

Studi Numerik Kinerja Pendinginan *Cold storage* Dengan Variasi Konfigurasi *Baffle* Dan Pengaturan Gap/*Stacking* Palet Produk

DHIMAS THUFEIL GHIFARI, FAUZUN

ABSTRACT

Salah satu penanganan pasca panen yang penting pada komoditas hortikultura adalah dengan penyimpanan dingin/*cold storage*. Studi ini dilakukan untuk melakukan validasi dan variasi terhadap studi *experimental cold storage* dengan komoditas buah apel berkapasitas 5 ton. Geometri *cold storage*, tata letak produk, dan tata letak evaporator mempengaruhi distribusi temperatur dan aliran udara di dalam *cold storage*. Kajian diawali dengan pemodelan geometri *cold storage* secara tiga dimensi dan penyederhanaan model dengan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD). Selanjutnya dilakukan *meshing* untuk membagi volume geometri menjadi volume-volume kecil dan dilakukan pendefinisian domain pemodelan. Selanjutnya dilakukan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk melihat distribusi temperatur dan aliran udara di dalam *cold storage* secara numerik. Adapun studi numerik diawali dengan validasi studi *experimental* dari literatur acuan terhadap hasil simulasi numerik validasi. Selanjutnya model geometri divariasikan berdasarkan konfigurasi *baffle* dengan 3 jenis konfigurasi: *single segmented*, *orifice* dan *double segmented*. Selanjutnya dipilih hasil variasi yang paling optimal dan divariasikan kembali berdasarkan pengaturan jarak gap udara *horizontal* antar produk. Hasil simulasi dibandingkan untuk melihat pengaruh variasi tersebut pada kinerja *cold storage* terhadap hasil validasi studi *experimental*. Hasil simulasi menunjukkan variasi *single segmented* memiliki waktu pendinginan produk di dalam *cold storage* yang paling cepat, sedangkan variasi *orifice* tidak memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap waktu pendinginan di dalam *cold storage*. Variasi pengaturan jarak gap udara *horizontal* antar produk dengan jarak yang lebih besar dapat mempercepat proses keseragaman temperatur di dalam *cold storage* dibandingkan dengan jarak yang lebih kecil.

Keywords: *baffle*, *CFD*, *cold storage*, *gap udara*, *hortikultura*,

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki berbagai potensi dan mampu menghasilkan berbagai macam tumbuhan dan buah – buahan. Kondisi iklim di Indonesia memungkinkan berkembangnya berbagai jenis tumbuhan yang dapat beradaptasi dengan iklim tropis maupun subtropis. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia tahun 2016, komoditas hortikultura di Indonesia mencapai lebih dari 7 juta ton. Komoditas hortikultura memegang peranan yang penting dalam sektor pertanian (Herista, 2015). Salah satu komoditas hortikultura di Indonesia yang memiliki produksi tinggi terdapat pada buah – buahan, yaitu salah satunya buah apel. Buah apel merupakan salah satu buah yang memiliki nilai yang penting baik dalam segi ekonomi untuk di ekspor serta untuk kebutuhan lokal (Sularso, 1997). Di Indonesia, komoditas hortikultura banyak yang mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh kebusukan dengan total kehilangan (losses) mencapai sekitar 25 – 40% (Muhtadi, D., Anjarsari, 1995). Hal ini, jika dibandingkan dengan negara maju, total kehilangannya (losses) hanya dibawah 25 % (Hatton & Pantastico, 1986).

Penerapan teknologi penyimpanan produk di dalam penyimpanan dingin/*cold storage* digunakan untuk mengurangi proses pembusukan dan kerusakan produk akibat aktivitas mikroba yang terjadi pada temperatur lingkungan. Metode pendinginan yang tepat dapat memastikan keseragaman temperatur produk yang ditumpuk pada *cold storage*. Banyak hal yang mempengaruhi aliran udara dan keseragaman temperatur di dalam *cold storage*, seperti volume, struktur, temperatur ruang, serta metode pendistribusian udara dingin dan lokasi evaporator di dalam *cold storage* (Hao, 2011).

Selain itu perbedaan posisi rak dan tumpukan produk di ruang pendingin serta desain tata letak evaporator juga dapat mempengaruhi keseragaman temperatur di dalam *cold storage* (Xie et al., 2006). Diperlukan analisis distribusi aliran udara dan keseragaman temperatur yang akurat agar efisiensi sistem refrigerasi di dalam *cold storage* menjadi maksimal. Namun, sulit untuk mengidentifikasi pola pembebanan yang optimal berdasarkan data empiris karena ada beberapa keterbatasan, misalnya, biaya eksperimen dan masalah teknis dengan pengumpulan data. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan *Computational*

Fluid Dynamic (CFD). Dengan menggunakan CFD, dapat dilihat pemotongan kontur dan vektor, serta dapat melihat pola distribusi temperatur dan aliran udara. Al-kindi et al. (2015) meneliti mengenai tata letak saluran masuk (inlet) dan keluar (outlet) udara ruang pendingin akan mempengaruhi distribusi temperatur dan aliran udara. Posisi inlet yang terletak di atas dan outlet di bawah, akan membuat temperatur serta aliran udara outlet lebih seragam.

Bishnoi et al. (2020) melakukan studi eksperimental mengenai *cold storage* komoditas hortikultura berupa apel dengan kapasitas penuh 5 ton. Dalam penelitian tersebut, peneliti melihat distribusi aliran udara dan temperatur *cold storage* ketika dalam kapasitas penuh. Penelitian difokuskan untuk mengetahui kecepatan udara dan temperatur udara terhadap keseragaman pendinginan produk di berbagai titik di dalam *cold storage*. Dalam penelitian tersebut juga melihat penurunan berat dari produk serta koefisien perpindahan panas pada setiap palet produk di dalam *cold storage*.

Ghiloufi et al. (2019) meneliti mengenai pengaruh adanya *baffle* atau *deflector* udara terhadap kinerja pendinginan *cold storage* dengan CFD. Digunakan persamaan *Reynolds Averaged Navier–Stokes* (RANS) dan persamaan energi dalam penelitian tersebut untuk mengetahui distribusi udara dan temperatur *cold storage* serta metode transiet dipilih untuk mengetahui perubahan distribusi udara dan temperatur di dalam *cold storage* setiap *time step*-nya.

Rajan et al. (2015) melakukan penelitian mengenai pengaturan *stacking* terhadap performa *cold storage* berskala laboratorium dengan refrigeran R-22. Agar pendinginan dapat seragam dan cepat dalam *cold storage*, palet produk harus ditumpuk dengan sedemikian rupa agar laju udara dingin dari *evaporator* dapat mengalir ke palet produk yang ada di dalam ruangan.

Pada penelitian ini dilakukan studi numerik *computational fluid dynamic* (CFD) dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS fluent dimana dilakukan pemodelan geometri 3 dimensi dari *cold storage*. Penelitian difokuskan untuk mengamati dan melakukan validasi dari hasil studi ekperimental *cold storage* buah apel dengan kapasitas 5 ton dari literasi acuan jurnal penelitian Bishnoi et al. (2020) terhadap hasil studi numerik.

Setelah dilakukan validasi, selanjutnya geometri *cold storage* akan dikembangkan dengan melakukan variasi pada geometri *cold storage*. Tujuan dari penelitian ini adalah, melakukan modifikasi geometri *cold storage* dari hasil validasi dengan variasi pada konfigurasi baffle dan jarak gap antar produk agar diperoleh geometri *cold storage* optimal yang dapat meningkatkan performa pendinginan *cold storage* serta keseragaman temperatur produk di dalam *cold storage*.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *finite volume method* (FVM). Untuk menyelesaikan persamaan kontinuitas, persamaan momentum, dan persamaan energi digunakan pendekatan dengan metode *Reynolds Averaged-Navier Stokes* (RANS) dengan model turbulensi *Shear-Stress Transport* (SST) $\kappa\text{-}\omega$ untuk mendefinisikan produk komoditas hortikultura digunakan pendekatan *solid block*. Kriteria data hasil simulasi yang dapat diolah adalah data yang dihasilkan telah mencapai *convergence* Untuk melihat fenomena yang terjadi selama proses simulasi dan kesesuaian proses simulasi dengan yang seharusnya maka ditampilkan data-data kuantitatif seperti skala residual, temperatur dalam *cold storage*. Data kuantitatif seperti temperatur ditampilkan dalam animasi berupa kontur dengan gradasi warna dimana setiap warna mewakili nilai tertentu. Data kuantitatif juga disimpan dengan mode *auto save* untuk setiap sekian time step selama proses simulasi guna dilakukan observasi lanjut setelah proses simulasi selesai.

1. Domain Komputasi

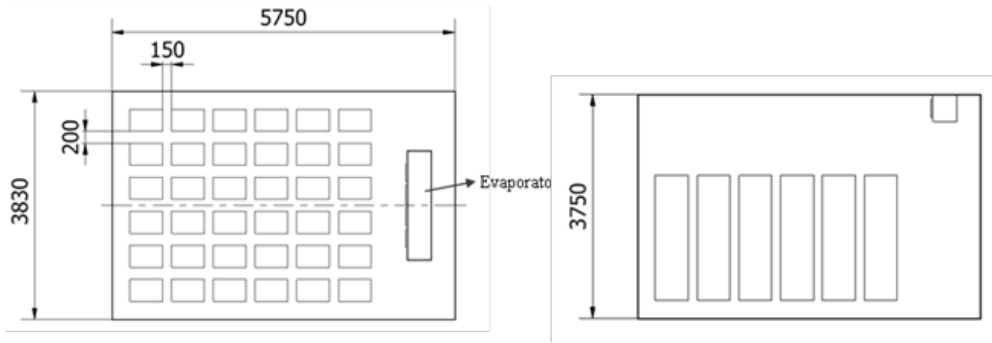
Model geometry 3D dari *cold storage* dibuat menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor 2018. Model *cold storage* tersebut didesain berdasarkan dengan referensi literatur dengan dimensi 5,75 m x 3,83 m x 3,75 m dengan total volume 81,86 m³. Di dalam *cold storage* tersebut terdapat 252 palet dengan produk berupa apel dengan dimensi setiap palet produknya adalah 0,55 m x 0,37 m x 0,3 m dengan berat total seluruh palet dan produknya adalah 5 ton. Layout 2 dimensi dari *cold storage* dapat dilihat pada Gambar 1. Model geometri 3D

dari *cold storage* yang telah dibuat di-import ke perangkat lunak ANSYS *Meshing* untuk pembuatan *meshing* pada geometri 3D. Kemudian setelah dilakukan *meshing*, geometri 3D di-import ke perangkat lunak ANSYS *Fluent* untuk dilakukan simulasi dengan parameter kondisi batas berupa kecepatan udara (v) yang keluar dari evaporator yang disesuaikan dengan literatur acuan. Selanjutnya pemodelan dalam bentuk 3D dilakukan pengambilan data dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan perangkat lunak ANSYS FLUENT versi 18.2. Hasil pengambilan data dari CFD akan dilakukan validasi dengan data studi experimental dari literasi acuan.

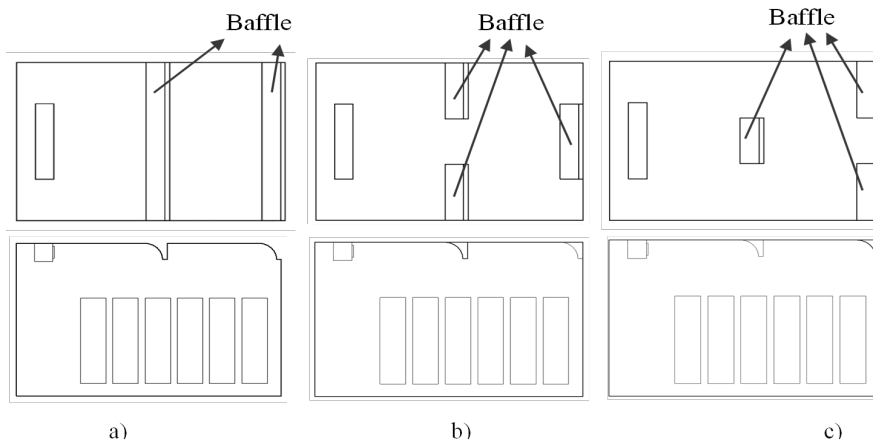
Setelah dilakukan validasi, langkah selanjutnya adalah pengambilan data kembali dengan penambahan variasi pada geometri *cold storage*. Variasi yang ditambahkan adalah adanya konfigurasi baffle pada geometri *cold storage*. Konfigurasi baffle diatur menjadi 3 jenis yaitu, *single segmented*, *orifice* dan *double segmented* yang dapat dilihat pada Gambar 2. Konfigurasi baffle berfungsi untuk memecah udara yang keluar dari evaporator *cold storage*, sehingga distribusi aliran udara di dalam *cold storage* dapat tersebar merata di dalam *cold storage* dan mengurangi titik panas (*hot zone*) di dalam *cold storage*.

Hasil dari variasi konfigurasi baffle akan dipilih variasi yang paling optimal dimana memiliki performa pendinginan dan keseragaman temperatur yang paling baik dibandingkan dengan geometri *cold storage* validasi. Selanjutnya geometri akan divariasikan kembali dengan pengaturan gap udara horizontal antar produk yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pengaturan gap udara horizontal antar produk bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak tumpukan produk dan pengaturan susunan produk terhadap distribusi aliran udara, temperature, waktu pendinginan produk di dalam *cold storage*.

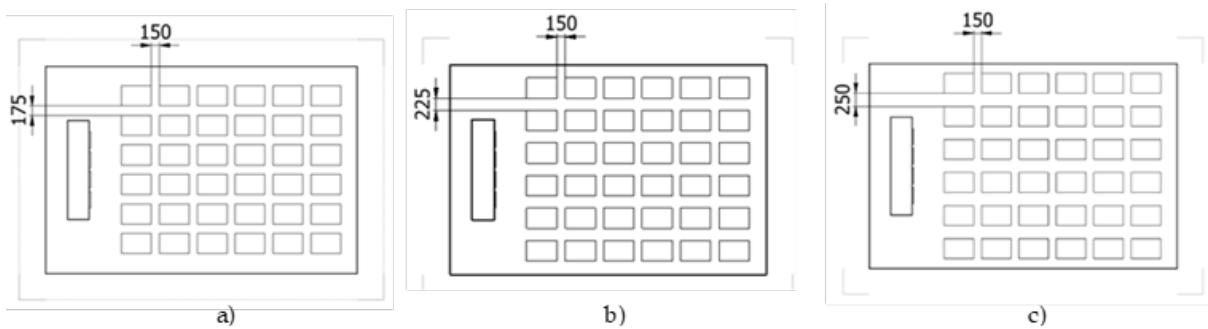
Hasil simulasi berupa data waktu pendinginan atau *cooling rate* yang diperoleh dari penurunan temperatur produk di dalam *cold storage* yang kemudian diplot dalam grafik temperatur rata-rata – produk terhadap waktu pendinginan produk (Diagram T-t) dan setiap variasi akan dibandingkan dengan model *cold storage* validasi untuk diperoleh variasi geometri *cold storage* yang paling optimal.



GAMBAR 1. Layout tampak atas dan tampak samping dari cold storage



GAMBAR 2. Cold storage dengan konfigurasi baffle (a) single segmented (b) orifice dan (c) double segmented



GAMBAR 3. Jarak gap udara horizontal antar produk (a) 175 mm, (b) 225 mm dan (c) 250 mm

2. Model Matematika

Udara di antara celah palet produk dimodelkan sebagai gas ideal. Model matematika yang digunakan berisi persamaan diferensial parsial yang mewakili hukum konversi massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi. Persamaan dasar tersebut kemudian diubah menjadi persamaan aljabar oleh perangkat lunak CFD yang kemudian disebut sebagai persamaan yang mengatur yang dikenal sebagai persamaan Navier-Stokes.

Persamaan kekekalan massa yang dikenal sebagai persamaan kontinuitas dinyatakan dengan persamaan 1. sebagai berikut:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Persamaan kekekalan momentum berdasarkan persamaan Navier-Stokes yang diturunkan dari hukum II Newton dinyatakan dengan persamaan 2. sebagai berikut:

$$\rho_f \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho_f \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

Reynolds Stress dapat dituliskan pada sisi kanan Persamaan 2. menggunakan hipotesis Boussinesq (ANSYS Guide) dan dapat dinyatakan dengan persamaan 3. sebagai berikut:

$$\rho_f \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho_f k \delta_{ij} \quad (3)$$

Dengan k dan t adalah energi kinetik dan viskositas, dimana k dapat dinyatakan dengan persamaan 4. sebagai berikut:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (4)$$

Persamaan kekekalan energi diperoleh dari turunan persamaan hukum pertama termodinamika yang dinyatakan dengan persamaan 5. sebagai berikut:

$$\frac{\partial \overline{T_f}}{\partial t} + \overline{u_i} \left(\frac{\partial \overline{T_f}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho_f C_{p_f}} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda_{eff}}{\rho_f C_{p_f}} \frac{\partial \overline{T_f}}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

λ_{eff} adalah konduktivitas termal efektif udara dan dapat dinyatakan dengan persamaan 6. sebagai berikut:

$$\lambda_{eff} = \lambda_f + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \quad (6)$$

Viskositas turbulensi (μ_t) untuk model $k-\omega$ dapat dinyatakan dengan persamaan 7. sebagai berikut:

$$\mu_t = \rho_f \frac{k}{\omega} \quad (7)$$

Dengan ω adalah frekuensi turbulen.

Viskositas turbulensi (μ_t) untuk model $k-\omega$ dapat juga dinyatakan dengan persamaan 8. sebagai berikut:

$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Dengan C_μ adalah konstanta dan ε adalah laju disipasi (*dissipation rate*).

3. Data koefisien perpindahan panas produk

Untuk menentukan koefisien perpindahan panas, setiap palet produk diasumsikan sebagai balok padat (*solid block*). Perpindahan panas antara palet produk dan udara dingin dicirikan oleh koefisien perpindahan panas konvektif (h_{cv}) yang terkait dengan fluks konvektif $q_{\text{produk-udara}}$ normal ke dinding produk. Koefisien perpindahan panas konveksi ini dapat dinyatakan dengan persamaan 9. sebagai berikut:

$$h_{cv} = \frac{q_{\text{produk-udara}}}{T_p - T_s} \quad (9)$$

dengan T_p = temperatur awal produk dan T_s = temperature penyimpanan saat produk dimasukkan ke dalam *cold storage*.

Perpindahan panas konduksi di dalam produk diasumsikan sebagai balok padat, didefinisikan menurut properti termofisik dari udara dan produk buah apel yang ditunjukkan pada Tabel 1.

3. Kondisi Batas

Pada bagian pengaturan/setup perangkat lunak ANSYS, model yang digunakan adalah *pressure based*, *absolute* dan *transient*. Kemudian persamaan yang digunakan yaitu model energi dan turbulensi $k-\omega$ SST. Kondisi pada domain *cold storage* ditetapkan sebagai fluida dengan udara sebagai material yang dipilih, sedangkan untuk domain produk ditetapkan sebagai *solid* dengan buah apel sebagai material yang dipilih.

Kondisi batas pada dinding penyimpanan dingin ditetapkan sebagai *wall*. Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida. Kondisi termal pada dinding *cold storage* menggunakan konveksi, dengan memasukkan nilai koefisien konveksi, temperatur aliran bebas, dan ketebalan masing-masing material penyusun dinding. Nilai koefisien konveksi dari dinding samping, atas dan lantai *cold storage* adalah $1.01 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Nilai temperatur aliran bebas untuk dinding samping, atas dan lantai *cold storage* 1.63°C , dengan pembangkitan panas pada semua dinding 0 W/m^3 . Ketebalan dinding *cold storage* terdiri dari tiga lapis material yaitu *galvanis plate - pu-foam - galvanis plate* dengan properti termofisik material ditunjukkan pada Tabel 2. Ketebalan setiap material adalah 0.005 m untuk material *galvanis plate* di seluruh dinding, 0.125 m untuk *pu-foam* pada dinding samping dan lantai serta 0.153 m untuk *pu-foam* pada dinding atas. Kondisi termal pada dinding produk buah apel menggunakan kopel yang ditentukan sesuai dengan sifat material (Lisowa et al., 2001).

Temperatur kondisi operasi pada simulasi adalah 25°C sedangkan tekanan 101325 Pa . Kondisi batas pada aliran udara keluar evaporator menggunakan kecepatan masuk. Kondisi batas kecepatan masuk digunakan untuk menentukan kecepatan aliran dan suhu yang meninggalkan evaporator. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran tak termampatkan. Evaporator *cold storage* memiliki empat buah kipas (*inlet*) yang nilai kecepatannya ditetapkan sebesar 1 m/s untuk setiap kipasnya dan diameter kipas evaporator 0.3 m yang diperoleh literasi acuan studi experimental (Bishnoi & Aharwal, 2020). Temperatur masuk kipas evaporator diatur pada 1.4°C . Intensitas turbulen diatur menggunakan skema $k-\omega$ dengan model SST dan mengaktifkan skema pemanasan viskos. Sebelum menjalankan simulasi, temperatur produk dilakukan patch pada 28°C dan temperatur udara pada 1.4°C .

TABEL 1. Properti termofisik udara dan buah apel (Lisowa et al., 2001)

Udara	
Dynamic viscosity, μ_{air} ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)	1.72×10^{-5}
Density, ρ (kg/m^3)	1.293
Specific Heat, C_{pair} ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	1004
Thermal Conductivity, k ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	24.07×10^{-3}
Produk (Buah Apel)	
Density, ρ (kg/m^3)	898
Specific Heat Above Freezing, C_{PL} ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	3829
Thermal Conductivity, k ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	0.463

TABEL 2. Properti termofisik material penyusun dinding *cold storage* (Bishnoi & Aharwal, 2020)

Lapisan	Ketebalan (mm)	Massa Jenis (kg/m^3)	Thermal Conductivity ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	Specific Heat ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
Dinding				
Polyurethane Foam	125	30	0.025	1.5
Plat Galvanis	5	7200	52	0,47
Atap				
Polyurethane Foam	143	30	0.025	1.5
Plat Galvanis	5	7200	52	0,47

HASIL DAN PEMBAHASAN

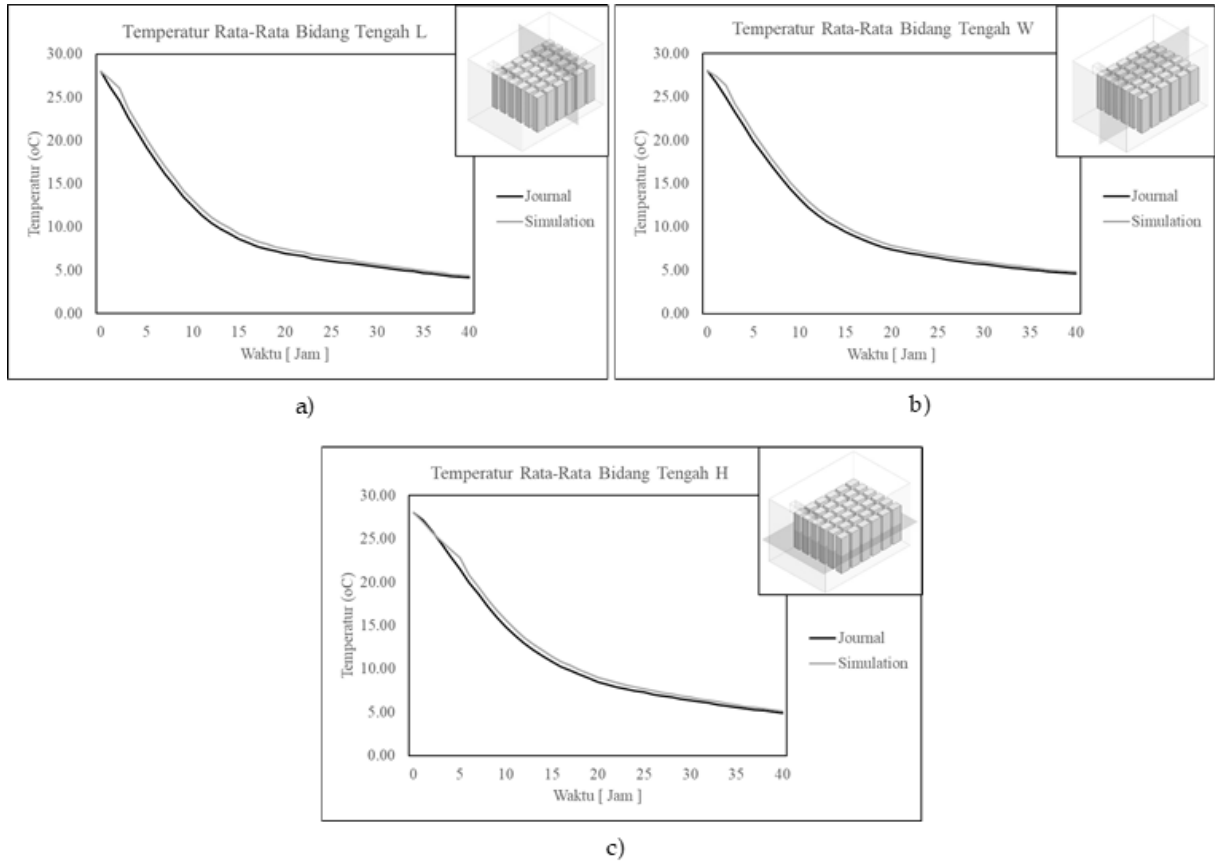
1. Komparasi dan validasi hasil simulasi

Validasi pada penelitian ini akan dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan studi experimental yang sudah dilakukan oleh Bishnoi *et al.* (2020). Penelitian yang dilakukan oleh Bishnoi *et al.* (2020) adalah studi eksperimental mengenai *cold storage* komoditas hortikultura berupa apel dengan kapasitas penuh 5 ton. Peneliti melihat distribusi aliran udara dan temperatur *cold storage* ketika dalam kapasitas penuh. Penelitian difokuskan untuk mengetahui kecepatan udara dan temperatur udara terhadap keseragaman pendinginan produk di berbagai titik di dalam *cold storage*.

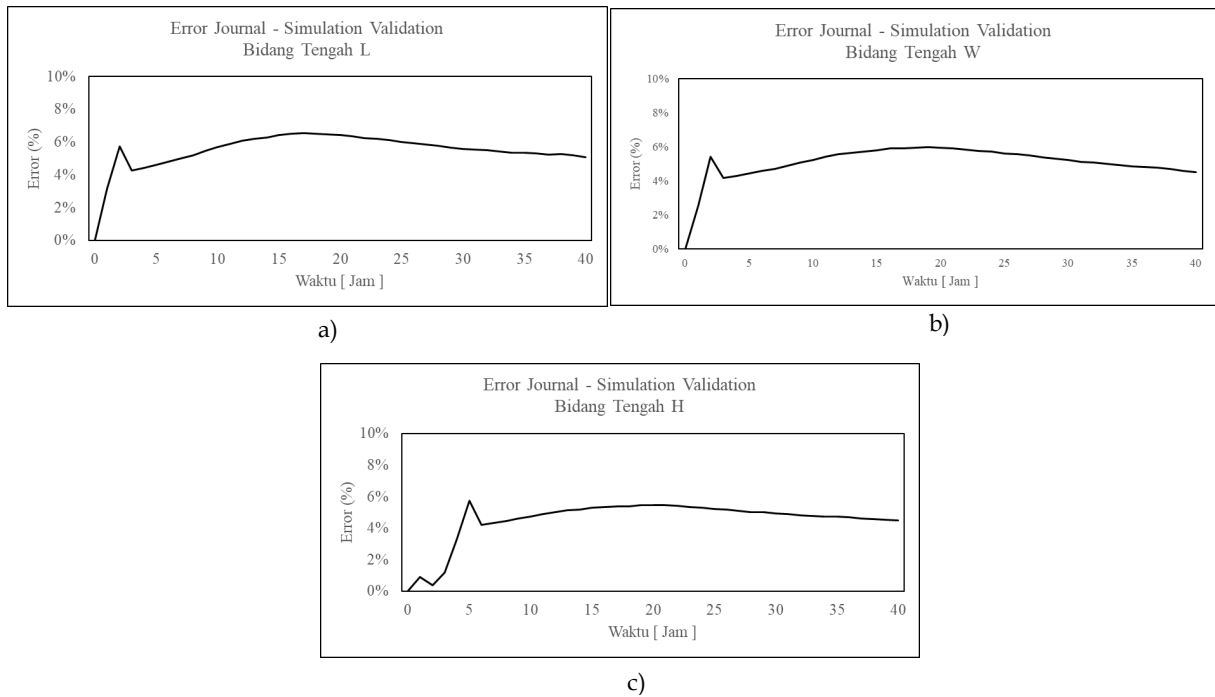
Metode simulasi yang dilakukan perlu diuji validitasnya dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil yang didapat oleh studi experimental dari literatur acuan. Nilai yang dibandingkan adalah waktu pendinginan atau

cooling rate hasil simulasi numerik yang dilakukan simulasi dengan kondisi geometri, tata letak produk, kecepatan dan temperatur evaporator yang sama dengan literasi acuan.

Distribusi temperatur dan keseragamannya merupakan parameter paling penting dari aktivitas termal di dalam *cold storage*. Perbandingan temperatur rata – rata pada waktu pendinginan yang berbeda diambil dari beberapa bidang di dalam *cold storage*. Bidang *cold storage* yang dilakukan validasi dapat dilihat pada Gambar 4, dimana terdapat tiga posisi bidang yaitu temperatur rata – rata bidang tengah L (a), bidang tengah W (b) dan bidang tengah H (c). Selanjutnya dilakukan perbandingan error antara temperatur rata – rata hasil studi experimental dengan hasil simulasi pada tiga bidang yang dilakukan validasi. Dapat dilihat pada Gambar 5 bahwa perbandingan temperatur rata – rata bidang tengah L (a), bidang tengah W (b) dan bidang tengah H (c) memiliki nilai error tidak melebihi 10% yang sehingga metode simulasi yang digunakan dapat diterima sebagai metode yang valid.



GAMBAR 4. Grafik perbandingan temperatur rata - rata produk terhadap waktu pendinginan pada tiga bidang validasi journal dan simulasi validasi

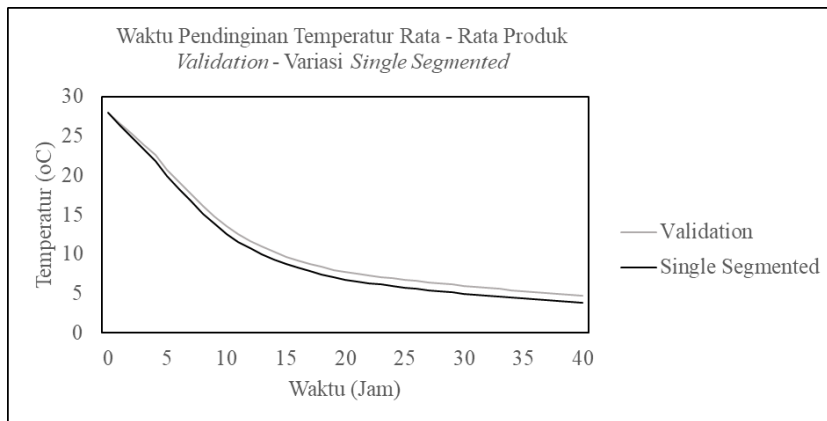


GAMBAR 5. Grafik perbandingan error temperatur rata - rata produk terhadap waktu pendinginan pada tiga bidang validasi journal dan simulasi validasi

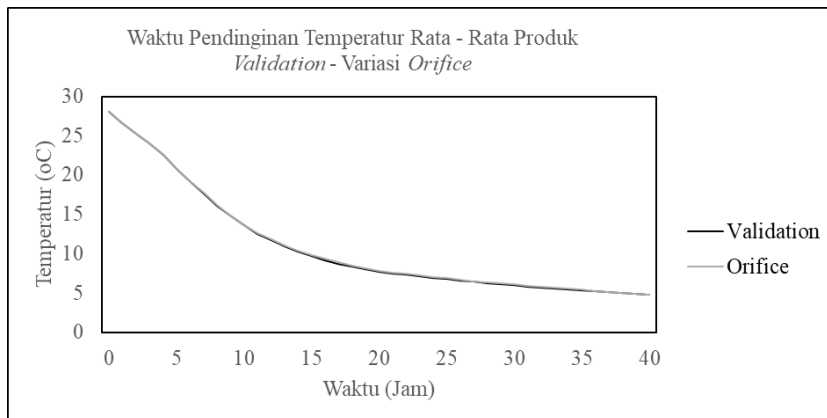
2. Hasil simulasi dengan variasi konfigurasi baffle

Simulasi numerik mencakup variasi konfigurasi baffle yang terdiri dari tiga jenis konfigurasi baffle yaitu, *single segmented*, *orifice* dan *double segmented* baffle. Hasil simulasi menunjukkan perbandingan waktu pendinginan dari temperatur rata – rata produk antara simulasi validasi jurnal dengan tiga variasi konfigurasi baffle. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa variasi konfigurasi baffle dengan jenis *single segmented* memiliki hasil simulasi dengan penurunan waktu pendinginan yang paling cepat dibandingkan dengan simulasi validasi jurnal yang dapat dilihat pada Gambar 6. Hal ini sesuai dengan penelitian Ghiloufi et al. (2019) mengenai penambahan *baffle* pada tengah ruangan *cold storage* dapat mengoptimalkan distribusi udara dan meningkatkan laju pendinginan produk di

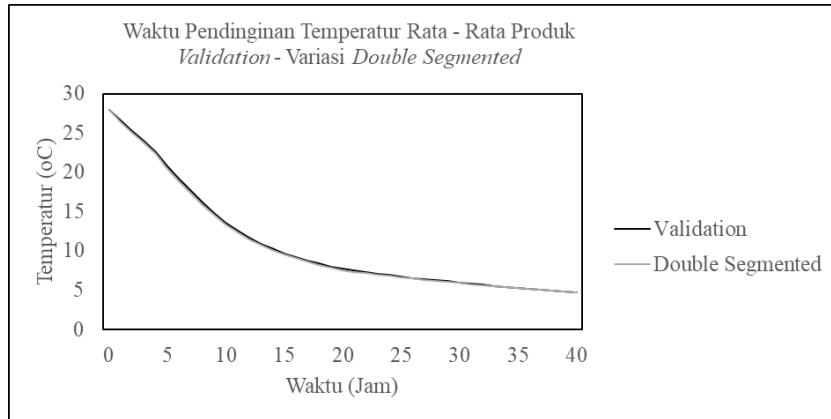
dalam *cold storage*. Hal ini mengoptimalkan resirkulasi udara di dalam *cold storage* dan memungkinkan untuk meningkatkan laju pendinginan dengan lebih cepat. Namun, dua jenis konfigurasi baffle yaitu, *orifice* dan *double segmented* tidak memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap penurunan waktu pendinginan *cold storage*. Perbandingan dari waktu pendinginan dari temperatur rata – rata produk dari simulasi validasi jurnal dengan variasi *orifice* baffle dapat dilihat pada Gambar 7 dan simulasi validasi jurnal dengan variasi *double segmented* baffle dapat dilihat. Hal ini dikarenakan jenis konfigurasi baffle *orifice* dan *double segmented* tidak dapat mengoptimalkan resirkulasi udara di dalam *cold storage* dengan baik dibandingkan dengan variasi *single segmented* baffle.



GAMBAR 6. Grafik perbandingan temperatur rata-rata produk terhadap waktu pendinginan antara simulasi validasi - variasi *single segmented* baffle



GAMBAR 7. Grafik perbandingan temperatur rata-rata produk terhadap waktu pendinginan antara simulasi validasi - variasi *orifice* baffle

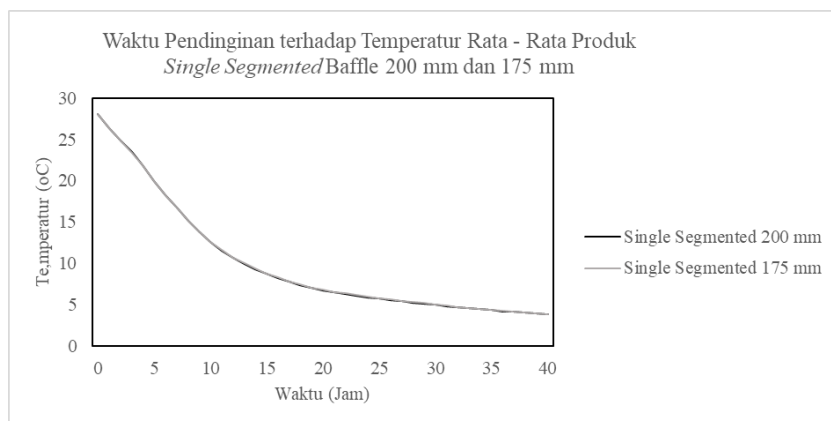


GAMBAR 8. Grafik perbandingan temperatur rata-rata produk terhadap waktu pendinginan antara simulasi validasi – variasi *double segmented* baffle

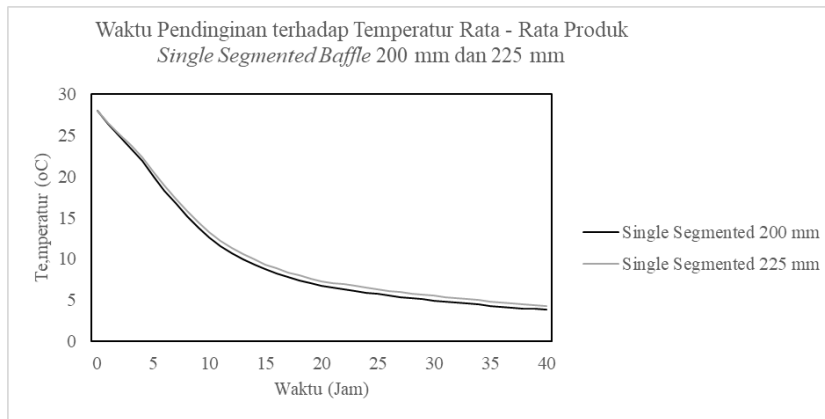
3. Hasil simulasi dengan variasi konfigurasi Jarak gap udara horizontal antar produk

Selanjutnya simulasi numerik dilakukan untuk mengetahui pengaruh jarak gap udara horizontal antar produk di dalam *cold storage*. Variasi jarak gap udara horizontal dibagi menjadi tiga jenis yaitu: Jarak gap udara horizontal antar produk 175 mm, 200 mm dan 225 mm. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa jarak gap udara horizontal 175 mm ke 200 mm terjadi penurunan waktu pendinginan produk dimana waktu pendinginan semakin cepat pada jarak 200 mm yang dapat dilihat pada Gambar 9 walaupun tidak signifikan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Rajan et al. (2015) yang menunjukkan distribusi temperatur akan semakin baik dengan adanya penambahan celah/gap pada kolom dari tumpukan produk sampai batas yang pasti. Adanya peningkatan gap memberikan kecenderungan pencapaian temperatur rendah pada *cold storage* dengan waktu pendinginan yang lebih cepat. Hal ini terjadi karena adanya peningkatan celah lebar dari saluran udara.

Peningkatan lebar dari saluran udara memberikan jalan udara untuk disirkulasikan dengan lebih baik pada tiap rak di dalam *cold storage*. Namun, efek peningkatan jarak gap udara horizontal antar produk tidak terjadi pada jarak gap udara 200 mm ke 225 mm. Hal ini dikarenakan penambahan jarak gap udara horizontal memiliki batas yang pasti, dimana jika peningkatkan jarak gap udara horizontal antar produk tidak secara proporsional, dapat mengubah karakteristik perpindahan panas tumpukan produk. Hal ini dapat dilihat pada hasil simulasi numerik pada jarak gap udara horizontal antar produk dengan jarak gap 200 mm ke 225 mm. Dapat dilihat pada Gambar 10, bahwa tidak terjadi penurunan waktu pendinginan produk dari jarak celah 200 mm ke 225 mm, namun yang terjadi sebaliknya. Hal sesuai dengan penelitian dari Chourasia & Goswami (2007), dimana penambahan jarak gap udara horizontal yang tidak proporsional atau melebihi batas pasti dapat mengubah karakteristik perpindahan panas antara produk dengan udara di dalam *cold storage*.



GAMBAR 9. Grafik perbandingan temperatur rata-rata produk terhadap waktu pendinginan antara *single segmented* baffle dengan jarak gap udara 200 mm dan 175 mm



GAMBAR 10. Grafik perbandingan temperatur rata-rata produk terhadap waktu pendinginan antara *single segmented* baffle dengan jarak gap udara 200 mm dan 225 mm

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Validasi antara hasil simulasi dengan studi experimental memiliki nilai error di bawah 10%, sehingga metode simulasi yang digunakan dapat diterima sebagai metode yang valid.
2. Berdasarkan hasil perbandingan simulasi numerik antara desain validasi dengan tiga jenis variasi konfigurasi baffle yaitu *single segmented*, *orifice* dan *double segmented*. *Cold storage* dengan variasi *single segmented* merupakan variasi konfigurasi baffle yang paling optimal, dimana waktu pendinginan produk paling cepat dibandingkan dengan hasil simulasi numerik validasi jurnal.
3. Selanjutnya variasi *single segmented* dilakukan variasi kembali yaitu jarak gap udara horizontal antara produk dengan jarak gap 175 mm, 200 mm dan 225 mm. Dimana adanya peningkatan jarak gap udara akan memberikan kecenderungan pencapaian temperatur rendah pada *cold storage* dengan waktu pendinginan yang lebih cepat. Namun, penambahan jarak gap udara horizontal yang tidak proporsional atau melebihi batas, dapat mengubah karakteristik perpindahan panas antara produk dengan udara di dalam *cold storage*, sehingga yang terjadi adalah waktu pendinginan produk menjadi semakin lama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada seluruh civitas akademi Prodi Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada atas segala dukungan yang telah diberikan untuk menyelesaikan penelitian ini.

PENULISAN PUSTAKA DAN DAFTAR PUSTAKA

- Al-Kindi, H., Purwanto, Y. A., & Wulandani, D. (2015). Analisis CFD Aliran Udara Panas pada Pengering Tipe Rak dengan Sumber Energi Gas Buang Distribution Analysis Hot Air Flow of Rack Type Dryer With Energy Source From Exhaust Gas Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 3(1), 9–16.
- Bishnoi, R., & Aharwal, K. R. (2020). Experimental investigation of air flow field and cooling heterogeneity in a refrigerated room. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(6), 1434–1443. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.05.004>
- Chourasia, M. K., & Goswami, T. K. (2007). Simulation of Effect of Stack Dimensions and Stacking Arrangement on Cool-down Characteristics of Potato in a Cold Store by Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 96(4), 503–515.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.010>

Ghiloufi, Z., & Khir, T. (2019). CFD modeling and optimization of pre-cooling conditions in a cold room located in the South of Tunisia and filled with dates. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8), 3668–3676. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03812-8>

Hao, X. (2011). Simulation and analysis on the flow field of the low temperature minitype cold store. *Heat and Mass Transfer - HEAT MASS TRANSFER*, 47, 771–775. <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0764-1>

Hatton, T. ., & Pantastico, E. . (1986). Persyaratan Masing-Masing Komoditi. In Kamariyani (Ed.), *Fisiologi Pasca Panen, Penanganan dan Pemanfaatan Buah-Buahan dan Sayuran Tropika dan Sub Tropika*. Gadjah Mada University Press.

Herista, M. I. S. (2015). *Sikap Dan Preferensi Konsumen Buah Jeruk Lokal Dan Jeruk Impor (Kasus Kota Bandar Lampung, Lampung)*.

Muhtadi, D., Anjarsari, B. (1995). Meningkatkan Nilai Tambah Komoditas Sayuran. *Seminar Nasional Komoditas Sayuran*.

Rajan, A., Aharwal, K. R., & Bhadu, R. (2015). *Performance Analysis of Cold Storage for the Different Stacking Arrangements*. 3(4), 455–467.

Sularso, R. B. (1997). *Budidaya apel* (1st ed.). Kanisius.

Xie, J., Qu, X. H., Shi, J. Y., & Sun, D. W. (2006). Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.044>

PENULIS:

Dhimas Thufeil Ghifari

Teknik Mesin, Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Email: dhimasthufeil@mail.ugm.ac.id

Fauzun

Teknik Mesin, Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Email: fauzun71@ugm.ac.id