

Performance Investigation of Cooling Machine Practice Props After Retrofitted by Natural Refrigerants

Mutaufiq¹, Hendri Sulisty², Kamin Sumardi³, Ega Taqwali Berman⁴, dan Apri Wiyono⁵

^{1,2,3,4,5} Departemen Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

¹taufiq_top@upi.edu, ²hendri_sulistyo@upi.edu, ³kaminsumardi@upi.edu, ⁴egatb@upi.edu, ⁵apri.wiyono@upi.edu

Abstrak

Penyesuaian komponen utama mesin pendingin perlu dilakukan setelah di-*retrofit*/diganti dengan refrigeran baru yang ramah lingkungan. Ini dilakukan untuk mendapatkan kinerja mesin pendingin yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh penyesuaian komponen utama mesin pendingin dalam meningkatkan kinerja mesin pendingin setelah menggunakan refrigeran baru yang ramah lingkungan. Penelitian dirancang secara eksperimen pada mesin pendingin jenis refrigerator yang menggunakan refrigeran R-134a sebagai fluida kerja. Jenis refrigeran hidrokarbon yang digunakan untuk menyubstitusi R-134a adalah Musicool-22 (MC-22). Beban pendinginan dalam kabin evaporator adalah larutan garam. Pengujian dilakukan dalam dua tahap. Pada tahap pertama refrigerator beroperasi dengan kondisi asalnya (R-134a dan CT1/variasi 1) dan pada tahap kedua fluida kerja R-134a di-*retrofit* dengan MC-22 dengan penyesuaian komponen utamanya. Selanjutnya kinerja refrigerator dianalisis menggunakan *software CoolPack 1.5* dengan membandingkan nilai *Refrigerating Effect* (RE), kalor kerja kompresor, dan angka kinerja (COP) refrigerator sebelum di-*retrofit* dan setelah di-*retrofit*. Hasil analisis menunjukkan bahwa angka kinerja refrigerator terbaik adalah saat refrigerator beroperasi dengan variasi 3 (refrigeran MC-22, alat ekspansi CT2) dengan kenaikan nilai COP berkisar 0,62% sampai 2,12% dari kondisi asalnya.

Kata kunci: hidrokarbon, kinerja, refrigerator, *resizing*, *retrofit*.

Abstract

Resizing the main components of the cooling machine needs to be done after being retrofitted with a new refrigerant. This is done to improve the performance of the cooling engine. In this study, we would like to investigate the effect of adjusting the main components of the cooling machine performance after using new environmentally friendly refrigerants. The experiment was designed on a refrigerator that uses R-134a as a working fluid. The type of hydrocarbon refrigerant used to substitute R-134a is Musicool-22 (MC-22). The cooling load in the evaporator cabin is a salt solution. Testing is done in two stages. In the first stage, the refrigerator operates in its original condition (R-134a with CT1 as the expansion valve). In the second stage, the working fluid R-134a is retrofitted with MC-22 with adjustments to its main components into several variations. Furthermore, the refrigerator performance is measured by comparing the value of the refrigerating effect (RE), the heat of compression, and the refrigerator performance (COP). The test results show that the best refrigerator performance rate is when the refrigerator operates with variation 3 (refrigerant MC-22 with CT2 as the expansion valve), increasing COP values ranging from 0.62% to 2.12%.

Keywords: hydrocarbons, performance, refrigerators, *resizing*, *retrofit*

1. Pendahuluan

Mesin pendingin jenis refrigerator merupakan alat yang banyak digunakan di rumah tangga sebagai alat untuk menyimpan makanan agar tetap segar dan lebih awet (Wang & Yu, 2015; Sari & Balli, 2014). Mesin pendingin refrigerator komersial, menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dengan empat komponen utamanya. Komponen-komponen tersebut terdiri dari kompresor untuk menyirkulasikan refrigeran, *condenser* untuk mengondensasikan refrigeran dengan melepas kalor ke lingkungan, alat ekspansi untuk menurunkan tekanan refrigeran, dan evaporator sebagai komponen yang menyerap kalor dari produk yang didinginkan. Keempat komponen utama ini dihubungkan dengan pipa tembaga yang di dalamnya mengalir refrigeran R-134a sebagai fluida kerja. Hanya saja, refrigeran R-134a yang digunakan oleh refrigerator, termasuk grup HFC yang memiliki nilai GWP (*Global Warming Potential*) tinggi sehingga penggunaannya dibatasi oleh *Kyoto protocol* (Harby, 2017; Yu & Teng, 2014). Karena dapat mengakibatkan pemanasan global di permukaan bumi dan dapat berdampak negatif terhadap makhluk hidup. Untuk itu dibutuhkan refrigeran dengan nilai GWP rendah dan nilai ODP (*Ozone Depletion Potential*) nol (UNEP, 2015; Kanna, 2018).

Info Makalah:

Dikirim : 08-18-21;

Revisi 1 : 08-23-21;

Revisi 2 : 10-11-21;

Diterima : 10-25-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +6281320324587

e-mail : taufiq_top@upi.edu

Untuk menyikapi fakta di atas, banyak percobaan penggantian refrigeran dilakukan menggunakan hidrokarbon pada mesin pendingin (Jatinder et al., 2019; Fatouh & Abou-Ziyan, 2018; Hossain et al., 2019). Walaupun refrigeran hidrokarbon bersifat mudah terbakar, akan tetapi hidrokarbon memiliki nilai ODP nol dan nilai GWP yang rendah sehingga ramah terhadap lingkungan. Untuk itu pada tahun 2019, laboratorium Refrigerasi Universitas Pendidikan Indonesia, telah melakukan

investigasi penggantian refrigeran R-134a untuk mendapatkan refrigeran baru untuk alat praktik mesin pendingin refrigerator dengan metode substitusi langsung, sebagaimana dilakukan oleh peneliti-peneliti lain (Aprea, Greco, & Maiorino, 2016; Mohanraj, 2019; Elgendy, Hassanain, & Fatouh, 2015). Hal ini dilakukan untuk menjaga kelangsungan alat peraga mesin pendingin refrigerator di laboratorium Refrigerasi sebagai alat peraga praktikum. Hasil pengujian menunjukkan bahwa, mesin pendingin refrigerator yang di *retrofit* dengan refrigeran ramah lingkungan MC-22 masih bisa beroperasi dengan baik. Pada variasi jumlah massa refrigeran MC-22 sama dengan 25% sampai 35% dari massa refrigeran R-134a, kinerja refrigerator yang ditunjukkan oleh COP (*Coefficient of Performance*), lebih baik sampai 10,3% dari pada refrigerator yang menggunakan refrigeran R-134a (Mutaufiq, Sulisty, Berman, & Wiyono, 2019).

Hasil ini mengindikasikan bahwa refrigeran R-134a yang digunakan oleh alat peraga praktik mesin pendingin refrigerator dapat digantikan oleh refrigeran MC-22 yang ramah lingkungan. Selain ramah lingkungan MC-22 dapat di substitusi secara langsung, karena oli sintetik yang ada di dalam kompresor tidak bereaksi dengan refrigeran MC-22 sehingga aman digunakan. Hal ini membuka peluang untuk meningkatkan performa refrigerator dengan melakukan resizing komponen utamanya. Karena dengan karakteristik fisik refrigeran yang berbeda, sudah selazimnya dilakukan perubahan komponen utama penyusun mesin pendingin. Untuk itu, dalam penelitian ini, dilakukan investigasi pengaruh penyesuaian komponen utama mesin pendingin refrigerator secara eksperimen dalam meningkatkan kinerja mesin setelah menggunakan refrigeran baru yang ramah lingkungan (El-Sayed, El-Morsi, & Mahmoud, 2018).

2. Metode

Untuk menyelidiki kinerja mesin pendingin dilakukan eksperimen pada mesin pendingin jenis refrigerator satu pintu seperti terlihat pada gambar 1 alat peraga praktik mesin pendingin refrigerator. Komponen penyusun refrigerator diantaranya yaitu kompresor jenis *hermetic* 1/6 PK fase tunggal 220V/50H, *condenser* jenis *tube fine*, *strainer*, alat ekspansi berupa pipa kapiler dengan dimensi panjang 3 m dan diameter 0,7874 mm, serta evaporator jenis *tube plate*.

Alat yang digunakan untuk penelitian di antaranya adalah refrigerator sebagai alat uji, *manifold gauge* untuk mengukur tekanan refrigeran, mesin las *oxy-ace* untuk instalasi perpipaan, *electronic charging meter* untuk menimbang massa refrigeran, *stopwatch* untuk menghitung waktu pengambilan data, tabung kosong refrigeran untuk menampung refrigeran sementara, mesin *recovery* refrigeran untuk me-*recovery* refrigeran lama, dan *digital thermometer* untuk mengukur suhu. Alat ukur *manifold gauge* digunakan untuk mengukur tekanan refrigeran di saluran *suction* (sebelum kompresor) dan tekanan refrigeran di *discharge* (setelah kompresor). Pengukuran dilakukan dengan menempatkan selang tekanan rendah pada katup servis *suction* kompresor dan selang tekanan tinggi pada katup servis *discharge*.



Gambar 1. Alat Peraga Praktik Mesin Pendingin Refrigerator

Selanjutnya bahan yang digunakan pada penelitian di antaranya yaitu refrigeran MC-22 dan R-134a sebagai fluida kerja, larutan garam sebagai beban pendinginan, empat unit pipa kapiler sebagai alat ekspansi, pipa tembaga ¼ inci sebagai penghubung komponen utama perpipaan sistem refrigerasi kompresi uap, Nitrogen untuk tes kebocoran

perpipaan refrigerator, oksigen dan *acetylene* sebagai bahan untuk pengelasan, dan *hand valve* untuk mengatur aliran refrigeran. Tabel 1 menunjukkan komposisi bahan penyusun refrigeran MC-22 yang digunakan untuk menggantikan refrigeran R-134a.

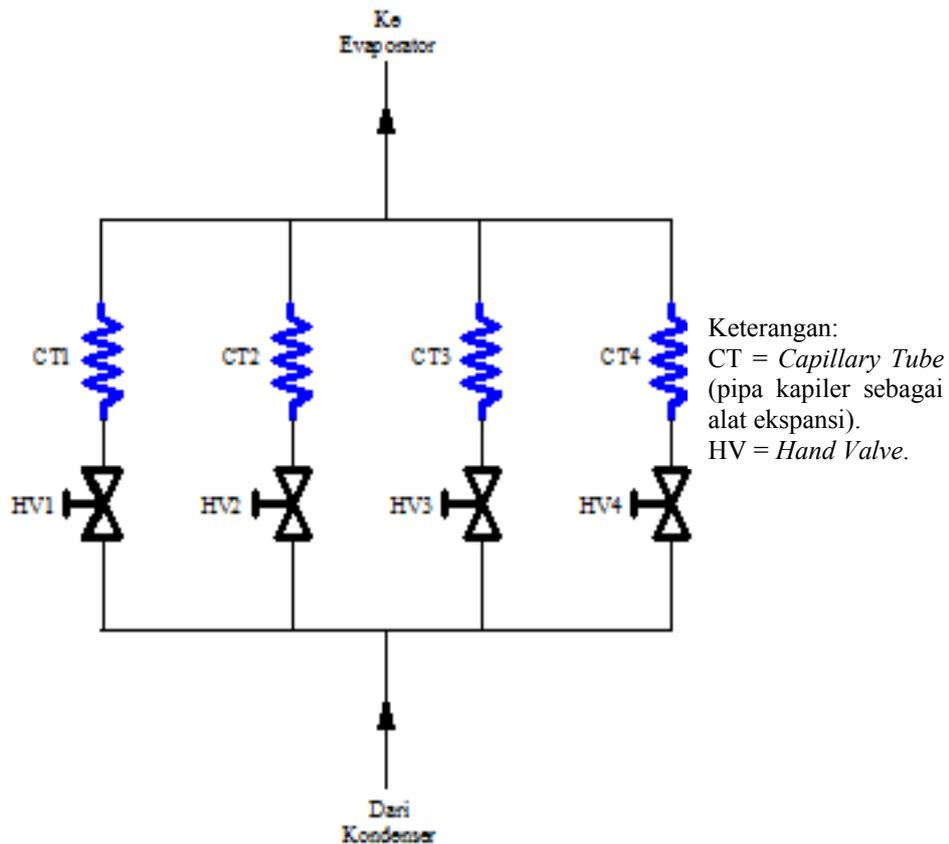
Tabel 1. Komposisi Bahan Penyusun MC-22.

Nama Kimia	Konsentrasi
<i>Etane</i>	<0,2 %w/w
<i>Propane</i>	>99,5 %w/w
<i>i-Butane</i>	<0,3 %w/w
<i>n-Butane</i>	<0,2 %w/w
<i>Pentane</i>	<100 ppm
<i>n-Heksane</i>	<50 ppm
<i>Olefin</i>	<0,03 % w/w

Sumber: *safety data sheet* Pertamina (*Safety Data Sheet MC-22*, 2017)

Pada refrigerator terdapat komponen utama yang disesuaikan untuk mendapatkan kinerja refrigerator yang lebih baik. Komponen utama refrigerator yang disesuaikan adalah alat ekspansi. Alat ekspansi pada refrigerator berupa pipa kapiler dengan panjang dan diameter tertentu. Komponen ini bertugas untuk menurunkan tekanan refrigeran cair dari tekanan *condenser* sampai tekanan evaporasi di evaporator. Sehingga refrigeran dapat menyerap kalor dari produk di dalam kabin evaporator untuk menguap dan kembali ke kompresor. Dimensi pipa kapiler pada refrigerator sudah didesain oleh pabrik pembuatnya dengan kapasitas pendinginan dan jenis refrigeran yang digunakan refrigerator. Sehingga refrigerator dapat mendinginkan produk sesuai dengan kapasitas mesin pendingin.

Untuk melihat pengaruh penyesuaian alat ekspansi dan refrigeran baru pada refrigerator, pada uji coba ini, dibuat tiga alat ekspansi dengan dimensi berbeda-beda. Alat ekspansi pertama memiliki panjang yang sama yaitu 3 meter, namun diameternya lebih besar yaitu $d = 0,9144$ mm. Alat ekspansi kedua memiliki panjang 3,62 meter dan diameter 0,9144 mm. kemudian alat ekspansi ketiga memiliki panjang 4 meter dan diameter 0,9144 mm. Gambar 2 menunjukkan posisi dan kondisi alat ekspansi pipa kapiler dapat dilihat.



Gambar 2. Posisi dan Kondisi Alat Ekspansi Pipa Kapiler

Pengujian dilakukan dalam dua tahap dengan beban pendinginan larutan garam NaCl untuk mengukur kinerja refrigerator sebelum dan setelah di *retrofit* dengan penyesuaian komponen utamanya. Pada pengujian tahap pertama

refrigerator beroperasi dengan refrigeran R-134 dan komponen asal pabrik pembuatnya (variasi 1). Selanjutnya pada tahap kedua refrigerator beroperasi dengan refrigeran natural MC-22 dan penyesuaian komponen utama *expansion valve*. Pada tahap ini refrigerator beroperasi dengan variasi 2 (refrigeran MC-22, komponen sama dengan pabriknya), variasi 3 (refrigeran MC-22, komponen disesuaikan), variasi 4 (refrigeran MC-22, komponen disesuaikan), dan variasi 5 (refrigeran MC-22, komponen disesuaikan). Tabel 2 menunjukkan pengujian tahap pertama dan tahap kedua beserta variasinya. Saat pengujian refrigerator diatur agar terus beroperasi selama 61 menit untuk mengetahui kinerja refrigeran R-134a dan MC-22 sebagai fluida kerja di dalam refrigerator.



Gambar 3. Set Up Alat Pengujian Mesin Pendingin Refrigerator

Pada pengujian tahap pertama, mula-mula refrigerator divakum selama 20 menit untuk mengeluarkan seluruh udara, uap air, dan kotoran yang ada di dalam instalasi perpipaan. Selanjutnya HV1 dibuka dan HV2, HV3, dan HV4 ditutup. Selanjutnya refrigerator diisi dengan refrigeran R-134a sebanyak 100 gram sambil dioperasikan. Selanjutnya data temperatur dan data tekanan diambil setiap menit untuk mengetahui kinerja refrigerator saat beroperasi dengan variasi 1.

Tabel 2. Variasi Pengujian Refrigerator

Pengujian tahap	Variasi Pengujian Refrigerator	Refrigeran		Capillary Tube			
		R-134a	MC-22	CT1 (d=0,7874 mm, P=3m)	CT2 (d=0,9144 mm, P=3m)	CT3 (d=0,9144 mm, P=3,62m)	CT4 (d=0,9144 mm, P=4m)
Pertama	Variasi 1	√		√			
Kedua	Variasi 2		√	√			
	Variasi 3		√		√		
	Variasi 4		√			√	
	Variasi 5		√				√

Pengujian tahap kedua diawali dengan *me-recovery* refrigeran R-134a ke dalam tabung kosong. Selanjutnya refrigerator di vakum lagi untuk mengeluarkan udara, uap air, dan kotoran seperti pada tahap pertama. HV 1 dibuka dan kran yang lain ditutup (pengujian menggunakan variasi 2) sebelum diisi refrigeran. Selanjutnya refrigerator diisi dengan refrigeran MC-22 sebanyak 30 gram sambil dioperasikan. Jumlah massa ini digunakan, karena merupakan massa refrigeran optimum yang menghasilkan kinerja terbaik pada penelitian sebelumnya tahun 2019 di Laboratorium Refrigerasi UPI. Data temperatur dan tekanan diambil setiap menit seperti pada pengujian tahap pertama. Setelah refrigerator beroperasi selama 61 dengan variasi 2, selanjutnya refrigerator dimatikan. Selanjutnya refrigerator didiamkan sampai temperatur dan tekanan kembali seperti kondisi awal sebelum dioperasikan. Setelah kondisi temperatur dan tekanan kembali seperti kondisi semula, pengujian tahap kedua dilakukan dengan variasi 3 (membuka HV 2 dibuka dan HV yang lain ditutup). Refrigerator dioperasikan selama 61 menit dengan interval pengambilan data setiap menit. Selanjutnya pengujian tahap kedua dengan variasi 4 dan variasi 5 dilakukan sebagaimana prosedur pada variasi 3 yaitu setelah 61 menit beroperasi refrigerator dimatikan terlebih dahulu dan didiamkan agar kondisi temperatur dan tekanan kembali seperti semula.

Data tekanan dan temperatur diplot pada diagram p-h Miller untuk mendapatkan nilai *enthalpy* pada saluran masuk dan saluran keluar evaporator, kompresor, dan *condenser*. Proses pendinginan diasumsikan terjadi secara ideal mengikuti siklus Carnot ideal. Nilai *enthalpy* masuk/ke luar evaporator, *enthalpy* masuk/ke luar kompresor, dan *enthalpy* masuk/ke luar *condenser* digunakan untuk menghitung parameter kinerja refrigerator diantaranya *Refrigerating Effect* (RE), *Heat of Compression* (W_k), dan angka kinerja (COP). Parameter kinerja refrigerator dihitung dengan persamaan (1), (2), dan (3).

$$RE = h_1 - h_3 \quad (1)$$

$$W_k = h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$COP = \frac{RE}{W_k} \quad (3)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian mesin pendingin refrigerator berdasarkan variasi jenis refrigeran dan ukuran pipa kapiler dengan beban pendinginan larutan garam (NaCl) telah dilakukan. Pengujian dilakukan selama 61 menit dengan interval waktu pengambilan data setiap menit. Data awal yang dibutuhkan untuk mengukur kinerja refrigeran pada mesin pendingin adalah temperatur evaporator dan temperatur *condenser*. Tabel 3 menyajikan data hasil pengukuran temperatur evaporator dan tabel 4 menyajikan data hasil pengukuran temperatur *condenser*.

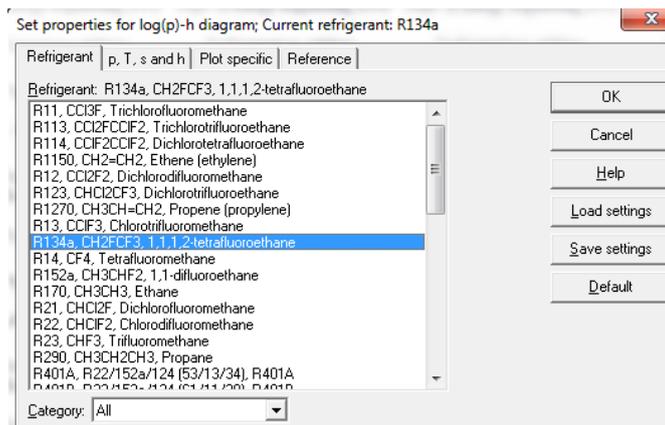
Tabel 3. Data Temperatur Evaporator Hasil Pengujian

t (menit)	T evaporator (°C)				
	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5
50	-21,7	-25,5	-18,3	-21,1	-20,8
51	-21,9	-25,3	-18,3	-21,1	-20,9
52	-22	-25,4	-18,3	-21,2	-20,8
53	-22	-25,5	-18,3	-21,3	-20,8
54	-22,2	-25,4	-18,4	-21,5	-20,8
55	-22,4	-25,5	-18,6	-21,6	-20,7
56	-22,4	-25,6	-18,5	-21,7	-20,9
57	-22,4	-25,6	-18,8	-21,7	-21
58	-22,5	-25,5	-18,6	-21,4	-20,8
59	-22,6	-25,5	-18,6	-21,2	-20,7
60	-22,3	-25,5	-18,6	-21,2	-20,9
61	-22,6	-25,8	-18,6	-21,2	-20,8

Tabel 4. Data Temperatur Condenser Hasil Pengujian

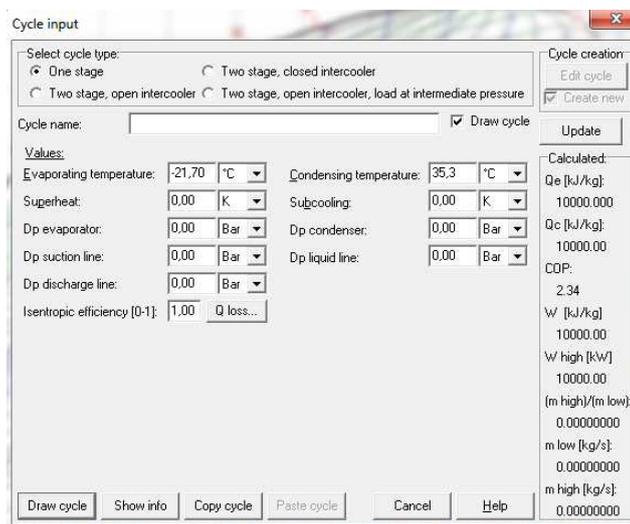
t (menit)	T condenser (°C)				
	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5
50	35,3	35,7	37,8	36,6	36,5
51	35,4	35,8	37,8	36,6	36,5
52	35,4	35,7	37,7	36,5	36,4
53	35,3	35,6	37,7	36,3	36,3
54	35,2	35,6	37,7	36,4	36,2
55	35,1	35,4	37,8	36,3	36,1
56	34,8	35,3	38	36,2	36,1
57	34,7	35,5	38,3	36,4	36,3
58	34,8	35,5	38,3	36,4	36,3
59	34,8	35,7	38,2	36,4	36,5
60	34,8	35,9	37,9	36,2	36,4
61	34,9	35,8	37,9	36,1	36,3

Selanjutnya kinerja mesin pendingin dihitung dengan menggunakan *software CoolPack* versi 1,5 bagian analisis *refrigeration utilities* yang dapat diakses secara terbuka pada www.ipu.dk, *Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark*. Kinerja mesin pendingin dihitung dengan asumsi siklus refrigerasi kompresi uap beroperasi sebagaimana siklus Carnot ideal. Dengan asumsi bahwa fluida kerja refrigeran saat masuk atau ke luar komponen utama mesin pendingin berada pada garis jenuh diagram p-h. Gambar 4 menyajikan tampilan *CoolPack* pada bagian *refrigeration utilities*. Bagian ini dapat menganalisis kinerja berbagai jenis refrigeran pada mesin pendingin dengan sistem refrigerasi kompresi uap. Mula-mula, buka aplikasi *CoolPack*, kemudian pilih menu *refrigeration utilities* untuk menganalisis kinerja refrigeran dalam mesin pendingin. Selanjutnya pastikan *properties* refrigeran yang digunakan sesuai dengan refrigeran yang akan dianalisis. Gambar 4 menunjukkan pemilihan jenis refrigeran yang akan dianalisis.



Gambar 4. Tampilan *CoolPack* pada Bagian *Properties* Refrigeran

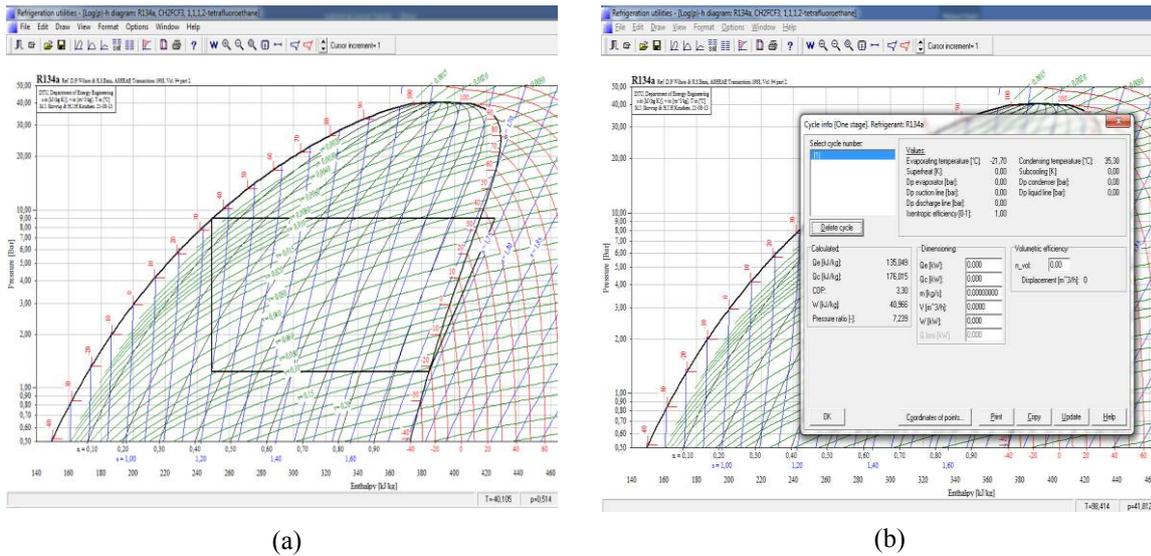
Selanjutnya untuk menganalisis kinerja refrigeran dibutuhkan minimal dua data temperatur evaporator dan *condenser*. Selain temperatur, juga bisa menggunakan data tekanan evaporator dan *condenser*. Pada penelitian ini digunakan data temperatur. Data temperatur evaporator dan temperatur *condenser* pada rentang pengambilan data menit ke-50 sampai menit ke 61 dimasukkan ke *cycle input CoolPack*.



Gambar 5. Data Temperatur Evaporator dan *Condenser* dimasukkan ke *Cycle Input CoolPack*

Pada gambar 5, disajikan simulasi pengukuran kinerja mesin pendingin dengan menggunakan parameter temperatur evaporator dan *condenser*. Data temperatur evaporator (tabel 3) dan temperatur *condenser* (tabel 4) saat mesin pendingin beroperasi dengan variasi 1 dimasukkan pada kolom *Evaporating temperatur* dan *Condensing temperatur*. Pada kasus ini, diasumsikan sistem bekerja secara ideal, sehingga selain temperatur evaporator dan *condenser* dibiarkan sebagaimana kondisi *default* (kondisi asalnya). Hasil analisis *CoolPack* memberikan luaran sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 6 berupa (a) *plotting* siklus refrigeran pada Diagram p-h dan (b) Kalkulasi Kinerja refrigeran dalam mesin pendingin refrigerator. Kalkulasi kinerja berupa parameter *Refrigerating Effect*, kalor kerja kompresor, dan COP. Parameter-parameter ini merupakan faktor penentu kinerja mesin pendingin yang menggunakan siklus kompresi uap.

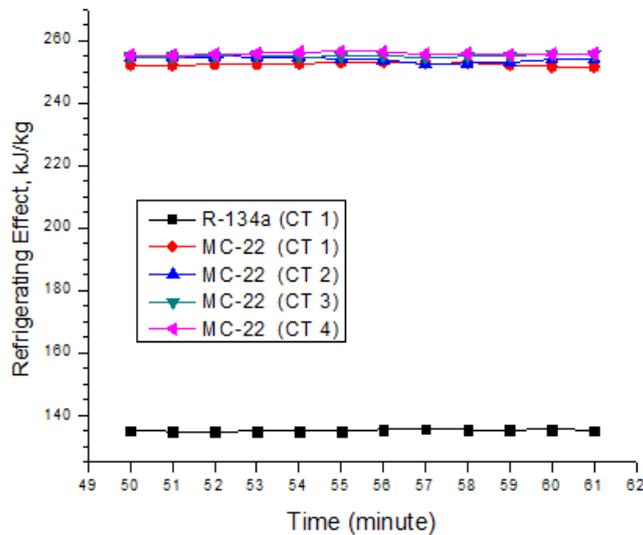
Selanjutnya untuk melihat perbandingan kinerja mesin pendingin refrigerator dengan lebih jelas saat beroperasi dengan variasi 1, variasi 2, variasi 3, variasi 4, dan variasi 5, hasil pengujian disajikan dalam bentuk diagram grafik. Diagram grafik *Refrigerating Effect*, kalor kerja kompresor, dan COP (*Coefficient of Performance*) terhadap interval waktu, disajikan pada pembahasan berikut.



Gambar 6. Hasil Analisis CoolPack, (a) Plotting Siklus Refrigeran pada Diagram $p-h$, (b) Kalkulasi Kinerja

Refrigerating Effect (RE)

RE merupakan salah satu parameter kinerja refrigerator. Parameter ini menunjukkan banyaknya kalor dari produk (larutan garam NaCl) yang dapat diserap oleh refrigeran di dalam pipa evaporator. Gambar 7 menyajikan grafik *Refrigerating Effect* terhadap interval waktu hasil pengujian refrigerator dengan variasi 1 (R-134a, CT1), variasi 2 (MC-22, CT1), variasi 3 (MC-22, CT2), variasi 4 (MC-22, CT3), dan variasi 5 (MC-22, CT4).



Gambar 7. Grafik RE terhadap Waktu

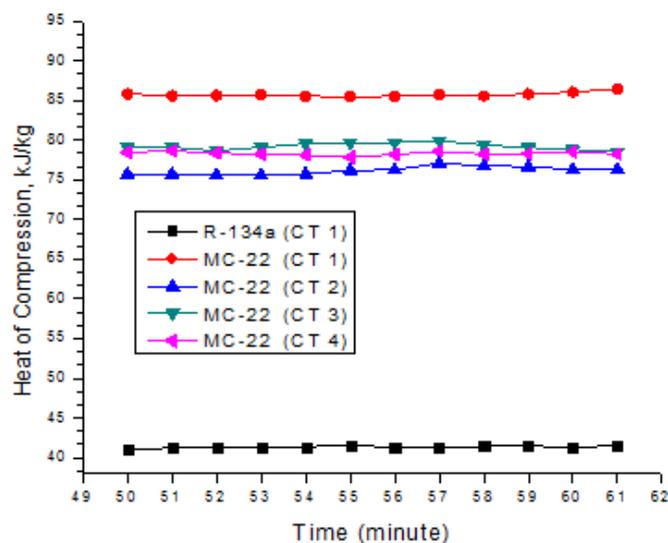
Berdasarkan gambar 7 grafik *Refrigerating Effect* terhadap interval waktu, terlihat bahwa nilai RE dari menit ke-50 sampai menit ke-61 refrigerator yang menggunakan refrigeran MC-22 dengan berbagai variasi dimensi pipa kapiler selalu lebih tinggi dibandingkan dengan saat refrigerator menggunakan R-134a. Nilai RE saat refrigerator beroperasi dengan variasi 1 berkisar 134,72 kJ/kg sampai 135,50 kJ/kg, kemudian nilai RE saat beroperasi dengan variasi 2 berkisar 251,52 kJ/kg sampai 253,14 kJ/kg, kemudian saat beroperasi dengan variasi 3 nilai RE berkisar 252,48 kJ/kg sampai 254,73 kJ/kg, kemudian saat beroperasi dengan variasi 4 nilai RE berkisar 254,52 kJ/kg sampai 255,64 kJ/kg, dan saat beroperasi dengan variasi 5 nilai RE berkisar 255,15 kJ/kg sampai 256,49 kJ/kg.

Hasil dari gambar 7 grafik RE terhadap waktu menunjukkan bahwa *retrofit* refrigeran dari R-134a ke natural refrigeran MC-22 memberikan dampak positif terhadap mesin pendingin refrigerator. Dampak positif ini ditunjukkan oleh nilai RE variasi 2 sampai variasi 5 yang selalu lebih tinggi pada setiap interval waktu pengambilan data dibandingkan nilai RE variasi 1 yang menggunakan refrigeran dan komponen pabrikannya. Hasil ini senada dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mutaufiq, dkk pada tahun 2019 yang melakukan penggantian R-134a ke MC-22 dengan metode *drop in substitute*, saat refrigeran asalnya diganti menggunakan MC-22, nilai RE naik yang

ditunjukkan oleh gambar 7 variasi 2 (komponen tidak disesuaikan). Selain itu ketika komponen alat ekspansinya disesuaikan, ternyata nilai RE-nya juga menjadi lebih baik dibandingkan dengan variasi 1 dan variasi 2. Penambahan panjang alat ekspansi pipa kapiler sampai 4 meter menunjukkan tren yang baik untuk nilai RE yang semakin besar, terlihat pada gambar 7 variasi 3 sampai variasi 5. Untuk sementara, variasi 5 menunjukkan dampak paling baik terhadap mesin pendingin. Hanya saja dampak penyesuaian pipa kapiler juga perlu diperhatikan terhadap *heat of compression* yang sangat berpengaruh terhadap angka kinerja (COP) mesin pendingin.

Heat of Compression

Heat of compression merupakan kalor yang dihasilkan dari kerja kompresor untuk menaikkan tekanan refrigeran dari tekanan evaporasi ke tekanan kondensasi. Kerja kompresor diperlukan untuk menaikkan tekanan refrigeran uap sampai tekanan kondensasi di *condenser* agar refrigeran uap dapat berubah fase menjadi refrigeran cair. perhatikan gambar 8 grafik *heat of compression* terhadap interval waktu. Gambar ini menyajikan kalor kerja kompresor pada rentang waktu pengambilan data menit ke-50 sampai menit ke-61 saat mesin pendingin beroperasi dengan variasi 1 (R-134a, CT1), variasi 2 (MC-22, CT1), variasi 3 (MC-22, CT2), variasi 4 (MC-22, CT3), dan variasi 5 (MC-22, CT4).



Gambar 8. Grafik *Heat of Compression* terhadap Waktu

Berdasarkan gambar 8 grafik kalor kerja kompresi terhadap interval waktu, terlihat bahwa kalor kerja kompresi refrigerator berbanding terbalik dengan grafik *refrigerating effect* terhadap interval waktu pada gambar 7. Kalor kerja kompresi refrigerator saat beroperasi dengan variasi 2 sampai variasi 5 lebih besar dibandingkan saat beroperasi dengan variasi 1. Nilai kalor kerja kompresi saat bekerja dengan variasi 1 berkisar 40,97 kJ/kg sampai 41,55 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 2 berkisar 85,48 kJ/kg sampai 86,48 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 3 berkisar 75,58 kJ/kg sampai 77,10 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 4 berkisar 78,53 kJ/kg sampai 79,92 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 5 berkisar 77,84 kJ/kg sampai 78,65 kJ/kg.

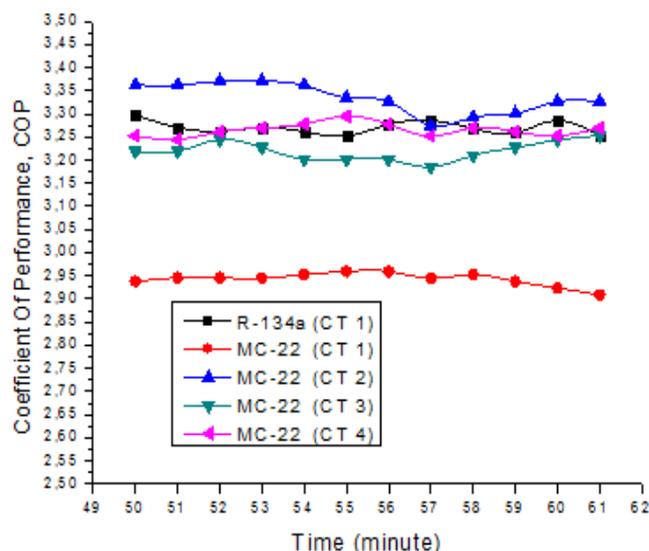
Hasil ini menunjukkan kompresor bekerja lebih berat saat beroperasi menggunakan MC-22 baik menggunakan ukuran pipa kapiler asal pabrikannya atau menggunakan penyesuaian ukuran pipa kapiler pada variasi 3 sampai variasi 5. Ini tentu saja merugikan kinerja sistem pendingin, karena nilai kalor kerja kompresor merupakan pembagi untuk mendapatkan angka kinerja (COP) mesin pendingin, seperti ditunjukkan oleh persamaan 3 di atas. Jika diperhatikan, dari seluruh variasi uji coba menggunakan MC-22, nilai kalor kerja kompresor cukup rendah terjadi saat mesin pendingin beroperasi dengan variasi 3 dan variasi 5. Sehingga ketika mesin pendingin beroperasi dengan kedua variasi ini, berpotensi menunjukkan angka kinerja (COP) paling baik.

COP (Coefficient of Performance)

COP merupakan angka kinerja refrigerator yang diperoleh dari perbandingan nilai *refrigerating effect* dengan kalor kerja kompresi kompresor. Berdasarkan hasil pembahasan nilai *refrigerating effect* dan kalor kerja kompresi di atas menunjukkan hasil yang berlawanan. Nilai RE refrigerator saat beroperasi menggunakan R-134a lebih buruk dibandingkan saat menggunakan MC-22 dan nilai kalor kerja kompresi refrigerator lebih baik saat menggunakan R-134a dibandingkan saat beroperasi menggunakan MC-22. Sehingga nilai COP bervariasi tergantung kenaikan dan penurunan nilai *refrigerating effect* dan kalor kerja kompresi kompresor.

Nilai COP pada rentang waktu menit ke-50 sampai menit ke-61 disajikan pada gambar 9 grafik COP terhadap interval waktu. Nilai COP saat refrigerator beroperasi dengan variasi 1 berkisar dari 3,25 sampai 3,30, variasi 2

berkisar dari 2,91 sampai 2,96, variasi 3 berkisar dari 3,27 sampai 3,37, variasi 4 berkisar dari 3,18 sampai 3,25, variasi 5 berkisar dari 3,24 sampai 3,29. Berdasarkan data-data tersebut mesin pendingin refrigerator bekerja dengan kinerja terbaik saat beroperasi dengan variasi 3 (refrigeran MC-22 dan pipa kapiler CT 2), dengan kenaikan nilai COP 0,62% sampai 2,12% daripada refrigerator yang beroperasi dengan kondisi asalnya. Ini menunjukkan bahwa penyesuaian komponen utama pipa kapiler memberikan dampak positif terhadap kinerja siklus refrigerasi kompresi uap mesin pendingin.



Gambar 9. Grafik COP terhadap Waktu

Nilai COP refrigerator menggunakan refrigeran hidrokarbon pada variasi 3 hanya sedikit lebih baik dibandingkan refrigerator yang beroperasi pada kondisi asalnya. Berbeda dengan hasil penelitian yang diperoleh oleh Thavamani dan Senthil, saat melakukan penggantian refrigeran pada refrigerator menggunakan refrigeran campuran propana 49% dengan butana 51%. Nilai COP refrigerator menggunakan hidrokarbon 40% lebih baik dibandingkan saat beroperasi menggunakan refrigeran 134a (Thavamani & Senthil, 2020). Sehingga untuk penelitian selanjutnya, campuran ini perlu diuji coba pada alat peraga refrigerator di Laboratorium Refrigerasi.

Kesimpulan

Eksperimen investigasi kinerja refrigerator setelah di-*retrofit* menggunakan refrigeran baru yang ramah lingkungan telah dilakukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa angka kinerja (COP) refrigerator terbaik adalah saat refrigerator beroperasi dengan variasi 3 (refrigeran MC-22, alat ekspansi CT2) dengan kenaikan nilai COP berkisar dari 0,62% sampai 2,12% dari refrigerator yang beroperasi dengan kondisi asalnya.

Ucapan Terima Kasih

Alhamdulillah. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pendidikan Indonesia atas dukungan finansial yang diberikan untuk penelitian ini, di bawah hibah Penelitian Untuk Tenaga Kependidikan No 1079 / UN40 / PM / 2020. Selain itu ucapan terima kasih kepada *IPU and Departement of Mechanical Engineering Technical University of Denmark* yang telah memberikan layanan *software CoolPack* versi 1,5 secara gratis untuk menganalisis kinerja mesin pendingin.

Daftar Notasi

T	= temperatur [°C]
t	= waktu [menit]
RE	= <i>Refrigerating Effect</i> [kJ/kg]
W_k	= kerja kompresor [kJ/kg]
COP	= angka kinerja siklus refrigerasi [tidak ada satuan]
h_1	= <i>specific enthalpy</i> refrigeran keluar evaporator [kJ/kg]
h_2	= <i>specific enthalpy</i> refrigeran keluar kompresor [kJ/kg]
h_3	= <i>specific enthalpy</i> refrigeran masuk evaporator [kJ/kg]
P	= panjang kapiler [m]
d	= diameter kapiler [mm]
m	= massa [gram]

Daftar Pustaka

- Apra, C., Greco, A., & Maiorino, A. (2016). An experimental investigation on the substitution of HFC134a with HFO1234YF in a domestic refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 106(2016), 959–967. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.098>
- El-Sayed, A. R., El-Morsi, M., & Mahmoud, N. A. (2018). A Review of the Potential Replacements of HCFC/HFCs Using Environmental Friendly Refrigerants. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. <https://doi.org/10.1142/S2010132518300021>
- Elgendy, E., Hassanain, M., & Fatouh, M. (2015). Assessment of R-438A as a retrofit refrigerant for R-22 in direct expansion water chiller. *International Journal of Refrigeration*, 50, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.017>
- Fatouh, M., & Abou-Ziyan, H. (2018). Energy and exergy analysis of a household refrigerator using a ternary hydrocarbon mixture in tropical environment – Effects of refrigerant charge and capillary length. *Applied Thermal Engineering*, 145, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.008>
- Harby, K. (2017). Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(February), 1247–1264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.039>
- Hossain, R., Arafat, A., Fei, A. B., Abu, X., Sujon, S., & Karim, R. (2019). Comparative analysis of refrigerant performance between LPG and R134a under subtropical climate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09126-3>
- Jatinder, G., Ohunakin, O. S., Adelekan, D. S., Atiba, O. E., Daniel, A. B., Singh, J., & Atayero, A. A. (2019). Performance of a domestic refrigerator using selected hydrocarbon working fluids and TiO₂ – MO nanolubricant. 160(February). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114004>
- Kanna, I. V. (2018). Optimisation of the evaporator of a refrigerator employing hydrocarbon as a refrigerant. *International Journal of Ambient Energy*, 0(0), 1–8. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1507943>
- Mohanraj, M. (2019). Experimental investigations on R430A as a drop-in substitute for R134a in domestic refrigerators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(4), 728–738. <https://doi.org/10.1177/0954408918796369>
- Mutaufiq, Sulistyono, H., Berman, E. T., & Wiyono, A. (2019). Investigasi Eksperimental Retrofit Refrigeran Pada Alat Praktik Refrigerator dengan Refrigeran Produk Domestik yang Ramah Lingkungan. *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin UNTIRTA*, 5(2), 51–57.
- Safety Data Sheet MC-22*. (2017). PT Pertamina Persero.
- Sari, O., & Balli, M. (2014). From conventional to magnetic refrigerator technology. *International Journal of Refrigeration*, 37(1), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.027>
- Thavamani, J., & Senthil, R. (2020). Performance analysis of retrofitted domestic vapor compression refrigeration system using hydrocarbon refrigerants. *International Journal of Ambient Energy*, 0(0), 1–25. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1751284>
- UNEP. (2015). *The Emissions Gap Report 2015* (pp. 1–98). pp. 1–98. Retrieved from https://uneplive.unep.org/media/docs/theme/13/EGR_2015_301115_lores.pdf
- Wang, X., & Yu, J. (2015). An experimental investigation on a novel ejector enhanced refrigeration cycle applied in the domestic refrigerator-freezer. *Energy*, 93, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.038>
- Yu, C. C., & Teng, T. P. (2014). Retrofit assessment of refrigerator using hydrocarbon refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, 66(1–2), 507–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>