Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Numerical Study of the Thermal Performance of a Food Retort Machine Considering Grid Resolution and Operating Temperature

Ridho Ardiansyah [1], Hisyam Ma'mun [2], Muhamad Safi'i [3*]

[1,2,3)] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Informatics, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Central Java 50232, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Dikirim 01 Juni 2026

Direvisi dari 17 Juni 2026

Diterima 07 Juni 2026

Dipublikasi 30 Juni 2026

***Keywords*:**

Computational Fluid Dynamics (CFD),
mesin retort,
distribusi temperatur,
grid independence,
sterilisasi termal,s
terilisasi pangan.

DOI:

doi.org/10.55377/jurutera.v13i01.14532

A B S T R A C T

Thermal sterilization processes in the food industry require uniform heat distribution so that the microbiological safety of products can be achieved without causing excessive energy consumption. A retort machine is one of the sterilization technologies widely used because it can extend the shelf life of packaged food products. This study aims to numerically evaluate the thermal performance of a retort machine by considering the effects of grid number and operating temperature on temperature distribution, pressure, and heat transfer coefficient. The benefit of this study is to provide a technical basis for selecting the optimum grid and effective operating temperature to support an accurate, stable, and efficient sterilization process. The significance of this study lies in the need of the food industry for a thermal analysis method that can reduce dependence on direct experiments, which require substantial cost, time, and resources. The method used in this study is Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation with the realizable k-ε turbulence model, grid variations ranging from 1,145,681 to 4,027,933 elements, a flow velocity of 2 m/s, and inlet temperature variations of 115°C, 117°C, 121°C, and 123°C. The results show that the grid with 3,063,355 elements is the optimum grid because the temperature change compared to the higher grid is not significant. An increase in inlet temperature also increases the surface temperature and heat transfer coefficient. The operating temperature of 121°C showed stable and effective thermal performance based on the CFD simulation results, so it can be considered as an initial recommendation in optimizing the thermal performance of the retort. However, its application on an industrial scale still requires further study of the F0 value, sterilization time, product quality, and energy consumption.

A B S T R A K

Proses sterilisasi termal pada industri pangan memerlukan distribusi panas yang merata agar keamanan mikrobiologis produk dapat tercapai tanpa menyebabkan penggunaan energi yang berlebihan. Mesin retort merupakan salah satu teknologi sterilisasi yang banyak digunakan karena mampu memperpanjang masa simpan produk pangan dalam kemasan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji performa termal mesin retort secara numerik dengan mempertimbangkan pengaruh jumlah grid dan temperatur operasi terhadap distribusi temperatur, tekanan, serta koefisien perpindahan panas. Manfaat penelitian ini adalah memberikan dasar teknis dalam pemilihan grid optimum dan temperatur operasi yang efektif untuk mendukung proses sterilisasi yang akurat, stabil, dan efisien. Kepentingan penelitian ini terletak pada kebutuhan industri pangan terhadap metode analisis termal yang mampu mengurangi ketergantungan pada eksperimen langsung yang membutuhkan biaya, waktu, dan sumber daya besar. Metode yang digunakan adalah simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan model turbulensi realizable k-ε, variasi jumlah grid 1.145.681 hingga 4.027.933 elemen, kecepatan aliran 2 m/s, serta variasi temperatur inlet 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa grid 3.063.355 elemen merupakan grid optimum karena perubahan temperatur terhadap grid yang lebih tinggi tidak signifikan. Peningkatan temperatur inlet juga meningkatkan temperatur permukaan dan koefisien perpindahan panas. Temperatur operasi 121°C menunjukkan performa termal yang stabil dan efektif berdasarkan hasil simulasi CFD, sehingga dapat dipertimbangkan sebagai rekomendasi awal dalam optimasi performa termal retort. Namun, penerapannya pada skala industri masih memerlukan kajian lanjutan terhadap nilai F0, waktu sterilisasi, mutu produk, dan konsumsi energi.

© 2026 Jurnal Ilmiah JURUTERA. Di kelola oleh Fakultas Teknik. Hak Cipta Dilindungi.

E-mail Coresponden : muhamadsafii@upgris.ac.id
© 2026 ISSN. 2356-5438. Fakultas Teknik Universitas Samudra

1. Pendahuluan

Proses termal merupakan salah satu tahapan penting dalam industri pangan karena digunakan untuk mempertahankan keamanan produk melalui proses pengalengan, pasteurisasi, dan sterilisasi guna menurunkan risiko cemaran mikroorganisme patogen pada makanan (1). Mesin *retort* menjadi salah satu teknologi sterilisasi termal yang banyak digunakan karena mampu meningkatkan keamanan mikrobiologis produk pangan sekaligus memperpanjang masa simpan secara lebih efisien dalam proses pengolahan makanan kemasan (2). Pengendalian masa simpan produk pangan sangat penting karena berkaitan langsung dengan keamanan konsumen, pengurangan pemborosan pangan, serta keberlanjutan ekonomi pada sektor pangan (3). *Retort* memiliki kelebihan karena mampu menghasilkan produk pangan yang lebih stabil selama penyimpanan dan distribusi, terutama pada produk dalam kemasan seperti kaleng, *pouch*, maupun jar kaca, namun proses *retort* juga memiliki kekurangan apabila distribusi panas di dalam ruang sterilisasi tidak merata sehingga dapat menyebabkan terjadinya pemanasan berlebih pada sebagian area dan pemanasan yang kurang optimal pada area lainnya (4). Performa termal mesin *retort* sangat dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas yang terjadi di dalam sistem, termasuk konduksi, konveksi, dan interaksi antara fluida pemanas dengan permukaan produk atau kemasan (5).

Kajian numerik diperlukan karena analisis perpindahan panas pada sistem termal yang kompleks tidak mudah dilakukan melalui pengujian eksperimen langsung, sehingga perkembangan metode numerik dan teknologi komputasi memberikan peluang besar untuk menganalisis sistem termal industri secara lebih rinci, cepat, dan efisien (6). Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD) karena mampu menampilkan distribusi temperatur, pola aliran fluida, serta karakteristik perpindahan panas secara visual dan kuantitatif, sehingga banyak diterapkan dalam industri pangan untuk memprediksi area pemanasan paling lambat (*slowest heating zone*) pada proses sterilisasi makanan dalam kemasan (7). Hasil simulasi CFD sangat bergantung pada kualitas *mesh* atau *grid* yang digunakan dalam proses pemodelan numerik, Jumlah *grid* yang terlalu sedikit dapat menurunkan ketelitian hasil simulasi, sedangkan jumlah *grid* yang terlalu banyak dapat meningkatkan waktu komputasi dan kebutuhan sumber daya komputer, sehingga pengujian independensi *grid* menjadi tahapan penting dalam simulasi numerik untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi mengalami perubahan signifikan ketika jumlah *grid* ditingkatkan (8,9).

Pada geometri dan sistem termal yang kompleks, pemilihan *grid* yang tepat diperlukan agar fenomena perpindahan panas, lapisan batas, dan pola aliran fluida dapat tertangkap secara lebih akurat, karena penelitian terkait simulasi perpindahan panas menunjukkan bahwa perbedaan resolusi *grid* dapat memengaruhi hasil prediksi temperatur, koefisien perpindahan panas, dan stabilitas numerik simulasi, oleh karena itu, analisis jumlah *grid* tidak hanya menjadi aspek teknis dalam simulasi CFD, tetapi juga menjadi faktor penting untuk menentukan keseimbangan antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi (9,10). Selain jumlah *grid*, temperatur operasi juga menjadi parameter penting dalam proses *retort* karena memengaruhi penetrasi panas dan kualitas produk pangan, dimana temperatur yang lebih tinggi dapat mempercepat proses sterilisasi, namun pemilihan temperatur yang tidak tepat dapat menyebabkan pemanasan berlebih atau distribusi panas yang tidak merata sehingga perlu dikaji secara numerik terhadap distribusi panas di dalam tabung *retort* (11). Karena hal ini, variasi temperatur operasi perlu dikaji secara numerik untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi panas dan efektivitas proses sterilisasi di dalam tabung mesin *retort* (4,11). Penelitian ini sangat penting karena terletak pada kebutuhan industri pangan terhadap metode sterilisasi yang tidak hanya aman secara mikrobiologis, tetapi juga efisien secara energi dan mampu mempertahankan mutu produk (2,6). Kajian numerik menjadi penting karena dapat mengurangi ketergantungan pada uji coba eksperimen yang membutuhkan biaya, waktu, dan bahan dalam jumlah besar, Selain itu, simulasi termal yang akurat dapat mendukung pengembangan sistem sterilisasi pangan yang lebih modern, efisien, dan berkelanjutan (6,12).

Studi numerik berbasis 3D dilakukan dengan menerapkan model SCRP. Variasi waktu pemanasan sebesar 15 dan 25 menit dipertimbangkan dalam penelitian ini. Hasilnya, profil suhu *retort* variabel (VRT) 95°C selama 25 menit diikuti oleh 121°C selama 15 menit. Jadwal ini mencapai nilai F sebesar 6,58, mengurangi nilai pemasakan permukaan (Cs) dan nilai pemasakan rata-rata volume (Cavg) masing-masing sebesar 42,95% dan 42,05%, serta mempersingkat waktu sterilisasi sebesar 26,07% (13). Kaji numerik perpindahan panas, massa, dan momentum yang saling terkait dalam pembengkakan bahan berbasis selulosa dengan aplikasi pada proses *retort* kemasan karton dilakukan untuk mengidentifikasi desain paling optimum. Waktu pemanasan sebesar 20, 40, 60, 80, dan 100 menit diusulkan dalam riset ini. Hasil riset menunjukkan bahwa waktu pemanasan sebesar 80 dan 100 menit memberikan kematangan sempurna pada makanan dengan kemasan karton ditinjau dari besaran nilai rata-rata temperatur permukaan sebesar 40°C dan 44°C (14). Optimalisasi teknologi pengawetan makanan sangat diperlukan untuk meningkatkan kualitas dan nutrisi produk, serta keberlanjutan energi dan lingkungan. Dalam penelitian ini, inaktivasi spora Bacillus subtilis dalam sup model (pH 6,1) dengan perlakuan *retort* pengaduk, *retort* statis, dan kombinasi tekanan-suhu tinggi diselidiki. Dengan percobaan isotermal, nilai D = 95°C dan z untuk spora B. subtilis dalam sup diperoleh sebesar 4,67 menit dan 8,65 °C. Model *log-linear* menunjukkan kinerja yang baik untuk menggambarkan kinetika inaktivasi spora isotermal dengan nilai R2adj yang memuaskan (0,94–0,97). Hal ini menunjukkan distribusi beban panas yang homogen di dalam sup dengan bantuan pengadukan frekuensi tinggi. Kombinasi perlakuan HPP dan suhu ringan sangat sinergis untuk menghilangkan spora B. subtilis dalam sup model yang sama yang digunakan dalam perlakuan panas. Perlakuan HPP

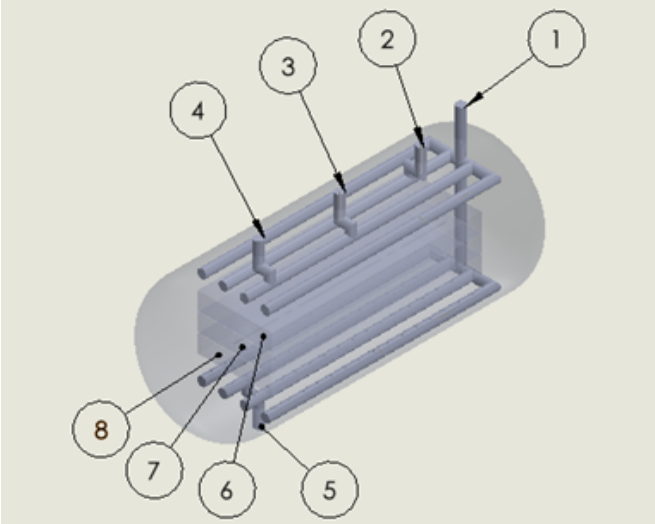
yang menggabungkan 650 MPa dan 55–65°C selama 10 menit menghasilkan efek pengurangan spora hingga 4,5 log (15).

Proses termodinamika pada mesin *retort* dilakukan dengan pemanasan (fase pemanasan) yang dibutuhkan untuk mencapai kriteria keseragaman suhu ±0,5 °C dalam *retort* adalah 28 menit ketika *retort* ditumpuk dengan stoples kaca, dan 24 menit ketika *retort* ditumpuk dengan kantong *retort.* Total waktu proses yang dihitung (fase penahanan), yang diperlukan untuk mencapai nilai sterilisasi (F0 sebesar 3 menit), untuk sampel dalam stoples kaca adalah 67 menit, tetapi dalam kantong *retort* – 62 menit. Perbedaan waktu proses sterilisasi keseluruhan antara dua jenis kemasan yang dipertimbangkan adalah 9 menit (4). Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas distribusi temperatur, penetrasi panas, dan zona pemanasan lambat pada proses *retort* maupun sterilisasi pangan (4,14). Penelitian lain juga telah mengkaji pentingnya kualitas *mesh* dalam simulasi CFD pada sistem perpindahan panas industri (7,8). Namun, kajian yang secara khusus menghubungkan pengaruh jumlah *grid* dan variasi temperatur operasi terhadap performa termal mesin *retort* masih perlu dikembangkan lebih lanjut (7,15). Kebaruan dari penelitian ini adalah penggabungan analisis independensi *grid* dan variasi temperatur operasi dalam satu kajian numerik untuk mengevaluasi akurasi simulasi, distribusi panas, dan efisiensi performa termal mesin *retort*. Penelitian ini bertujuan mengkaji performa termal mesin *retort* secara numerik dengan mempertimbangkan pengaruh jumlah *grid* terhadap akurasi simulasi dan temperatur operasi terhadap distribusi panas di dalam tabung *retort*. Penelitian ini bermanfaat sebagai dasar pemilihan *grid* yang optimal agar simulasi tetap akurat dan efisien secara komputasi serta memberikan rekomendasi temperatur operasi yang efektif, hemat energi, dan mampu menjaga kualitas produk pangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar awal dalam perancangan dan optimasi performa termal mesin *retort*. Analisis CFD terhadap distribusi temperatur, tekanan, pola aliran, dan perpindahan panas dapat membantu pengembangan desain *retort* yang lebih stabil dan terarah.

2. Metodologi

2.1. Model Fisik

Geometri mesin *retort* dirancang dengan panjang 1800 mm dan diameter 750 mm. Pada ruang *retort* terdapat tiga tingkat rak produk yang disusun secara simetris seperti yang dijelaskan oleh **Gambar 1** dan bagiannya dijelaskan oleh **Tabel 1**. Bahan *stainless steel* AISI 304 diaplikasikan dalam pemodelan yang sedang dipelajari. Bahan tersebut memiliki spesifikasi densitas (ρ) = 7.920 kg/m³, panas spesifik (Cp) = 500 J/kg.K, dan konduktivitas termal (k) = 14,6 W/m.K (16).



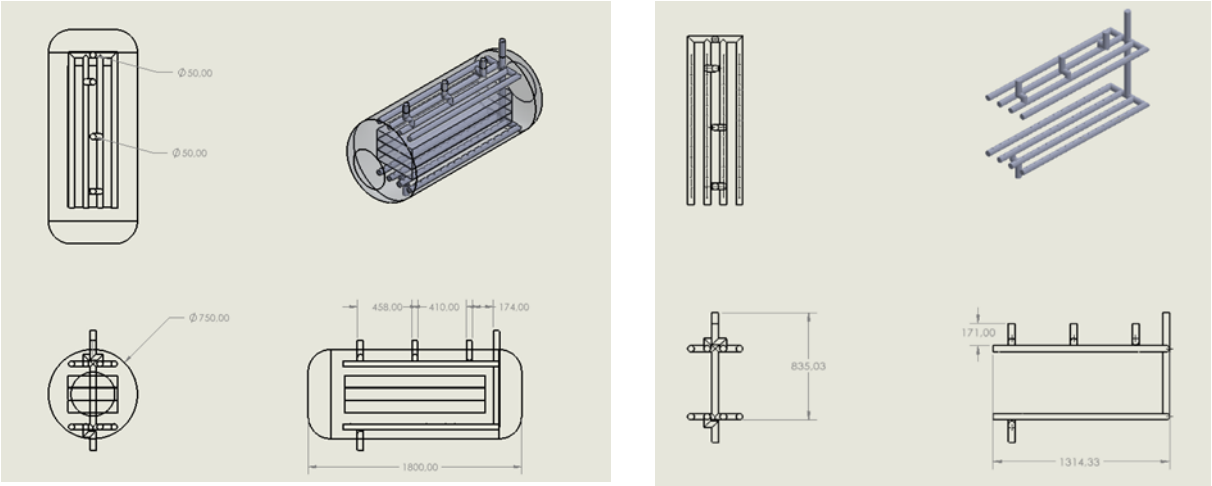
Gambar 1. *Mesin Retort*

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	Rack 1	Dudukan Komponen Produk 1
7	Rack 2	Dudukan Komponen Produk 2
8	Rack 3	Dudukan Komponen Produk 3

2.2. Desain Mesin *Retort*

Desain mesin *retort* dibuat berdasarkan hasil modifikasi eksperimen sebelumnya dengan mempertimbangkan susunan rak dan susunan saluran keluar fluida uap. Detail gambar dan ukuran mesin *retort* dijelaskan oleh **Gambar 1**. yang menunjukkan gambar 3D, tampak atas, depan, samping, dan detail pipa saluran untuk fluida uap.

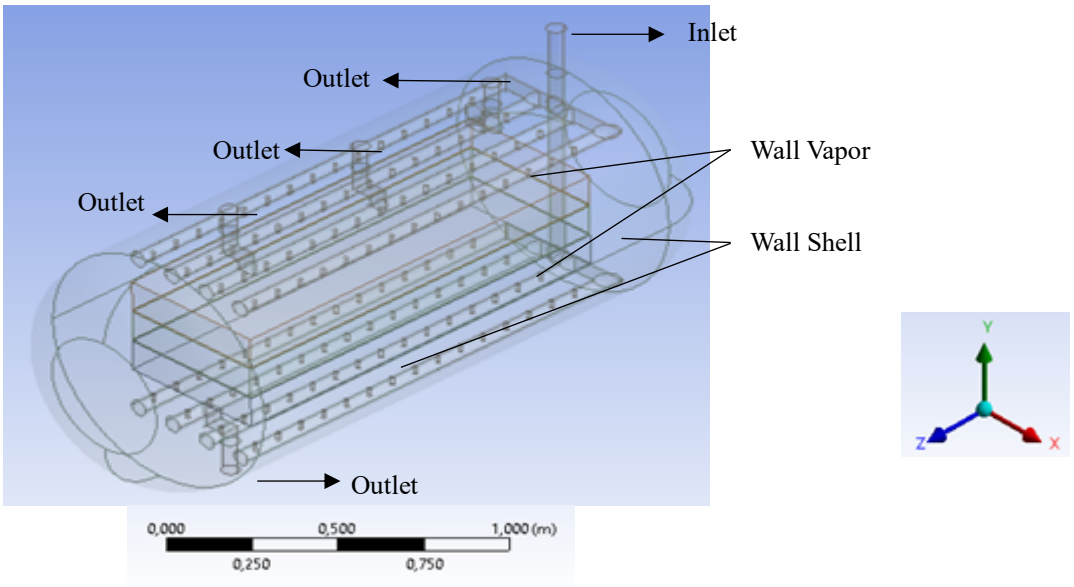


Gambar 2. *Desain dan Ukuran Mesin Retort*

2.3. Studi Numerik

2.3.1. Domain Komputasi

Domain komputasi ditetapkan pada ruang fluida di dalam tabung mesin *retort* dengan ukuran panjang 1800 mm dan diameter 750 mm. Penentuan lokasi kondisi batas dijelaskan pada Gambar 3. dengan bagian *inlet, outlet, wall vapor*, dan *wall shell* sebagai batas simulasi aliran uap jenuh di dalam ruang *retort*. Pada penelitian ini model turbulensi *realizable k-ε* dipilih karena memiliki kestabilan yang baik dalam memprediksi pola aliran fluida pada domain tertutup seperti tabung *retort*, selain itu model ini mampu memberikan distribusi aliran dan temperatur yang cukup akurat pada simulasi termal 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:

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

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

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

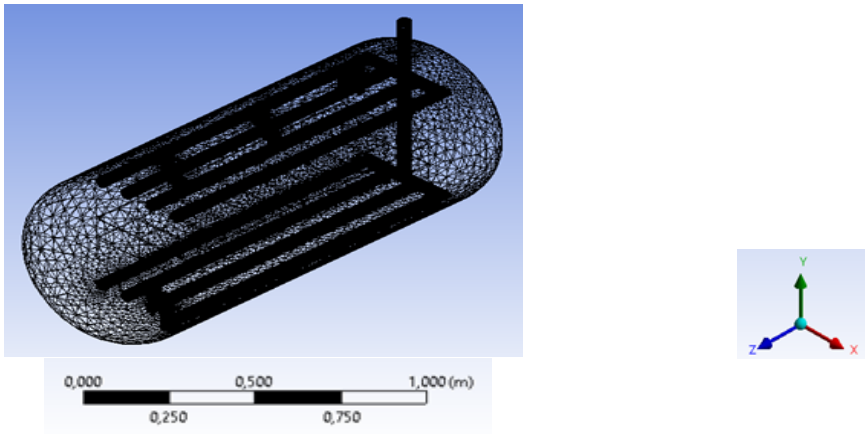
Persamaan energi:

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

Di mana T_s adalah *surface temperature* atau temperatur permukaan rata-rata pada bagian *wall vapor* di dalam ruang mesin *retort*, ρadalah densitas fluida (kg/m³), C_p adalah panas spesifik fluida (J/kg·K), $k$adalah konduktivitas termal fluida (W/m·K)

2.3.2. Meshing

Proses pembuatan *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan jenis topologi *automatic* (*tetrahedral*) dan *sizing cell* dengan ukuran 200 mm seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Tahapan meshing bertujuan untuk membagi domain simulasi menjadi elemen-elemen kecil sehingga perhitungan yang dilakukan secara numerik dapat dilakukan dengan akurat sehingga mampu menangkap perubahan aliran dan perpindahan panas pada area *inlet*, *outlet*, dinding, dan rak produk secara lebih baik. *Mesh* optimum ditentukan berdasarkan hasil uji *grid* serta kualitas mesh yang ditinjau dari nilai *skewness mesh metric spectrum* sebesar 0,25 (*very good*) dan *orthogonal quality* memiliki nilai 0,95 (*excellent*). Analisis numerik dilakukan untuk mengamati distribusi temperatur dan pola aliran fluida pada mesin *retort*. Perpindahan panas ini menggunakan skema *first order upwind* agar diperoleh hasil simulasi yang lebih akurat. Hasil perhitungan menunjukkan nilai rata-rata y^+= 1 dan pada *wall shell* dan area sekitar tube. Nilai tersebut menunjukkan bahwa *mesh* di dekat dinding memiliki resolusi yang halus untuk mendukung analisis aliran dan perpindahan panas dekat dinding.



Gambar 4. *Struktur Mesh Tetrahedral*

2.3.3. Uji *Grid Independent*

Uji *grid* (*grid independence test*) merupakan tahapan penting dalam simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi dipengaruhi oleh jumlah elemen *mesh* atau *grid* yang digunakan. Uji independensi *grid* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jumlah elemen mesh yang digunakan. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan dengan menggunakan empat variasi jumlah *grid*, yaitu 1.145.681, 2.073.340, 3.063.355, dan 4.027.933 elemen. Setiap variasi *grid* diuji pada kondisi operasi yang sama, yaitu kecepatan aliran sebesar 2 m/s dan temperatur *inlet* sebesar 121°C, sehingga

perubahan hasil simulasi hanya dipengaruhi oleh perbedaan jumlah *grid*. Parameter yang digunakan sebagai pembanding adalah *surface temperature*, karena parameter tersebut merepresentasikan distribusi panas pada permukaan *domain* yang dianalisis. Hasilnya *grid* sebesar 3.063.355 memiliki nilai *temperatur surface* sebesar 180,759 dan *grid* sebesar 4.027.933 memiliki nilai *surface temperature* sebesar 180,279. Hasil tersebut memiliki margin error sebesar 0,266% dan *grid* 3.063.355 memiliki hasil paling optimum serta berpotensi dapat digunakan untuk studi validasi dan mengambil data numerik lainnya.

Tabel 2. *Data Uji Grid*

Grid Number	Velocity (m/s)	*Temperature Inlet* (°C)	*Surface Temperature* (°C)
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

2.3.4. *Setup* Simulasi

Set up simulasi dilakukan menggunakan CFD Fluent dengan mempertimbangkan hasil eksperimen yang sebelumnya telah dilakukan. Aliran fluida berupa uap jenuh dengan temperatur 121°C dialirkan melalui saluran pipa *inlet* kemudian menyebar ke seluruh permukaan pipa tube mesin *retort* dengan kecepatan konstan sebesar 2 m/s. Fluida uap jenuh yang berperan sebagai pembawa energi panas memiliki spesifikasi densitas (ρ) = 1,1556 kg/m³, panas spesifik (Cp) = 2180 J/kg.K, dan konduktivitas termal (k) = 0,02708 W/m.K. Pada tahap *Design Modeler*, dilakukan pembuatan domain komputasi pada setiap bagian mesin *retort* yang akan dianalisis. Setelah domain komputasi terbentuk, proses dilanjutkan ke tahap *meshing* dengan mengatur ukuran elemen (*element size*) untuk memperoleh jumlah *grid* yang sesuai dengan kebutuhan simulasi. Tahap berikutnya dilakukan pada bagian *setup*. Penyelesaian numerik dilakukan menggunakan *pressure-based solver* dengan asumsi aliran *steady-state* diawali dengan mengaktifkan persamaan energi (*energy equation*) pada menu *model*. Selanjutnya, model viskos yang digunakan adalah model turbulensi *realizable k-ε* karena model ini sesuai untuk menganalisis aliran fluida turbulen di dalam ruang *retort*. Pada bagian *material*, ditambahkan material *water vapor* sebagai fluida kerja yang digunakan dalam simulasi. Setelah itu, pada bagian *cell zone condition*, zona fluida dipilih sebagai *vapor* dan materialnya diatur menjadi *water vapor*. Proses kemudian dilanjutkan ke bagian *boundary condition* menentukan parameter kecepatan aliran *inlet* dan kondisi temperatur 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 pada sisi masuk aliran. Selanjutnya, pada bagian *methods*, skema penyelesaian yang digunakan adalah model PISO. Adapun 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, Dalam simulasi ini kriteria konvergensi ditentukan 10^{-5} untuk persamaan *continuity*, momentum dan k-epsilon, sementara pada energi konvergensi ditentukan 10^{-6}.

2.3.5. Validasi

Validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik dengan data eksperimen. Pada penelitian ini, validasi dilakukan menggunakan jumlah *grid* optimum sebesar 3.063.355 elemen dengan kecepatan aliran sebesar 2 m/s. Variasi temperatur *inlet* yang digunakan adalah 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Parameter yang digunakan sebagai pembanding adalah *surface temperature*, karena parameter tersebut dapat menunjukkan kemampuan model numerik dalam memprediksi distribusi panas pada mesin *retort*. Perbandingan antara hasil eksperimen dan hasil numerik dilakukan dengan menghitung nilai persentase *error*. Nilai *error* digunakan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan hasil simulasi terhadap data eksperimen. Semakin kecil nilai *error*, maka semakin baik tingkat kesesuaian model numerik terhadap kondisi aktual. Dari 4 kali percobaan validasi didapati bahwa hasil eksperimen dan numerik yang sedang dipelajari memiliki tingkat *error* yang kecil walaupun temperatur operasi divariasikan. Hasil menunjukkan bahwa error terkecil diperoleh dengan nilai 0,209 % saat temperatur operasi diuji sebesar 123°C, sedangkan nilai *error* terbesar diperoleh pada temperatur *inlet* 121°C sebesar 0,404 %. Hasil validasi ini menunjukkan adanya kesepakatan yang baik antara hasil eksperimen dan studi numerik yang sedang dipelajari.

***Tabel 3**. Hasil Validasi*

Temperature Inlet Experimental Study (°C)	*Temperature Inlet Numerical Study* (°C)	*Surface temperature Experimental Study* (°C)	*Surface temperature Numerical Study* (°C)	Error %
115	115	173,12	172,58	0,312
117	117	176,48	175,93	0,312
121	121	183,34	182,60	0,404
123	123	186,24	185,85	0,209

2.3.6. Reduksi Data Numerik

Kondisi operasi simulasi mesin *retort* mengacu pada arah *inlet* ke *outlet* pada sumbu vertikal ZX *Software* CFD dan bilangan Reynolds digunakan untuk mengkarakterisasi tipe aliran yang berkembang didalamnya serta 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:

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

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

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

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

3. Hasil dan Pembahasan

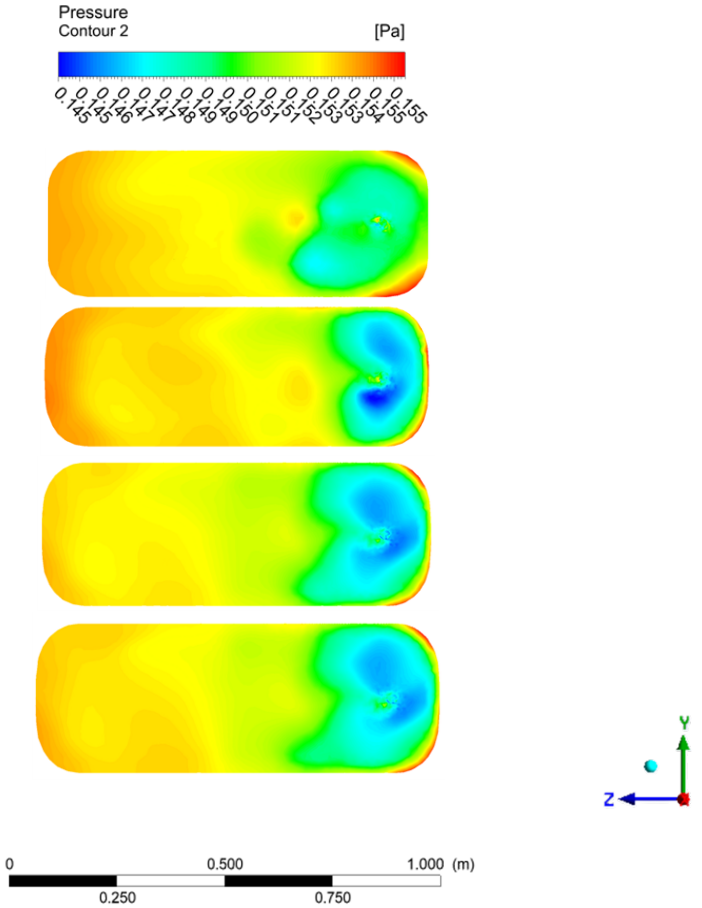
3.1. Pengaruh Jumlah *Grid*

Pada dasarnya, mesin *retort* bekerja dengan cara mensterilkan makanan dalam kemasan kedap udara (*pouch* atau kaleng) menggunakan uap panas atau air bersuhu tinggi 121°C-131°C dan tekanan tinggi. Proses ini membunuh mikroorganisme bakteri tanpa bahan pengawet, membuat makanan tahan suhu ruang 1-2 tahun. Proses meliputi pengisian, penutupan vakum, sterilisasi uap panas, dan pendinginan. Pada mulanya fluida uap panas dengan temperatur sebesar 121°C dialirkan melalui pipa *inlet* dan kemudian menyebar ke seluruh pipa *tube* mesin *retort* dengan kecepatan konstan sebesar 2 m/s dan perlahan keluar menuju saluran *outlet* pada pipa mesin *retort*. Selain mensterilkan makanan dalam kemasan kedap udara fluida uap juga memiliki fungsi untuk memanaskan makanan di dalamnya. Dalam hal ini, penelitian karakterisasi efek jumlah *grid* dan temperatur operasi melalui studi numerik dengan menggunakan perangkat komputer *Computational Fluid Dynamics* menjadi perhatian utama. Tujuannya adalah mencari pengaturan optimal saat *Computational Fluid Dynamics* dan akhirnya akan mendapatkan desain optimal pada operasi mesin *retort*. Jumlah *grid* dan variasi temperatur operasi pada mesin *retort* diselidiki lebih lanjut dalam riset ini. Jumlah *grid* sebesar 1.145.681, 2.073.340, 3.063.355 dan 4.027.933 ditentukan dalam studi numerik. Pengaruh jumlah *grid* (*mesh*) dalam simulasi CFD untuk mesin *retort* sangat signifikan terhadap akurasi hasil dan efisiensi komputasi. Secara umum, semakin halus *grid* (jumlah elemen lebih banyak), semakin akurat simulasi dalam menangkap distribusi temperatur, tekanan dan aliran fluida uap panas, namun membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama.

Dalam studi numerik yang sedang dipelajari distribusi tekanan dan panas berguna menjamin sterilisasi produk pangan yang merata. Tekanan di dalam *retort* bekerja di atas tekanan atmosfer untuk mencapai suhu tinggi yang diperlukan.

Kontur tekanan cenderung berkembang tidak merata ketika jumlah *grid* kecil. Sehingga hasilnya sering menunjukkan kontur tekanan tidak merata, terutama di dekat *inlet* uap, karena adanya pergerakan fluida (uap) dan hambatan dari produk yang disusun.Titik tekanan tertinggi umumnya ditemukan di dekat pipa *inlet* uap atau di area di mana aliran langsung menghantam produk atau dinding *retort* sehingga titik tekanan menjadi terendah. Akibatnya, area di belakang produk (daerah *wake*) atau sudut-sudut yang jauh dari aliran masuk cenderung memiliki tekanan yang lebih rendah, yang berpotensi menjadi zona dingin jika tidak dikelola dengan baik. Ada kemungkinan bahwa dampak kecepatan *inlet* uap yang lebih tinggi meningkatkan perbedaan tekanan di dalam ruang *retort*. Beda halnya jika kecepatan aliran uap yang masuk dikembangkan secara konstan. Ilustrasi tersebut dirangkum dalam Gambar 5.

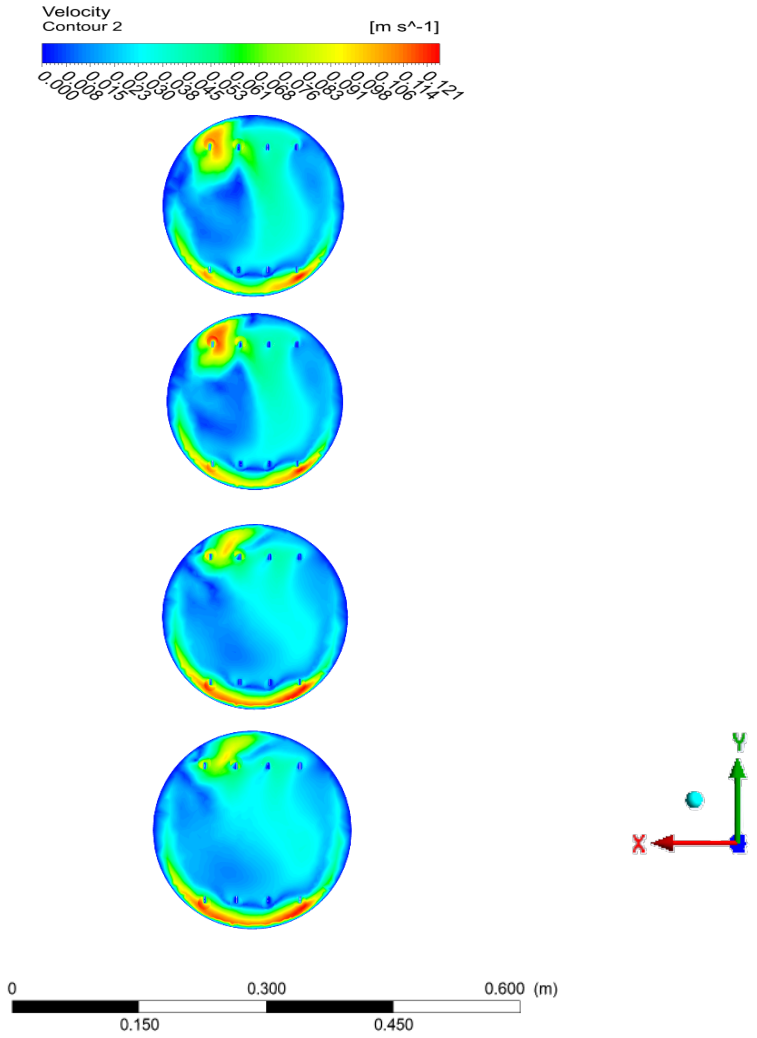
Berdasarkan kontur distribusi tekanan pada Gambar 5, perbedaan warna menunjukkan variasi tekanan lokal akibat interaksi aliran uap panas dengan dinding tabung, rak produk, dan saluran *outlet*. Area bertekanan tinggi menunjukkan adanya titik stagnasi, yaitu kondisi ketika aliran membentur permukaan atau mengalami perubahan arah sehingga kecepatan lokal menurun dan tekanan statis meningkat. Sebaliknya, area berwarna biru menunjukkan tekanan rendah yang berkaitan dengan *pressure drop* akibat hambatan rak, perubahan arah aliran, dan keluarnya fluida melalui beberapa *outlet*. Perbedaan tekanan lokal tersebut dapat memicu separasi aliran dan pembentukan pusaran atau *vortex*, yaitu kondisi ketika sebagian aliran tidak mengikuti arah aliran utama dan membentuk sirkulasi. Fenomena *vortex* dapat membantu pencampuran fluida panas pada sebagian area, tetapi juga berpotensi menyebabkan distribusi tekanan dan temperatur menjadi tidak seragam apabila sirkulasi terjebak pada area tertentu. Nilai perbedaan tekanan yang relatif kecil, yaitu sekitar 0,329–0,332 Pa, menunjukkan bahwa pengaruh variasi temperatur terhadap tekanan tidak besar, namun tetap menggambarkan kemungkinan lokasi stagnasi, separasi aliran, dan *vortex* di dalam ruang *retort*.



Gambar 5. *Kontur Distribusi Tekanan Mesin Retort di berbagai Variasi Temperatur Operasi dengan Jumlah Grid sebesar 3.063.355.*

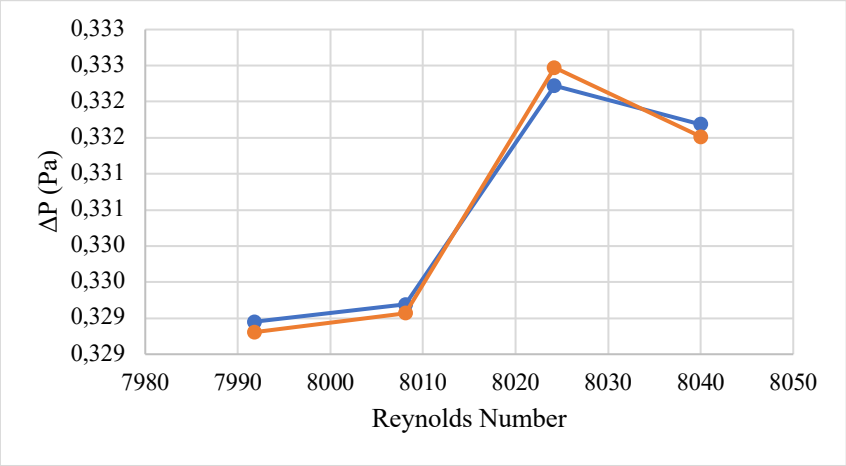
Hubungan antara bilangan Reynolds dan perbedaan tekanan pada Gambar 7. menunjukkan bahwa peningkatan Reynolds cenderung diikuti perubahan ΔP, meskipun nilainya relatif kecil. Secara fisik, bilangan Reynolds menunjukkan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos. Ketika Reynolds meningkat, gaya inersia menjadi lebih dominan sehingga aliran uap lebih mudah membentuk sirkulasi, tumbukan lokal, dan perubahan arah aliran di sekitar rak maupun dinding *retort*. Kondisi ini dapat memperkuat pencampuran fluida panas dan membuat distribusi panas lebih aktif, tetapi pada geometri tertutup seperti ruang *retort*, hambatan rak, jarak antar saluran, dan posisi *outlet* dapat menyebabkan sebagian aliran membentuk pusaran lokal, sementara area lain tetap berkecepatan rendah. Oleh

karena itu, peningkatan Reynolds perlu dianalisis bersama kontur tekanan dan kecepatan untuk menilai apakah aliran mendukung pemerataan panas atau justru membentuk zona sirkulasi lokal. Nilai ΔP sebesar 0,329–0,332 Pa menunjukkan bahwa perubahan tekanan akibat variasi temperatur relatif kecil, namun pola kontur tetap menunjukkan distribusi aliran yang belum homogen, sehingga performa termal *retort* tidak hanya dipengaruhi temperatur *inlet*, tetapi juga kemampuan aliran uap menjangkau seluruh area ruang *retort*.



Gambar 6. *Kontur Distribusi Velocity Mesin Retort di berbagai Variasi Temperatur Operasi dengan Jumlah Grid sebesar 3.063.355.*

Berdasarkan kontur kecepatan pada Gambar 6. distribusi aliran fluida di dalam ruang *retort* menunjukkan kondisi yang belum sepenuhnya seragam, dengan rentang kecepatan sekitar 0 hingga 0,121 m/s. Area berwarna hijau, kuning, hingga merah merepresentasikan zona dengan kecepatan aliran relatif tinggi, terutama pada bagian sekitar saluran masuk uap dan sepanjang arah aliran utama. Sebaliknya, area berwarna biru menunjukkan zona dengan kecepatan aliran rendah yang secara fisik dapat diidentifikasi sebagai zona aliran lambat atau *dead zone*. Terbentuknya *dead zone* dipengaruhi oleh adanya hambatan dari rak, perubahan arah aliran, serta pola distribusi *outlet* yang menyebabkan sebagian fluida bergerak dengan intensitas lebih rendah dibandingkan aliran utama. Pada zona tersebut, momentum aliran menjadi lebih kecil sehingga kemampuan fluida dalam membawa dan mendistribusikan panas juga menurun. Kondisi ini berpotensi menyebabkan proses perpindahan panas secara konveksi berlangsung lebih lambat. Fenomena tersebut menjadi penting dalam proses *retort* karena keseragaman aliran fluida panas sangat berpengaruh terhadap pemerataan temperatur di dalam ruang sterilisasi. Apabila *dead zone* terbentuk di sekitar rak atau posisi produk, maka area tersebut berisiko mengalami keterlambatan pemanasan. Dengan demikian, kontur kecepatan tidak hanya menggambarkan variasi besar kecilnya kecepatan fluida, tetapi juga berperan dalam mengidentifikasi area yang berpotensi menjadi zona pemanasan lambat.



Gambar 7. *Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dan Perbedaan Tekanan.*

3.2. Pengaruh Temperatur operasi

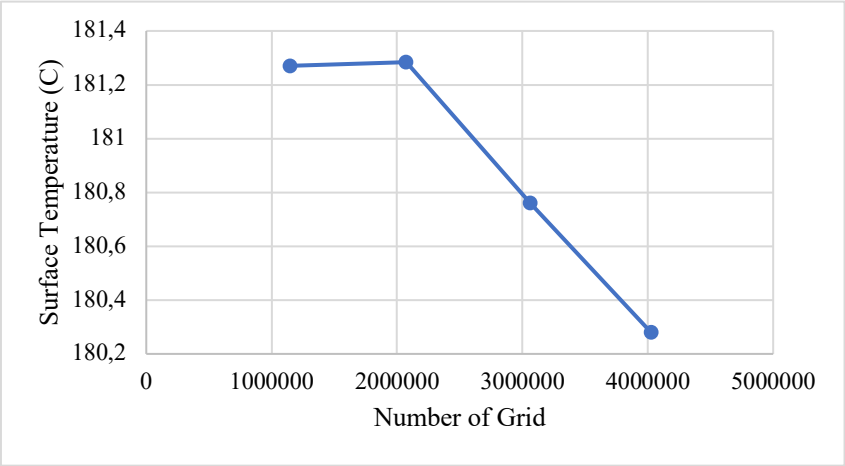
Pada penelitian ini, *surface temperature* didefinisikan sebagai temperatur rata-rata pada permukaan *wall vapor* di dalam ruang mesin *retort*. Nilai ini bukan merupakan temperatur fluida pada saluran *inlet*, melainkan temperatur permukaan hasil interaksi antara aliran uap panas dengan dinding atau pipa uap di dalam domain simulasi. Oleh karena itu, *surface temperature* digunakan untuk mengevaluasi respons termal permukaan mesin *retort* terhadap variasi temperatur operasi. Proses pengambilan data temperatur dan tekanan dilakukan melalui menu *Results* dengan menggunakan fitur *Location* untuk membuat beberapa bidang potong, yaitu *Plane* 1 menggunakan metode YZ *Plane*, *Plane* 2 menggunakan metode ZX *Plane* pada koordinat Y = -0,11 m, *Plane* 3 menggunakan metode XY *Plane*, dan *Plane* 4 menggunakan metode ZX *Plane* pada koordinat Y = 0,42 m. Setelah bidang potong ditentukan, hasil simulasi divisualisasikan menggunakan fitur *Insert Contour*, dengan *Contour* 1 untuk menampilkan distribusi temperatur pada *Plane* 1, *Contour* 2 untuk distribusi tekanan pada *Plane* 2, dan *Contour* 3 untuk distribusi kecepatan pada *Plane* 3. Setiap kontur diatur menggunakan *Range Local* dengan jumlah kontur sebanyak 100 agar pola distribusi hasil simulasi dapat diamati secara lebih jelas. Data numerik diperoleh melalui menu *Calculators* dengan memilih *Function Calculator*, di mana temperatur rata-rata dihitung menggunakan fungsi areaAve pada *Plane* 1 dengan variabel *temperature*, tekanan masuk dihitung menggunakan fungsi *areaAve* pada lokasi *Inlet* dengan variabel *pressure*, sedangkan tekanan keluar diperoleh melalui fungsi *areaAve* pada *Plane* 4 dengan variabel *Pressure*. Data tersebut kemudian digunakan untuk menganalisis hubungan antara variasi temperatur *Inlet*, tekanan, kecepatan, serta distribusi temperatur di dalam ruang *retort*.

Hasil simulasi distribusi temperatur menunjukkan pola yang stabil dan konsisten, sehingga variasi jumlah *grid* mampu mengidentifikasi zona temperatur tinggi dan rendah (gradien temperatur) serta menghasilkan distribusi panas yang lebih merata di dalam ruang *retort*. Detail distribusi temperatur disajikan pada Gambar 9, sedangkan perbandingan hasil temperatur operasi eksperimen dan simulasi numerik ditunjukkan pada Gambar 10. Pengujian dilakukan menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.063.355 elemen, kecepatan aliran 2 m/s, dan variasi temperatur *inlet* 115°C, 117°C, 121°C, serta 123°C. Data *surface temperature* diperoleh melalui *surface report* pada Fluent menggunakan metode *area-weighted average* pada permukaan *wall vapor*, sehingga nilai yang dihasilkan merepresentasikan temperatur rata-rata berdasarkan luas permukaan yang mengalami kontak termal dengan aliran uap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *inlet* diikuti oleh peningkatan temperatur permukaan pada hasil eksperimen maupun simulasi numerik. Pada temperatur *inlet* 115°C, temperatur permukaan eksperimen dan numerik masing-masing sebesar 173,12°C dan 172,58°C dengan selisih 0,54°C, sedangkan pada temperatur *inlet* 117°C nilainya meningkat menjadi 176,48°C dan 175,93°C dengan selisih 0,55°C.

Kenaikan temperatur yang cukup besar terjadi pada variasi temperatur *inlet* 121°C dan 123°C. Pada temperatur *inlet* 121°C, temperatur permukaan hasil eksperimen diperoleh sebesar 183,34°C, sedangkan hasil simulasi numerik menunjukkan nilai 182,60°C, dengan selisih sebesar 0,74°C. Sementara itu, pada temperatur *inlet* 123°C, temperatur permukaan hasil eksperimen mencapai 186,24°C, sedangkan hasil numerik sebesar 185,85°C, dengan selisih 0,39°C. Nilai *surface temperature* yang lebih tinggi dibandingkan temperatur *inlet* perlu dipahami berdasarkan perbedaan lokasi pengamatan dan metode ekstraksi data. Temperatur *inlet* merupakan temperatur uap pada saluran masuk sebagai kondisi batas simulasi, sedangkan *surface temperature* adalah temperatur rata-rata pada permukaan *wall vapor* yang diperoleh melalui metode *area-weighted average*. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak merepresentasikan temperatur fluida masuk secara langsung, tetapi menunjukkan respons termal permukaan dalam domain simulasi. Perbedaan nilai ini dapat dipengaruhi oleh distribusi panas lokal, interaksi termal antara uap dan permukaan *wall vapor*, serta pola sirkulasi aliran di ruang *retort*, sehingga perlu dilakukan verifikasi terhadap variabel temperatur, satuan, pemilihan

surface report, dan kondisi batas termal yang digunakan. Peningkatan temperatur *inlet* juga berpengaruh terhadap bertambahnya energi panas pada uap jenuh, sehingga perpindahan panas dari fluida menuju permukaan ruang *retort* berlangsung lebih intensif. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa temperatur operasi memiliki peranan penting terhadap kinerja termal mesin *retort*, khususnya dalam mempercepat kenaikan temperatur permukaan serta mendukung pemerataan distribusi panas di dalam ruang sterilisasi. Nilai error antara data eksperimen dan hasil numerik berturut-turut sebesar 0,312%, 0,312%, 0,404%, dan 0,209%. Seluruh nilai error tersebut berada di bawah 1%, sehingga model numerik dapat dinyatakan memiliki kesesuaian yang baik terhadap hasil eksperimen. Kesamaan kecenderungan kenaikan temperatur menunjukkan bahwa simulasi CFD mampu merepresentasikan perubahan temperatur permukaan akibat peningkatan temperatur operasi dengan tingkat ketelitian yang baik.

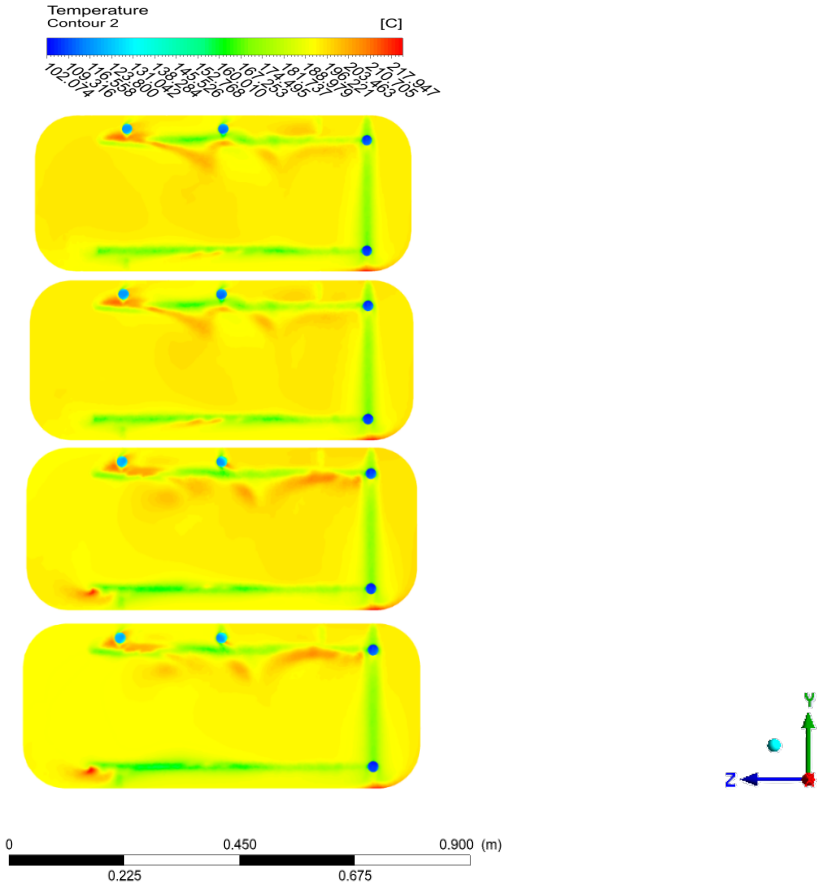
Akurasi distribusi temperatur (*Thermal Distribution*) pada jumlah *grid* yang besar yang lebih halus memungkinkan aplikasi komputer CFD memodelkan perpindahan panas secara lebih detail, terutama di dekat dinding *retort* dan di sekitar produk yang disterilisasi. *Grid* yang kasar dapat menyebabkan *underestimation* atau *overestimation* pada distribusi temperatur. Akurasi aliran fluida (*flow field*) dengan jumlah *grid* yang tinggi membantu menangkap karakteristik aliran fluida yang kompleks di dalam *retort*, seperti area *dead spot* (suhu rendah) dan sirkulasi uap panas. Waktu dan sumber daya komputasi juga memainkan peran penting terhadap peningkatan jumlah *grid* yang akibatnya meningkatkan jumlah persamaan yang harus diselesaikan, yang berbanding lurus dengan lamanya waktu simulasi. Validasi hasil penelitian sering menggunakan teknik *grid independence test* untuk memastikan bahwa hasil simulasi (seperti nilai temperatur tertinggi atau terendah) tidak lagi berubah secara drastis meskipun jumlah *grid* ditambah. Data hasil temuan tersebut dirangkum pada Gambar 8.



Gambar 8. *Hubungan Nomor Grid dan Surface temperature*

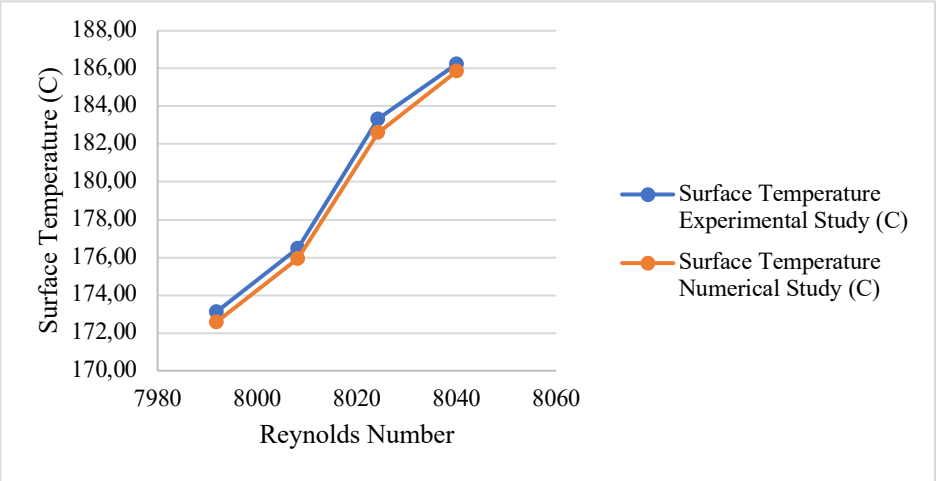
Berdasarkan hubungan antara jumlah *grid* dan *surface temperature* yang ditampilkan pada Gambar 8, pengujian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah elemen *mesh* terhadap temperatur permukaan pada hasil simulasi numerik. Pengujian dilakukan pada kondisi operasi tetap, yaitu temperatur *inlet* 121°C dan kecepatan aliran 2 m/s. Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur permukaan pada *grid* pertama diperoleh sebesar 181,27°C. Pada *grid* kedua, temperatur permukaan mengalami peningkatan sangat kecil menjadi 181,284°C, dengan selisih sebesar 0,014°C atau sekitar 0,008%. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa penambahan jumlah elemen pada tahap awal belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil temperatur permukaan.

Pada *grid* ketiga, temperatur permukaan mengalami penurunan menjadi 180,759°C, dengan selisih sebesar 0,525°C atau sekitar 0,29% dibandingkan *grid* kedua. Selanjutnya, pada *grid* keempat, temperatur permukaan kembali menurun menjadi 180,279°C, dengan selisih sebesar 0,480°C atau sekitar 0,266% dibandingkan *grid* ketiga. Penurunan nilai temperatur permukaan ini dapat terjadi karena semakin besar jumlah *grid* yang digunakan, maka pembagian elemen pada domain komputasi menjadi lebih rapat dan halus. Kondisi tersebut memungkinkan proses perhitungan distribusi temperatur berlangsung lebih detail, sehingga hasil simulasi menjadi lebih stabil dan mendekati kondisi konvergen. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh perubahan temperatur antar *grid* masih berada di bawah 1%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi sudah tidak mengalami perubahan signifikan akibat penambahan jumlah elemen *mesh*. Dengan demikian, jumlah *grid* sebesar 3.063.355 elemen dapat dipilih sebagai *grid* optimum karena mampu menghasilkan nilai temperatur permukaan yang stabil dengan tingkat perubahan yang kecil terhadap *grid* yang lebih tinggi, yaitu 4.027.933 elemen.



Gambar 9. *Kontur Distribusi Temperatur Mesin Retort di berbagai Variasi Temperatur Operasi dengan Jumlah Grid sebesar 3.063.355.*

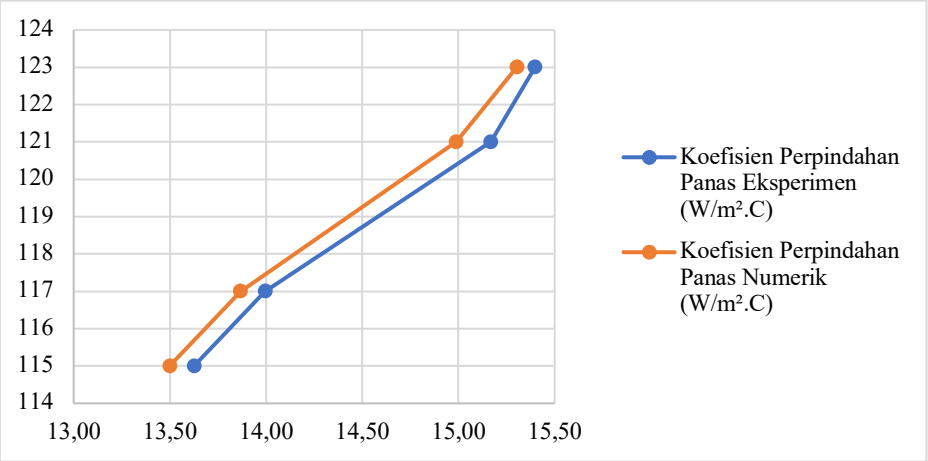
Hasil perbandingan temperatur operasi antara data eksperimen dan simulasi numerik ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil Perbandingan Temperatur Operasi, pengujian dilakukan menggunakan *grid* optimum sebesar 3.063.355 elemen dengan kecepatan aliran 2 m/s. Variasi temperatur *inlet* yang digunakan adalah 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan temperatur *inlet* menyebabkan peningkatan temperatur permukaan pada hasil eksperimen maupun simulasi numerik. Pada temperatur *inlet* 115°C, temperatur permukaan eksperimen sebesar 173,12°C, sedangkan hasil numerik sebesar 172,58°C dengan selisih 0,54°C. Pada temperatur *inlet* 117°C, temperatur permukaan eksperimen meningkat menjadi 176,48°C, sedangkan hasil numerik sebesar 175,93°C dengan selisih 0,55°C.



Gambar 10. *Hasil Perbandingan Temperatur Operasi*

Peningkatan temperatur yang lebih besar terjadi pada temperatur *inlet* 121°C dan 123°C. Pada temperatur *inlet* 121°C, temperatur permukaan eksperimen sebesar 183,34°C, sedangkan hasil numerik sebesar 182,60°C dengan selisih 0,74°C. Sementara itu, pada temperatur *inlet* 123°C, temperatur permukaan eksperimen mencapai 186,24°C,

sedangkan hasil numerik sebesar 185,85°C dengan selisih 0,39°C. Peningkatan temperatur *inlet* menyebabkan energi panas yang dibawa oleh uap jenuh semakin besar. Akibatnya, proses perpindahan panas dari fluida ke permukaan dalam ruang *retort* menjadi lebih intensif. Kondisi ini menunjukkan bahwa temperatur operasi berperan penting terhadap performa termal mesin *retort*, khususnya dalam mempercepat peningkatan temperatur permukaan dan memperbaiki distribusi panas di dalam ruang sterilisasi.



Gambar 11. *Grafik Koefisien Perpindahan Panas.*

Perbandingan nilai koefisien perpindahan panas antara hasil eksperimen dan simulasi numerik disajikan pada Gambar 11. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *grid* optimum sebanyak 3.063.355 elemen pada kecepatan aliran 2 m/s. Adapun variasi temperatur *inlet* yang digunakan dalam pengujian meliputi 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada grafik, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan panas meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur *inlet*, baik pada data eksperimen maupun hasil simulasi numerik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi memberikan pengaruh terhadap kemampuan fluida dalam memindahkan panas menuju permukaan ruang *retort*.

Pada temperatur *inlet* 115°C, koefisien perpindahan panas eksperimen sebesar 13,63 W/m²°C, sedangkan hasil numerik sebesar 13,50 W/m²°C dengan selisih 0,13 W/m²°C. Pada temperatur *inlet* 117°C, nilai eksperimen meningkat menjadi 13,99 W/m²°C, sedangkan hasil numerik sebesar 13,87 W/m²°C dengan selisih 0,12 W/m²°C. Peningkatan yang lebih besar terjadi pada temperatur *inlet* 121°C, yaitu koefisien perpindahan panas eksperimen sebesar 15,17 W/m²°C dan hasil numerik sebesar 14,99 W/m²°C dengan selisih 0,18 W/m²°C. Sementara itu, pada temperatur *inlet* 123°C, koefisien perpindahan panas eksperimen mencapai 15,40 W/m²°C, sedangkan hasil numerik sebesar 15,30 W/m²°C dengan selisih 0,10 W/m²°C.

Peningkatan nilai koefisien perpindahan panas terjadi seiring dengan bertambahnya temperatur *inlet*, karena uap jenuh membawa energi panas yang lebih besar pada kondisi temperatur yang lebih tinggi. Hal ini menyebabkan selisih temperatur antara fluida panas dan permukaan ruang *retort* semakin besar, sehingga laju perpindahan panas melalui mekanisme konveksi menjadi lebih kuat. Kecenderungan tersebut juga didukung oleh peningkatan bilangan Nusselt, bahwa proses perpindahan panas konveksi berlangsung lebih efektif pada temperatur operasi yang semakin tinggi.

4. Kesimpulan

1) Jumlah *grid* dan temperatur operasi berpengaruh terhadap performa termal mesin *retort*, terutama terhadap distribusi temperatur, tekanan, dan koefisien perpindahan panas.
2) *Grid* 3.063.355 elemen ditetapkan sebagai *grid* optimum karena menghasilkan perubahan temperatur permukaan yang relatif kecil terhadap *grid* yang lebih tinggi, sehingga cukup baik dalam menyeimbangkan akurasi simulasi dan efisiensi komputasi.
3) Model numerik menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil eksperimen. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *error* di bawah 1% pada seluruh variasi temperatur *inlet*, yaitu 115°C, 117°C, 121°C, dan 123°C.
4) Peningkatan 60elative60re *inlet* menyebabkan kenaikan 60elative60re permukaan dan koefisien perpindahan panas. Namun, perubahan tekanan yang terjadi 60elative kecil dan masih ditemukan area aliran lambat di dalam ruang *retort*.
5) Temperatur operasi 121°C dapat dipertimbangkan sebagai rekomendasi awal dalam optimasi performa termal mesin *retort*, sedangkan temperatur 123°C menunjukkan kemampuan pemanasan yang lebih tinggi.
6) Keterbatasan penelitian ini pada simulasi CFD dan belum mencakup analisis nilai F0, waktu sterilisasi, mutu produk, konsumsi energi, serta pengujian skala industri. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar teknis awal untuk pengembangan dan optimasi mesin retort.

DAFTAR PUSTAKA

1. Chiozzi V, Agriopoulou S, Varzakas T. applied sciences Advances , Applications , and Comparison of Thermal Hydrostatic Pressure) Technologies in Food Processing. Appl Sci. 2022;12(4):2202.
2. Simoneth P, Sneh J, Bangar P, Suffern M, Whiteside WS. Understanding retort processing : A review. Food Sci Nutr. 2024;12(3):1545–63.
3. Tarlak F. The Use of Predictive Microbiology for the Prediction of the Shelf Life of Food Products. Foods. 2023;12(24):4461.
4. Raits E, Pinte L, Kirse-Ozolina A, Muizniece-Brasava S. A Case-study: Temperature Distribution and Heat Penetration in Steam-air Retort, Using Glass Jars and Retort Pouches *. sciendo. 2021;46(341).
5. Shafiq F, Ullah A, Nadeem M, Khan A, Ullah A. Natural Convection Heat Transfer in an Enclosed Assembly of Thin Vertical Cylinders – A CFD Study. Chem Eng Teknol. 2020;43(8):1–12.
6. Łach Ł. Advances in Numerical Modeling for Heat Transfer and Thermal Management : A Review of Computational Approaches and Environmental Impacts. energies. 2025;18(5):1302.
7. Zhu J, Frerich T, Herrmann AS. CFD modeling and validation of heat transfer inside an autoclave based on a mesh independency study. J Compos Mater. 2021;55(18):2469–87.
8. Berni F, Cicalese G, Borghi M, Fontanesi S. Towards grid-independent 3D-CFD wall-function-based heat transfer models for complex industrial flows with focus on in-cylinder simulations. Appl Therm Eng [Internet]. 2021;190(May 2020):116838. Available from: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116838
9. Zhang K, Ye X, Hou Z, Ren Y, Shi Q. Study on heat transfer performance of cold plate with grid channel. Sci Rep [Internet]. 2024;14(1):1–13. Available from: https://doi.org/10.1038/s41598-024-52238-6
10. Sassanis V, Gamet L, Rolland M, Ma R, Pozzobon V. Numerical determination of the volumetric heat transfer coefficient in fixed beds of wood chips. Chem Eng J. 2020;417:1–30.
11. Lee M, Park G, Park C, Kim C. Improvement of Grid Independence Test for Computational Fluid Dynamics Model of Building Based on Grid Resolution. Adv Civ Eng. 2020;2020(1):11.
12. Kannapinn M, Pham MK, Schäfer M. Physics-based Digital Twins for Autonomous Thermal Food. Food Sci Emerg Technol. 2022;81:1–26.
13. Yongxian J, Lei W, Qian M, Qun W, Leilei W, Aiquan J, Jingpeng L LD. 3D modeling and optimization of batch sterilization for irregularly shaped spicy chicken retort pouches. Food Bioprod Proc. 2025;154(2):282–94.
14. Alexandersson M, Ristinmaa M. Coupled heat , mass and momentum transport in swelling cellulose based materials with application to retorting of paperboard packages. Appl Math Model [Internet]. 2021;92:848–83. Available from: https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.11.041
15. Baris M, Skipnes D, Mari T, Lekang O ivar. Comparison of spore inactivation with novel agitating retort , static retort and combined high pressure-temperature treatments. Food Control [Internet]. 2026;60:484–92. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.033
16. Fajar N, Pratama S, Saputro DD. Design and Validation of Horizontal Steam Retort with Capacity of 100 kg Presto milkfish Using Finite Element Method (FEM). J Inov Mesin. 2024;6(2):18–24.