panas antara uap dan permukaan akibat bertambahnya energi termal pada sisi masuk. Meskipun demikian, nilai temperatur permukaan yang melebihi temperatur *inlet* perlu diverifikasi kembali melalui pemeriksaan satuan, variabel temperatur, sifat termofisik fluida, dan kondisi batas simulasi sebelum dijadikan dasar interpretasi. Variasi kecepatan aliran juga memengaruhi momentum serta penyebaran uap di dalam ruang *retort*, sehingga berkontribusi terhadap perubahan pola distribusi temperatur. Pengaruh tersebut perlu dianalisis bersama distribusi kecepatan, bilangan Reynolds, bilangan Nusselt, dan koefisien perpindahan panas agar mekanisme termal yang terjadi dapat dijelaskan secara lebih tepat. Pada kecepatan aliran rendah, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, momentum uap yang masuk masih terbatas sehingga proses perpindahan dan penyebaran panas berlangsung relatif lambat. Kondisi ini berpotensi menimbulkan ketidakseragaman temperatur, khususnya antara area yang dekat dengan *inlet* dan bagian yang lebih jauh dari lintasan utama aliran uap. Sebaliknya, peningkatan kecepatan aliran menjadi 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s meningkatkan momentum uap sehingga distribusi panas berlangsung lebih efektif, lebih cepat, dan cenderung lebih merata di seluruh domain. Namun demikian, peningkatan kecepatan aliran yang lebih tinggi juga dapat memunculkan fenomena hidrodinamika seperti *vortex* dan separasi aliran, yang pada kondisi tertentu dapat memengaruhi pola distribusi panas di dalam sistem *retort*.

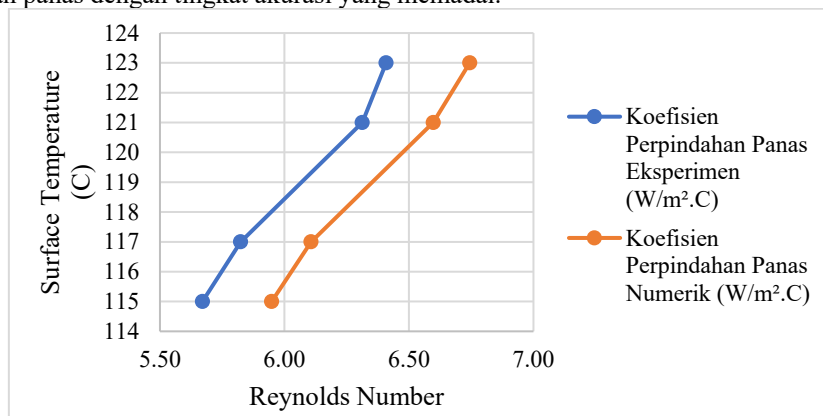
Gambar 8 menunjukkan distribusi temperatur pada mesin *retort* pada kondisi temperatur operasi 123°C dan kecepatan aliran 2 m/s. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa temperatur domain berada pada rentang 110,523°C hingga 213,984°C, dengan zona temperatur tertinggi (*hotspots*) terletak pada bagian kiri atas serta beberapa sisi samping objek yang ditandai warna merah, yang mengindikasikan konsentrasi panas mendekati 214°C dan diduga berkaitan dengan area sumber panas utama seperti terminal listrik. Secara umum, distribusi temperatur menunjukkan pola yang relatif seragam di seluruh domain, yang mengindikasikan keseragaman beban panas dan kondisi pendinginan antar unit, meskipun masih terdapat variasi gradien temperatur pada permukaan, di mana bagian tengah cenderung lebih panas (oranye) dan bagian pinggir bawah lebih rendah (kuning terang). Dari aspek perpindahan panas, koefisien perpindahan panas mengalami peningkatan seiring kenaikan temperatur operasi, yaitu dari 5,88–5,99 W/m².°C pada 115°C menjadi 6,67–6,74 W/m².°C pada 123°C, yang menunjukkan peningkatan kemampuan uap dalam mentransfer energi ke permukaan tabung *retort*. Sejalan dengan itu, laju perpindahan panas juga meningkat dari sekitar 1320 W/m² menjadi 1371 W/m², sehingga dapat disimpulkan bahwa kenaikan temperatur operasi meningkatkan efisiensi proses pemanasan dan mempercepat pencapaian kondisi sterilisasi secara lebih optimal.





Gambar 8. Kontur Distribusi Temperatur Mesin *Retort* pada Variasi Temperatur Operasi 123°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

Perbandingan koefisien perpindahan panas antara data eksperimen dan hasil simulasi numerik yang ditunjukkan pada Gambar 9 dilakukan pada kondisi *grid* optimum sebesar 3.012.679 elemen dengan kecepatan aliran fluida 2 m/s serta variasi temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Hasil analisis menunjukkan bahwa koefisien perpindahan panas pada kedua pendekatan, baik eksperimen maupun numerik, memiliki kecenderungan meningkat seiring kenaikan temperatur *inlet*, yang mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur operasi meningkatkan kemampuan fluida dalam mentransfer panas ke permukaan ruang *retort*. Secara rinci, pada temperatur 115°C, nilai koefisien perpindahan panas sebesar 5,67 W/m².°C (eksperimen) dan 5,95 W/m².°C (numerik) dengan selisih 0,28 W/m².°C. Pada 117°C, nilai eksperimen meningkat menjadi 5,82 W/m².°C dan numerik 6,11 W/m².°C dengan selisih 0,29 W/m².°C, sedangkan pada 121°C masing-masing sebesar 6,31 W/m².°C dan 6,60 W/m².°C dengan selisih 0,29 W/m².°C. Pada temperatur 123°C, nilai koefisien perpindahan panas mencapai 6,41 W/m².°C (eksperimen) dan 6,74 W/m².°C (numerik) dengan selisih 0,33 W/m².°C. Peningkatan ini disebabkan oleh semakin besarnya energi termal yang dibawa uap jenuh pada temperatur lebih tinggi, sehingga memperbesar perbedaan temperatur antara fluida dan permukaan *retort* dan meningkatkan intensitas perpindahan panas konveksi. Fenomena tersebut juga didukung oleh peningkatan bilangan Nusselt yang menunjukkan efektivitas konveksi yang semakin baik pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Persentase *error* antara hasil eksperimen dan simulasi numerik masing-masing sebesar 4,938%, 4,983%, 4,596%, dan 5,148%, dengan *error* tertinggi pada 123°C dan terendah pada 121°C. Secara keseluruhan, nilai *error* yang relatif kecil menunjukkan bahwa model numerik memiliki kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen, sehingga CFD dapat digunakan untuk memprediksi koefisien perpindahan panas dengan tingkat akurasi yang memadai.



Gambar 9. Grafik Koefisien Perpindahan Panas.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, *grid* optimum mampu menghasilkan simulasi CFD yang stabil dengan validasi yang baik terhadap data eksperimen. Peningkatan temperatur operasi memengaruhi performa dan hidrodinamika mesin *retort* melalui peningkatan tekanan masuk, *pressure drop*, temperatur permukaan, dan koefisien perpindahan panas. Kenaikan temperatur 115°C hingga 123°C serta peningkatan kecepatan aliran uap meningkatkan efektivitas distribusi panas, meskipun berpotensi menimbulkan fenomena aliran seperti *vortex* dan separasi. Nilai koefisien perpindahan panas numerik meningkat dari kisaran 5,88–5,99 W/m².°C pada temperatur *inlet* 115°C menjadi 6,67–6,74 W/m².°C pada 123°C. Perbandingan dengan data eksperimen menunjukkan penyimpangan sebesar 4,60–5,15%, sehingga model numerik memiliki tingkat kesesuaian yang memadai dalam memprediksi koefisien perpindahan panas pada kondisi pengujian yang dianalisis.

REFERENCES

- [1] P. S. Jimenez, S. P. Bangar, M. Suffern, and W. S. Whiteside, "Understanding retort processing: A review," *Food Sci. Nutr.*, vol. 12, no. 3, pp. 1545–1563, 2024, doi: 10.1002/fsn3.3912.
- [2] H. Jung, Y. J. Lee, and W. B. Yoon, "Effect of Pouch Size on Sterilization of Ready-to-Eat (RTE) Bracken Ferns: Numerical Simulation and Texture Evaluation," *Processes*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.3390/pr11010035.

- [3] A. Giraldo Gil, O. A. Ochoa González, L. F. Cardona Sepúlveda, and P. N. Alvarado Torres, "Venting stage experimental study of food sterilization process in a vertical retort using temperature distribution tests and energy balances," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 22, no. August, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100736.
- [4] W. Wang *et al.*, "Simulation and optimization of the thermal sterilization process of puree cans using the production of chestnut puree as an example," *Front. Microbiol.*, vol. 14, no. April, pp. 1–11, 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1135700.
- [5] F. Shafiq, A. Ullah, M. Nadeem, A. Khan, and A. Ullah, "Natural Convection Heat Transfer in an Enclosed Assembly of Thin Vertical Cylinders – A CFD Study," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 43, no. 8, pp. 1648–1658, 2020, doi: 10.1002/ceat.201900672.
- [6] Ł. Łach and D. Svyetlichnyy, "Advances in Numerical Modeling for Heat Transfer and Thermal Management: A Review of Computational Approaches and Environmental Impacts," *Energies*, vol. 18, no. 5, 2025, doi: 10.3390/en18051302.
- [7] A. Szpicer *et al.*, "Computational Fluid Dynamics Simulation of Thermal Processes in Food Technology and Their Applications in the Food Industry," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–33, 2025, doi: 10.3390/app15010424.
- [8] F. Berni, G. Cicalese, M. Borghi, and S. Fontanesi, "Towards grid-independent 3D-CFD wall-function-based heat transfer models for complex industrial flows with focus on in-cylinder simulations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 190, no. March, p. 116838, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116838.
- [9] K. Zhang, X. Ye, Z. Hou, Y. Ren, and Q. Shi, "Study on heat transfer performance of cold plate with grid channel," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52238-6.
- [10] V. Sassanis, L. Gamet, M. Rolland, R. Ma, and V. Pozzobon, "Numerical determination of the volumetric heat transfer coefficient in fixed beds of wood chips," *Chem. Eng. J.*, vol. 417, p. 128009, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.128009.
- [11] M. Lee, G. Park, C. Park, and C. Kim, "Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8827936.
- [12] S. Pletzer, M. Miranda, M. Lucchesi, M. Magno, and C. Hochenauer, "Numerical modelling of the evaporative cooling effect on solid walls in steam sterilisers," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 214, p. 124396, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124396.
- [13] M. Kannapinn, M. K. Pham, and M. Schäfer, "Physics-based digital twins for autonomous thermal food processing: Efficient, non-intrusive reduced-order modeling," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 81, pp. 1–26, 2022, doi: 10.1016/j.ifset.2022.103143.
- [14] A. A. Alonso, J. L. Pitarch, L. T. Antelo, and C. Vilas, "Event-based dynamic optimization for food thermal processing: High-quality food production under raw material variability," *Food Bioprod. Process.*, vol. 127, pp. 162–173, 2021, doi: 10.1016/j.fbp.2021.02.013.
- [15] M. Alexandersson and M. Ristinmaa, "Coupled heat, mass and momentum transport in swelling cellulose based materials with application to retorting of paperboard packages," *Appl. Math. Model.*, vol. 92, pp. 848–883, 2021, doi: 10.1016/j.apm.2020.11.041.
- [16] M. B. Ates, D. Skipnes, T. M. Rode, and O. I. Lekang, "Comparison of spore inactivation with novel agitating retort, static retort and combined high pressure-temperature treatments," *Food Control*, vol. 60, pp. 484–492, 2016, doi: 10.1016/j.foodcont.2015.08.033.
- [17] E. Raits, L. Pinte, A. Kirse-Ozolina, and S. Muizniece-Brasava, "A Case-study: Temperature Distribution and Heat Penetration in Steam-air Retort, Using Glass Jars and Retort Pouches," *Rural Sustain. Res.*, vol. 46, no. 341, pp. 90–96, 2021, doi: 10.2478/plua-2021-0020.
- [18] A. Szpicer, W. Bińkowska, I. Wojtasik-Kalinowska, S. M. Salih, and A. Półtorak, "Application of computational fluid dynamics simulations in food industry," *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 249, no. 6, pp. 1411–1430, 2023, doi: 10.1007/s00217-023-04231-y.
- [19] J. Zhu, T. Frerich, and A. S. Herrmann, "CFD modeling and validation of heat transfer inside an autoclave based on a mesh independency study," *J. Compos. Mater.*, vol. 55, no. 18, pp. 2469–2487, 2021, doi: 10.1177/0021998320979043.
- [20] S. Su, Y. Han, S. Ahn, and S. Hee, "Heat penetration and quality analysis of retort processed vegetables for home meal replacement foods," *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 32, no. 8, pp. 1057–1065, 2023, doi: 10.1007/s10068-023-01247-8.
- [21] R. Ardiansyah, H. Ma'mun, M. Safi'i, "Numerical Study of the Thermal Performance of a Food Retort Machine Considering Grid Resolution and Operating Temperature". *Jurnal Ilmiah Jurutera.*, VOL.13 No.01 (06.2026) 48–61. VOL.13 No.01 (06.2026) 48–61.
- [22] R. Ardiansyah, H. Ma'mun, M. Safi'i, "Studi Numerik dan Optimasi Desain Mesin Retort dengan



Mempertimbangkan Temperatur Operasi dan Kecepatan Aliran Fluida". *Jurnal Blends Sains*. VOL. 5 NO. 1 (2026) EDISI JULI, pp. 1-16. <https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i1.1789>.