

Rancang Bangun Sistem Refrigerasi *Mini Freezer* dengan Menambahkan *Pre-cooler* Air Kondensat pada Pipa *Discharge*

Muhamad Ardi Hidayat^{1,*}, Rizki Muliawan², Triaji Pangripto Pramudantoro³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : ^{1,*}muhamad.ardi.tptu20@polban.ac.id; ²rizki.muliawan@polban.ac.id; ³triajipangripto20@polban.ac.id

ABSTRAK

Sub-cooling merupakan proses penurunan temperatur refrigeran setelah melalui titik saturasi *liquid* pada keluaran kondenser dan wujud refrigerannya disebut *subcooled liquid*. Biasanya, air kondensat pada lemari es maupun *mini freezer* akan dibuang. Namun pada penelitian ini air kondensat akan dimanfaatkan untuk mendinginkan pipa *discharge* sehingga diharapkan refrigeran akan mengalami *Sub-cooling*. *Sub-cooling* dapat meningkatkan efek refrigerasi dan meminimalkan penggunaan daya listrik. Pada penelitian ini metode yang digunakan ialah penggunaan air kondensat. Sistem yang digunakan merupakan *mini freezer* dengan kompresor hermetik jenis *reciprocating* berkapasitas 1/8 PK dan refrigeran R134a. Setelah dilakukan pengukuran data selama 180 menit atau 3 jam diperoleh peningkatan performansi sistem refrigerasi dimana sistem tanpa *pre-cooler* memiliki COP_{aktual} sebesar 1,839, COP_{Carnot} sebesar 3,771, efisiensi sebesar 48,76% dan konsumsi daya listrik sebesar 1,937 kWh. Sedangkan sistem dengan *pre-cooler* memiliki COP_{aktual} sebesar 1,908, COP_{Carnot} sebesar 3,759, efisiensi sebesar 50,75%, dan konsumsi daya listrik sebesar 1,859 kWh. Sistem dengan *pre-cooler* memiliki peningkatan efisiensi sebesar 1,99% dan penurunan konsumsi daya listrik sebesar 4,026%.

Kata Kunci

Air Kondensat, *Pre-cooler*, *Sub-cooling*, Performansi

1. PENDAHULUAN

Sub-cooling merupakan proses penurunan temperatur refrigeran setelah melalui titik saturasi *liquid*-nya dengan cara menurunkan beban pendinginan atau meningkatkan kinerja sistem refrigerasi sehingga dapat meningkatkan kapasitas pendinginan evaporator [9]. Umumnya, *sub-cooling sengaja* diciptakan oleh ahli refrigerasi karena dapat meningkatkan efek refrigerasi. Dengan turunnya temperatur keluaran kondenser akibat efek *sub-cooling diikuti* dengan penurunan *entalphi* proses kondensasi maka efek refrigerasi akan meningkat [9]. Ringkasnya, semakin besar kalor yang dibuang kondenser akan memengaruhi jumlah kalor yang diserap evaporator, sehingga penurunan temperatur ruangan atau benda yang dikondisikan akan semakin cepat.

Pada penelitian ini penggunaan metode *sub-cooling* untuk mencapai efisiensi tinggi dilakukan pada sistem refrigerasi berkapasitas kecil yakni *mini freezer*. Sejauh ini terdapat beberapa metode *sub-cooling*, diantaranya penambahan *liquid-suction heat exchanger* (LSHX), *dedicated sub-cooling*, *integrated sub-cooling* serta penggunaan air kondensat untuk mendinginkan saluran *discharge* atau *suction*.

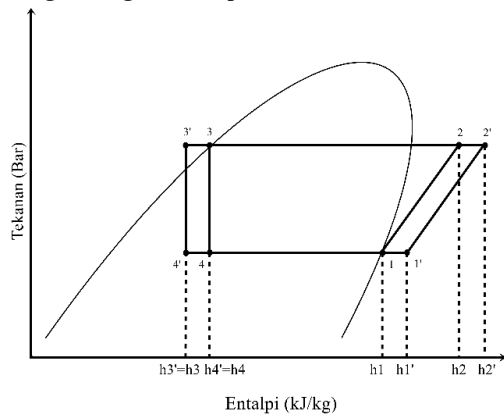
Diantara empat metode *sub-cooling* tersebut metode *sub-cooling* yang telah digunakan secara komersial ialah *liquid-suction heat exchanger* (LSHX) [9].

Pada penelitian ini metode *sub-cooling* yang digunakan ialah penggunaan air kondensat untuk mendinginkan pipa *discharge*. Biasanya air kondensat dianggap masalah pada kulkas-kulkas rumah tangga [3]. Air kondensat merupakan air yang timbul karena proses pengembunan pada evaporator disebabkan temperatur evaporator lebih rendah dari temperatur pengembunan udara. Temperatur pengembunan udara merupakan temperatur saat udara mulai mengembun ketika bersentuhan dengan bidang dengan temperatur di bawah temperatur pengembunan udara [10]. Laju pengembunan pada pipa evaporator dipengaruhi kapasitas pendinginan, temperatur evaporator, dan temperatur kabin [1]. Pendinginan pipa *discharge* atau *suction* menggunakan air kondensat akan menurunkan tekanan kondensasi sehingga temperatur keluaran kondenser menjadi rendah [7].

Pemilihan metode tersebut dilatarbelakangi oleh belum banyak desain sistem refrigerasi domestik seperti lemari es dan *mini freezer* yang memanfaatkan air kondensat dan dibuang begitu saja, air kondensat dapat dimanfaatkan untuk

meningkatkan efisiensi dan meminimalkan konsumsi daya listrik pada sistem tersebut.

Pada metode air kondensat, *sub-cooling* diperoleh ketika air kondensat menyerap kalor pada saluran *discharge* sehingga temperatur keluaran kondenser dapat mengalami penurunan karena pelepasan kalor pada kondensor menjadi lebih optimal. *Sub-cooling* dapat dideskripsikan dengan diagram P-h pada Gambar 1.



Gambar 1. Siklus Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Ideal, *Sub-cooling*, dan *Superheat*

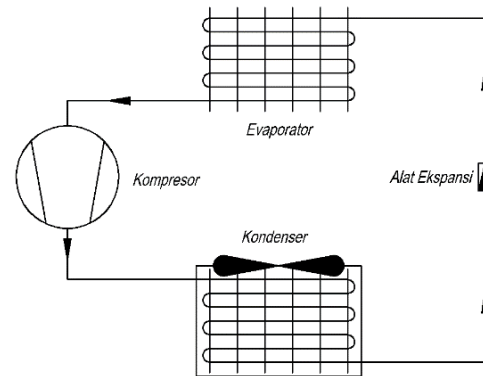
Gambar 1. menunjukkan siklus refrigerasi kompresi uap ideal dan siklus refrigerasi kompresi uap yang mengalami *superheat* dan *sub-cooling* pada diagram P-h. Pada diagram P-h sumbu Y menunjukkan tekanan dan sumbu X menunjukkan entalpi. Berdasarkan Gambar 1., titik 1' menunjukkan temperatur *suction* lebih tinggi dari titik saturasi uap dan disebut *superheating*. Selanjutnya titik 4' menunjukkan temperatur keluar kondenser lebih rendah dari titik saturasi cair sehingga disebut *sub-cooling*. Efek refrigerasi yang dihasilkan oleh sistem yang mengalami *superheating* dan *sub-cooling* akan lebih besar dimana entalpi h_1 dikurangi entalpi h_4 atau efek refrigerasi akan lebih besar pada sistem yang mengalami *superheating* dan *sub-cooling* dari pada sistem yang ideal. Peningkatan efek refrigerasi menggunakan metode *sub-cooling* menjadi salah satu cara yang banyak diaplikasikan pada sistem refrigerasi [8].

2. TINJAUAN PUSTAKA

Mini freezer merupakan salah satu sistem refrigerasi domestik yang berguna untuk menyimpan bahan makanan seperti daging ayam [6].

Freezer yang digunakan sebagai alat menyimpan produk makanan atau minuman beku banyak digunakan oleh supermarket dan toko-toko besar, tetapi tidak demikian oleh warung-warung kecil dan pedagang eceran [5].

Sistem refrigerasi kompresi uap memiliki komponen yang tergolong sederhana apabila dibandingkan dengan sistem refrigerasi jenis lainnya. Komponen utama pada sistem refrigerasi kompresi uap ialah kompresor, kondenser, alat ekspansi, dan evaporator [4]. Komponen-komponen tersebut bekerja secara berkesinambungan sehingga membentuk siklus refrigerasi kompresi uap seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Komponen Utama Sistem Refrigerasi

Sistem refrigerasi kompresi uap memiliki empat proses yakni proses kompresi, proses kondensasi, proses ekspansi, dan proses evaporasi. Untuk menggambarkan sistem refrigerasi kompresi uap dapat dilakukan pada diagram tekanan dan entalpi (P-h). Siklus yang digambarkan pada diagram P-h merupakan siklus yang terjadi secara atau dianggap ideal. Hal-hal yang dianggap memengaruhi besaran performansi suatu sistem seperti rugi gesek dan panas akan diabaikan. Data yang diperoleh berdasarkan hasil *plot* tekanan *discharge* dan *suction* adalah entalpi pada ke empat proses siklus refrigerasi serta temperatur kondensasi dan evaporasi. Kerja kompresi merupakan entalpi pada titik 2 dikurangi entalpi pada titik 1, efek refrigerasi merupakan entalpi pada titik 1 dikurangi entalpi pada titik 4, efek kondensasi merupakan entalpi pada titik 2 dikurangi entalpi pada titik 3 [4]. Selain kinerja sistem, untuk mengetahui efisiensi sistem dapat dilakukan dengan membagi COP Carnot dengan COP aktual kemudian dikali 100% [2]. Adapun persamaan lengkap untuk mengetahui kinerja dan efisiensi sistem dapat dilihat pada persamaan di bawah:

$$q_w = h_2 - h_1 \quad (1)$$

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (2)$$

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (3)$$

$$COP_a = \frac{q_e}{q_w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

$$COP_c = \frac{T_e - T_c}{T_e} \quad (5)$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{COP}_c}{\text{COP}_a} \times 100\% \quad (6)$$

dimana :

q_w = Kerja kompresi (kJ/kg)

q_e = Efek refrigerasi (kJ/kg)

q_c = Efek kondensasi (kJ/kg)

h_1 = Entalpi refrigeran masuk kompresor (kJ/kg)

h_2 = Entalpi refrigeran masuk kondenser (kJ/kg)

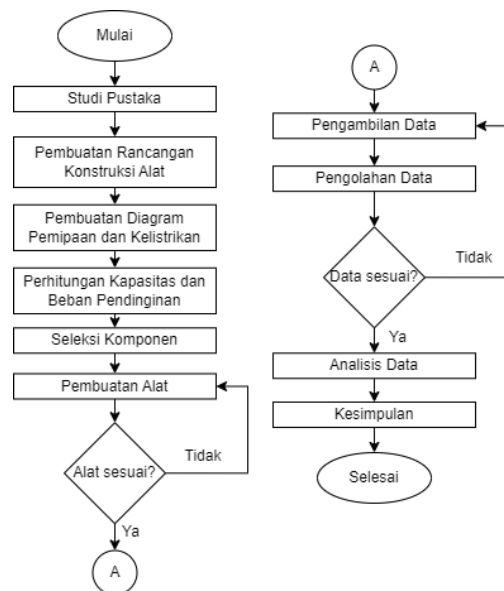
h_3/h_4 = Entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg)

T_c = Temperatur kondensasi ($^{\circ}\text{C}$)

T_e = Temperatur evaporasi ($^{\circ}\text{C}$)

3. METODOLOGI

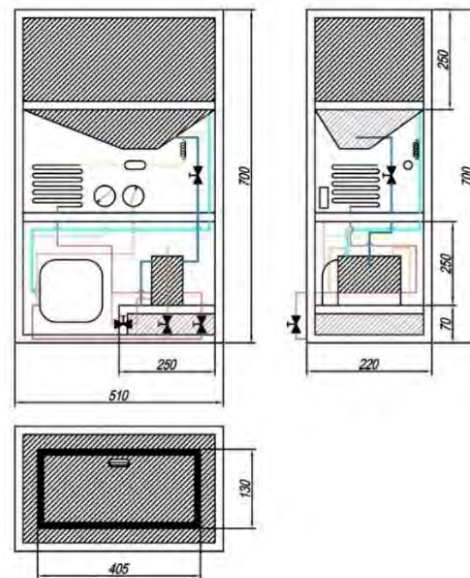
Berikut merupakan langka-langkah dalam pelaksanaan penelitian:



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

3.1. Rancangan Konstruksi Sistem

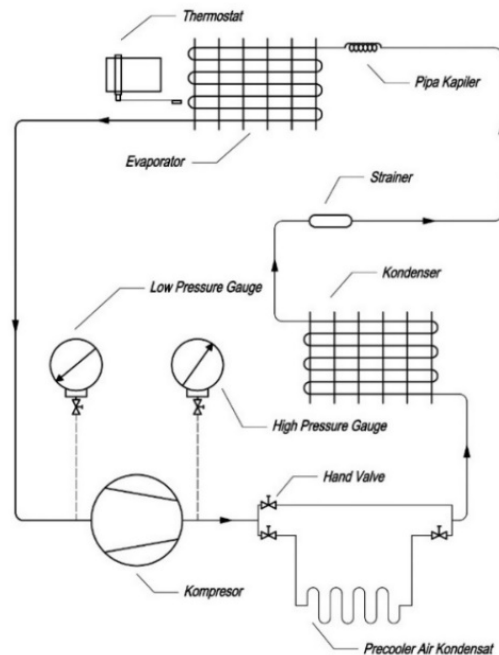
Sistem dirancang sederhana mungkin menggunakan rangka dengan material besi siku 2,8 cm. Secara keseluruhan tinggi alat adalah 70 cm dan lebar 51 cm. Adapun susunan komponen sistem refrigerasinya ialah evaporator diletakkan paling atas, kondenser dan alat ekspansi di bagian tengah, serta kompresor di bagian paling bawah. Hal tersebut bertujuan agar air kondensat dapat didistribusikan menggunakan gravitasi. Rancangan konstruksi sistem refrigerasi adalah sebagai berikut:



Gambar 4. Rancangan Konstruksi Sistem Refrigerasi

3.2. Rancangan Diagram Pemipaan

Selain konstruksi sistem refrigerasi, terdapat diagram pemipaan. Berikut rancangan diagram pemipaan sistem yang dirancang pada penelitian ini:



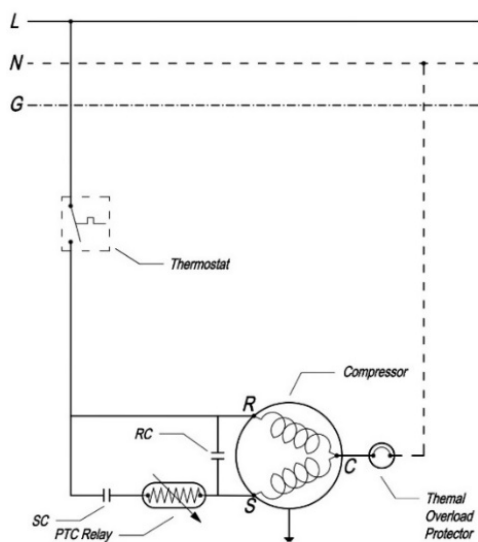
Gambar 5. Diagram Pemipaan

Secara umum, komponen pada diagram pemipaan sistem yang dirancang sama dengan sistem *mini freezer* pada umumnya. Umumnya, *mini freezer* hanya memiliki empat komponen utama sistem refrigerasi yakni kompresor, kondenser, alat ekspansi dan evaporator. Pada penelitian ini sistem pemipaan yang dirancang memiliki perbedaan pada saluran *discharge*

yakni terdapat dua saluran. Salah satu saluran mengarah masuk ke *pre-cooler* untuk didinginkan menggunakan air kondensat. Kedua saluran tersebut dapat digunakan secara bersamaan maupun bergantian. Pergantian saluran dapat dilakukan secara manual dengan membuka dan menutup *hand valve* pada masukan dan keluaran kedua saluran tersebut.

3.3. Rancangan Sistem Kontrol

Rancangan sistem kontrol dibuat sederhana sehingga mirip dengan sistem kontrol pada *mini freezer* yang ada di pasaran. Terdapat komponen *thermostat* yang dapat mengatur nyala kompresor dan beberapa komponen yang terintegrasi dengan kompresor seperti kapasitor, PTC relay, dan *thermal overload protector*. Diagram kelistrikan yang dirancang pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 6. Diagram Kelistrikan

3.4. Rancangan Sistem Refrigerasi

Rancangan awal sistem refrigerasi ditentukan berdasarkan jenis produk yang akan didinginkan, adapun produk yang didinginkan ialah daging ayam dengan massa 0,5 kg. Rancangan sistem refrigerasi adalah sebagai berikut:

Data	Keterangan
Temperatur Kabin	-10°C
Temperatur Evaporasi	-15°C
Temperatur Kondensasi	55°C
Temperatur Penyimpanan Produk	-2°C
Refrigeran	R134a

Berdasarkan *plot* diagram P-h data temperatur evaporasi dan kondensasi serta perhitungan

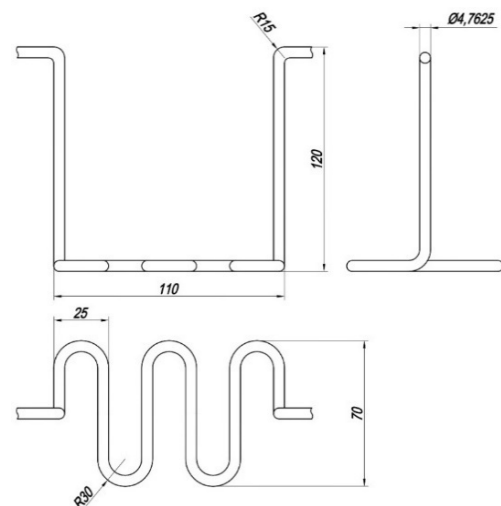
performansi diperoleh data konerja sistem sebagai berikut:

Tabel 2. Performansi Rancangan Sistem Refrigerasi

Data	Keterangan
h1	388,318 kJ/kg
h2	437,305 kJ/kg
h3/h4	279,301 kJ/kg
COP aktual	2,225
COP Carnot	3,687
Efisiensi	60,30%
Kerja Kompresi	48,987 kJ/kg
Efek Refrigerasi	109,017 kJ/kg
Efek Kondensasi	158,004 kJ/kg

3.5. Rancangan Pre-cooler Air Kondensat

Pre-cooler air kondensat berfungsi melepas kalor pada saluran yang dipasang *pre-cooler* tersebut. Penyerapan kalor dilakukan oleh air kondensat yang dihasilkan oleh sistem saat proses *cooling* dan *dehumidifying* pada kabin. Desain *pre-cooler* yang dirancang adalah sebagai berikut:



Gambar 7. Rancangan *Pre-cooler* Air Kondensat

Berikut merupakan data spesifikasi rancangan *pre-cooler* air kondensat:

Data	Keterangan
Material	Pipa Tembaga
Diameter Inlet/Outlet	3/16 Inch
Laju Aliran Massa	0,001487 kg/s
Kapasitas Pendinginan	162,14 watt
Cp air	4,19 kJ/kg.K
ΔT	5°C
Kapasitas <i>Pre-cooler</i>	0,031158 kJ/kg

3.6. Beban Pendinginan

Beban pendinginan yang diperhitungkan adalah beban transmisi dan beban produk. Hasil kedua perhitungan beban pendinginan dapat dilihat pada tabel 4. di bawah:

Tabel 4. Data Beban Pendinginan

Beban Pendinginan	Keterangan
Beban Transmisi	10,70 watt
Beban Produk	7,77 watt
Beban Pendinginan Total	18,42 watt
Kapasitas Sistem Refrigerasi	162,14 watt

Jumlah beban total yang diperoleh dari perhitungan beban pendinginan ialah 18,421 watt. Apabila ditambah dengan *safety factor* yakni 10% maka beban totalnya menjadi atau 20,26 watt.

3.7. Pengambilan Data

Proses pengukuran data dilakukan selama 180 menit menggunakan beban produk daging ayam 0,5 kg dan pengukuran data dilakukan setiap 5 menit sekali. Berdasarkan hasil pengukuran kedua sistem diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 5. Data Hasil Pengukuran

Parameter	Jenis Sistem	
	Dengan Pre-cooler	Tanpa Pre-cooler
Tekanan Suction (bar)	1,68	1,75
Tekanan Discharge	14,37	15,03
Temp. Discharge (°C)	62,13	64,65
Temp. Suction (°C)	-7,45	-7,95
Temp. Kel. Kondenser	48,10	51,00
Temp. Mas.	51,60	54,05
Temp. Produk (°C)	-0,10	-0,10
Temp. Lingkungan	24,45	24,90
Temp. Kabin (°C)	-9,90	-9,90
Temp. Air Kondensat	44,68	-
Tegangan Listrik (V)	215,13	215,90
Arus Listrik (A)	0,660	0,685
Cos ϕ	0,655	0,655
Daya Listrik (W)	92,999	96,869

3.8. Plot Diagram P-h

Berdasarkan *plot* diagram P-h pada pengukuran data kedua jenis sistem diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 6. Data Hasil Plot Diagram P-h

Data	Jenis Sistem	
	Tanpa Pre-cooler	Dengan Pre-cooler
h1 (kJ/kg)	393,961	394,618
h2 (kJ/kg)	459,747	460,718
h3/h4 (kJ/kg)	272,98	268,47

Te (°C)	-13,43	-14,43
Tk (°C)	55,42	53,49

3.9. Hasil Perhitungan Performansi dan Kinerja

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 7. Hasil Perhitungan Performansi dan Kinerja

Data	Jenis Sistem	
	Tanpa Pre-cooler	Dengan Pre-cooler
COP aktual	1,839	1,908
COP Carnot	3,771	3,759
Efisiensi (%)	48,76	50,75
Kerja Kompresi (kJ/kg)	95,786	66,100
Efek Refrigerasi (kJ/kg)	120,981	126,148
Efek Kondensasi (kJ/kg)	186,980	192,248
Kapasitas Pre-cooler	-	0,05680

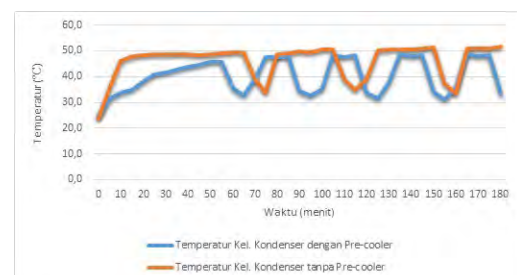
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan hasil rancang bangun sistem refrigerasi *mini freezer* yang dirancang.



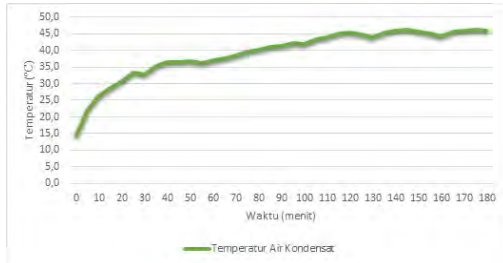
Gambar 8. Hasil Rancang Bangun

Selanjutnya merupakan grafik perbandingan temperatur keluar kondenser kedua sistem.



Gambar 9. Grafik Temperatur Keluar Kondenser

Sistem tanpa *pre-cooler* memiliki temperatur keluar kondenser tertinggi 51,7 °C dan rata-rata sebelum *cut-off* 51 °C sedangkan sistem dengan *pre-cooler* memiliki temperatur keluar kondenser tertinggi 48,7 °C dan rata-rata sebelum *cut-off* 48,1°C.



Gambar 10. Grafik Temperatur Air Kondensat

Pada awal air kondensat dialirkan ke bak penampungan air pada *pre-cooler* temperatur air kondensat terendah adalah 14,4 °C. Temperatur air kondensat terus meningkat sampai paling tinggi menjadi 45,8 °C.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan data pada penelitian ini diperoleh kesimpulan diantaranya efek refrigerasi sistem tanpa *pre-cooler* 120,981 kJ/kg dan sistem dengan *pre-cooler* 126,148 kJ/kg, terdapat peningkatan sebesar 4,27%. Selanjutnya daya listrik *input* kompresor sistem tanpa *pre-cooler* adalah 96,869 watt dan sistem dengan *pre-cooler* adalah 92,999 watt, terjadi penurunan sebesar 4,13%. Selain itu, penambahan *pre-cooler* mampu meningkatkan performansi sistem secara keseluruhan dari awalnya COP aktual sebesar 1,839, COP Carnot sebesar 3,771, efisiensi sebesar 48,76% menjadi COP aktual sebesar 1,908, COP Carnot 3,759, efisiensi sebesar 50,75%, terjadi peningkatan sebesar 1,99%. Terakhir, sistem yang dirancang tidak mampu menghasilkan air kondensat dalam jumlah yang cukup untuk mendinginkan pipa *discharge secara* konsisten di bawah temperatur lingkungan. Kesimpulan pada hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya maupun bagi produsen sistem refrigerasi, khususnya dalam melakukan penelitian atau memproduksi sistem serupa

dengan tujuan menciptakan sistem yang memiliki efisiensi tinggi dan konsumsi daya listrik rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arora, C.P., *Refrigeration and air conditioning*, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore, 2001.
- [2] ASHRAE, *ASHRAE HANDBOOK Fundamentals*, 2021.
- [3] Bagja, M. S., Mitrakusuma, W. H., & Pramudantoro, T. P., "KAJI EKSPERIMENTAL PENINGKATAN SUB-COOLING KONDESER PADA KULKAS SATU PINTU MENGGUNAKAN AIR KONDENSAT", *KURVATEK*, 201-210, 2021.
- [4] Dossat, Roy J., *Principle of Refrigeration*, SI Version, Second Edition, 1981.
- [4] Pramudantoro, T. P., "Analisis Performansi Mini Freezer yang Dilengkapi dengan Fluida Penyimpan Dingin (Thermal Storage)", *IRWSN 2010*, 13.1 - 13.7., 2010.
- [6] Saputra, A. R., Widiyatmoko, & Azahrudin., "Coefficient of Performance (COP) Mini Freezer Daging Ayam Kapasitas 4 kg", *Jurnal Teknologi Pendingin dan Tata Udara Politeknik Sekayu (PETRA)*, 44-54, 2010.
- [7] Selbaş, R., Kızılkın, Ö., & Şencan, A., "Thermoeconomic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle", *Energy*, 2108-2128, 2010.
- [8] Sencan, A., Selbaş, R., Kızılkın, Ö., & Kalogirou, S., "Thermodynamique Analysis of Sub-cooling and Superheating Effects of Alternative Refrigerants for Vapour Compression Cycles", *International Journal of Energy Research*, 2108-2128, 2006.
- [9] Sumeru, K., *Sub-cooling Pada Siklus Refrigerasi Kompresi Uap: Aplikasinya pada Mesin Pendingin dan Pengkondisi Udara*, Yogyakarta: Deepublish, 2018.
- [10] Sumeru, K., Pramudantoro, T. P., & Tritjahjono, R. I., *AIR KONDENSAT AC: KUANTITAS, KUALITAS DAN MANFAATNYA*, Yogyakarta: Deepublish, 2022.