

Perancangan Sistem *Air Blast Freezing* Berkapasitas 25 Kg dengan Sistem Refrigerasi *Cascade* Menggunakan *Refrigerant R290/R32*

Tikkos Sihombing^{1*}, Ibnu Rizqullah², Fayzil Auliaswan², Rahmat Iman Mainil²,
Awaludin Martin^{2*}

¹Prodi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru, Kota Pekanbaru, 28293, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru, Kota Pekanbaru, 28293, Indonesia

*Corresponding author: awaludinmartin01@gmail.com

Abstract

Indonesia is a country rich in marine catch, especially shrimp commodities, with a production volume reaching 1.12 million tons, but only approximately 19.64% are exported. One of the main contributing factors to the low export rate is poor temperature control during the cold chain process. This study aims to design and develop an air blast freezing system with a capacity of 25 kg and to compare the design results with experimental performance. The system is designed to increase cooling capacity and maintain product temperatures between -18 °C and -25 °C through design, fabrication, and experimental testing. The air blast freezing system is configured with two evaporator units and two condenser units, with an evaporator surface area of 4.84 m² and a condenser surface area of 8.98 m², and component dimensions of 50 × 39 × 9 cm for the evaporator and 29 × 35 × 14 cm for the condenser. The system is supported by a low temperature cycle (LTC) compressor with a power input of 725 W and a high temperature cycle (HTC) compressor with a power input of 339 W. Refrigerant flow is controlled using capillary tubes with a length of 1.62 m and diameters of 0.031 inch (LTC) and 0.052 inch (HTC). Experimental results show that the system achieves product temperatures between -19.6 °C and -25.3 °C, with a cascade COP of 3.09 under design conditions and an actual COP of 2.413.

Keywords: *Air blast freezing, cascade refrigeration, temperature stability, shrimp export, cold chain.*

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang kaya akan hasil tangkapan laut terutama pada komoditas udang dengan volume produksi mencapai 1,12 juta ton, namun sekitar 19,64% yang diekspor. Rendahnya angka ekspor ini salah satunya disebabkan penjagaan temperatur yang buruk selama proses rantai dingin. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem *air blast freezing* berkapasitas 25 kg, serta membandingkan hasil perancangan dengan hasil pengujian. Sistem dirancang untuk meningkatkan kapasitas pendinginan dan menjaga temperatur produk pada temperatur -18 °C hingga -25 °C melalui metode perancangan, fabrikasi, dan pengujian eksperimental. Sistem *air blast freezing* dirancang menggunakan dua unit evaporator dan dua unit kondensor dengan luas permukaan evaporator sebesar 4,84 m² dan kondensor 8,98 m², dengan dimensi evaporator 50 × 39 × 9 cm dan kondensor 29 × 35 × 14 cm. Sistem didukung oleh kompresor siklus *low temperature cycle* (LTC) dengan daya 725 W dan kompresor siklus *high temperature cycle* (HTC) dengan daya 339 W. Pengaturan aliran refrigeran dilakukan menggunakan pipa kapiler sepanjang 1,62 m dengan diameter 0,031 inch (LTC) dan 0,052 inch (HTC). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai temperatur produk antara -19,6 °C hingga -25,3 °C dengan COP *cascade* desain 3,09 dan COP aktual 2,413.

Kata kunci: *Air blast freezing, refrigerasi bertingkat, stabilitas temperatur, ekspor udang, rantai dingin.*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang kaya akan hasil tangkapan laut terutama pada komoditas udang. Pada tahun 2023 volume produksi udang sebesar 1,12 juta ton dengan nilai Rp 78,08 triliun dan volume ekspor sebesar 220 ribu ton. Dari data tersebut hanya 19,64% saja yang diekspor dari total produksinya dengan nilai ekspor

sebesar USD 1,7 miliar atau Rp 27,4 triliun [1]. Seiring dengan upaya peningkatan produksi ekspor udang di Indonesia, tantangan untuk menjaga kualitas produk selama rantai distribusi tetap menjadi perhatian. Karena dari total ekspor tersebut tidak semuanya diterima oleh konsumen luar.

Berdasarkan data penolakan produk perikanan Indonesia ke market eropa tahun 2010-2020 dari 83 kasus penolakan, kontrol temperatur yang buruk menjadi kasus kedua tertinggi penolakan produk perikanan Indonesia yaitu 16,87% kasus penolakan [2]. Kontrol temperatur yang buruk pada setiap tahap rantai dingin distribusi makanan laut dapat menyebabkan peningkatan dan fluktuasi temperatur produk selama transportasi ke negara tujuan [3]. Kontrol temperatur yang buruk tersebut menyebabkan tumbuhnya mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan *yeast* yang akan menurunkan kualitas produk. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan alat untuk pembekuan cepat yang dapat menjaga temperatur produk pada temperatur $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

Beberapa penelitian terkait *air blast freezing* diantaranya, Syaka merancang *air blast freezing* dengan sistem refrigerasi bertingkat dalam skala rumah tangga. Adapun permasalahan utama dalam penelitian ini adalah penyimpanan hasil tangkapan laut yang ada masih bergantung pada musim tertentu dan membuat alat yang dapat mencegah pembusukan dan kerusakan pada hasil tangkapan laut. Sistem pendingin ini menggunakan refrigeran R22/R32 dengan sistem refrigerasi bertingkat. Setelah dilakukan pengujian didapatkan temperatur evaporator $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatur ruang pendingin $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan COP desain 1,418 dan COP pengujian 1,018 [5].

Wang melakukan optimalisasi temperatur untuk sistem pendingin bertingkat dan pompa panas dengan menggunakan *extreme seeking control* (ESC). Permasalahan dalam penelitian ini yaitu belum adanya sistem kontrol untuk mengoptimalkan temperatur dalam waktu nyata (*real-time*) pada kondisi pengujian yang bervariasi. Refrigeran yang digunakan pada penelitian ini adalah R134a/CO₂, dengan sistem pendinginan refrigerasi bertingkat. Metode yang digunakan untuk mengendalikan temperatur pendingin adalah *extreme seeking control* (ESC). Hasilnya didapatkan temperatur evaporator $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,

COP sistem 1,63, dan deviasi temperatur $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

Zhang melakukan pengujian pada performa R1270/CO₂ dengan sistem refrigerasi bertingkat. Pada penelitian sebelumnya ditemukan sistem refrigerasi bertingkat yang menggunakan NH₃ sering digunakan, namun karena toksisitas dan sifat mudah terbakar NH₃ diganti dengan CO₂. Didapatkan hasil temperatur penguapan $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$, COP sistem *cascade* meningkat, dan efisiensi isentropik kompresor R1270 menurun dari 78,5% menjadi 74,7% [7].

Dwinanto melakukan analisis performa *air blast freezing* menggunakan refrigeran hidrofluorokarbon dan hidrokarbon. Permasalahan dalam penelitian ini penggunaan refrigeran alternatif yang ada masih menggunakan refrigeran dengan potensi GWP yang cukup tinggi. Kemudian penelitian ini mengevaluasi dan membandingkan kinerja termodinamika dari berbagai refrigeran untuk aplikasi pendinginan. Penelitian ini menggunakan refrigeran R290/R600a dan sistem refrigerasi bertingkat. Hasilnya temperatur penguapan $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, COP R290/R600a lebih tinggi dibandingkan dengan R404a/R507a yaitu 14,39% dan 12,31% secara berturut [8].

Oginni, melakukan perancangan dan evaluasi performa sistem refrigerasi bertingkat untuk penyimpanan plasma darah. Permasalahan pada penelitian ini yaitu keterbatasan sistem pendingin yang diperlukan untuk aplikasi khusus seperti penyimpanan plasma darah, vaksin, dan produk medis lainnya. Penelitian ini menggunakan refrigeran R404a/R410a, dengan sistem refrigerasi bertingkat, dan sampel penelitian plasma darah. Hasilnya didapatkan temperatur evaporasi $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, COP LTC 4,49, COP HTC 7.66, dan COP sistem 2,45 [9, 10].

Nasution melakukan perancangan dan pengujian *air blast freezing* berkapasitas 5 kg dengan sistem refrigerasi bertingkat untuk mencegah pembusukan udang windu. Permasalahan pada penelitian ini adalah

permasalahan terkait pembusukan udang ketika udang windu diekspor dan menghilangkan penggunaan HFC dengan GWP tinggi pada sistem pendingin udara dan pendingin komersial baru. Penelitian ini menggunakan refrigeran R290 dan R32 dengan produk pengujian udang *black tiger*. Pada penelitian ini tercapai temperatur evaporasi -40°C , temperatur produk -30°C , COP desain 1,548, COP aktual 1,334. Dalam pengujian dengan tekanan 12 bar dan berat 5 kg serta variasi kecepatan kipas, ditemukan bahwa kecepatan kipas 3,3 m/s menghasilkan waktu pembekuan yang paling cepat [11, 12].

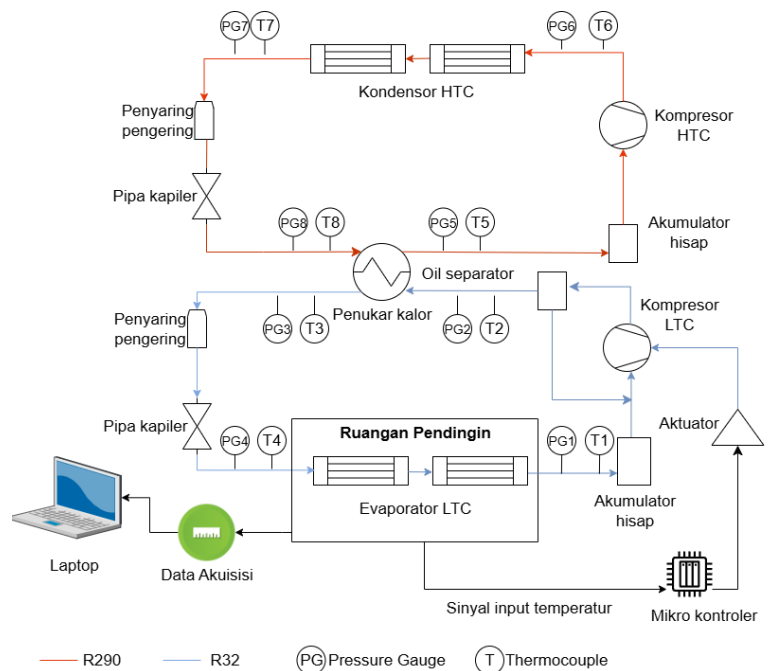
Berdasarkan data produksi dan ekspor budidaya udang di Indonesia, dengan volume produksi sebesar 1,12 Juta (ton), hanya 19,64% yang diekspor. Rendahnya angka ekspor ini salah satunya disebabkan penjagaan temperatur yang buruk selama proses rantai dingin pasokan laut. penjagaan temperatur yang buruk tersebut menyebabkan tumbuhnya mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan *yeast* yang akan menurunkan kualitas produk.

Penelitian ini menitikberatkan pada peningkatan kapasitas dan stabilitas temperatur pada sistem *air blast freezing* untuk mendukung rantai dingin ekspor udang. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem *air blast freezing* berkapasitas 5 kg masih mengalami fluktuasi temperatur ruang yang cukup besar, sehingga proses pembekuan tidak konsisten dan berpotensi menurunkan kualitas produk selama penyimpanan dan distribusi. Untuk memenuhi kebutuhan rantai dingin pada penanganan beban 25 kg, diperlukan sistem dengan kapasitas lebih besar dan kontrol temperatur yang lebih stabil. Oleh karena itu, pada penelitian ini dirancang *air blast freezing* berkapasitas 25 kg yang mampu mendinginkan produk hingga -30°C menggunakan sistem refrigerasi bertingkat dengan refrigeran ramah lingkungan R290 dan R32, yang memiliki nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan *Global Warming Potential* (GWP) lebih rendah dibandingkan batas yang ditetapkan *United*

States Environmental Protection Agency (US EPA) [13]. Dengan peningkatan kapasitas dan stabilitas temperatur ini, penelitian ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan sistem sebelumnya dan memenuhi standar pembekuan cepat pada rantai dingin produk perikanan.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah perancangan, pembuatan, dan pengujian *Air blast freezing* dengan peningkatan pada kapasitas ruang pendingin sebesar 25 kg. Perancangan *air blast freezing* diawali dengan studi literatur untuk menentukan parameter yang dibutuhkan, Adapun parameter perancangan *air blast freezing* yaitu parameter desain *low temperature cycle* (LTC), parameter desain *high temperature cycle* (HTC), dan parameter desain pipa kapiler. Setelah didapatkan spesifikasi hasil rancangan *air blast freezing* dilanjutkan pembuatan dan instalasi komponen *air blast freezing*. Setelah itu dilakukan pengambilan data dan dianalisa untuk ditarik kesimpulan. Skematik alat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Skematik alat *air blast freezing*

Pada sistem ini, kondensor dari *low temperature cycle* (LTC) didinginkan oleh evaporator dari *high temperature cycle* (HTC). Kedua komponen tersebut terintegrasi dalam satu unit *heat exchanger*, yang berfungsi sebagai penghubung antara kedua siklus. Tekanan dan temperatur pada setiap titik diukur menggunakan *pressure gauge* dan *thermocouple*, untuk pembacaan temperatur pada produk menggunakan data akuisisi yang direkam pada laptop.

Perancangan sistem *air blast freezing* menggunakan R32 pada siklus LTC dan R290 pada siklus HTC, dengan asumsi sebagai berikut:

1. Temperatur *refrigerant* masuk evaporator LTC -40°C .
2. Temperatur *refrigerant* masuk evaporator HTC -5°C .
3. Temperatur produk -30°C .
4. Tekanan kompresor LTC 8 bar.
5. Tekanan kompresor HTC 15 bar.
6. Ketebalan dinding ruang ABF 2 mm, 150 mm dan 1 mm masing-masing menggunakan plat besi, *polyurethane* dan *stainless steel*.
7. Beban pendinginan dari udang 25 kg, beban kipas dan beban transmisi.
8. Kalor spesifik udang $3,63 \text{ kJ/kg.K}$ dan kalor *latent* udang 277 kJ/kg [14].
9. Waktu pembekuan 6 jam.
10. Konduktivitas termal plat besi, *polyurethane* dan *stainless steel* adalah $80,2 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, $0,026 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ dan $15,1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ [15, 16].

2.1 Beban Pendinginan *Air blast freezing*

Beban pendinginan pada sistem *air blast freezing* adalah total energi panas yang harus diserap dari produk dan lingkungan sekitar agar produk dapat dibekukan hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Berikut ini merupakan data awal rancangan yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Sejumlah parameter tambahan seperti kapasitas panas spesifik, kalor laten, konduktivitas termal, faktor beban panas motor listrik, densitas, volume spesifik, entalpi, bilangan Prandtl, bilangan Nusselt,

dan viskositas diperoleh melalui data properti termodinamika serta ditinjau dari berbagai referensi, termasuk jurnal ilmiah, buku teks, dan penelitian sebelumnya yang relevan [17, 18]. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung beban pendinginan evaporator LTC menggunakan persamaan pada Tabel 2.

Tabel 1 Data awal perancangan

No	Parameter	Lambang	Nilai
1	Berat produk	m	25 kg
2	<i>Specific heat</i>	cp	$4,18 \text{ kJ/kg.K}$
3	<i>Heat latent</i>	hlt	277 kJ/kg
4	Temperatur awal produk	T awal produk	27°C
5	Temperatur <i>freezing</i>	T <i>freezing</i>	$-2,2^{\circ}\text{C}$
6	Temperatur <i>frozen</i>	T <i>frozen</i>	-30°C
7	Waktu pembekuan	t	6 jam
8	Konduktivitas as thermal SS	K _{SS}	$15,1 \text{ W/m.K}$
9	Konduktivitas as thermal PU	K _{PU}	$0,026 \text{ W/m.K}$
10	Konduktivitas as thermal plat	K _{plat}	$80,2 \text{ W/m.K}$
11	<i>Safety factor</i>	SF	1,1

Tabel 2 Parameter perhitungan beban pendinginan evaporator LTC

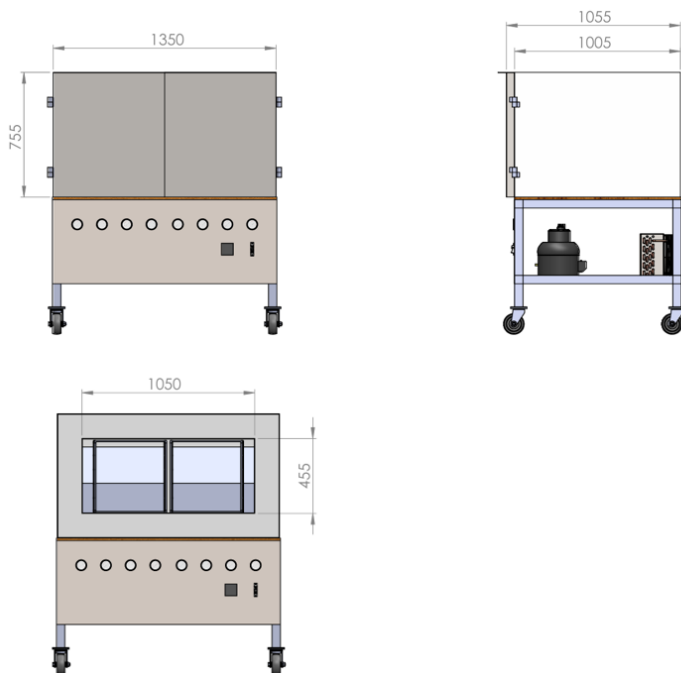
No	Parameter	Persamaan
1	<i>Fresh load</i>	$Q_{\text{fresh}} = m \times C_p \times \Delta T$
2	<i>Freezing load</i>	$Q_{\text{freezing}} = m \times h_{\text{lt}}$
3	<i>Frozen load</i>	$Q_{\text{frozen}} = m \times C_p \times \Delta T$
4	<i>Transmission load</i>	$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_{\text{out}} A} + \frac{L}{k_{\text{Alm}} A} + \frac{L}{k_{\text{pu,foam}} A} + \frac{1}{k_{\text{ss}} A} + \frac{1}{h_{\text{in}} A}$ $Q_{\text{trans}} = \frac{T_{\text{ambient}} - T_{\text{evap}}}{R_{\text{total}}}$
5	<i>Fan evap load</i>	$Q_{\text{fan}} = P \times f$

Tabel 3 berikut merupakan parameter perhitungan beban pendinginan evaporator HTC.

Tabel 3 Parameter perhitungan beban pendinginan evaporator HTC

No	Parameter	Persamaan
1	LTC condensor load	$Q_{kondensor} = \dot{m}(\Delta h)$
2	Transmission load heat exchanger	$R_{total} = \frac{1}{h_i A} + \frac{L}{kA}$
		$Q_{trans} = \frac{1}{\frac{1}{h_o A} + \frac{L}{kA}} (T_{ambient} - T_{evap})$

Dimensi geometrik ruang pendingin diperlihatkan pada Gambar 2 dan digunakan untuk menghitung luas permukaan sisi-sisi ruang pendingin, sebagai acuan dalam perhitungan beban transmisi kalor melalui dinding, lantai, dan atap.



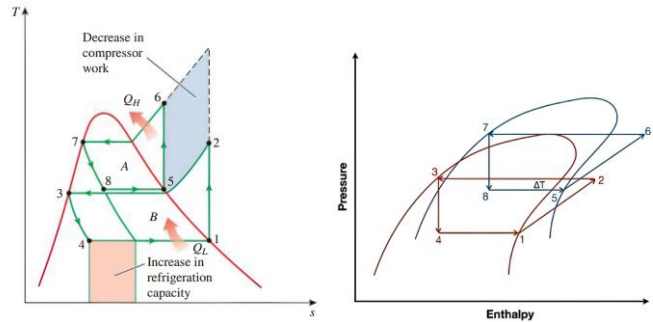
Gambar 2 Dimensi ruang pendingin

2.2 Siklus refrigerasi Cascade

Siklus refrigerasi *cascade* digunakan dalam siklus kerja *air blast freezing* yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Untuk menghitung siklus sistem refrigerasi *cascade* pada sistem *air blast freezing* dilakukan dengan menghitung entalpi, tekanan, temperatur, dan entropi

masing-masing siklus LTC dan HTC pada setiap keadaan. *Properties refrigerant* diperoleh dari tabel termodinamika untuk menghitung laju aliran massa, kerja kompresor, dan beban kondensor sehingga didapatkan nilai *coefficient of performance* (COP) berdasarkan persamaan pada Tabel 4.



Gambar 3 Siklus T-s dan P-h refrigerasi *cascade* [16]

Tabel 4 Parameter perhitungan sistem *air blast freezing*

No	Parameter	Persamaan
1	Laju aliran massa refrigerant	$\dot{m}_B = \frac{Q_{evap LTC}}{h_1 - h_4}$
		$\dot{m}_A = \frac{Q_{evap HTC}}{h_5 - h_8}$
2	Kerja kompresor	$W_{comp B} = \dot{m}(h_2 - h_1)$
		$W_{comp A} = \dot{m}(h_5 - h_6)$
3	Beban kondensor	$Q_{cond A} = \dot{m}(h_2 - h_3)$
		$Q_{cond B} = \dot{m}(h_6 - h_7)$
4	COP	$COP = \frac{Q_L}{W_{comp B} + W_{comp A}}$

COP (*Coefficient of Performance*) pada sistem refrigerasi *cascade* digunakan untuk mengetahui seberapa efisien sistem dalam menghasilkan efek pendinginan dibandingkan dengan daya yang dibutuhkan. Nilai COP ini penting untuk menilai seberapa baik sistem bekerja, terutama pada sistem *cascade* yang terdiri dari dua tahap pendinginan dan menggunakan *heat exchanger* sebagai penghubung antar tahap.

2.3 Perancangan *heat exchanger* evaporator LTC dan kondensor HTC

Perancangan *heat exchanger* menggunakan metode *logarithmic mean temperature difference* (LMTD), yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Parameter perhitungan *heat exchanger*

No	Parameter	Persamaan
1	Laju perpindahan panas <i>heat exchanger</i>	$Q = U \times A_s \times \Delta T_{lm}$
2	Temperatur keluar	$T_{out} = T_{in} - \frac{Q}{\dot{m} - C_p}$
3	Perbedaan temperatur	$\Delta T_1 = T_{h.in} - T_{c.out}$ $\Delta T_2 = T_{h.out} - T_{c.in}$
4	LMTD	$\Delta T_{lm.cf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$
5	Koefisien perpindahan panas keseluruhan	$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}}$
6	Luas permukaan <i>heat exchanger</i>	$A = \frac{Q}{U \times \Delta T_{lm}}$

2.4 Perancangan pipa kapiler

Dalam sistem refrigerasi kompresi uap, pipa kapiler berfungsi untuk mengatur penurunan tekanan refrigeran setelah keluar dari kondensator sebelum masuk ke evaporator. Penentuan panjang pipa kapiler dilakukan dengan bantuan perangkat lunak

DanCap. Aplikasi ini dirancang untuk memudahkan perhitungan panjang kapiler yang berdasarkan parameter yang telah ditentukan, sehingga mempercepat proses perancangan tanpa perlu perhitungan manual. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan DanCap, panjang dan diameter optimal pipa kapiler yang dibutuhkan adalah 1,62 m dan 1,27 mm untuk sistem HTC, serta 1,62 m dan 1,40 mm untuk sistem LTC.

3. Hasil

3.1 Hasil Perancangan

Dari hasil perancangan sistem *air blast freezing*, telah dilakukan perhitungan meliputi beban pendinginan sistem, siklus refrigerasi *cascade*, luas permukaan pada evaporator dan kondensator, pipa kapiler, dan COP. Rekapitulasi parameter perancangan beserta hasil perhitungan sistem refrigerasi *cascade* ditampilkan pada Tabel 6 berikut ini.

Tabel 6 Hasil perancangan *air blast freezing*

No.	Keterangan	Parameter	Hasil	Satuan
1	Beban LTC	Beban produk (Qtotal produk)	596,37	Watt
		Beban fan (Qfan)	60	Watt
		Beban transmisi (Qtransmisi)	60,6	Watt
		Beban evaporator (Qevaporator)	788,66	Watt
		Kerja kompresor (Wkompresor)	221,78	Watt
		Beban kondensator (Qkondensator)	1317,64	Watt
2	Beban HTC	Beban transmisi (Qtransmisi)	45,77	Watt
		Beban evaporator (Qevaporator)	1499,76	Watt
		Kerja kompresor (Wkompresor)	159,61	Watt
		Beban kondensator (Qkondensator)	948,27	Watt
4	Luas permukaan evaporator	LTC	4,84	m ²
5	Luas permukaan kondensator	HTC	8,98	m ²
6	Pipa kapiler LTC	Panjang pipa kapiler (LTC)	1,62	m
		Diameter pipa kapiler (LTC)	1,27	mm
7	Pipa kapiler HTC	Panjang pipa kapiler (HTC)	1,62	m
		Diameter pipa kapiler (HTC)	1,4	mm
8	COP desain	COP <i>cascade</i>	3,09	

Berdasarkan hasil perancangan sistem *air blast freezing* yang telah

dilakukan, diperoleh spesifikasi teknis dan dimensi komponen utama yang digunakan

pada sistem. Data ini mencakup jenis komponen, ukuran utama, serta parameter pendukung yang menjadi acuan dalam

proses perakitan dan pengujian sistem. Rincian spesifikasi setiap komponen utama disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Spesifikasi teknis dan dimensi komponen utama *air blast freezing*

No.	Komponen	Parameter	Spesifikasi
1	Evaporator	Tipe	DE-0.45/2.5
		Tinggi	50 cm
		Panjang	39 cm
		Lebar	9 cm
		Jumlah	2
2	Kondensor	Tipe	TCM 085
		Tinggi	29 cm
		Panjang	35 cm
		Lebar	14 cm
		Jumlah	2
3	Kompresor LTC	Tipe	GMCC KSM103V11VFT
		Daya	725 W
		Tinggi	29,2 cm
4	Kompresor HTC	Tipe	Secop SC21CNX.2
		Daya	339 W
		Tinggi	21,9 cm
5	Pipa kapiler LTC	Panjang	1,62 m
		Diameter	0,031 inch
6	Pipa kapiler HTC	Panjang	1,62 m
		Diameter	0,052 inch

3.2 Hasil Pengujian



Gambar 4 Penempatan udang

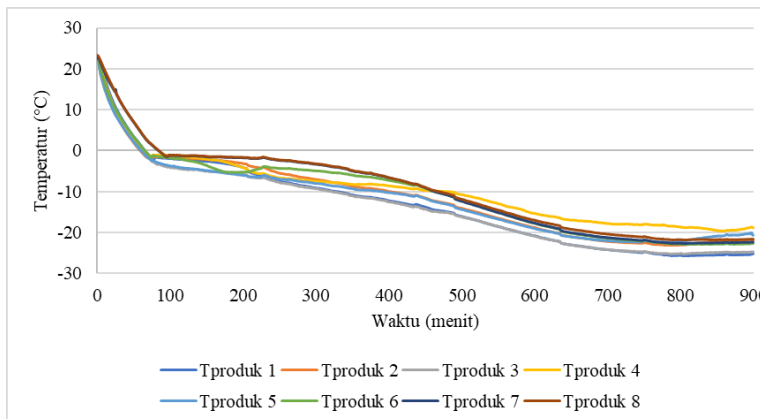
Untuk membandingkan hasil perancangan dengan pengujian dilakukan

pengujian pada beban perancangan yaitu 25 kg. Pengujian menggunakan udang Vaname yang dilakukan selama 15 jam. Gambar 4 merupakan penempatan udang dan pemasangan *thermocouple* pada udang.

Pada pengujian ini udang disusun menggunakan 2 rak pengujian yang terdiri dari 8 nampan, masing-masing nampan memuat 3,1 s/d 3,2 kg udang.

Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian sistem pada beban 25 kg, sesuai dengan kapasitas desain. $T_{\text{produk 1}}$ mencapai -18°C dalam 560 menit, sedangkan $T_{\text{produk 4}}$ mencapai target temperatur paling lambat pada 740 menit. Temperatur akhir terendah tercatat pada $T_{\text{produk 1}}$ sebesar $-25,3^{\circ}\text{C}$, dan

tertinggi pada $T_{\text{produk 4}}$ sebesar $-19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Perbedaan temperatur produk ini terjadi akibat perbedaan laju perpindahan kalor di dalam produk. Pelepasan kalor dari udang dipengaruhi oleh konduksi kalor di dalam jaringan serta konveksi paksa dari aliran udara. Posisi produk yang berbeda di dalam ruang pendingin menimbulkan distribusi aliran udara yang tidak seragam, sehingga laju pendinginan pada setiap titik pengukuran menjadi berbeda.



Gambar 5 Grafik temperatur VS waktu beban, 0 s/d 8 jam

Proses pembekuan udang berlangsung melalui tiga tahapan utama, yaitu pendinginan sensibel dari temperatur awal menuju titik beku, pelepasan panas laten saat air dalam jaringan berubah fase dari cair menjadi padat, serta pendinginan sensibel lanjutan setelah seluruh air membeku. Pada rentang temperatur $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, aktivitas mikroorganisme dan reaksi enzimatik terhambat sehingga mutu produk tetap terjaga selama penyimpanan.

Temperatur aktual produk berada pada rentang $-19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-25,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang telah memenuhi kriteria pembekuan cepat ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pada rentang temperatur tersebut, aktivitas mikroorganisme seperti bakteri dan *yeast* terhambat sehingga mutu dan keamanan produk tetap terjaga selama proses penyimpanan.

Nilai COP desain pada beban 25 kg sebesar 3,09, sedangkan COP pengujian sebesar 2,413. Perbedaan nilai ini berkaitan dengan perbedaan antara kondisi ideal dan

kondisi nyata pada siklus refrigerasi. COP desain dihitung berdasarkan kondisi termodinamika ideal tanpa mempertimbangkan rugi-rugi energi sehingga merepresentasikan performa yang lebih baik secara teoritis. COP aktual merepresentasikan kondisi operasi nyata yang melibatkan irreversibilitas seperti gesekan fluida, penurunan tekanan, serta deviasi sifat refrigeran, sehingga nilai COP aktual secara teori lebih rendah dibandingkan COP desain.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan membangun sistem *air blast freezing* berkapasitas 25 kg menggunakan sistem refrigerasi *cascade* dengan refrigeran R290/R32. Sistem yang dirancang mampu diaplikasikan untuk mendukung proses pembekuan cepat pada produk udang sebagai bagian dari rantai dingin penyimpanan hasil tangkapan laut.

Sistem *air blast freezing* dirancang menggunakan dua unit evaporator dan dua unit kondensor dengan luas permukaan evaporator sebesar $4,84\text{ m}^2$ dan kondensor $8,98\text{ m}^2$, dengan dimensi evaporator $50 \times 39 \times 9\text{ cm}$ dan kondensor $29 \times 35 \times 14\text{ cm}$. Sistem didukung oleh kompresor siklus LTC dengan daya 725 W dan kompresor siklus HTC dengan daya 339 W. Pengaturan aliran refrigeran dilakukan menggunakan pipa kapiler sepanjang 1,62 m dengan diameter 0,031 inch (LTC) dan 0,052 inch (HTC).

Nilai COP desain sebesar 3,09 dan COP aktual sebesar 2,413 menunjukkan bahwa sistem refrigerasi *cascade* dengan kombinasi refrigeran R290/R32 dapat beroperasi secara efektif dalam memenuhi kebutuhan kapasitas dan stabilitas temperatur pada penyimpanan udang dalam rantai dingin.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi yang memberikan dukungan finansial pada Tahun Anggaran 2025

melalui skema Penelitian Tesis Magister dengan Nomor Kontrak Induk 102/C3/DT.05.00/PL/2025 dan Nomor Kontrak Turunan 19637/UN19.5.1.3/AL.04/2025

Referensi

- [1] A. Setiawan, 2024. Kelautan dan Perikanan dalam Angka 2024, vol. 11. Jakarta: Pusat Data, Statistik dan Informasi.
- [2] A. Aprilia Nurkhasanah dan I. Dewi Puspita, 2022. The Root Causes Analysis of Indonesia's Fishery Products Rejection in the United States of America and European Countries during 2010-2020 Analisis Akar Masalah Penolakan Produk Perikanan Indonesia ke Amerika Serikat dan Eropa Tahun 2010-2020. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, vol. 11, hlm. 165–176.
- [3] Abrar Hafina, 2021. Pengolahan Udang Vannamei (*Litopenaeus vannamei*) Kupas Mentah Beku Peeled Deveined (PD) di PT. Central Pertiwi Bahari, Lampung. Prosiding Simposium Nasional VIII Kelautan dan Perikanan.
- [4] Wahyudi, 2003. Penerimaan dan Persiapan Bahan Baku Udang. Jakarta: Bagian Pengembangan Kurikulum Direktorat Pendidikan Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional.
- [5] D. R. B. Syaka, W. Sugita, dan M. Bijaksana, 2019. Characteristics Study of Two-Stage Cascade Refrigeration System Design for Household Air Blast Freezing. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 10, no. 01, hlm. 1804–1813 [Daring].
- [6] W. Wang, Q. Zhou, G. Tian, B. Hu, Y. Li, dan F. Cao, 2020. The intermediate temperature optimization for cascade refrigeration system and air source heat pump via extreme seeking control. *International Journal of Refrigeration*, vol. 117, hlm. 150–162.
- [7] Y. Zhang, Y. He, Y. Wang, X. Wu, M. Jia, dan Y. Gong, 2020. Experimental investigation of the performance of an R1270/CO2 cascade refrigerant system. *International Journal of Refrigeration*, vol. 114, hlm. 175–180.
- [8] M. M. Dwinanto, I. S. Limbong, dan D. G. H. Adoe, 2021. Analysis of the performance of air blast freezer by using hydrofluorocarbon and hydrocarbon refrigerants. dalam *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd.
- [9] O. Oginni, B. Bolaji, dan O. Ajani, 2023. Design and Building of a Two-Stage Cascade Refrigeration System for Storage of Blood Plasma. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, no. 3.
- [10] O. T. Oginni, 2023. Performance Evaluation of Vapour Compression Cascade Refrigeration System for Storing Blood Plasma. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*.
- [11] F. F. Nasution, A. Martin, dan R. I. Mainil, 2024. Design of Air Blast Freezing System Using Cascade Refrigeration R290/R32 System with Capacity 5kg. *Journal of Ocean*, vol. 68.
- [12] F. F. Nasution, R. I. Mainil, I. Taib, dan A. Martin, 2025. Experiment Investigation of Air Blast Freezer in a Cascade Refrigeration System with R290/R32 for Vannamei Shrimp. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 127, no. 2.
- [13] Informasi dari <https://www.epa.gov/climate-hfcs-reduction/technology-transitions-hfc->

- restrictions-sector (Diakses: 10 Juni 2025).
- [14] A. Reyes, N. Pérez, dan A. Mahn, 2013. Determination of Specific Heat and Thermal Conductivity of ‘Loco’ (Concholepas concholepas). *Food Bioproc Tech*, vol. 6, no. 7.
- [15] Y. A. Cengel, , 2015. Heat and Mass Transfer: Fundamentals And Applications, Fifth Edition, 5 ed. New York: McGraw-Hill Education.
- [16] Y. A. Cengel, 2019. Thermodynamics: An Engineering Approach, 9 ed. New York: McGraw-Hill Education.
- [17] F. Moerman dan K. Fikiin, 2016. Hygienic Design of Air-Blast Freezing Systems. dalam *Handbook of Hygiene Control in the Food Industry: Second Edition*, Elsevier Inc.
- [18] Widiyatmoko, 2015. Perancangan, Perakitan, dan Pengujian Performa Mesin Pembuat Es Krim Manual Kapasitas 5 Liter. *Jurnal PETRA*, vol. 1, no. 1.