CC BY

Armatur volume 8 nomor 1 (2027)
ISSN (cetak): 2722-080X, ISSN (online): 2722-0796
Universitas Muhammadiyah Metro

Contents list available at Sinta

**ARMATUR**

**:** Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur

# Kaji CFD Efek Temperatur dan Kecepatan Aliran Uap terhadap Performa Termal dan Hidrodinamik Mesin *Retort*

**Risqyka Imanuddin[1], Muhamad Safi'i[2], Hisyam Ma'mun[3]**
[1,2,3] Program Studi Teknik Mesin, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Jawa Tengah 50232, Indonesia

*ARTICLE INFO*

*Keywords:*
*Retort*
*Computational Fluid Dynamics* (CFD)
*Sterilitation*
*Heat Distribution*

*ABSTRACT*

*Sterilization using retort machines plays an important role in the food industry by ensuring product safety while extending shelf life. The effectiveness of the sterilization process is influenced by the uniformity of temperature distribution and steam flow characteristics within the retort chamber. This study aims to evaluate the effects of temperature and steam flow velocity on the thermal and hydrodynamic characteristics of a retort machine and to determine operating conditions that support optimal heat transfer. The study employed the Computational Fluid Dynamics (CFD) method by varying the inlet temperature from 115 to 123°C and the steam flow velocity from 2 to 10 m/s. The analysis focused on surface temperature, heat transfer coefficient, heat transfer rate, temperature distribution, and pressure drop. The results showed that increasing the operating temperature increased the retort surface temperature from 175.965°C to 189.545°C, the heat transfer coefficient from 5.88–5.99 to 6.67–6.74 W/m².°C, and the heat transfer rate from approximately 1320 to 1371 W/m². Increasing the steam flow velocity to 10 m/s also improved heat distribution but resulted in a higher pressure drop of approximately 4.272–4.309 Pa. These findings can be utilized as a basis for determining and optimizing retort operating conditions to improve heat transfer effectiveness and support a more optimal food sterilization process.*

**Corresponding author*: hisyam@upgris.ac.id
DOI: https://doi.org/10.24127/armatur.v8i1.12937
Received 27 August 2026; Received in revised form 29 September 2026; Accepted 30 September 2026
Available online 1 November 2026

## Pendahuluan

Sterilisasi menggunakan *retort* merupakan teknologi pengolahan termal yang banyak diterapkan dalam industri pangan untuk mencapai sterilitas komersial sehingga menghasilkan produk yang aman secara mikrobiologis, stabil selama penyimpanan, dan memiliki umur simpan yang lebih panjang pada suhu ruang[1]. Pencapaian kondisi tersebut diperoleh melalui penerapan kombinasi suhu tinggi dan tekanan terkontrol yang mampu menginaktivasi mikroorganisme patogen maupun mikroorganisme pembusuk, sehingga teknologi ini banyak digunakan pada produk pangan siap saji dan pangan dalam kemasan [2]. Teknologi *retort* telah diterapkan secara luas pada berbagai produk pangan, seperti makanan kaleng, *retort pouch*, pangan siap santap, dan produk pangan steril komersial. Penerapan teknologi ini bertujuan menginaktivasi bakteri patogen beserta sporanya yang tahan terhadap panas sehingga dapat menjamin keamanan produk dan meminimalkan risiko kesehatan bagi konsumen [3]. Salah satu tantangan utama dalam proses sterilisasi menggunakan *retort* adalah ketidakseragaman distribusi temperatur di dalam ruang *retort* maupun pada produk yang diproses. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan *under-processing* apabila sebagian produk tidak menerima panas yang cukup untuk mencapai standar sterilitas komersial, serta *over-processing* pada area yang mengalami pemanasan berlebih sehingga dapat menurunkan mutu produk, baik dari aspek sensori maupun nilai gizinya [4]. Efektivitas proses sterilisasi pada sistem *retort* tidak semata-mata bergantung pada temperatur operasi, melainkan juga pada keseragaman distribusi temperatur di dalam ruang *retort*. Keseragaman distribusi panas diperlukan untuk menjamin bahwa setiap produk memperoleh perlakuan termal yang setara sehingga proses sterilisasi berlangsung secara optimal dan memenuhi persyaratan sterilitas komersial [5]. Kinerja termal pada mesin *retort* dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas yang terjadi di dalam sistem, yang meliputi proses konduksi, konveksi, serta interaksi termal antara media pemanas dengan permukaan produk maupun bahan kemasan [6].

Kajian numerik memiliki peran penting dalam analisis sistem termal karena karakteristik perpindahan panas pada sistem yang kompleks sering kali sulit dievaluasi secara komprehensif melalui pengujian eksperimental. Perkembangan metode numerik yang didukung oleh kemajuan teknologi komputasi memungkinkan analisis karakteristik termal dilakukan secara lebih rinci, efisien, dan akurat sehingga mampu mendukung proses evaluasi maupun optimasi sistem termal industi [7]. Salah satu pendekatan numerik yang banyak digunakan dalam analisis sistem termal adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pada sistem *retort*, CFD digunaka untuk menganalisis distribusi temperatur, pola aliran uap, karakteristik perpindahan panas, serta *pressure drop* didalam ruang strerilisasi secara simultan Dalam industri pangan, metode ini dimanfaatkan untuk perancangan dan optimasi berbagai peralatan proses, seperti *oven*, pengering, sistem pendingin, dan penukar panas. CFD mampu memprediksi distribusi aliran fluida, kecepatan, dan temperatur sehingga kinerja sistem dapat dianalisis secara komprehensif [8]. Akurasi hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sangat dipengaruhi oleh kualitas mesh atau *grid* yang digunakan dalam proses diskretisasi domain komputasi. Penggunaan *grid* dengan resolusi yang terlalu rendah dapat menurunkan ketelitian hasil simulasi, sedangkan *grid* yang terlalu rapat meningkatkan waktu komputasi dan kebutuhan sumber daya komputasi. Oleh karena itu, uji independensi *grid* (*grid independence test*) diperlukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen dan tidak mengalami perubahan yang signifikan akibat peningkatan jumlah *grid* [9].

Pada geometri yang kompleks dan sistem termal, pemilihan *grid* yang sesuai merupakan aspek penting untuk merepresentasikan fenomena perpindahan panas, perkembangan lapisan batas, dan karakteristik aliran fluida secara akurat. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa perubahan resolusi *grid* dapat memengaruhi prediksi distribusi temperatur, koefisien perpindahan panas, serta stabilitas solusi numerik. Oleh karena itu, analisis *grid* tidak hanya berfungsi sebagai tahapan dalam pemodelan CFD, tetapi juga berperan penting dalam memperoleh keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi komputasi [10]. Di samping kualitas *grid*, temperatur operasi merupakan parameter yang menentukan kinerja termal proses *retort* karena berpengaruh terhadap laju penetrasi panas dan mutu produk pangan. Meskipun peningkatan temperatur mampu mempercepat pencapaian kondisi sterilitas, pengendalian temperatur yang tidak optimal dapat mengakibatkan *over-processing* dan distribusi panas yang tidak seragam. Oleh karena itu, evaluasi secara numerik diperlukan untuk menganalisis pengaruh temperatur operasi terhadap distribusi panas di dalam tabung *retort* [2]. Perkembangan teknologi komputasi dalam beberapa tahun terakhir telah mendorong peningkatan pemanfaatan metode simulasi numerik sebagai pendekatan prediktif dalam memahami fenomena perpindahan panas dan perilaku aliran fluida pada sistem sterilisasi [11]. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tuntutan industri pangan terhadap pengembangan metode sterilisasi yang mampu memastikan keamanan mikrobiologis produk, sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mempertahankan karakteristik mutu pangan selama proses pengolahan termal [12]. Pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) memiliki peran strategis dalam analisis proses sterilisasi termal karena mampu mengurangi kebutuhan terhadap pengujian eksperimental yang membutuhkan waktu, biaya, dan sumber daya material yang besar. Melalui pemodelan perpindahan panas dan aliran fluida yang tervalidasi, CFD dapat digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur, mengevaluasi keseragaman pemanasan, serta mendukung optimasi sistem sterilisasi pangan yang lebih efisien dan berkelanjutan [13].

Penelitian tersebut menggunakan simulasi numerik tiga dimensi berbasis model SCRP untuk mengevaluasi efektivitas proses sterilisasi termal dengan variasi waktu pemanasan 15 dan 25 menit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan *variable retort temperature* (VRT) dengan pemanasan 95°C selama 25 menit dan dilanjutkan 121°C selama 15 menit mampu mencapai nilai sterilitas (*F-value*) sebesar 6,58, sekaligus menurunkan nilai *cooking value* permukaan (*Cs*) sebesar 42,95%, *cooking value* rata-rata volumetrik (*Cavg*) sebesar 42,05%, serta mengurangi waktu sterilisasi hingga 26,07% [14]. Penelitian ini mengevaluasi kinerja penerapan profil temperatur *retort* variabel (*Variable Retort Temperature/VRT*) dalam proses sterilisasi termal pangan. Strategi pemanasan tersebut juga terbukti dapat menurunkan nilai pemasakan pada permukaan (*surface cook value, Cs*) dan nilai pemasakan rata-rata produk (*average cook value, Cavg*) lebih dari 42%, serta memperpendek waktu proses sterilisasi hingga 26,07%, sehingga menunjukkan potensi VRT dalam meningkatkan efisiensi proses termal. Selain itu, analisis terhadap variasi waktu pemanasan 20, 40, 60, 80, dan 100 menit menunjukkan bahwa durasi 80 dan 100 menit menghasilkan respons termal yang lebih optimal, ditunjukkan oleh peningkatan temperatur permukaan rata-rata produk dalam kemasan karton masing-masing mencapai 40°C dan 44°C [15]. Penelitian ini berfokus pada pengembangan strategi optimasi teknologi pengawetan pangan untuk mempertahankan kualitas produk, menjaga kandungan nutrisi, meningkatkan efisiensi penggunaan energi, serta mendukung konsep pengolahan pangan yang berkelanjutan. Kajian

dilakukan melalui evaluasi inaktivasi spora *Bacillus subtilis* pada sup model dengan pH 6,1 menggunakan beberapa metode perlakuan, yaitu *retort* berpengaduk, *retort* statis, serta kombinasi perlakuan tekanan tinggi (*High Pressure Processing/HPP*) dan pemanasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter ketahanan panas spora *B. subtilis* memiliki nilai $D_{95}$ sebesar 4,67 menit dengan nilai z sebesar 8,65°C, sedangkan model kinetika *log-linear* mampu menggambarkan proses inaktivasi dengan tingkat kesesuaian yang baik ($R^2adj$ = 0,94–0,97). Penerapan *retort* berpengaduk meningkatkan keseragaman distribusi panas sehingga mempercepat proses inaktivasi, sementara kombinasi HPP sebesar 650 MPa pada suhu 55–65°C selama 10 menit menghasilkan efek sinergis yang mampu mereduksi jumlah spora hingga 4,5 log [16].

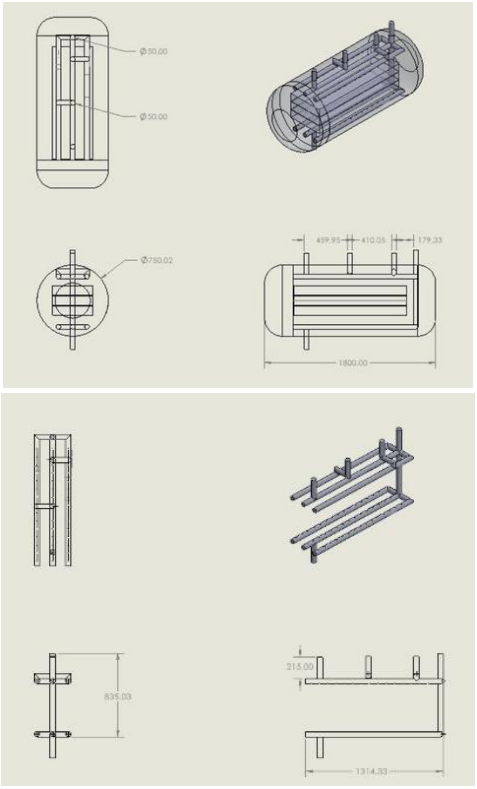
Penelitian ini mengevaluasi karakteristik termodinamika proses *retort* melalui analisis *come-up time* dan *holding time* pada kemasan stoples kaca dan kantong *retort*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keseragaman temperatur (±0,5°C) dicapai dalam waktu 28 menit pada stoples kaca dan 24 menit pada kantong *retort*, sedangkan untuk mencapai nilai sterilitas $F_0$ sebesar 3 menit diperlukan waktu penahanan masing-masing 67 dan 62 menit. Perbedaan karakteristik perpindahan panas kedua jenis kemasan tersebut menghasilkan selisih waktu sterilisasi total sebesar 9 menit, sehingga jenis kemasan berpengaruh terhadap kinerja termal dan efisiensi proses sterilisasi [4]. Berbagai penelitian terdahulu telah memfokuskan kajian pada analisis distribusi temperatur, karakteristik penetrasi panas, serta identifikasi zona pemanasan paling lambat (*slowest heating zone*) dalam sistem *retort* dan proses sterilisasi termal pangan [17]. Kualitas mesh merupakan faktor penting dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), sehingga evaluasi *mesh independence* diperlukan untuk menjamin akurasi hasil simulasi [18]. Meskipun demikian, penelitian yang mengkaji secara komprehensif pengaruh jumlah *grid* dan variasi temperatur operasi terhadap karakteristik termal mesin *retort* masih relatif terbatas, sehingga diperlukan kajian lebih lanjut [9]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara numerik pengaruh variasi jumlah *grid* dan temperatur operasi terhadap performa termal mesin *retort* pangan, dengan fokus pada evaluasi kestabilan solusi, tingkat akurasi simulasi, dan karakteristik distribusi temperatur di dalam ruang *retort*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam menentukan jumlah *grid* yang optimal sehingga mampu menghasilkan simulasi dengan tingkat akurasi yang tinggi, kestabilan numerik yang baik, serta efisiensi komputasi yang optimal. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis pengaruh jumlah *grid* dan temperatur operasi sebagai parameter utama dalam evaluasi performa termal mesin *retort*. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada distribusi temperatur, penetrasi panas, atau efektivitas sterilisasi, penelitian ini mengkaji keterkaitan kedua parameter tersebut untuk meningkatkan kualitas hasil simulasi. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode simulasi serta mendukung perancangan dan optimasi mesin *retort* yang lebih efisien, hemat energi, mampu menjamin keamanan mikrobiologis, dan tetap mempertahankan mutu produk pangan

## Metode Penelitian

### Model Fisik

Desain mesin *retort* yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada hasil pengembangan dari rancangan eksperimen terdahulu dengan mempertimbangkan aspek konfigurasi rak penyimpanan produk serta posisi saluran keluaran uap sebagai parameter utama dalam perancangan. Pendekatan tersebut bertujuan menghasilkan representasi geometri yang sesuai dengan kondisi operasional sistem.

Geometri beserta dimensi mesin *retort* dimodelkan secara tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SolidWorks, sedangkan spesifikasi bentuk dan ukurannya ditunjukan secara rinci pada Gambar 1.



Gambar 1. *Geometri Retort* dan Ukurannya.

## Material

Paduan *stainless steel* digunakan sebagai material utama mesin *retort* karena memiliki sifat termofisik dan mekanik yang sesuai untuk mendukung proses sterilisasi termal. Nilai densitas, panas jenis, dan konduktivitas termal yang digunakan dalam simulasi ditunjukan pada Tabel. Karakteristik tersebut memungkinkan *stainless steel* mempertahankan kestabilan struktur pada temperatur operasi yang tinggi serta mendukung penyerapan dan perpindahan panas secara efektif. Selain itu, ketahanan terhadap korosi dan kemudahan pembersihan menjadikan material ini memenuhi persyaratan higienitas dan keamanan pada peralatan pengolahan pangan.

Tabel 1. Sifat termofisik material *Stainless steel*

| Parameter | Nilai |
|---|---|
| Densitas *(ρ)* | 7,90 × 10³ kg/m³ |
| Panas jenis *(Cp)* | 500 J/kg.°C |
| Konduktivitas termal *(k)* | 15,1 W/m.°C |

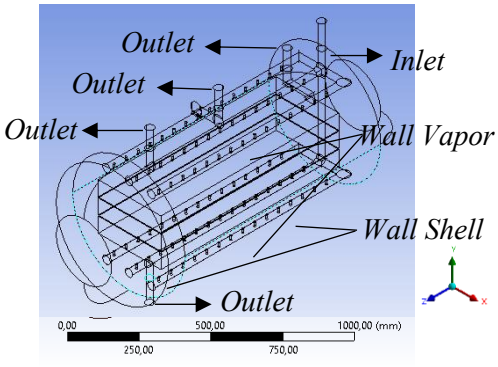
Tabel 2. Sifat termofisik *water vapor*

| Parameter | Nilai |
|---|---|
| Densitas *(ρ)* | 0,0000122 10³ kg/m³ |
| Panas jenis *(Cp)* | 2071 J/kg.°C |
| Konduktivitas termal *(k)* | 18,0087 W/m.°C |

## Domain Komputasi

Simulasi numerik pada penelitian ini dilakukan pada domain komputasi yang merepresentasikan ruang fluida di dalam tabung *retort* dengan dimensi 1800 × 750 × 950 mm. Domain tersebut disusun untuk menggambarkan perilaku aliran uap jenuh selama proses sterilisasi termal. Penerapan kondisi batas (*boundary conditions*) mencakup *inlet, outlet, wall vapor, dan wall shell* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2. Dalam penelitian ini, water vapor dimodelkan sebagai fluida satu fase dengan pendekatan gas ideal dan aliran kompresible menggunakan Energy Equation, tanpa memperhitungkan fenomena kondensasi sehingga analisis difokuskan pada distribusi temperatur, pola aliran, perpindahan panas dan *pressure drop* didalam ruang *retort* Penentuan kondisi batas tersebut bertujuan menghasilkan representasi numerik yang mendekati kondisi operasi aktual sehingga karakteristik aliran dan perpindahan panas di dalam ruang *retort* dapat dimodelkan secara realistis. Untuk menyelesaikan fenomena aliran turbulen, simulasi menggunakan model turbulensi *realizable k–ε* karena model ini memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi perilaku aliran pada domain tertutup dengan geometri silinder. Selain itu, model tersebut mampu memberikan estimasi distribusi

kecepatan dan temperatur yang lebih representatif, sehingga sesuai untuk analisis karakteristik perpindahan panas berbasis aliran fluida pada sistem *retort*.




Gambar 2. Domain Komputasi dan Penentuan Kondisi Batas

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

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

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

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

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

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

Persamaan energi:

$$\rho\left(\frac{\partial uT_s}{\partial x}+\frac{\partial vT_s}{\partial y}+\frac{\partial wT_s}{\partial z}\right)=-\frac{k}{C_p}+\mu\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

## *Set up* Simulasi

Parameter simulasi ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi operasi mesin *retort* menggunakan CFD. Fluida kerja berupa uap jenuh (*water vapor*) dengan variasi temperatur *inlet* 115, 117, 119, 121, dan 123°C serta kecepatan aliran 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s. Pemodelan aliran turbulen menggunakan model *Realizable k–ε,* sedangkan *Energy Equation* diaktifkan untuk menyelesaikan perpindahan panas dan aliran fluida secara simultan. Material *water vapor* didefinisikan melalui menu Material dan diterapkan pada domain fluida menggunakan *Cell Zone Conditions*. Kondisi batas terdiri atas *Velocity Inlet* pada saluran masuk sesuai variasi temperatur dan kecepatan, *Pressure Outlet* pada saluran keluar, serta kondisi *no-slip wall* pada seluruh dinding *retort* dan rak. Penyelesaian numerik menggunakan algoritma *Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)* dengan skema diskretisasi *First Order Upwind* untuk persamaan momentum, energi, energi kinetik turbulen (k), dan laju disipasi turbulen (ε). Sebelum iterasi, solusi diinisialisasi menggunakan *Standard Initialization* melalui fitur *Compute From Inlet.* Kestabilan solusi dipantau menggunakan *Report Definition* pada menu Solution kemudian *Report Definitions* dengan memonitor *Area-Weighted Average Temperature* pada *Wall Vapor, Area-Weighted Average Pressure* pada *inlet* dan *outlet*, serta *Mass Flow Rate* pada *outlet*. Seluruh parameter direkam pada setiap iterasi melalui fitur Monitor dan Plot hingga sistem mencapai kondisi tunak (*steady-state*). Kriteria konvergensi ditentukan berdasarkan residual persamaan pengendali dan kestabilan parameter hasil pemantauan. Solusi dinyatakan konvergen apabila *residual continuity,* momentum, serta persamaan turbulensi ($k$ dan $\varepsilon$) lebih kecil dari $10^{-5}$ sedangkan residual energi kurang dari $10^{-6}$ Selain itu, hasil simulasi

dinyatakan stabil apabila nilai *Area-Weighted Average Temperature* dan tekanan rata-rata berubah kurang dari 0,1% selama sedikitnya 200 iterasi berturut-turut. Simulasi dijalankan hingga maksimum 1000 iterasi atau dihentikan lebih awal setelah seluruh kriteria konvergensi terpenuhi.

***Measurement Method***

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

**Reduksi Data Numerik**

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

$$R_e = \frac{\rho . V . D}{\mu} \tag{6}$$

Area permukaan *retort* dihitung dengan Persamaan 7:

$$A = 2\pi r(r+t) \tag{7}$$

Koefisien perpindahan panas dapat dihitung menggunakan Persamaan 8:

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

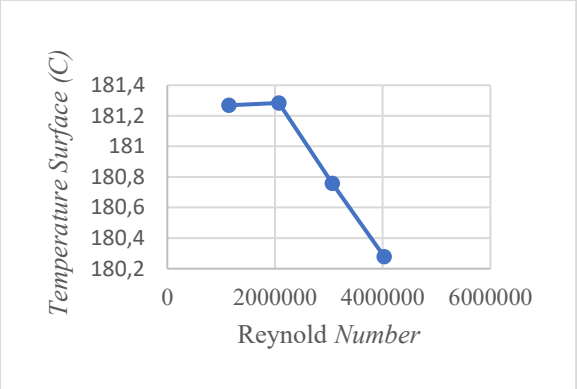
Tahanan termal dan Bilangan *Nusselt* didefinisikan untuk membandingkan nilai antara perpindahan panas konveksi dan konduksi yang dapat dihitung dengan Persamaan 9 dan 10:

$$R_{th} = \frac{T_{ave} - T_\infty}{Q} \tag{9}$$

$$Nu = \frac{h . L}{K} \tag{10}$$

**Uji *Grid Independent***

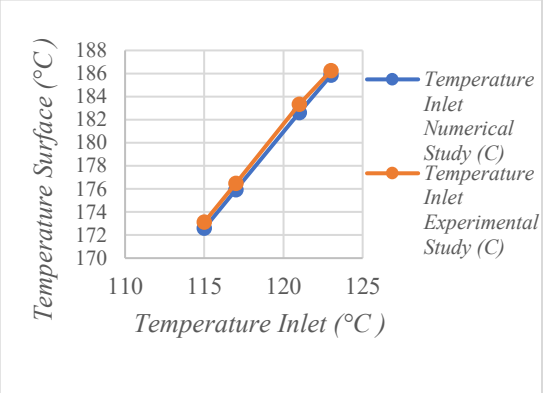
Uji independensi *grid* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi CFD tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah elemen *mesh*. Pengujian menggunakan empat variasi *grid*, yaitu 1.145.681, 2.073.340, 3.028.451, dan 4.027.933 elemen pada kondisi operasi yang sama, dengan kecepatan aliran 2 m/s dan temperatur *inlet* 121 °C. Temperatur permukaan digunakan sebagai parameter pembanding karena merepresentasikan distribusi panas pada domain yang dianalisis. Hasil pengujian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa *grid* 3.028451 elemen menghasilkan temperatur permukaan 180,759 °C, sedangkan *grid* 4.027.933 elemen menghasilkan 180,279 °C dengan margin *error* 0,03%. Dengan demikian, *grid* 3.028.451 elemen ditetapkan sebagai *grid* optimum untuk tahap validasi dan pengambilan data numerik selanjutnya.




Gambar 4. Grafik Uji *Grid*

**Validasi**

Validasi dilakukan untuk menilai kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan data eksperimen menggunakan *grid* optimum 3.028451 elemen pada kecepatan aliran 2 m/s. Variasi temperatur *inlet* yang digunakan meliputi 115, 117, 121, 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 0,00015127% pada temperatur 121 °C. Hasil ini menunjukkan bahwa model numerik memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap kondisi eksperimen.



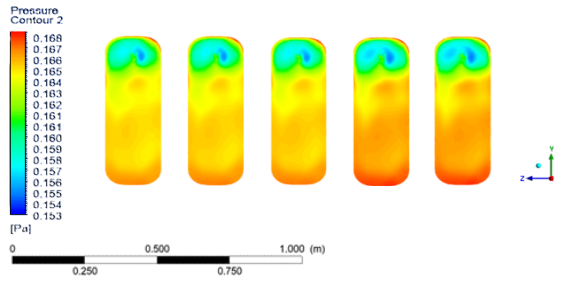

Gambar 5. Grafik Hasil Validasi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Pengaruh Variasi Tekanan**

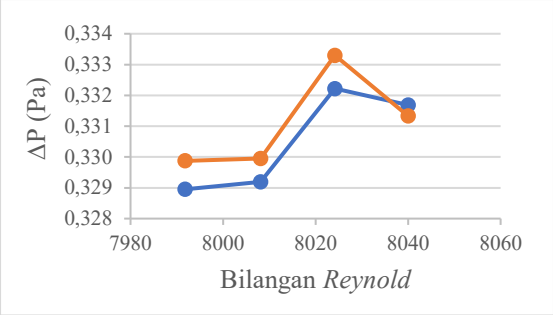
Dalam penelitian numerik ini, analisis distribusi tekanan dan temperatur dilakukan untuk mengevaluasi keseragaman kondisi termal di dalam ruang *retort* sehingga proses sterilisasi produk pangan dapat berlangsung secara efektif. Selama proses sterilisasi, ruang *retort* dioperasikan pada tekanan yang melebihi tekanan atmosfer untuk memungkinkan tercapainya temperatur tinggi yang diperlukan dalam inaktivasi mikroorganisme. Pada konfigurasi dengan jumlah *grid* yang relatif rendah, distribusi tekanan umumnya belum tergambarkan secara optimal sehingga masih terlihat ketidakseragaman, khususnya pada daerah di sekitar *inlet* uap. Fenomena tersebut dipengaruhi oleh interaksi antara aliran fluida dengan hambatan yang ditimbulkan oleh susunan produk di dalam ruang *retort*. Nilai tekanan maksimum umumnya teridentifikasi pada area di sekitar pipa *inlet* uap atau pada lokasi ketika aliran

uap secara langsung berinteraksi dengan permukaan produk maupun dinding *retort*. Sebaliknya, tekanan yang lebih rendah cenderung terbentuk pada daerah di belakang produk (*wake regio*n) serta pada bagian sudut ruang *retort* yang relatif jauh dari arah masuknya aliran uap. Perbedaan distribusi tekanan tersebut berpotensi menyebabkan terbentuknya zona dingin (*cold spot*) apabila distribusi aliran dan perpindahan panas tidak berlangsung secara merata. Selain itu, peningkatan kecepatan aliran uap pada sisi *inlet* dapat meningkatkan gradien tekanan di dalam ruang *retort*, sedangkan penggunaan kecepatan *inlet* yang konstan berkontribusi terhadap kestabilan pola aliran selama proses sterilisasi. Visualisasi distribusi tekanan dan karakteristik aliran di dalam ruang *retort* ditampilkan pada Gambar 6.




Gambar 6. Kontur Distribusi Tekanan Mesin *Retort* diberbagai Variasi Temperatur Operasi dengan Jumlah *Grid* sebesar 3.028.451

Berdasarkan Gambar 6, hasil simulasi memperlihatkan distribusi tekanan pada mesin *retort* dengan variasi temperatur operasi 115°C hingga 123°C menggunakan *grid* sebanyak 3.028.451 elemen. Distribusi tekanan yang dihasilkan menunjukkan pola yang tidak seragam pada seluruh domain aliran. Area yang ditampilkan dengan warna hijau kebiruan mengindikasikan tekanan yang relatif lebih tinggi, sedangkan area berwarna oranye merepresentasikan tekanan yang lebih rendah. Perbedaan distribusi tekanan tersebut mencerminkan terbentuknya gradien tekanan akibat interaksi antara aliran fluida dan geometri ruang *retort*, yang meliputi perubahan arah aliran, keberadaan hambatan, serta pengaruh gesekan pada dinding *retort*. Zona dengan tekanan yang lebih tinggi diperkirakan merupakan daerah stagnasi (*stagnation region*) atau *impingement flow*, yaitu kondisi ketika aliran fluida mengalami perlambatan akibat tumbukan langsung dengan permukaan dinding sehingga energi kinetik dikonversi menjadi tekanan statis. Secara kuantitatif, tekanan pada sisi masuk (*inlet*) mengalami peningkatan dari 0,52 Pa menjadi 0,55 Pa seiring dengan kenaikan temperatur operasi, sedangkan tekanan pada sisi keluar (*outlet*) relatif konstan pada kisaran 0,159–0,168 Pa. Kondisi tersebut menyebabkan *pressure drop* meningkat dari 0,352 Pa menjadi 0,391 Pa, yang mengindikasikan bertambahnya resistansi aliran pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Selain itu, pola kontur tekanan juga mengindikasikan adanya kemungkinan terjadinya separasi aliran (*flow separation*) dan pembentukan pusaran (*vortex*) pada beberapa area tertentu, sehingga distribusi tekanan di dalam ruang *retort* menjadi kurang seragam. Dari perspektif rekayasa, daerah dengan tekanan tinggi merupakan lokasi yang menerima pembebanan terbesar pada dinding *retort*, sehingga perlu menjadi perhatian dalam evaluasi kekuatan struktur untuk memastikan material mampu menahan beban operasi secara aman. Secara keseluruhan, peningkatan temperatur operasi tidak hanya memengaruhi distribusi temperatur di dalam ruang *retort*, tetapi juga menyebabkan peningkatan *pressure drop* serta memperjelas ketidakseragaman distribusi tekanan di dalam sistem.



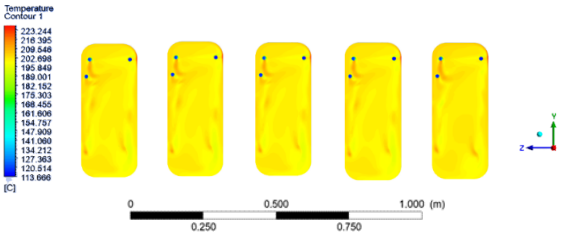

Gambar 7. Grafik Hubungan Bilangan *Reynold* dan Perbedaan tekanan

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 7, grafik berwarna biru menunjukan perubahan bilangan *Reynold* pada setiap variasi temperatur *Inlet* sedangkan grafik berwarna orange menunjukan nilat perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi *Inlet* dan *Outlet.* analisis dilakukan menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.028.451 elemen dengan variasi temperatur *inlet* sebesar 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai perbedaan tekanan (ΔP) terendah diperoleh pada temperaur 115°C, yaitu sebesar 0,329 Pa. Nilai tersebut kemudian mengalami peningkatan pada temperatur 117°C, sedangkan ΔP tertinggi dicapai pada temperatur 121°C dan 123°C dengan nilai masing-masing sekitar 0,332 Pa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur operasi cenderung diikuti oleh peningkatan nilai ΔP, meskipun besarnya perubahan yang terjadi relatif kecil. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur *inlet* meningkatkan energi termal fluida sehingga karakteristik aliran di dalam ruang *retort* menjadi lebih dinamis dan memengaruhi distribusi aliran. Akibatnya, perbedaan tekanan antara sisi *inlet* dan *outlet* menjadi semakin besar. Selain itu, perbandingan antara hasil eksperimen dan simulasi numerik menunjukkan kecenderungan yang serupa, yaitu bahwa peningkatan temperatur *inlet* menghasilkan kenaikan temperatur permukaan pada kedua metode pengujian. Pada temperatur *inlet* 115°C, temperatur permukaan yang diperoleh dari eksperimen sebesar 173,12°C, sedangkan hasil simulasi numerik mencapai 175,97°C dengan selisih sebesar 2,85°C. Pada temperatur 117°C, temperatur permukaan eksperimen meningkat menjadi 176,48°C dan hasil numerik sebesar 179,36°C, sehingga diperoleh selisih sebesar 2,88°C. Selanjutnya, pada temperatur 121°C, temperatur permukaan hasil eksperimen mencapai 183,34°C, sementara simulasi numerik menghasilkan nilai 186,15°C dengan selisih 2,81°C. Adapun pada temperatur 123°C, temperatur permukaan eksperimen dan simulasi numerik masing-masing sebesar 186,24°C dan 189,55°C, dengan selisih sebesar 3,31°C. Secara keseluruhan, peningkatan temperatur *inlet* menunjukkan bahwa energi termal yang dibawa oleh uap jenuh semakin besar, sehingga proses perpindahan panas dari fluida menuju permukaan di dalam ruang *retort* berlangsung dengan intensitas yang lebih tinggi dan menghasilkan proses pemanasan yang lebih efektif.

**Pengaruh Variasi Temperature**

Studi numerik ini bertujuan untuk mengevaluasi 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 karakteristik termal dan hidrolik pada mesin *retort*, dengan fokus pada analisis distribusi panas di dalam tabung *retort*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan distribusi temperatur di dalam ruang *retort* dapat dievaluasi secara komprehensif berdasarkan kombinasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap yang diterapkan. Secara umum, kenaikan temperatur operasi diikuti oleh peningkatan temperatur permukaan tabung *retort*. Pada kondisi kecepatan aliran uap sebesar 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 tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi meningkatkan energi termal yang dibawa

oleh uap pemanas, sehingga laju perpindahan panas menuju permukaan *retort* menjadi lebih besar dan menghasilkan temperatur permukaan yang lebih tinggi. Di samping pengaruh temperatur operasi, variasi kecepatan aliran uap juga berperan dalam membentuk pola distribusi temperatur di dalam ruang *retort*. Pada kecepatan aliran yang relatif rendah, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, momentum uap yang memasuki ruang *retort* masih terbatas sehingga proses perpindahan dan penyebaran panas berlangsung lebih lambat. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan distribusi temperatur yang kurang seragam, terutama antara daerah yang berada di sekitar *inlet* dan bagian yang lebih jauh dari jalur utama aliran uap. Sebaliknya, peningkatan kecepatan aliran menjadi 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s meningkatkan momentum uap sehingga proses distribusi panas berlangsung lebih cepat, lebih efektif, dan cenderung lebih merata pada seluruh domain aliran. Meskipun demikian, kecepatan aliran yang lebih tinggi juga berpotensi memunculkan fenomena hidrodinamika, seperti pembentukan pusaran (*vortex*) dan separasi aliran (*flow separation*), yang pada kondisi tertentu dapat memengaruhi pola distribusi panas di dalam sistem *retort*.

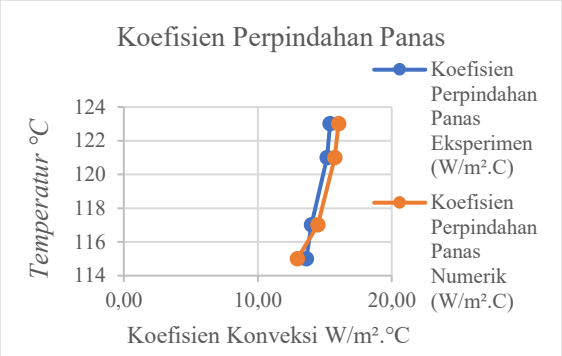



Gambar 8. Kontur Distribusi Temperatur Mesin *Retort* pada Variasi Temperatur Operasi 123°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

Gambar 8 memperlihatkan distribusi temperatur pada mesin *retort* pada kondisi temperatur operasi 123°C dengan kecepatan aliran uap sebesar 2 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur di dalam domain berada pada rentang 110,523°C hingga 213,984°C. Zona dengan temperatur tertinggi (*hotspots*) teridentifikasi pada bagian kiri atas serta beberapa sisi objek yang ditunjukkan oleh warna merah, yang mengindikasikan temperatur mendekati 214°C dan diduga berkaitan dengan lokasi sumber panas utama, seperti terminal listrik. Secara umum, kontur temperatur memperlihatkan distribusi yang relatif seragam di seluruh domain, yang mengindikasikan keseragaman beban panas serta kondisi pendinginan antarunit. Meskipun demikian, masih terdapat variasi gradien temperatur pada permukaan, di mana bagian tengah memiliki temperatur yang lebih tinggi yang ditunjukkan oleh warna oranye, sedangkan bagian pinggir bawah memiliki temperatur yang relatif lebih rendah yang ditandai dengan warna kuning terang. Dari aspek perpindahan panas, koefisien perpindahan panas mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan temperatur operasi, yaitu dari 5,88–5,99 W/m².°C pada temperatur 115°C menjadi 6,67–6,74 W/m².°C pada temperatur 123°C. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan uap dalam mentransfer energi termal menuju permukaan tabung *retort* semakin meningkat. Sejalan dengan peningkatan tersebut, laju perpindahan panas juga mengalami kenaikan dari sekitar 1320 W/m² menjadi 1371 W/m². Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi berkontribusi terhadap meningkatnya efisiensi proses pemanasan serta mempercepat tercapainya kondisi sterilisasi yang lebih optimal.

Perbandingan koefisien perpindahan panas antara hasil eksperimen dan simulasi numerik yang disajikan pada Gambar 9 dilakukan menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.028.451 elemen, kecepatan aliran fluida sebesar 2 m/s, serta variasi temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Hasil analisis menunjukkan bahwa

nilai koefisien perpindahan panas pada kedua pendekatan, baik eksperimen maupun simulasi numerik, sama-sama mengalami peningkatan seiring bertambahnya temperatur *inlet*. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa kenaikan temperatur operasi meningkatkan kemampuan fluida dalam mentransfer panas menuju permukaan ruang *retort*. Pada temperatur *inlet* 115°C, koefisien perpindahan panas yang diperoleh dari eksperimen sebesar 5,67 W/m².°C, sedangkan hasil simulasi numerik sebesar 5,95 W/m².°C dengan selisih 0,28 W/m².°C. Pada temperatur 117°C, nilai koefisien perpindahan panas meningkat menjadi 5,82 W/m².°C untuk eksperimen dan 6,11 W/m².°C untuk simulasi numerik, dengan selisih sebesar 0,29 W/m².°C. Selanjutnya, pada temperatur 121°C diperoleh nilai masing-masing sebesar 6,31 W/m².°C dan 6,60 W/m².°C, sehingga selisih antara kedua metode tetap sebesar 0,29 W/m².°C. Adapun pada temperatur 123°C, koefisien perpindahan panas mencapai 6,41 W/m².°C pada hasil eksperimen dan 6,74 W/m².°C pada hasil simulasi numerik, dengan selisih sebesar 0,33 W/m².°C. Peningkatan koefisien perpindahan panas tersebut disebabkan oleh bertambahnya energi termal yang dibawa oleh uap jenuh pada temperatur operasi yang lebih tinggi, sehingga memperbesar perbedaan temperatur antara fluida dan permukaan *retort*. Kondisi ini meningkatkan intensitas perpindahan panas secara konveksi dan didukung oleh kenaikan bilangan *Nusselt* yang menunjukkan semakin efektifnya mekanisme perpindahan panas konvektif pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Persentase *error* antara hasil eksperimen dan simulasi numerik berturut-turut sebesar 4,938%, 4,983%, 4,596%, dan 5,148%, dengan nilai *error* tertinggi diperoleh pada temperatur 123°C, sedangkan nilai terendah terjadi pada temperatur 121°C. Secara keseluruhan, persentase *error* yang relatif kecil menunjukkan bahwa model numerik memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen. Oleh karena itu, metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dinilai mampu memprediksi koefisien perpindahan panas pada mesin *retort* dengan tingkat akurasi yang memadai.



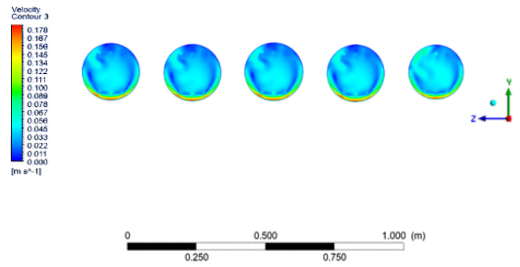

Gambar 9. Grafik Koefisien Perpindahan Panas

**Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran**

Variasi kecepatan aliran fluida merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap kinerja perpindahan panas secara konvektif pada mesin *retort*. Secara umum, peningkatan kecepatan aliran akan meningkatkan koefisien perpindahan panas, sehingga laju transfer energi termal dari uap jenuh ke permukaan *retort* menjadi lebih efektif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi kecepatan aliran di dalam ruang *retort* membentuk pola yang relatif stabil, meskipun masih dijumpai variasi kecepatan pada beberapa lokasi tertentu. Berdasarkan kontur *velocity*, kecepatan aliran berada pada kisaran 0 hingga 0,178 m/s. Area yang didominasi warna hijau dan kuning menunjukkan kecepatan aliran menengah, yaitu sekitar 0,04 - 0,08 m/s, dan tersebar pada bagian tengah atas ruang *retort*. Dibandingkan dengan area di dekat dinding *retort* yang memiliki kecepatan lebih tinggi, zona tersebut menunjukkan kecepatan yang relatif lebih rendah. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh perubahan arah

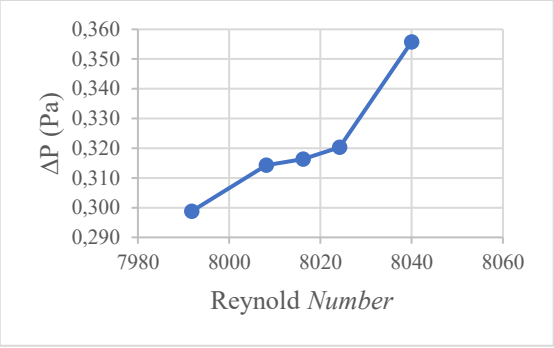
aliran maupun terbentuknya daerah resirkulasi (*recirculation zone*), sehingga distribusi kecepatan pada area tersebut menjadi lebih kecil. Sebaliknya, kecepatan aliran yang lebih tinggi teramati pada bagian tepi, terutama di sisi kanan atas dan bagian bawah ruang *retort*. Perbedaan distribusi kecepatan ini menunjukkan bahwa meskipun karakteristik aliran secara keseluruhan relatif stabil, masih terdapat ketidakseragaman lokal yang berpotensi memengaruhi keseragaman perpindahan panas selama proses sterilisasi termal.

Gambar 10 menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran berpengaruh terhadap karakteristik sirkulasi fluida panas di dalam ruang *retort*. Peningkatan kecepatan aliran cenderung meningkatkan efektivitas perpindahan panas melalui mekanisme konveksi, sehingga proses pemanasan menuju produk maupun rak sterilisasi berlangsung lebih cepat. Meskipun demikian, hasil simulasi masih memperlihatkan ketidakseragaman distribusi kecepatan aliran, out terutama pada bagian tengah ruang *retort* yang membentuk zona berkecepatan rendah (*dead zone*), sehingga pemerataan aliran masih menjadi faktor penting dalam mendukung distribusi panas yang lebih optimal selama proses sterilisasi termal.




Gambar 10. Kontur Distribusi *Velocity* Mesin *Retort* pada Variasi Temperatur Operasi 117°C dan Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s.

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




Gambar 11. Grafik Hubungan Bilangan *Reynolds* dan Perbedaan Tekanan.

Grafik pada Gambar 11 menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan selisih tekanan seiring dengan bertambahnya bilangan *Reynolds*, meskipun kenaikan yang terjadi relatif kecil sehingga tidak memberikan perubahan yang signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur *inlet* memengaruhi karakteristik aliran fluida di dalam ruang *retort* melalui perubahan sifat termofisik fluida, khususnya densitas dan viskositas, yang selanjutnya berkontribusi terhadap nilai bilangan *Reynolds*. Akan tetapi, pengaruh variasi temperatur *inlet* terhadap selisih tekanan masih tergolong rendah. Ditinjau dari distribusi panas, pengaruh pola aliran uap di dalam tabung *retort* juga dapat dievaluasi melalui perubahan nilai tekanan. Pada kecepatan aliran 2 m/s, nilai *pressure drop* relatif kecil, yaitu berkisar antara 0,352–0,391 Pa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, sedangkan pada kecepatan 10 m/s terjadi peningkatan *pressure drop* hingga sekitar 4,272–4,309 Pa. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran, semakin besar selisih tekanan antara sisi *inlet* dan *outlet*. Kondisi tersebut mengindikasikan meningkatnya energi kinetik aliran serta interaksi fluida dengan dinding tabung yang semakin kuat. Dalam konteks distribusi panas, fenomena ini dapat berkontribusi terhadap peningkatan penyebaran uap panas ke area yang lebih luas di dalam ruang *retort*. Namun demikian, peningkatan tekanan dan kecepatan aliran juga berpotensi memunculkan ketidakseragaman pola aliran pada beberapa area tertentu dalam sistem.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengevaluasi karakteristik termal dan hidrodinamik pada mesin *retort*. Hasil uji independensi *grid* menunjukkan bahwa penggunaan 3.028.451 elemen merupakan konfigurasi *grid* yang optimal dengan margin *error* sebesar 0,03%, sementara hasil validasi menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan eksperimen, dengan nilai *error* terendah sebesar 0,00015127% pada temperatur 121°C. Peningkatan temperatur operasi dari 115°C hingga 123°C terbukti meningkatkan temperatur permukaan *retort* dari 175,965°C menjadi 189,545°C, serta meningkatkan koefisien perpindahan panas dari sekitar 5,88–5,99 W/m².°C menjadi 6,67–6,74 W/m².°C dan laju perpindahan panas dari sekitar 1320 W/m².°C menjadi 1371 W/m². Selain itu, peningkatan kecepatan aliran uap hingga 10 m/s berkontribusi terhadap peningkatan efektivitas distribusi panas, namun juga diikuti oleh peningkatan *pressure drop* dari 0,352–0,391 Pa pada kecepatan 2 m/s menjadi sekitar 4,272–4,309 Pa pada kecepatan 10 m/s. Dengan demikian, optimasi kinerja mesin *retort* perlu mempertimbangkan kesesuaian jumlah *grid*, temperatur operasi, dan kecepatan aliran uap secara simultan guna memperoleh perpindahan panas yang optimal dengan tetap mempertahankan karakteristik hidrodinamik sistem.

## DAFTAR PUSTAKA


[1] R. Simpson *et al.*, *Assessment and outlook of variable retort temperature profiles for the thermal processing of packaged foods: Plant productivity, product quality, and energy consumption*, vol. 275. 2020. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109839

[2] 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

[3] E. Azhari, M. S. Aliredjo, N. Dharmayanti, and A. H. Purnomo, "Sterilisasi Produk Siap Saji (Katsuwonus pelamis Linnaeus 1778) Dalam Kemasan Retort Pouch - Sterilization of Ready-to-Eat Products:

Skipjack Tuna (Katsuwonus pelamis Linnaeus 1778) in Retort Pouch Package," *J. Pengolah. Has. Perikan. Indones.*, vol. 26, no. 1, pp. 77–86, 2023. doi.org/10.17844/jphpi.v26i1.41863

[4] 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

[5] 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

- [6] M. T. K. Kubo *et al.*, "Thermal processing of food: Challenges, innovations and opportunities. A position paper," *Food Rev. Int.*, vol. 39, no. 6, pp. 3344–3369, 2023, doi: 10.1080/87559129.2021.2012789

[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] C. K. Ajani, Z. Zhu, and D. W. Sun, "Recent advances in multiscale CFD modelling of cooling processes and systems for the agrifood industry," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 61, no. 15, pp. 2455–2470, 2021, doi: 10.1080/10408398.2020.1809992

[9] 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. May 2020, p. 116838, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116838.

[10] R. Chu and K. Wang, "CFD in Urban Wind Resource Assessments: A Review," *Energies*, vol. 18, no. 10, 2025, doi: **10.3390/en18102626**.

[11] M. Soleymani Serami, Y. Ramezan, and M. Khashehchi, "CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew," *Food Sci. Nutr.*, vol. 9, no. 2, pp. 1079–1087, 2021, doi: 10.1002/fsn3.2083

[12] L. Z. Deng *et al.*, "Thermal Decontamination Technologies for Microorganisms and Mycotoxins in Low-Moisture Foods," *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, vol. 12, pp. 287–305, 2021, doi: **10.1146/annurev-food-062220-112934**

[13] S. Wason, T. Verma, and J. Subbiah, "Validation of process technologies for enhancing the safety of low-moisture foods: A review," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 20, no. 5, pp. 4950–4992, 2021, doi: **10.1111/1541-4337.12800**

[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. Fardella *et al.*, "Variable retort temperature profiles (Vrtps) and retortable pouches as tools to minimize furan formation in thermally processed food," *Foods*, vol. 10, no. 9, 2021, doi: **10.3390/foods10092205**.

[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] 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.

[18] 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.