

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

Studi Numerik dan Optimasi Desain Mesin *Retort* dengan Mempertimbangkan Temperatur Operasi dan Kecepatan Aliran Fluida

Ridho Ardiansyah, Hisyam Ma'mun^{*}, Muhamad Safi'i

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang, Semarang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 06 Juni 2026
Revisi Akhir: 15 Juli 2026
Diterbitkan Online: 19 Juli 2026

KATA KUNCI

Computational Fluid Dynamics
Heat Distribution
Mesin *Retort*
Sterilisasi Pangan

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 895-0750-0001
E-mail: hisyam@upgris.ac.id

A B S T R A K

Perlakuan panas pada mesin *retort* berperan penting dalam menjamin keamanan mikrobiologis dan memperpanjang masa simpan produk pangan, namun efektivitas sterilisasi sangat dipengaruhi oleh keseragaman distribusi panas di dalam tabung *retort*. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik *heat distribution* dalam tabung mesin *retort* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap jenuh terhadap performa termal sistem. Manfaat penelitian ini adalah menyediakan dasar evaluasi numerik bagi optimasi desain dan kondisi operasi *retort* agar proses sterilisasi berlangsung lebih merata, stabil, dan efisien. Metode yang digunakan berupa simulasi numerik tiga dimensi dengan model turbulensi *realizable k-ε*, *grid* optimum 3.063.355 elemen, variasi temperatur *inlet* 115–123°C, serta kecepatan aliran 2–10 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa temperatur *inlet* merupakan parameter dominan, ditandai peningkatan temperatur permukaan dari 175,546°C menjadi 189,315°C pada kecepatan 2 m/s, serta kenaikan koefisien perpindahan panas dari 14,20 menjadi 16,15 W/m²°C. Ketidakteraturan pada 6 m/s dan 119°C mengindikasikan potensi *cold spot*. Hasil penelitian diharapkan dapat diimplementasikan sebagai acuan perancangan dan optimasi proses sterilisasi pada mesin *retort* untuk mendukung keamanan pangan serta efisiensi energi pada industri makanan

PENDAHULUAN

Perlakuan panas menjadi langkah yang sangat penting dalam industri pangan karena digunakan untuk memastikan keamanan produk melalui metode seperti pengalengan, pasteurisasi, dan sterilisasi, dengan tujuan menekan risiko kontaminasi oleh mikroorganisme patogen [1]. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan dalam sterilisasi termal adalah mesin *retort*, karena mampu meningkatkan keamanan mikrobiologis produk serta memperpanjang masa simpan makanan kemasan secara efisien [2]. Pengelolaan masa simpan produk pangan sangat penting karena terkait langsung dengan perlindungan konsumen, pengurangan limbah pangan, dan mendukung keberlanjutan ekonomi dalam sektor industri pangan [3]. Proses *retort* memiliki keunggulan dalam meningkatkan kestabilan produk pangan selama penyimpanan dan distribusi, khususnya pada produk yang dikemas dalam kaleng, *pouch*, maupun jar kaca. Namun demikian, metode ini juga memiliki keterbatasan apabila sebaran panas di dalam ruang sterilisasi tidak berlangsung secara merata. Kondisi tersebut dapat menimbulkan pemanasan berlebihan pada bagian tertentu, sementara bagian lainnya tidak memperoleh perlakuan panas secara optimal [4]. Kinerja termal pada mesin *retort* ditentukan oleh proses perpindahan panas yang berlangsung di dalam sistem sterilisasi, baik melalui konduksi, konveksi, maupun kontak antara medium pemanas dengan permukaan kemasan atau produk pangan [5].

Pendekatan numerik diperlukan untuk mengkaji fenomena perpindahan panas pada sistem termal industri yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi, karena pengujian eksperimental secara langsung tidak selalu mudah dilakukan. Dengan

dukungan perkembangan komputasi dan metode numerik, karakteristik termal suatu sistem dapat dianalisis secara lebih detail, cepat, dan efisien [6]. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan salah satu pendekatan numerik yang banyak dimanfaatkan karena mampu menggambarkan sebaran temperatur, pola pergerakan fluida, serta fenomena perpindahan panas secara visual maupun kuantitatif. Dalam industri pangan, metode ini sering digunakan untuk menganalisis proses sterilisasi produk dalam kemasan, khususnya dalam mengidentifikasi area yang mengalami laju pemanasan paling lambat atau *slowest heating zone* [7]. Analisis simulasi *heat distribution* dalam tabung mesin *retort* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) diperlukan karena proses sterilisasi termal sangat dipengaruhi oleh keseragaman distribusi temperatur di dalam ruang *retort*, sehingga evaluasi pola pemanasan menjadi penting untuk memastikan seluruh bagian produk memperoleh perlakuan panas yang memadai selama proses berlangsung [8]. Pemodelan numerik dapat digunakan untuk menggambarkan perubahan medan temperatur, kecepatan aliran panas, dan nilai sterilisasi selama proses termal, sehingga CFD berperan sebagai pendekatan analitis untuk memahami perilaku perpindahan panas secara lebih rinci dibandingkan pengamatan eksperimental langsung [9]. Ketidakeragaman distribusi panas dalam sistem sterilisasi perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan terbentuknya area pemanasan paling lambat atau *cold point*, yaitu bagian yang menerima panas lebih rendah dibandingkan area lain dan berpotensi memengaruhi efektivitas sterilisasi produk [10].

Studi ini dilakukan melalui simulasi numerik tiga dimensi dengan menggunakan model SCRP. Penelitian mempertimbangkan variasi waktu pemanasan selama 15 dan 25 menit untuk menilai efektivitas proses sterilisasi. Berdasarkan hasil simulasi, kombinasi profil Variabel *Retort* Temperatur (VRT) sebesar 95°C selama 25 menit yang dilanjutkan dengan 121°C selama 15 menit menghasilkan nilai F sebesar 6,58. Selain itu, skenario tersebut mampu menurunkan nilai pemasakan permukaan (C_s) dan nilai pemasakan rata-rata volume (C_{avg}) masing-masing sebesar 42,95% dan 42,05%, serta memperpendek waktu sterilisasi sebesar 26,07% [11]. Studi numerik ini menganalisis keterkaitan antara perpindahan panas, massa, dan momentum pada proses pembengkakan bahan berbasis selulosa, dengan penerapan pada sistem *retort* untuk kemasan karton. Variasi waktu pemanasan yang digunakan meliputi 20, 40, 60, 80, dan 100 menit guna memperoleh konfigurasi proses yang paling optimal. Berdasarkan hasil simulasi, waktu pemanasan 80 dan 100 menit menunjukkan performa termal yang lebih baik, ditandai dengan peningkatan nilai rata-rata temperatur permukaan hingga 40°C dan 44°C pada makanan dalam kemasan karton [12]. Pengembangan teknologi pengawetan pangan perlu terus dioptimalkan untuk mempertahankan mutu, kandungan gizi, efisiensi energi, serta keberlanjutan lingkungan. Studi ini mengkaji proses inaktivasi spora *Bacillus subtilis* pada sup model dengan pH 6,1 melalui beberapa perlakuan, yaitu *retort* berpengaduk, *retort* statis, serta kombinasi tekanan tinggi dan suhu. Berdasarkan pengujian isothermal, nilai D pada suhu 95°C (D_{95°C}) dan nilai z spora *B. subtilis* dalam sup masing-masing diperoleh sebesar 4,67 menit dan 8,65°C. Model log-linear mampu merepresentasikan kinetika inaktivasi spora secara baik, ditunjukkan oleh nilai R^2_{adj} yang cukup tinggi, yaitu 0,94–0,97. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan pengadukan berfrekuensi tinggi dapat membantu menghasilkan distribusi beban panas yang lebih merata di dalam sup. Selain itu, kombinasi perlakuan tekanan tinggi (*High-Pressure Processing*/HPP) dan suhu ringan menunjukkan efek sinergis yang kuat dalam mereduksi spora *B. subtilis* pada sup model yang sama. Perlakuan HPP pada tekanan 650 MPa dengan suhu 55–65°C selama 10 menit mampu menghasilkan penurunan jumlah spora hingga 4,5 log [13].

Proses termodinamika pada mesin *retort* melibatkan tahap pemanasan awal yang bertujuan untuk mencapai keseragaman suhu di dalam ruang *retort* dengan toleransi $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tersebut berbeda berdasarkan jenis kemasan yang digunakan, yaitu 28 menit pada *retort* yang diisi stoples kaca dan 24 menit pada *retort* yang diisi kantong *retort*. Selanjutnya, waktu proses total pada fase penahanan yang dibutuhkan untuk mencapai nilai sterilisasi F_0 sebesar 3 menit tercatat selama 67 menit pada sampel dalam stoples kaca, sedangkan pada sampel dalam kantong *retort* hanya memerlukan 62 menit. Dengan demikian, terdapat selisih waktu sterilisasi keseluruhan sebesar 9 menit antara kedua jenis kemasan tersebut [4]. Berbagai penelitian terdahulu telah berfokus pada analisis sebaran temperatur, karakteristik penetrasi panas, serta penentuan zona pemanasan lambat dalam sistem *retort* maupun proses sterilisasi pangan [4], [14]. Pada proses sterilisasi dan *retort* pangan, pendekatan numerik telah dimanfaatkan untuk memprediksi profil suhu, menentukan *Slowest Heating Zone* (SHZ), mengevaluasi nilai letalitas termal, serta menyesuaikan program sterilisasi berdasarkan karakteristik produk dan kemasan [9], [15]. Namun, kajian yang secara khusus menganalisis sebaran panas di dalam tabung mesin *retort* sebagai ruang pemanasan utama masih perlu dikembangkan, terutama untuk memahami keseragaman temperatur, potensi zona panas rendah, dan efektivitas perpindahan panas selama proses sterilisasi berlangsung [14], [12], [11]. Oleh karena itu, simulasi CFD pada tabung mesin *retort* menjadi penting untuk memberikan gambaran visual dan kuantitatif mengenai performa distribusi panas, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi desain, pengaturan kondisi operasi, dan peningkatan efisiensi proses sterilisasi pangan. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis distribusi panas di dalam tabung mesin *retort*

menggunakan pendekatan simulasi CFD, sehingga pola sebaran temperatur dapat diamati secara visual dan kuantitatif. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi karakteristik *heat distribution* dalam tabung *retort* untuk mengetahui tingkat keseragaman suhu dan efektivitas perpindahan panas selama proses sterilisasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar evaluasi performa termal mesin *retort*, terutama dalam mengidentifikasi area dengan pemanasan kurang merata serta memberikan rekomendasi awal bagi optimasi desain dan kondisi operasi *retort* yang lebih efisien, aman, dan sesuai untuk proses pengolahan pangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Mesin *retort* merupakan teknologi sterilisasi termal yang digunakan untuk menghasilkan pangan kemasan yang aman secara mikrobiologis melalui pemanasan terkontrol hingga mencapai kondisi steril komersial, *Retort processing* menjadi penting karena mampu menekan risiko *Clostridium botulinum* dan mikroorganisme pembentuk spora yang berbahaya pada produk pangan siap konsumsi [2]. Penelitian Rahayu dkk (2022) menunjukkan bahwa produk nasi siap makan dalam kemasan *retort pouch* membutuhkan pengaturan waktu operasi untuk mencapai nilai F_0 sebesar 4,12 agar memenuhi syarat pangan stabil komersial [16]. Penelitian Fadhillah dkk (2024) menjelaskan bahwa proses sterilisasi lauk berkuah dalam kemasan *retort pouch* umumnya menggunakan suhu ekuivalen 121°C dengan nilai F_0 melebihi 3 menit, serta *air-steam retort* memiliki penetrasi panas lebih baik dibandingkan *water immersion retort* [17].

Nilai sterilisasi atau F_0 menjadi parameter penting dalam proses *retort* karena menunjukkan kecukupan panas yang diterima produk selama proses sterilisasi berlangsung [18]. Penelitian Permana dkk (2021) membuktikan bahwa lama sterilisasi dan penambahan asam sitrat pada produk sambal andaliman kemasan *retort pouch* berpengaruh terhadap kadar air, pH, aktivitas air, viskositas, warna, dan karakteristik sensori produk [19]. Syukri dkk (2025) menjelaskan bahwa proses sterilisasi pangan siap konsumsi harus mampu menjaga keseimbangan antara keamanan pangan, umur simpan, kualitas nutrisi, tekstur, dan penerimaan konsumen [20]. Perkembangan *retort processing* modern tidak hanya diarahkan untuk mencapai sterilitas komersial, tetapi juga untuk mempertahankan mutu produk melalui pemilihan jenis kemasan, media pemanas, dan kondisi operasi yang sesuai [2]. Geometri kemasan pada proses *retort* berpengaruh terhadap pola penetrasi panas karena bentuk wadah dapat menyebabkan perbedaan distribusi temperatur pada produk selama proses pemanasan [21]. Jenis kemasan dan pola gerakan selama *retort processing* juga memengaruhi laju perpindahan panas, waktu proses, dan perubahan sifat nutrisi produk pangan [22].

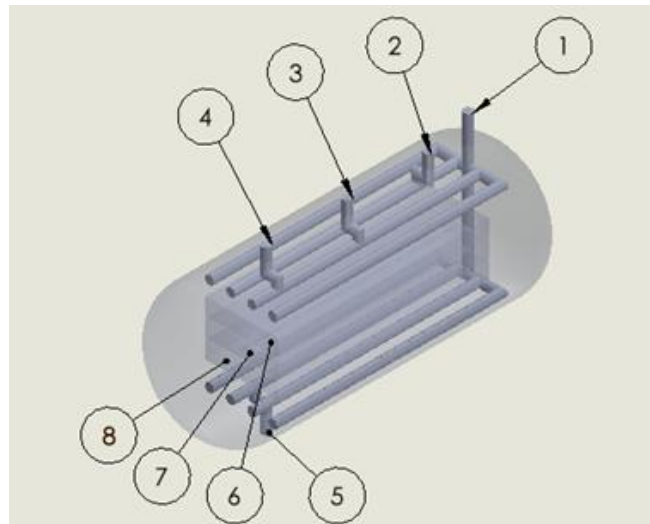
Pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) relevan digunakan dalam analisis mesin *retort* karena mampu menggambarkan fenomena perpindahan panas, pola aliran fluida, dan distribusi temperatur secara visual maupun kuantitatif [14]. Soleymani dkk (2021) menunjukkan bahwa simulasi CFD yang divalidasi secara eksperimental dapat digunakan untuk memprediksi profil temperatur dan menentukan *slowest heating zone* pada produk pangan selama proses termal berlangsung [23]. Rivera dkk (2024) menegaskan bahwa pendekatan komputasional dapat digunakan untuk mengoptimalkan proses sterilisasi termal melalui prediksi beban panas dan ketidakseragaman pemanasan [24]. Teknologi sterilisasi termal modern masih menghadapi tantangan berupa pemanasan yang tidak seragam, sehingga evaluasi distribusi panas tetap diperlukan untuk mengurangi risiko *cold spot* pada produk [25]. Koutchma dan Ezzatpanah (2021) menjelaskan bahwa tantangan utama dalam rekayasa proses pangan modern adalah merancang proses yang aman, efisien, dan mampu mempertahankan mutu produk melalui pengendalian kondisi operasi [26]. Jadhav dan Choudhary (2024) menegaskan bahwa teknologi pengolahan pangan perlu diarahkan pada peningkatan keamanan pangan tanpa mengabaikan kualitas produk, sehingga optimasi parameter proses menjadi hal penting dalam industri pangan [27].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, kajian mengenai proses *retort* umumnya masih berfokus pada karakteristik produk, jenis kemasan, nilai sterilisasi, dan perubahan mutu pangan setelah proses pemanasan [16]. Sementara itu, kajian yang secara khusus mengevaluasi distribusi temperatur di dalam tabung mesin *retort* sebagai ruang utama perpindahan panas masih perlu dikembangkan untuk memahami keseragaman pemanasan dan potensi terbentuknya *cold spot* [14]. Oleh karena itu, studi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan mempertimbangkan variasi temperatur operasi dan kecepatan aliran fluida penting dilakukan sebagai dasar optimasi desain mesin *retort* yang lebih merata, efisien, dan aman untuk proses sterilisasi pangan [23].

METODOLOGI

Model Fisik

Model geometri mesin *retort* dirancang dengan dimensi panjang 1800 mm dan diameter 750 mm. Di dalam ruang *retort*, produk ditempatkan pada tiga susunan rak bertingkat yang disusun secara simetris, seperti ditunjukkan pada Gambar 1, sementara keterangan masing-masing bagian dijelaskan pada Tabel 1. Pada proses pemodelan, stainless steel digunakan sebagai material utama dengan karakteristik termofisik meliputi densitas (ρ) 7,90 kg/m³, panas spesifik (C_p) 500 J/kg.°C, serta konduktivitas termal (k) 15,1 W/m.°C.



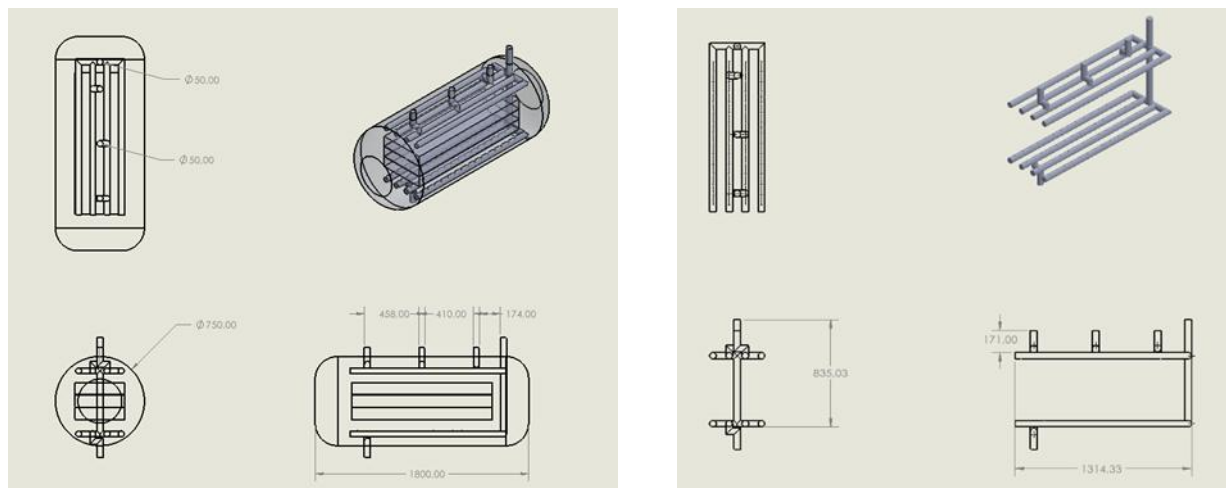
Gambar 1. Gambar Mesin *Retort*

Tabel 1. Bagian Mesin *Retort*

No	Nama Komponen	Keterangan
1	Aliran Pipa Uap Jenuh	Jalur Distribusi Uap Jenuh
2	Aliran Pipa Pembuangan 1	Jalur Pembuangan Fluida 1
3	Aliran Pipa Pembuangan 2	Jalur Pembuangan Fluida 2
4	Aliran Pipa Pembuangan 3	Jalur Pembuangan Fluida 3
5	Aliran Pipa Pembuangan 4	Jalur Pembuangan Fluida 4
6	Rak 1	Dudukan Komponen Produk 1
7	Rak 2	Dudukan Komponen Produk 2
8	Rak 3	Dudukan Komponen Produk 3

Desain Mesin *Retort*

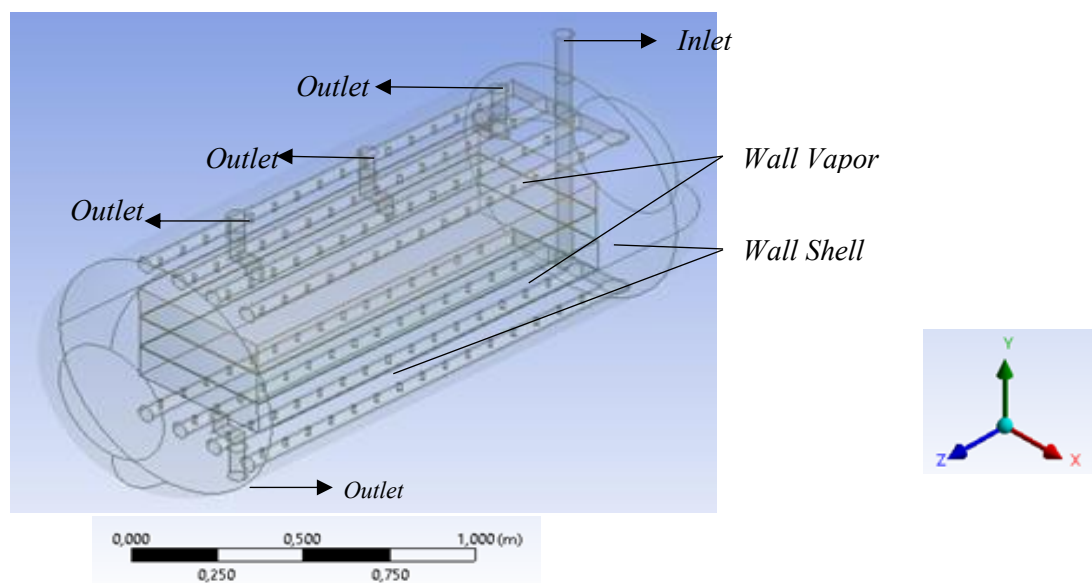
Desain mesin *retort* dalam penelitian ini dikembangkan dari modifikasi rancangan eksperimen sebelumnya dengan mempertimbangkan konfigurasi rak produk serta tata letak saluran keluaran fluida uap. Rincian bentuk dan dimensi mesin *retort* ditampilkan pada Gambar 1, yang mencakup visualisasi tiga dimensi, tampak atas, tampak depan, tampak samping, serta detail pipa saluran uap.



Gambar 2. Desain Mesin Retort

Domain Komputasi

Pada penelitian ini, domain komputasi dibatasi pada ruang fluida di dalam tabung mesin *retort* yang memiliki panjang 1800 mm dan diameter 750 mm. Penempatan kondisi batas disajikan pada Gambar 3, meliputi *inlet*, *outlet*, *wall vapor*, dan *wall shell* yang digunakan sebagai batas numerik dalam simulasi aliran uap jenuh di ruang *retort*. Model turbulensi *realizable k-ε* dipilih karena dinilai stabil dalam memprediksi pola aliran fluida pada geometri tertutup, termasuk tabung *retort*. Model tersebut juga mampu memberikan representasi distribusi kecepatan aliran dan temperatur yang memadai pada analisis perpindahan panas berbasis fluida.



Gambar 3. Domain Komputasi dan Penentuan Kondisi Batas

Persamaan kontinuitas, momentum dan energi saat studi numerik:

Persamaan kontinuitas:

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

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

Persamaan momentum:

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

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

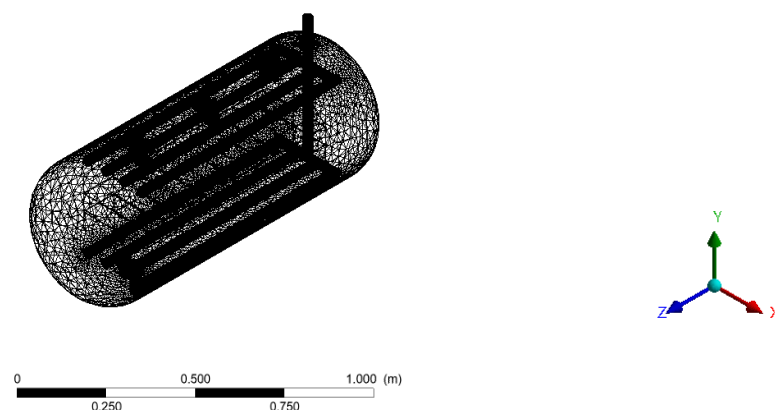
$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} + \frac{\partial uw^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(\rho - \rho_\infty)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

Persamaan Energi:

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

Meshing

Pembuatan *mesh* pada penelitian ini dilakukan dengan menerapkan topologi *automatic* menggunakan elemen *tetrahedral* dan ukuran *cell sizing* sebesar 200 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Proses *meshing* dimaksudkan untuk membagi domain komputasi menjadi sejumlah elemen kecil sehingga penyelesaian numerik dapat merepresentasikan fenomena aliran dan perpindahan panas secara lebih baik, terutama pada bagian *inlet*, *outlet*, dinding tabung, serta rak produk. Pemilihan *mesh* yang digunakan yaitu 3.063.355 dan penilaian kualitas *mesh* melalui nilai *skewness* serta *orthogonal quality*. Simulasi numerik kemudian dilakukan untuk menganalisis sebaran temperatur dan pola aliran fluida di dalam ruang *retort*. Skema *first order upwind* digunakan dalam proses diskretisasi untuk memperoleh solusi yang stabil pada simulasi termal fluida.



Gambar 4. Struktur *Mesh Tetrahedral*

Setup Simulasi

Pengaturan simulasi dilakukan dengan mengacu pada data eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya. Fluida kerja yang digunakan berupa uap jenuh bersuhu 115, 117, 119, 121, dan 123 °C, yang dialirkan melalui pipa *inlet* dan kemudian menyebar ke seluruh bagian pipa pada mesin *retort* dengan kecepatan aliran konstan sebesar 2, 4, 6, 8, 10 m/s. Uap jenuh tersebut berfungsi sebagai media pembawa panas dalam proses pemanasan, dengan sifat termofisik berupa densitas (ρ) sebesar 0,0000122 kg/m³, panas spesifik (C_p) sebesar 2071 J/kg·°C, dan konduktivitas termal (k) sebesar 18,0087 W/m·°C. Pada tahap *Design Modeler*, domain komputasi dibuat pada setiap bagian mesin *retort* yang akan dianalisis. Setelah domain komputasi selesai dibentuk, proses dilanjutkan ke tahap *meshing* dengan menentukan ukuran elemen (*element size*) untuk memperoleh jumlah *grid* yang sesuai dengan kebutuhan simulasi. Tahap selanjutnya dilakukan pada bagian *setup*, dimulai dengan mengaktifkan persamaan energi (*energy equation*) pada menu *model*. Model viskos yang digunakan adalah model turbulensi *k-epsilon* karena sesuai untuk menganalisis aliran fluida turbulen di dalam ruang *retort*. Pada bagian *material*, ditambahkan *water vapor* sebagai fluida kerja dalam simulasi. Selanjutnya, pada bagian *cell zone condition*, zona fluida ditetapkan sebagai *vapor* dan materialnya diatur menjadi *water vapor*. Proses kemudian dilanjutkan ke bagian *boundary condition* untuk menentukan parameter kecepatan aliran dan kondisi termal sesuai dengan variasi pengujian yang telah ditentukan. Pada bagian *reference values*, nilai acuan dihitung dengan memilih opsi *compute from inlet*, sehingga parameter referensi yang digunakan berasal dari kondisi sisi masuk aliran. Selanjutnya, pada bagian *methods*, skema penyelesaian yang digunakan adalah model PISO. Diskretisasi untuk parameter *pressure* hingga *energy*

menggunakan metode *first order upwind*. Setelah pengaturan metode numerik selesai, dilakukan pembuatan *report definition* dalam bentuk *surface report* dengan metode *area-weighted average*. *Report* yang dibuat terdiri atas *pressure average* dan *temperature average*, dengan pemilihan permukaan pada bagian *wall vapor*. Tahap berikutnya adalah proses *initialization* menggunakan *standard initialization* dengan opsi *compute from inlet*. Setelah seluruh pengaturan selesai, simulasi dijalankan melalui menu *run calculation* dengan jumlah iterasi sebanyak 1000. Proses perhitungan dilakukan hingga residual menunjukkan kondisi konvergen, sehingga hasil simulasi dapat digunakan untuk tahap analisis selanjutnya.

Measurement Method

Olah data penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran dan temperatur *inlet* terhadap temperatur permukaan hasil simulasi numerik. Kecepatan aliran divariasikan sebesar 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s, sedangkan temperatur *inlet* digunakan pada 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *inlet* secara umum menyebabkan kenaikan *surface temperature*, sehingga temperatur *inlet* menjadi parameter yang dominan terhadap respons termal sistem. Sebaliknya, variasi kecepatan aliran memberikan pengaruh yang relatif kecil pada temperatur *inlet* yang sama. Temperatur permukaan tertinggi diperoleh pada kecepatan 2 m/s dan temperatur *inlet* 123°C sebesar 189,32°C, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kecepatan 4 m/s dan temperatur *inlet* 115°C sebesar 174,81°C. Nilai *Error* yang sangat kecil, yaitu 0,00014880% hingga 0,00082988%, menunjukkan bahwa hasil simulasi numerik memiliki tingkat ketelitian yang baik dalam merepresentasikan karakteristik perpindahan panas yang dikaji.

Tabel 2. Hasil Olah Data Penelitian

Kecepatan Aliran Numerik (m/s)	Temperature Inlet Numerik (°C)	Surface Temperature Numerik (°C)	Error %
2	115	175,55	0,00019022
2	117	178,95	0,00018624
2	119	182,35	0,00019033
2	121	185,88	0,00018123
2	123	189,32	0,00082988
4	115	174,81	0,00019051
4	117	178,20	0,00018728
4	119	181,60	0,00018129
4	121	184,96	0,00018364
4	123	188,42	0,00077512
6	115	174,86	0,00018935
6	117	178,24	0,00019301
6	119	174,86	0,00054713
6	121	184,98	0,00017887
6	123	188,35	0,00074001
8	115	175,38	0,00014880
8	117	178,02	0,00018627
8	119	181,40	0,00018419
8	121	184,81	0,00018201
8	123	188,23	0,00073293
10	115	175,38	0,00018326
10	117	178,65	0,00019425
10	119	182,19	0,00017674
10	121	185,47	0,00019922
10	123	189,24	0,00020327

Reduksi Data Numerik

Kondisi operasi simulasi mesin *retort* mengacu pada arah aliran *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 8:

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

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

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

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

Uji Grid

Uji independensi *grid* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi CFD telah mencapai kondisi yang stabil dan tidak lagi bergantung pada jumlah elemen *mesh* yang digunakan. Dalam penelitian ini, empat variasi jumlah *grid* diterapkan, yaitu 1.145.681, 2.073.340, 3.063.355, dan 4.027.933 elemen. Seluruh variasi *mesh* diuji pada kondisi operasi yang sama, dengan kecepatan aliran 2 m/s dan temperatur *inlet* 121°C. Penggunaan kondisi yang sama bertujuan agar perbedaan hasil simulasi hanya dipengaruhi oleh tingkat kerapatan *grid*. Parameter yang diamati dalam pengujian ini adalah temperatur permukaan, karena dapat menunjukkan respons perpindahan panas pada permukaan domain yang dianalisis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *grid* dengan jumlah 3.063.355 elemen menghasilkan temperatur permukaan sebesar 180,759°C, sedangkan *grid* dengan jumlah 4.027.933 elemen menghasilkan temperatur permukaan sebesar 180,279°C. Selisih kedua nilai tersebut relatif kecil, yaitu sekitar 0,03%, sehingga *grid* 3.063.355 elemen dinilai telah cukup merepresentasikan hasil yang independen terhadap *grid*. Dengan demikian, *grid* tersebut dipilih sebagai konfigurasi optimum untuk proses validasi dan pengambilan data numerik pada tahap selanjutnya.

Tabel 3. Data Uji Grid

<i>Grid Number</i>	<i>Velocity (m/s)</i>	<i>Temperature Inlet (°C)</i>	<i>Temperature Surface (°C)</i>
1.145.681	2	121	181,27
2.073.340	2	121	181,284
3.063.355	2	121	180,759
4.027.933	2	121	180,279

Validasi

Kesesuaian model numerik terhadap hasil eksperimen dievaluasi melalui proses validasi. Simulasi dilakukan menggunakan *grid* hasil uji independensi sebanyak 3.063.355 elemen, dengan kecepatan aliran dijaga tetap sebesar 2 m/s. Pengujian dilakukan pada empat variasi temperatur *inlet*, yaitu 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Temperatur permukaan digunakan sebagai parameter pembanding karena berkaitan langsung dengan sebaran panas pada mesin *retort*. Perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen dihitung menggunakan persentase *Error* untuk mengetahui tingkat penyimpangan

model terhadap kondisi aktual. Hasil validasi menunjukkan bahwa nilai *Error* pada seluruh variasi temperatur tergolong kecil. *Error* terendah diperoleh pada temperatur *inlet* 123°C, yaitu sebesar 0,00002099%. Berdasarkan hasil tersebut, model numerik dapat dinyatakan mampu merepresentasikan kondisi termal mesin *retort* dengan baik.

Tabel 4. Hasil Validasi

<i>Temperature Inlet Experimental Study (°C)</i>	<i>Temperature Inlet Numerical Study (°C)</i>	<i>Surface Temperature Experimental Study (°C)</i>	<i>Surface Temperature Numerical Study (°C)</i>	<i>Error %</i>
115	115	173,12	172,58	0,000 03135
117	117	176,48	175,93	0,000 03086
121	121	183,34	182,60	0,000 04031
123	123	186,24	185,85	0,000 02099

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Temperatur dalam Tabung Mesin Retort

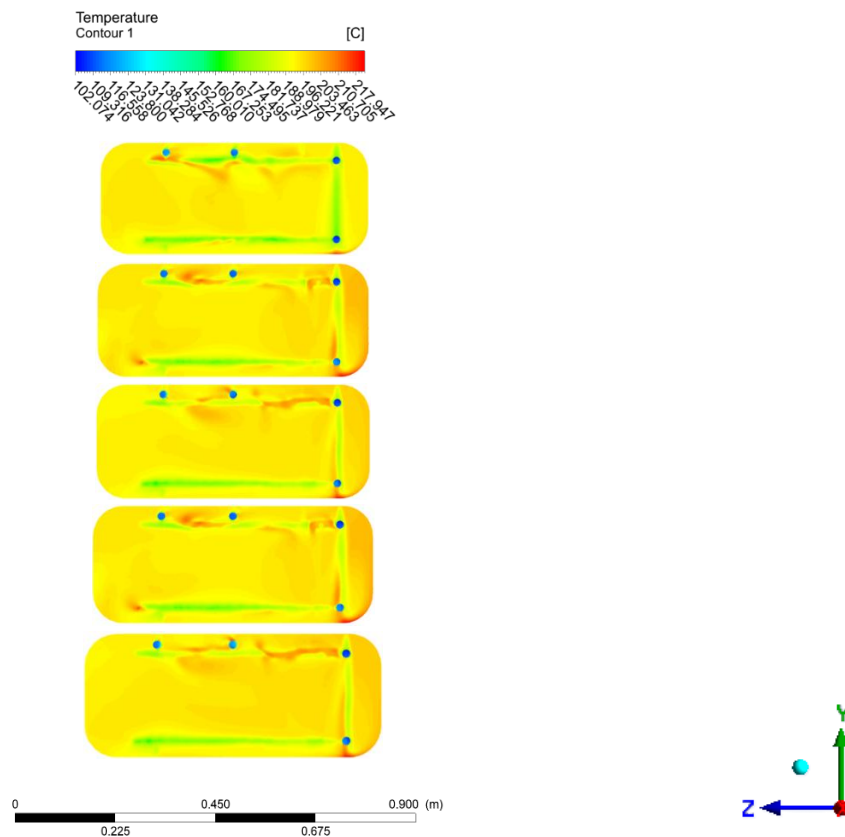
Berdasarkan hasil simulasi *heat distribution* dalam tabung mesin *retort* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD), analisis distribusi temperatur dilakukan dengan jumlah *grid* tetap sebesar 3.063.355 elemen, variasi temperatur operasi 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C, serta variasi kecepatan aliran *inlet* sebesar 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s. Penggunaan jumlah *grid* tetap bertujuan untuk menjaga konsistensi hasil numerik, sehingga perubahan temperatur di dalam tabung *retort* dapat dianalisis berdasarkan pengaruh variasi temperatur operasi dan kecepatan aliran uap. Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi menyebabkan kenaikan *surface temperature* pada tabung *retort*. Pada kecepatan 2 m/s, *surface temperature* meningkat dari 175,546°C pada temperatur operasi 115°C menjadi 189,315°C pada temperatur operasi 123°C. Pola ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur operasi, semakin besar energi termal yang dibawa oleh uap panas, sehingga kemampuan fluida dalam memanaskan ruang *retort* juga meningkat.

Variasi kecepatan aliran *inlet* turut memengaruhi pola penyebaran temperatur di dalam tabung *retort*. Pada kecepatan rendah, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, aliran uap cenderung memiliki momentum yang lebih kecil sehingga proses penyebaran panas berlangsung lebih lambat. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan perbedaan temperatur antara area yang dekat dengan *inlet* dan area yang jauh dari jalur utama aliran uap. Sebaliknya, pada kecepatan yang lebih tinggi, yaitu 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s, momentum aliran meningkat sehingga uap panas lebih mampu menjangkau ruang tabung secara lebih luas. Dengan demikian, peningkatan kecepatan aliran dapat membantu mempercepat distribusi panas, meskipun pada kondisi tertentu juga dapat menimbulkan pola aliran yang tidak stabil, seperti pusaran atau separasi aliran.

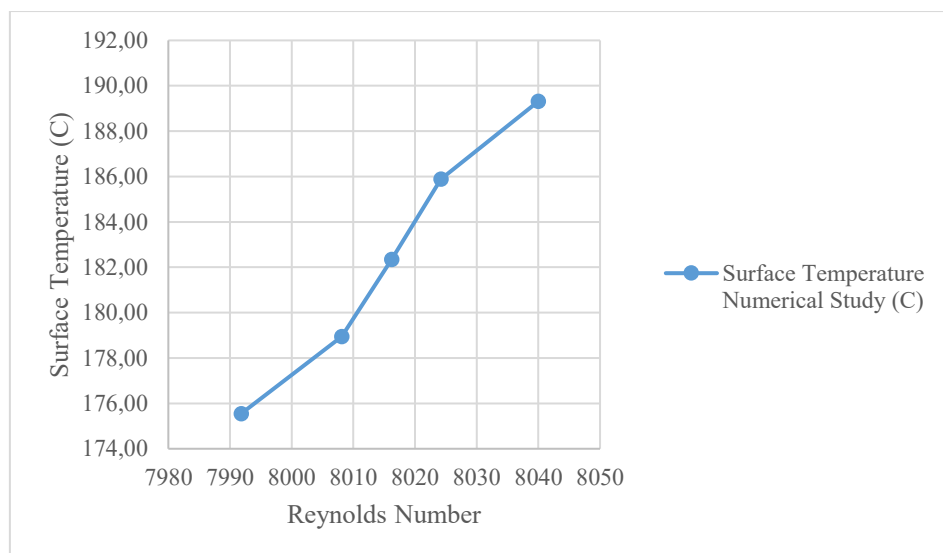
Dari sisi perpindahan panas, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai koefisien perpindahan panas cenderung meningkat seiring kenaikan temperatur operasi. Pada temperatur 115°C, nilai koefisien perpindahan panas berada pada kisaran 14,02–14,15 W/m²°C, sedangkan pada temperatur 123°C meningkat hingga sekitar 15,88–16,15 W/m²°C. Peningkatan ini menunjukkan bahwa temperatur operasi yang lebih tinggi mampu memperbesar intensitas perpindahan panas dari fluida uap menuju permukaan tabung *retort*. Selain itu, laju perpindahan panas juga meningkat dari 1320 W/m² pada temperatur 115°C menjadi 1371 W/m² pada temperatur 123°C. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur operasi dapat mendukung proses pemanasan yang lebih cepat dan membantu tercapainya kondisi sterilisasi yang lebih efektif.

Namun, hasil simulasi juga memperlihatkan adanya ketidakteraturan distribusi temperatur pada kondisi tertentu, khususnya pada kecepatan 6 m/s dan temperatur operasi 119°C, di mana *surface temperature* tercatat sebesar 174,863°C, lebih rendah dibandingkan kondisi temperatur 117°C pada kecepatan yang sama, yaitu 178,238°C. Penurunan ini dapat mengindikasikan adanya ketidakseragaman distribusi panas di dalam tabung *retort*. Fenomena tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh perlambatan aliran, terbentuknya pusaran (*vortex*), separasi aliran, atau adanya area yang tidak menerima

suplai panas secara optimal. Area dengan temperatur yang lebih rendah ini berpotensi menjadi *cold spot*, yaitu zona yang perlu diperhatikan karena dapat menghambat tercapainya proses sterilisasi yang merata.



Gambar 5. Distribusi Temperatur Mesin *Retort* Variasi Temperatur Operasi 115-123°C Serta Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s



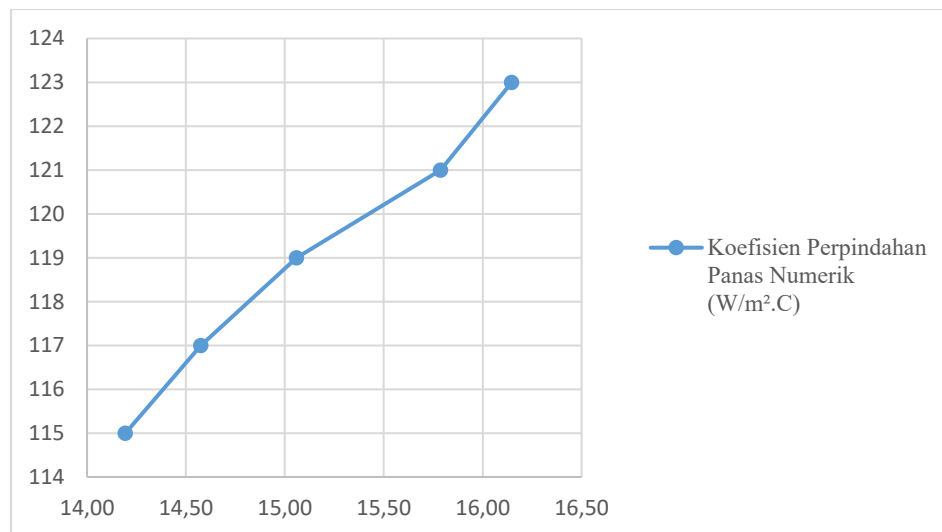
Gambar 6. Hasil Perbandingan Variasi Temperatur Operasi

Hasil pengaruh variasi temperatur operasi terhadap temperatur permukaan berdasarkan simulasi numerik ditunjukkan pada Gambar 6. Pengujian dilakukan menggunakan *grid* optimum sebesar 3.063.355 elemen dengan kecepatan aliran 2 m/s. Variasi temperatur *inlet* yang digunakan adalah 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C. Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan temperatur *inlet* menyebabkan peningkatan nilai Reynolds number dan temperatur permukaan secara konsisten. Pada temperatur *inlet* 115°C, nilai Reynolds number berada pada kisaran 7991 dengan temperatur

permukaan sebesar $175,5^{\circ}\text{C}$. Pada temperatur *inlet* 117°C , nilai Reynolds number meningkat menjadi sekitar 8008 dengan temperatur permukaan sebesar $178,9^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya, pada temperatur *inlet* 119°C , nilai Reynolds number mencapai sekitar 8016 dengan temperatur permukaan sebesar $182,3^{\circ}\text{C}$.

Peningkatan temperatur permukaan yang lebih tinggi terjadi pada temperatur *inlet* 121°C dan 123°C . Pada temperatur *inlet* 121°C , nilai Reynolds number berada pada kisaran 8024 dengan temperatur permukaan sebesar $185,9^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, pada temperatur *inlet* 123°C , nilai Reynolds number mencapai sekitar 8040 dengan temperatur permukaan tertinggi sebesar $189,3^{\circ}\text{C}$. Pola peningkatan ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur *inlet* memberikan pengaruh terhadap peningkatan energi panas yang dibawa oleh uap jenuh. Semakin tinggi temperatur operasi, energi termal yang tersedia untuk proses perpindahan panas semakin besar, sehingga temperatur permukaan di dalam ruang *retort* mengalami peningkatan.

Secara umum, hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa temperatur operasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa termal mesin *retort*. Kenaikan Reynolds number yang diikuti oleh peningkatan temperatur permukaan mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas berlangsung lebih intensif pada temperatur operasi yang lebih tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengaturan temperatur *inlet* berperan penting dalam mempercepat peningkatan temperatur permukaan serta mendukung distribusi panas yang lebih efektif di dalam ruang sterilisasi.



Gambar 7. Grafik Koefisien Perpindahan Panas

Berdasarkan Gambar 7, hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa nilai koefisien perpindahan panas mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya temperatur operasi. Pengujian dilakukan menggunakan *grid* optimum sebesar 3.063.355 elemen dengan kecepatan aliran 2 m/s. Variasi temperatur *inlet* yang digunakan yaitu 115°C , 117°C , 119°C , 121°C , dan 123°C . Dari grafik terlihat bahwa pada temperatur *inlet* 115°C , nilai koefisien perpindahan panas numerik berada sekitar $14,20 \text{ W/m}^2.\text{C}$. Nilai tersebut kemudian meningkat pada temperatur 117°C menjadi sekitar $14,58 \text{ W/m}^2.\text{C}$, pada temperatur 119°C menjadi sekitar $15,05 \text{ W/m}^2.\text{C}$, pada temperatur 121°C menjadi sekitar $15,78 \text{ W/m}^2.\text{C}$, dan mencapai nilai tertinggi pada temperatur 123°C yaitu sekitar $16,15 \text{ W/m}^2.\text{C}$.

Peningkatan koefisien perpindahan panas tersebut menunjukkan bahwa temperatur operasi berpengaruh terhadap kemampuan fluida dalam memindahkan panas ke permukaan ruang *retort*. Semakin tinggi temperatur *inlet*, energi panas yang dibawa oleh fluida juga semakin besar, sehingga proses perpindahan panas secara konveksi berlangsung lebih intensif. Kondisi ini menyebabkan laju perpindahan panas dari fluida menuju permukaan meningkat. Dengan demikian, hasil pada Gambar 7 menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi dapat memperbaiki efektivitas perpindahan panas di dalam mesin *retort*, sehingga mendukung proses pemanasan yang lebih optimal.

Pengaruh Pola Aliran Uap Jenuh terhadap Distribusi Panas

Berdasarkan hasil simulasi *heat distribution* dalam tabung mesin *retort* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD), pola aliran uap jenuh memiliki pengaruh penting terhadap distribusi panas di dalam ruang *retort*. Simulasi dilakukan menggunakan jumlah *grid* tetap sebesar 3.063.355 elemen, variasi temperatur operasi 115°C , 117°C , 119°C , 121°C , dan 123°C , serta variasi kecepatan aliran *inlet* sebesar 2, 4, 6, 8, dan 10 m/s. Uap jenuh dialirkan melalui pipa *inlet* menuju

ruang tabung *retort*, kemudian menyebar mengikuti bentuk geometri tabung sebelum keluar melalui saluran *outlet*. Pola pergerakan uap tersebut menentukan seberapa efektif energi panas dapat menjangkau seluruh bagian ruang *retort*. Oleh karena itu, distribusi panas tidak hanya dipengaruhi oleh besar temperatur operasi, tetapi juga oleh arah aliran, kecepatan aliran, serta kemampuan uap dalam mengisi ruang-ruang yang jauh dari jalur utama aliran.

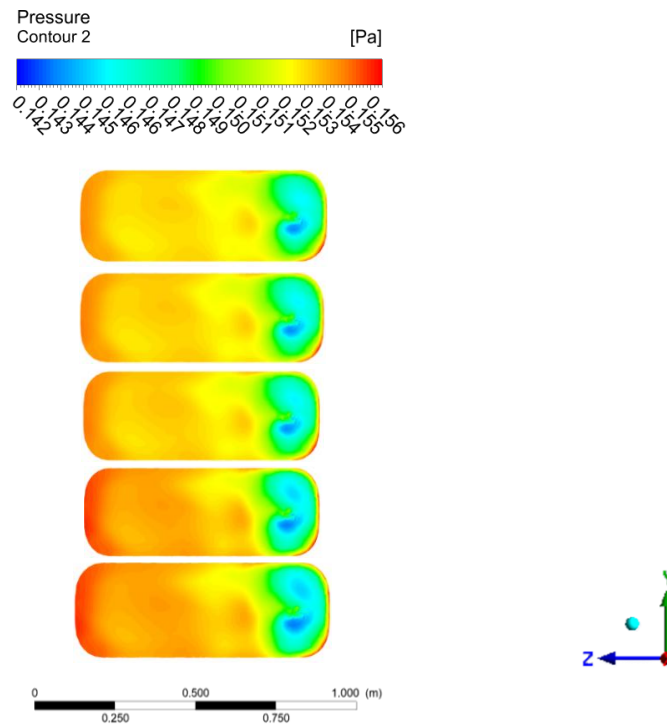
Pada kecepatan rendah, yaitu 2 m/s dan 4 m/s, pola aliran uap cenderung memiliki momentum yang lebih kecil sehingga penyebaran panas berlangsung lebih lambat. Kondisi ini menyebabkan energi termal dari uap lebih dominan terkonsentrasi pada area yang dekat dengan *inlet*, sedangkan area yang jauh dari aliran masuk membutuhkan waktu lebih lama untuk menerima panas. Hal tersebut terlihat dari nilai *surface temperature* yang meningkat seiring kenaikan temperatur operasi. Pada kecepatan 2 m/s, *surface temperature* meningkat dari 175,546°C pada temperatur operasi 115°C menjadi 189,315°C pada temperatur operasi 123°C. Peningkatan ini menunjukkan bahwa temperatur operasi yang lebih tinggi mampu meningkatkan energi panas yang dibawa uap, tetapi pemerataan panas tetap bergantung pada kemampuan aliran uap untuk menyebar ke seluruh bagian tabung.

Ketika kecepatan aliran dinaikkan menjadi 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s, momentum uap jenuh meningkat sehingga aliran mampu bergerak lebih kuat dan menjangkau area tabung secara lebih luas. Peningkatan kecepatan ini dapat mempercepat proses distribusi panas karena uap memiliki gaya dorong yang lebih besar untuk melewati ruang *retort* dan membawa energi termal menuju area yang lebih jauh dari *inlet*. Namun, kecepatan aliran yang lebih tinggi juga dapat menyebabkan pola aliran menjadi lebih kompleks. Aliran uap yang membentur dinding tabung atau mengalami perubahan arah menuju *outlet* berpotensi membentuk pusaran (*vortex*), separasi aliran, dan daerah perlambatan. Fenomena tersebut dapat menyebabkan distribusi panas menjadi tidak seragam, terutama pada bagian yang berada di belakang hambatan aliran atau pada area yang jauh dari jalur utama pergerakan uap.

Pengaruh pola aliran uap terhadap distribusi panas juga dapat diamati dari perubahan tekanan di dalam tabung *retort*. Pada kecepatan 2 m/s, nilai *pressure drop* relatif kecil, yaitu sekitar 0,328–0,329 Pa, sedangkan pada kecepatan 10 m/s meningkat hingga sekitar 4,67–4,70 Pa. Peningkatan *pressure drop* ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran, semakin besar perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi masuk dan sisi keluar aliran. Perbedaan tekanan tersebut menandakan adanya peningkatan energi kinetik dan interaksi fluida dengan dinding tabung. Dalam konteks distribusi panas, kondisi ini dapat memperkuat penyebaran uap panas, tetapi juga dapat memunculkan ketidakteraturan aliran pada area tertentu.

Hasil simulasi juga menunjukkan adanya ketidakteraturan pada kondisi kecepatan 6 m/s dan temperatur operasi 119°C, di mana *surface temperature* tercatat sebesar 174,863°C, lebih rendah dibandingkan kondisi temperatur 117°C pada kecepatan yang sama, yaitu 178,238°C. Dengan demikian, pola aliran uap jenuh berperan penting dalam menentukan keberhasilan distribusi panas di dalam tabung mesin *retort*. Temperatur operasi yang tinggi memang meningkatkan energi termal fluida, tetapi pemerataan panas sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran uap, terutama kecepatan *inlet*, arah penyebaran aliran, serta kemungkinan terbentuknya pusaran dan daerah stagnasi. Kecepatan aliran yang terlalu rendah dapat menyebabkan penyebaran panas berlangsung lambat, sedangkan kecepatan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan ketidakteraturan aliran. Oleh karena itu, pengaturan kecepatan uap jenuh dan temperatur operasi perlu dioptimalkan agar distribusi panas di dalam tabung *retort* berlangsung lebih merata, stabil, dan efektif untuk mendukung proses sterilisasi produk pangan.

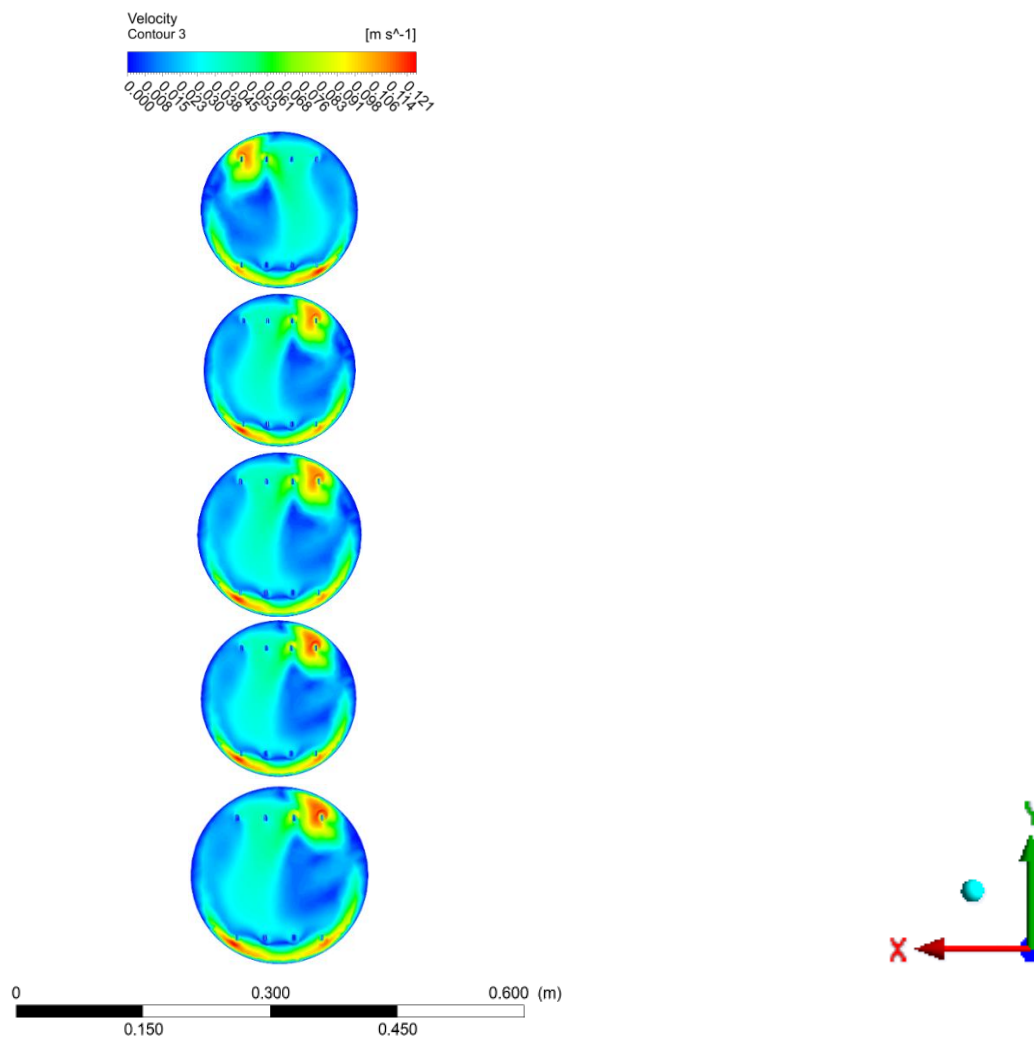
Berdasarkan Gambar 10, hubungan antara bilangan Reynolds dan perbedaan tekanan (ΔP) menunjukkan bahwa hasil simulasi numerik dengan *grid* optimum sebesar 3.063.355 elemen memiliki perubahan tekanan yang relatif kecil pada variasi temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 119°C, 121°C, dan 123°C. Nilai bilangan Reynolds berada pada kisaran sekitar 7990 hingga 8040, sedangkan nilai ΔP cenderung berada di sekitar 0,329 Pa. Pola grafik memperlihatkan adanya kecenderungan peningkatan ΔP seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds, namun perubahan yang terjadi sangat kecil dan tidak signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *inlet* dapat memengaruhi karakteristik aliran fluida di dalam ruang *retort* melalui perubahan sifat termofisik fluida dan bilangan Reynolds, tetapi pengaruhnya terhadap perbedaan tekanan masih relatif rendah.



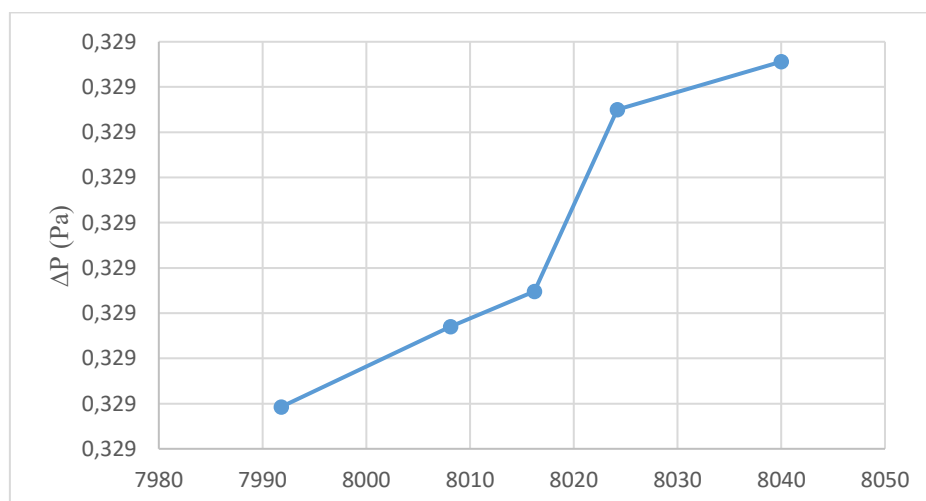
Gambar 8. Kontur Distribusi Tekanan Mesin *Retort* Variasi Temperatur Operasi 115-123°C Serta Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s

Distribusi kecepatan aliran pada mesin *retort* menunjukkan pola sebaran yang relatif stabil pada setiap variasi temperatur operasi, namun masih terdapat perbedaan kecepatan pada beberapa area di dalam ruang *retort*. Hasil kontur velocity menunjukkan bahwa nilai kecepatan aliran berada pada kisaran sekitar 0 hingga 0,121 m/s. Area dengan kecepatan rendah ditunjukkan oleh warna biru, sedangkan area dengan kecepatan lebih tinggi ditunjukkan oleh warna hijau, kuning, hingga merah. Pada gambar terlihat bahwa kecepatan aliran yang lebih tinggi cenderung muncul di sekitar area masuknya aliran serta pada sisi bawah ruang *retort*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa fluida panas bergerak lebih intensif pada bagian tersebut, sementara area tengah ruang *retort* didominasi oleh warna biru hingga hijau muda yang menandakan kecepatan aliran relatif lebih rendah.

Pada Gambar 9, hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa variasi kecepatan aliran memengaruhi pola sirkulasi fluida panas di dalam ruang *retort*. Kecepatan aliran yang lebih tinggi dapat membantu mempercepat perpindahan panas menuju produk atau rak. Namun, distribusi kecepatan yang belum merata masih berpotensi membentuk zona aliran rendah atau *dead zone*, terutama pada area tengah yang memiliki kecepatan aliran lebih rendah. Oleh karena itu, pemerataan kecepatan aliran penting untuk mendukung distribusi panas yang lebih optimal di dalam mesin *retort*.



Gambar 9. Kontur Distribusi Velocity Mesin *Retort* diberbagai Variasi Temperatur Operasi 115-123°C Serta Variasi Kecepatan Aliran 2 m/s



Gambar 10. Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dan Perbedaan Tekanan

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, simulasi *heat distribution* pada tabung mesin *retort* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menunjukkan bahwa variasi temperatur operasi dan kecepatan aliran *inlet* berpengaruh terhadap distribusi panas, pola aliran, tekanan, serta efektivitas perpindahan panas di dalam ruang *retort*. Penggunaan *grid* optimum

sebesar 3.063.355 elemen menghasilkan simulasi yang stabil, dengan kecenderungan bahwa peningkatan temperatur *inlet* dari 115°C hingga 123°C menyebabkan kenaikan temperatur permukaan, terutama pada kecepatan 2 m/s yang meningkat dari 175,546°C menjadi 189,315°C. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur operasi menjadi parameter dominan dalam peningkatan energi termal dan intensitas perpindahan panas. Variasi kecepatan aliran juga memengaruhi pemerataan panas, di mana kecepatan rendah cenderung memperlambat penyebaran uap, sedangkan kecepatan lebih tinggi membantu memperluas jangkauan aliran, namun berpotensi menimbulkan pusaran, separasi aliran, dan daerah stagnasi. Ketidakteraturan pada kondisi 6 m/s dan 119°C dengan temperatur permukaan 174,863°C mengindikasikan kemungkinan terbentuknya *cold spot*. Selain itu, koefisien perpindahan panas meningkat dari sekitar 14,20 W/m²°C pada 115°C menjadi 16,15 W/m²°C pada 123°C, sedangkan *pressure drop* meningkat seiring bertambahnya kecepatan aliran. Dengan demikian, pengaturan temperatur operasi dan kecepatan aliran perlu dioptimalkan agar distribusi panas dalam mesin *retort* berlangsung lebih merata, stabil, dan efektif untuk mendukung proses sterilisasi produk pangan. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar evaluasi performa termal serta dasar teknis awal untuk pengembangan dan optimasi mesin *retort*.

Penelitian selanjutnya disarankan mengoptimalkan geometri internal mesin *retort* melalui variasi konfigurasi dan jarak antar rak serta penambahan *baffle* atau *flow guide* untuk mengurangi *vortex*, separasi aliran, daerah stagnasi, dan potensi *cold spot*. Evaluasi dapat difokuskan pada kondisi 6 m/s dan 119°C yang menghasilkan temperatur permukaan 174,863°C. Pengambilan data distribusi temperatur yang lebih akurat dan efektif memerlukan sensor termokopel yang terintegrasi dengan sistem DAQ (*Data Acquisition*). Selain itu, penggunaan kamera termal FLIR dapat diterapkan untuk memvisualisasikan distribusi temperatur secara menyeluruh sehingga karakteristik dan fenomena termal lebih mudah dianalisis serta proses pengoperasian dan pengambilan data menjadi lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Chiozzi, S. Agriopoulou, and T. Varzakas, “applied sciences Advances , Applications , and Comparison of Thermal Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 4, p. 2202, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12042202>.
- [2] P. Simoneth, J. Sneh, 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] F. Tarlak, “The Use of Predictive Microbiology for the Prediction of the,” *Foods*, vol. 12, no. 24, p. 4461, 2023.
- [4] E. Raits, L. Pinte, A. Kirse-Ozolins, and S. Muizniece-Brasava, “A Case-study: Temperature Distribution and Heat Penetration in Steam-air *Retort*, Using Glass Jars and *Retort* Pouches *,” *sciendo*, vol. 46, no. 341, 2021, doi: 10.2478/plua-2021-00.
- [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. Teknol.*, vol. 43, no. 8, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1002/ceat.201900672.
- [6] Ł. Łach, “Advances in Numerical Modeling for Heat Transfer and Thermal Management : A Review of Computational Approaches and Environmental Impacts,” *energies*, vol. 18, no. 5, p. 1302, 2025.
- [7] 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.
- [8] L. F. Cardona, A. Giraldo, O. Alberto, O. Gonz, P. Nel, and A. Torres, “Case Studies in Thermal Engineering Venting stage experimental study of food sterilization process in a vertical *retort* using temperature distribution tests and energy balances,” vol. 22, no. April, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100736.
- [9] W. Wang, “Simulation and optimization of the thermal sterilization process of puree cans using the production of chestnut puree as an example,” *Frontiers (Boulder).*, vol. 14, no. April, pp. 1–11, 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1135700.
- [10] 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, p. 35, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/pr11010035>.
- [11] L. D. Yongxian J, Lei W, Qian M, Qun W, Leilei W, Aiquan J, Jingpeng L, “3D modeling and optimization of batch sterilization for irregularly shaped spicy chicken *retort* pouches,” *Food Bioprod. Proc.*, vol. 154, no. 2, pp. 282–294, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.09.018>.
- [12] 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.
- [13] M. Baris, D. Skipnes, T. Mari, and O. Lekang, “Comparison of spore inactivation with novel agitating *retort* , static *retort* and combined high pressure-temperature treatments,” *Food Control*, vol. 60, pp. 484–492, 2026, doi: 10.1016/j.foodcont.2015.08.033.
- [14] A. Szpicer, W. Bińkowska, I. Wojtasik, K. Salih, M. Salih, and A. Pótorak, “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.
- [15] R. Padmavati and C. Anandharamakrishnan, “Computational Fluid Dynamics Modeling of the Thermal Processing of Canned Pineapple Slices and Titbits,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 882–895, 2013, doi: 10.1007/s11947-012-0892-8.
- [16] S. Rahayu, T. Muhandri, D. Hunaefi, P. Fuhrmann, and I. Smetanska, “Ready-To-Eat Rice in *Retort* Pouch Packaging as an Alternative Emergency Food Product,” *Food Technol. Ind.*, vol. 33, no. 2, pp. 129–136, 2022.
- [17] A. A. Fadhillah, F. S. Budi, and H. D. Kusumaningrum, “Karakteristik dan Pengaruh Proses Sterilisasi terhadap Mutu Fisik Produk Lauk Berkuah dalam Kemasan *Retort* Pouch : Tinjauan Sistematis,” vol. 17, no. 3, pp. 484–500, 2024.
- [18] A. Sari, A. Kusumaningrum, A. Nurhikmat, and A. Susanto, “Estimation of Sterilization Value using General Method and Ball Formula for Beef Rendang in *Retort* Pouch,” vol. 10, no. 5, pp. 2118–2125, 2020.
- [19] L. Permana, H. A. Pangastuti, V. Fitrian, D. T. Areta, and A. Wahyuningtyas, “Pengembangan Produk Sambal Andaliman (*Zanthoxylum acanthopodium* DC) Berkemasan *Retort* pouch : Studi Karakteristik,” vol. 10, no. 2, pp. 46–52, 2021.
- [20] D. Syukri *dkk.*, “Trends and Innovations in Sterilization of Ready-to-Eat Food Products : Challenges and Future Directions,” 2025, doi: 10.3844/ojbsci.2025.373.382.
- [21] C. H. Stowe, S. P. Bangar, W. S. Whiteside, R. L. Thomas, and S. Birla, “Effects of Semi- - Rigid Plastic Trays Geometry on Heat Penetration in a *Retort* Process as Demonstrated via Heat Mapping,” *Food Process Eng.*, vol. 48, pp. 1–12, 2025, doi: 10.1111/jfpe.70101.
- [22] S. Whiteside, “Original article Effect of *retort* processing , containers and motion types on digestibility of black beans (*Phaseolus vulgaris* L .) starch,” *Food Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 916–924, 2024, doi: 10.1111/ijfs.16850.
- [23] M. Soleymani and S. Yousef, “CFD simulation and experimental validation of in-container thermal processing in Fesenjan stew,” *Food Sci. Nutr.*, vol. 9, no. December 2020, pp. 1079–1087, 2020, doi: 10.1002/fsn3.2083.
- [24] J. Rivera, M. Gratz, H. Jaeger, and F. Schottroff, “Characterization and optimization of continuous ohmic thermal sterilization based on the development of a predictive computational toolbox,” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 96, no. July, p. 103792, 2024, doi: 10.1016/j.ifset.2024.103792.
- [25] A. Soni, J. Smith, A. Thompson, and G. Brightwell, “Trends in Food Science & Technology Microwave-induced thermal sterilization- A review on history , technical progress , advantages and challenges as compared to the conventional methods,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 97, no. November 2019, pp. 433–442, 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2020.01.030.
- [26] T. Koutchma and H. Ezzatpanah, “Frontiers : Current Challenges in Food Process Design and Engineering,” vol. 1, no. November, pp. 1–4, 2021, doi: 10.3389/frfst.2021.780013.
- [27] H. B. Jadhav and P. Choudhary, “Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality : a review,” *Discov. Food*, vol. 4, p. 20, 2024, doi: 10.1007/s44187-024-00089-5.