

KAJI EKSPERIMENTAL RETROFIT R404A DENGAN REFRIGERAN RAMAH LINGKUNGAN R290 PADA *FREEZER*

Kasni Sumeru¹, Triaji Pangripto Pramudantoro², Apip Badarudin³, Ridwan Nugraha⁴, Luga Martin Simbolon^{5*}, Mohamad Firdaus bin Sukri⁶

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Refrigerasi & Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559

⁶Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Melaka 76100, Malaysia

Email: ¹sumeru@polban.ac.id, ²triajipangripto@polban.ac.id, ³apipbdr@polban.ac.id, ⁴ridwan.nugraha.tptu419@polban.ac.id, ^{5*}lugamartin@polban.ac.id, ⁶mohdfirdaus@utem.edu.my

Abstrak

Refrigeran R404A masih banyak digunakan sebagai fluida kerja pada *freezer* untuk temperatur di bawah -30°C . Namun karena R404A masih memiliki nilai *global warming potential* (GWP) yang sangat tinggi, maka penggunaannya sebagai fluida kerja harus segera dihentikan. Salah satu alternatif pengganti adalah refrigeran ramah lingkungan, yaitu R290. Penggantian refrigeran R404A dengan R290 pada penelitian ini dilakukan pada *freezer* yang dapat mencapai temperatur -40°C . Dalam retrofit refrigeran dengan jenis yang berbeda, acuan yang digunakan adalah volume pengisian yang sama di dalam sistem. Massa pengisian R290 adalah perbandingan massa jenis R404A dengan R290 pada temperatur evaporasinya, yaitu -40°C . Massa pengisian R404A adalah sebesar 170 g, sedangkan massa pengisian R290 adalah 62,9 g. Berdasarkan pengujian selama 120 menit, penggantian R404A dengan R290 dapat menurunkan daya listrik sebesar 6,0%, dan juga sedikit meningkatkan kapasitas pendinginannya, yaitu sebesar 2,42%. Akibat penurunan daya listrik dan meningkatnya kapasitas pendinginan, maka COP pada *freezer* juga meningkat, yaitu sebesar 8,05%. Hal yang lebih penting, penggantian R404A dengan R290 dapat mengurangi emisi gas penyumbang pemanasan global bila terjadi kebocoran pada mesin pendingin, karena nilai GWP refrigeran R404A sebesar 3922 diganti dengan R290 yang memiliki GWP hanya 3.

Kata Kunci: *freezer*, GWP, R404A, R290, COP

Abstract

R404A refrigerant is still widely used as the working fluid in freezers with temperatures below -30°C . However, because of R404A's high global warming potential (GWP) value, its use as a working fluid should be stopped immediately. One alternative is an environmentally friendly refrigerant, that is R290. In this study, the R404A refrigerant was replaced by R290 in a freezer that can reach -40°C . In the case of replacing a refrigerant with a different type, the reference used is the same charging volume in the system. The filling mass of R290 is the ratio of the density of R404A to R290 at its evaporation temperature, which is -40°C . The amount of R404A's mass filling is 170 g, while the amount of R290's mass filling is 62.9 g. Based on a 120-minutes testing, replacing R404A with R290 has resulted in the reduction of power input by 6.0%, as well as in the slight increase of its cooling capacity, which is 2.42%. As a result of the input power decrease and the cooling capacity increase, the COP in the freezer also increased, namely by 8.05%. More importantly, if a leak occurs in the refrigerant, the replacement of R404A with R290 can help reduce gas emissions that contribute to global warming. It is because the GWP value of R404A refrigerant, which is 3922, is replaced by the GWP value of R290 refrigerant, which is only 3.

Keywords: *freezer*, GWP, R404A, R290, COP

I. PENDAHULUAN

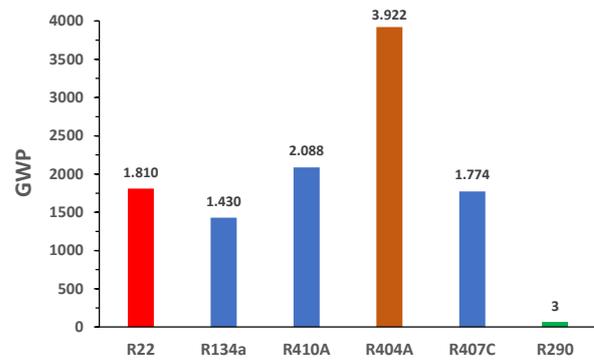
Mesin refrigerasi menyumbang pemanasan global, baik secara langsung karena kebocoran refrigeran, maupun tidak langsung akibat konsumsi

energi oleh mesin pendingin. (Makhnatch and Khodabandeh, 2014; Antunes and Bandarra Filho, 2016; Cabello *et al.*, 2022). Persentase penyumbang pemanasan secara langsung dan tidak langsung adalah 37% dan 63% (Cabello *et al.*, 2022).

Kontribusi penyebab pemanasan global bidang refrigerasi secara global adalah sekitar 7,8% (Dupont, 2019). Saat ini diperkirakan jumlah mesin refrigerasi, pengkondisi udara dan *heat pump* di seluruh dunia sekitar 5 miliar, dimana sekitar 2 miliar adalah lemari pendingin yang digunakan di perumahan (Matsuda *et al.*, 2022). Untuk itu, penggunaan refrigeran yang ramah lingkungan di masa depan adalah suatu keharusan dalam upaya mengurangi pemanasan global.

Refrigeran R404A bersama R134a, R410A dan R407C adalah keluarga dari HFC (*hydrofluorocarbon*) telah digunakan sekitar selama 30 tahun terakhir (Zhang *et al.*, 2022). Pada dekade 90an, HFC digunakan untuk menggantikan refrigeran CFC dan HCFC yang memiliki sifat merusak ozon (Oruç, Devocioğlu and Ender, 2018; Ghanbarpour *et al.*, 2021). Meskipun refrigeran keluarga HFC sudah tidak memiliki sifat merusak ozon, namun masih memiliki nilai pemanasan global yang cukup tinggi. Oleh karena itu maka penggunaan refrigeran HFC harus segera dihentikan, Jadwal pengurangan penggunaan HFC telah dimulai di Eropa sejak tahun 2014 (The European Regulation, 2014). Namun kenyataannya, penggunaan HFC sebagai fluida kerja di mesin pendingin maupun pengkondisi udara (AC) masih banyak digunakan, khususnya di Indonesia.

Penggunaan refrigeran HFC berpotensi mempercepat pemanasan global bila terjadi kebocoran pada mesin pendingin maupun AC. Kebocoran merupakan hal yang biasa terjadi pada sistem refrigerasi. Untuk itu sangat beralasan bila penggunaan refrigeran HFC harus segera dihentikan. Salah satu alternatif pengganti refrigeran adalah R290. Fluida kerja ini (R290) memiliki nilai GWP yang sangat rendah. Nilai GWP untuk berbagai refrigeran terlihat seperti pada Gambar 1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa ternyata R404A memiliki nilai GWP tertinggi bila dibandingkan dengan refrigeran HFC lainnya, yaitu sebesar 3922. Sedangkan R290 nilai GWP-nya sangat rendah, yaitu hanya 3. Terdapat beberapa refrigeran alternatif untuk menggantikan R404A, antara lain adalah karbon dioksida (Mota-Babiloni *et al.*, 2015), ammonia dan hydrocarbon (Sawalha *et al.*, 2017), dan campuran HFC (Mota-Babiloni *et al.*, 2014). Pada penelitian ini akan digunakan R290 sebagai fluida kerja, dimana refrigeran ini merupakan keluarga dari hydrocarbon.



Gambar 1. Perbandingan nilai GWP untuk berbagai jenis refrigeran.

Beberapa dekade terakhir ini telah terjadi pemanasan global, namun hanya sedikit masyarakat yang menyadarinya. Menurut para ahli, temperatur bumi rata-rata akan meningkat 1,4°C hingga 5,8°C pada akhir abad ke-21 (Makhnatch *et al.*, 2017). Bahkan ada ahli yang lebih pesimis, karena telah terjadi peningkatan temperatur 0,02°C per tahun pada beberapa akhir dekade ini (Makhnatch *et al.*, 2017; Shakouri G., 2019). Bila upaya pengurangan emisi gas-gas penyebab rumah kaca tidak segera dihentikan, maka sangat mungkin peningkatan temperatur permukaan bumi lebih tinggi dari perkiraan para ahli (Wang and Chen, 2014; Dirks *et al.*, 2015) Bukti nyata telah terjadinya pemanasan global di Indonesia adalah tidak dinginnya lagi kota Bandung dan Malang seperti sebelum tahun 80an.

Refrigeran pengganti R404A pada *freezer* bukan hanya R290 saja. Ghanbarpour melakukan penelitian pada penggantian R404A dengan refrigeran rendah GWP, yaitu R449A mesin pendingin di supermarket (Ghanbarpour *et al.*, 2021). Hasil kajiannya melaporkan bahwa penggantian R404A dengan R449A dapat meningkatkan kinerja mesin pendingin sebesar 10% untuk mesin pendingin bertemperatur di bawah -10°C dan 5% untuk mesin refrigerasi dengan temperatur sekitar 5°C. Zhang melakukan penelitian mengganti R404A dengan refrigeran yang disebut RTJU-Z yang memiliki GWP 794 pada *cold storage* (Zhang *et al.*, 2022). Mereka melaporkan bahwa penggantian R404A dengan RTJU-Z dapat meningkatkan COP sebesar 2,15%-5,71% untuk berbagai temperatur evaporasi mesin pendingin. Penelitian lainnya dilakukan oleh Oruç pada mesin pendingin dengan mengganti R404A dengan R442A dan R453A dan memvariasikan temperatur evaporasi -6°C, -30°C dan 0°C (Oruç, Devocioğlu and Ender, 2018). Hasil penelitiannya mendapatkan hasil bahwa penggantian R404A dengan R442A dan R453A dapat meningkatkan kapasitas

pendinginan 1%-8%. Peningkatan COP adalah 5%-12% untuk R442A dan 10%-14% untuk R453A.

Berbeda dengan penelitian-penelitian yang telah dijelaskan di atas, penelitian ini bertujuan mengganti R404A dengan refrigeran ramah lingkungan R290 pada freezer yang memiliki temperatur kabin hingga -40°C. Selama ini refrigeran dari keluarga HFC (R134a, R410A, R407C dan R404A) adalah produk import, sedangkan R290 sudah dapat diproduksi sendiri di dalam negeri. Sehingga dari sisi ekonomi, penggunaan R290 berpotensi meningkatkan pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Dari hasil penelitian ini juga diharapkan dapat dijadikan pertimbangan penghentian penggunaan refrigeran dari keluarga HCF diganti dengan refrigeran dari keluarga *hydrocarbon*, yaitu R290 atau R600a dalam upaya mengurangi pemanasan global dari sektor refrigerasi.

II. METODE

Penggantian refrigeran atau retrofit dari R404A dengan R290a pada penelitian ini dilakukan pada freezer yang menggunakan *condensing unit* untuk R404A dengan kapasitas kompresor sekitar 3/4 HP. Dimensi kabin tempat evaporator adalah: panjang 0,52 m, lebar 0,36 m dan tinggi 0,33 m, seperti yang terlihat pada Gambar. 2. Pada gambar terlihat bahwa kabin terpisah dengan *condensing unit*. Untuk mengetahui tekanan kerja freezer, pada bagian tekanan tinggi (warna merah) dan rendah (warna biru) dipasang *pressure gauge*. Sedangkan untuk mengukur temperatur pada beberapa titik digunakan *thermocouple* yang dihubungkan dengan aquisisi data yang dapat langsung terekam di dalam laptop.

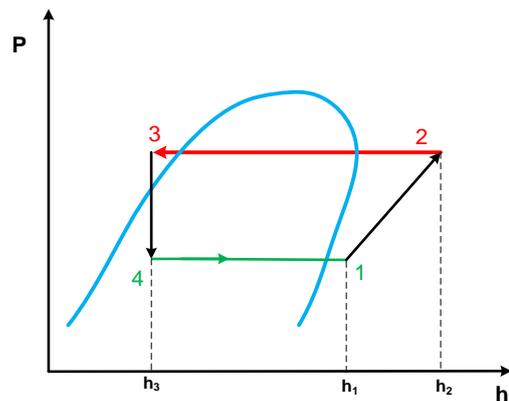
Pada gambar terlihat proses pengisian R404A ke dalam sistem (tabung orange), sedangkan tabung hijau yang berisi R290 akan dimasukkan ke dalam sistem setelah pengujian R404A selesai. Timbangan digunakan untuk mengukur massa pengisian R404A maupun R290 yang akan diisikan ke dalam sistem.

Massa pengisian refrigeran R404A pada freezer adalah sebesar 170 gram. Setelah dilakukan pengujian menggunakan R404A, selanjutnya dilakukan pengosongan (vakum) refrigeran dari sistem, kemudian diganti dengan R290. Massa pengisian R290 yang dimasukkan ke dalam sistem adalah berdasarkan perbandingan massa jenis R404A dan R290 pada temperatur -40°C, yaitu 0,37 (Lemmon *et al.*, 2018). Itu artinya massa pengisian R290 ke dalam freezer adalah 170 gr x 0,37 = 62,9 g. Durasi pengujian pada penelitian ini adalah selama 120 menit, dimana data tekanan kerja sistem diambil tiap 10 menit sekali.



Gambar 2. Foto freezer tempat uji retrofit refrigeran R404A dengan R290.

Berdasarkan data tekanan *suction*, tekanan *discharge*, temperatur keluar kondenser, temperatur keluar evaporator dan temperatur *discharge*, siklus refrigerasi freezer digambarkan pada diagram P-h (*pressure-enthalpy*) seperti yang terlihat pada Gambar 3. Dengan menggunakan gambar ini dapat dilakukan analisis kinerja freezer.



Gambar 3. Siklus refrigerasi kompresi uap freezer pada diagram P-h.

Dengan menggunakan Gambar. 3, dapat dihitung laju aliran refrigeran di dalam freezer, dengan menggunakan daya listrik kompresor yang terukur. Daya listrik kompresor diketahui dengan mengukur arus dan tegangan listrik yang masuk ke kompresor. Besarnya daya listrik dihitung dengan persamaan,

$$P = V \cdot I \tag{1}$$

dimana,

P = daya listrik kompresor, W
 V = tegangan listrik, V

I = arus listrik, A

Sedangkan laju aliran massa refrigeran di dalam freezer dihitung dengan persamaan,

$$\dot{m} = \frac{P}{(h_2 - h_1)} \quad (2)$$

dimana,

- \dot{m} = laju aliran massa, kg/s
- h_1 = entalpi pada titik 1, kJ/kg
- h_2 = entalpi pada titik 2, kJ/kg

Dengan diketahuinya laju aliran massa refrigeran, maka kapasitas pendinginan freezer dapat dihitung dengan persamaan,

$$Q = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (3)$$

dimana,

- Q = kapasitas pendinginan, kW
- \dot{m} = laju aliran massa, kg/s
- h_2 = entalpi pada titik 2, kJ/kg
- h_1 = entalpi pada titik 3, kJ/kg

Kinerja freezer, yaitu perbandingan antara kapasitas pendinginan dengan daya listrik, atau sering disebut *coefficient of performance* (COP), dihitung dengan persamaan (4), yaitu,

$$COP = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

Akurasi dari alat ukur yang digunakan pada penelitian ini terlihat pada Tabel 1. Pada tabel terlihat bahwa akurasi alat-alat yang digunakan cukup memadai untuk digunakan dalam menentukan perubahan-perubahan parameter pada freezer sebelum dan setelah dilakukan retrofit dari R404A dengan R290.

Tabel 1. Akurasi Alat Ukur Yang Digunakan

No.	Nama Alat	Akurasi
1.	Thermocouple K-type	$\pm 0,1^\circ\text{C}$
2.	High pressure gauge	$\pm 0,5$ bar
3.	Low pressure gauge	$\pm 0,1$ bar
4.	Ampere meter	$\pm 0,1$ A
5.	Volt meter	± 1 V
6.	Timbangan	$\pm 0,1$ g

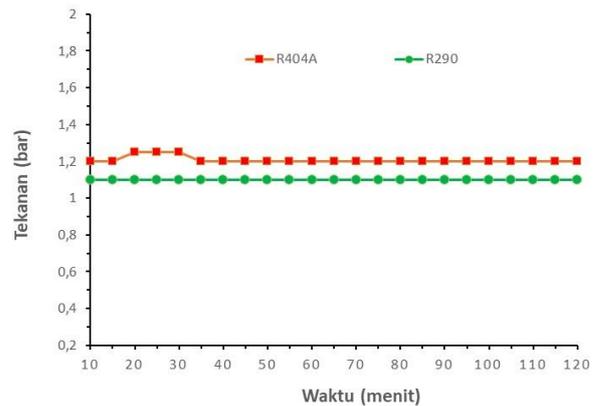
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini terdapat beberapa parameter yang akan dibandingkan selama proses retrofit, yaitu tekanan suction, tekanan discharge, daya listrik, kapasitas pendinginan dan COP freezer

sebelum dan setelah dilakukan penggantian refrigeran dari R404A dengan R290.

3.1. Perubahan Tekanan Kerja

Setiap penggantian jenis refrigeran pada sistem refrigerasi, hal utama yang langsung dapat diamati adalah perubahan tekanan kerja. Gambar 4. menunjukkan perbandingan tekanan suction R404A dan R290 selama pengambilan data. Dari gambar dapat dilihat bahwa tekanan suction tekanan suction R404A sedikit lebih tinggi dibanding dengan R290. Besarnya tekanan suction untuk R404A adalah 1,2 bar, dan 1,1 bar untuk R290. Dengan tekanan suction ini, temperatur kabin terendah yang dapat dicapai oleh R404A dan R290 adalah $-40,1^\circ\text{C}$ dan $-38,0^\circ\text{C}$. Artinya penggantian R404A dengan R290 mengakibatkan temperatur terendah meningkat sedikit, yaitu sekitar 2°C . Hal ini disebabkan perbedaan NBP dari R404A lebih rendah sekitar 4°C dari R290, yaitu $-46,5^\circ\text{C}$ dibanding $-42,1^\circ\text{C}$ (Devecioğlu and Oruç, 2015; Lemmon *et al.*, 2018). Berdasarkan sifat termodinamika R404A dan R290, temperatur evaporasi 1,2 bar untuk R404A adalah $-42,0^\circ\text{C}$, sedangkan untuk temperatur evaporasi 1,1 bar adalah $-40,0^\circ\text{C}$ (Lemmon *et al.*, 2018). Ini artinya temperatur kabin saat menggunakan R404A dan R290 lebih tinggi sekitar 2°C dari temperatur refrigeran di dalam evaporator.

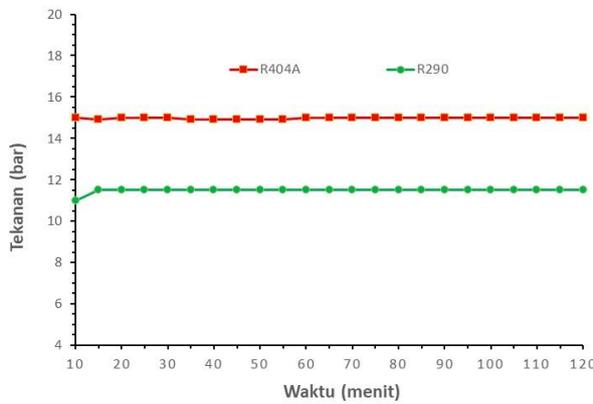


Gambar 4. Perbandingan tekanan suction pada saat menggunakan refrigeran R404A dan R290.

Gambar 5 menampilkan tekanan discharge untuk R404A dan R290 pada freezer. Gambar menunjukkan bahwa tekanan discharge R404A lebih tinggi dari R290, yaitu 15 bar untuk R404A dan 12 bar untuk R290. Berdasarkan sifat termodinamika R404A, untuk tekanan discharge, temperatur kondensasinya adalah $32,3^\circ\text{C}$. Sedangkan untuk R290 dengan tekanan discharge 11,5 bar, temperatur kondensasinya adalah $32,8^\circ\text{C}$ (Lemmon *et al.*, 2018). Pada penelitian ini, pengujian kinerja freezer dilakukan di dalam

Laboratorium Tata Udara dengan temperatur sekitar 25°C. Ini artinya terjadi perbedaan sekitar 7°C antara temperatur lingkungan dengan temperatur kondensasi freezer.

Dengan tekanan *suction* yang hampir sama, namun tekanan *discharge* yang cukup jauh berbeda, maka secara teoritis R404A akan berpotensi memerlukan daya listrik yang lebih besar dari R290. Hal ini akan ditunjukkan pada analisis berikutnya.



Gambar 5. Perbandingan tekanan *discharge* pada saat menggunakan refrigeran R404A dan R290.

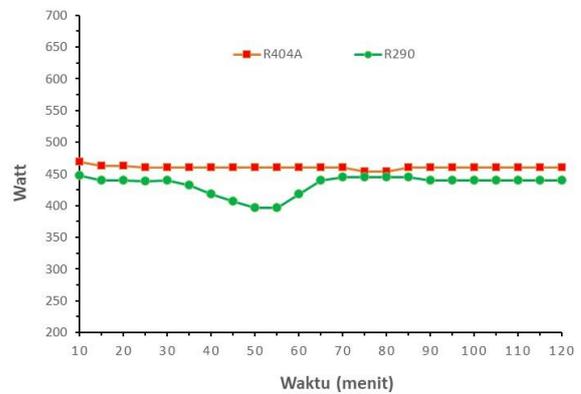
3.2. Perubahan Daya Listrik

Selain ramah lingkungan, refrigeran pengganti diharapkan juga dapat menurunkan konsumsi daya listrik oleh mesin refrigerasi. Kalaupun tidak dapat menurunkan daya listrik, minimal tidak meningkatkan daya listrik cukup signifikan, karena produksi energi sebagai sumber daya listrik mesin refrigerasi juga akan menghasilkan gas CO₂, dimana gas ini salah satu penyebab pemanasan global (Cabello *et al.*, 2022). Dengan kata lain, bila daya listrik menurun, maka produksi CO₂ oleh mesin refrigerasi juga akan menurun.

Kuantitas daya listrik dihitung dengan menggunakan persamaan (1). Gambar 6 menggambarkan perbandingan daya listrik kompresor freezer pada saat menggunakan R404A dan R290 sebagai fluida kerja. Dari gambar terlihat bahwa pengujian selama 120 menit menunjukkan daya listrik R404A selalu lebih tinggi dibandingkan dengan saat menggunakan R290. Tingginya daya listrik oleh R404A salah satunya ditandai dengan tekanan *discharge* yang lebih tinggi dari R290, seperti yang telah dijelaskan pada Gambar 5 di atas. Terjadinya penurunan daya listrik pada menit ke-40 hingga menit ke-60 disebabkan terjadinya penurunan tegangan jaringan listrik pada saat pengambilan data. Oleh karena daya listrik adalah perkalian arus listrik dengan tegangan listrik, seperti yang dinyatakan oleh persamaan (1), maka bila

voltase listrik turun, maka turun pula daya listriknya.

Rata-rata daya listrik untuk R404A dan R290 selama pengukuran 120 menit adalah 460,2 W dan 434,1 W. Dengan kata lain, penggantian refrigeran dari R404A dengan R290 pada freezer menurunkan daya listrik sebesar 6,0%. Dari hasil ini menunjukkan bahwa selain akan menghasilkan penurunan emisi dari refrigeran penyebab rumah kaca yang cukup signifikan juga dapat menurunkan konsumsi energi oleh freezer. Sehingga penurunan pemanasan global tidak hanya berasal dari secara langsung akibat nilai GWP dari kedua refrigeran yang jauh berbeda, namun juga berasal dari tidak langsung, yaitu akibat penurunan konsumsi energi listrik (Cabello *et al.*, 2022). Seperti yang telah dilaporkan oleh Cabello bahwa persentase penyumbang pemanasan secara langsung dan tidak langsung dari sistem refrigerasi adalah 37% dan 63%.

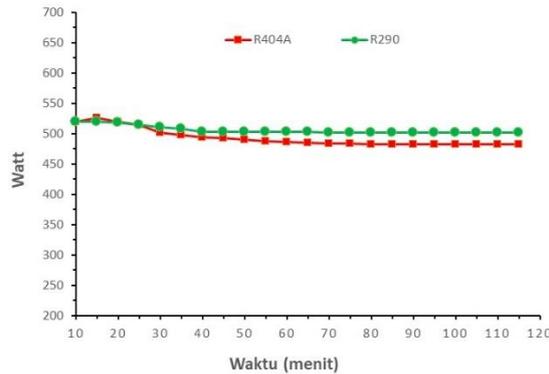


Gambar 6. Perbandingan daya listrik freezer pada saat menggunakan refrigeran R404A dan R290.

3.3. Perubahan Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan adalah luaran yang diinginkan oleh mesin pendingin. Semakin besar kapasitas pendinginan, maka akan semakin baik kinerja mesin pendingin tersebut, untuk daya listrik yang sama. Oleh karena itu, penggantian refrigeran pada suatu mesin pendingin diharapkan akan meningkatkan kapasitas pendinginannya. Kapasitas pendinginan yang digambarkan oleh Gambar 7 dihitung dengan menggunakan persamaan (3). Gambar tersebut menunjukkan perbandingan kapasitas pendinginan freezer saat menggunakan R404A dan R290. Pada gambar terlihat bahwa kapasitas pendinginan R290 sedikit lebih tinggi dari R404A. Rata-rata kapasitas pendinginan untuk R404A dan R290 adalah 495,0 W dan 507,3 W. Persentase peningkatan kapasitas pendinginan freezer akibat penggantian refrigeran dari R404A

dengan R290 adalah 2,42%. Persentase peningkatan kapasitas pendinginan ini serupa dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Oruç (Oruç, Devocioğlu and Ender, 2018), yaitu 1%-8%.

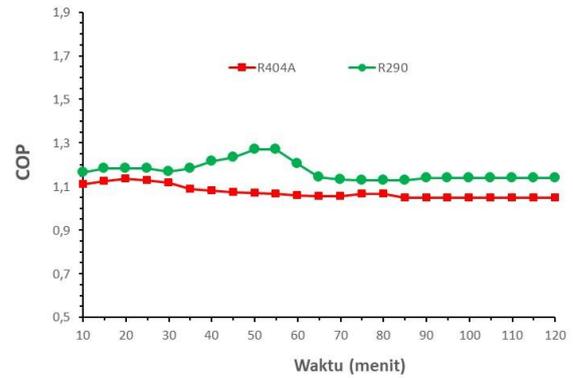


Gambar 7. Perbandingan kapasitas pendinginan freezer pada saat menggunakan refrigeran R404A dan R290.

3.4. Perubahan COP

Gambar 8 menampilkan COP untuk R404A dan R290. Terlihat bahwa COP R290 selalu lebih tinggi dari R404A selama pengambilan data 120 menit. Terjadi lonjakan nilai COP R290 yang cukup signifikan pada menit ke-40 hingga menit ke-60. Hal ini disebabkan karena pada menit-menit tersebut daya listrik R290 mengalami penurunan yang cukup tajam. Nilai COP rata-rata R404A dan R290 adalah 1,08 dan 1,17.

Pada bagian sebelumnya telah ditunjukkan bahwa penggantian refrigeran dari R404A dengan R290 dapat menurunkan daya listrik dan menaikkan kapasitas pendinginan freezer. Sesuai dengan persamaan (4), COP adalah perbandingan antara kapasitas pendinginan dengan daya listrik, sehingga bila kapasitas pendinginan meningkat dan daya listrik menurun, maka persentase peningkatan COP akan lebih besar dari persentase peningkatan kapasitas pendinginan. Seperti yang telah disebutkan di atas, persentase peningkatan kapasitas pendinginan adalah 2,42%, sedangkan persentase peningkatan COP adalah sebesar 8,05%. Peningkatan COP ini sedikit lebih kecil bila dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Ghanbarpour (Ghanbarpour *et al.*, 2021), yaitu 10%. Namun peningkatan COP pada penelitian ini sedikit lebih tinggi penelitian yang dilakukan oleh Zhang, yaitu 2,15%-5,71% (Zhang *et al.*, 2022).



Gambar 8. Perbandingan COP freezer pada saat menggunakan refrigeran R404A dan R290.

Berdasarkan penjelasan di atas terbukti bahwa penggantian R404A dengan R290 dapat meningkatkan kinerja freezer. Dengan kata lain dapat menurunkan konsumsi energi listrik oleh freezer selama beroperasi. Disamping itu, karena nilai GWP R290 sangat rendah dibandingkan dengan R404A, maka penggantian R404A dengan R290 pada mesin pendingin harus segera dilaksanakan agar emisi refrigeran dari bidang refrigerasi dapat berkurang sangat signifikan.

IV. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan pengujian menunjukkan bahwa penggantian R404A dengan R290 pada freezer dapat dilakukan dengan massa pengisian R290 sebesar 37% dari massa pengisian R404A. Penggantian dari R404A dengan R290 akan menaikkan temperatur terendah di dalam kabin, yaitu yang sebelumnya temperaturnya dapat mencapai $-40,1^{\circ}\text{C}$ menjadi hanya $-38,0^{\circ}\text{C}$. Hal ini disebabkan karena nilai NBP dari keduanya sedikit berbeda.

Penggantian refrigeran yang telah dilakukan dapat menurunkan daya listrik sebesar 6,0% dan meningkatkan kapasitas pendinginan sebesar 2,42%. Oleh karena terjadi penurunan daya listrik dan peningkatan kapasitas pendinginan, maka COP freezer meningkat sebesar 8,05%. Ini artinya penggantian R404A dengan R290 pada freezer akan menghasilkan keuntungan dari sisi biaya operasional akibat peningkatan COP. Selain itu, penggantian R404A dengan R290 juga akan jauh menurunkan emisi refrigeran penyebab pemanasan global bila terjadi kebocoran karena nilai GWP keduanya jauh berbeda, yaitu 3.922 dan 3. Untuk itu, sangatlah beralasan bila penggunaan R404A pada sistem refrigerasi segera dihentikan.

Saran

Pada penelitian ini, massa pengisian R290 mengacu pada perbandingan massa jenis R404A dengan R290 pada temperatur saturasi gas -40°C . Oleh karena massa jenis refrigeran selalu berubah pada saat beroperasi, maka masih diperlukan penelitian lanjutan dengan memvariasikan massa pengisian R290, agar didapatkan massa pengisian yang optimal sehingga didapatkan peningkatan COP yang maksimal.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas pendanaannya melalui skema Penelitian Terapan Nomor: B/92.48/PL1.R7/PG.00.03/2023. Ucapan terima kasih juga ditujukan pada Jurusan Teknik Refrigerasi & Tata Udara atas diijinkannya penggunaan fasilitas pada penelitian ini.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Antunes, A. H. P. and Bandarra Filho, E. P. (2016) 'Experimental investigation on the performance and global environmental impact of a refrigeration system retrofitted with alternative refrigerants', *International Journal of Refrigeration*, 70, pp. 119–127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.06.027>.
- Cabello, R. *et al.* (2022) 'Energy impact of the Internal Heat Exchanger in a horizontal freezing cabinet. Experimental evaluation with the R404A low-GWP alternatives R454C, R455A, R468A, R290 and R1270', *International Journal of Refrigeration*, 137(October 2021), pp. 22–33. doi: [10.1016/j.ijrefrig.2022.02.007](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.007).
- Devecioğlu, A. G. and Oruç, V. (2015) 'Characteristics of Some New Generation Refrigerants with Low GWP', *Energy Procedia*, 75, pp. 1452–1457. doi: [10.1016/j.egypro.2015.07.258](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.258).
- Dirks, J. A. *et al.* (2015) 'Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings: A detailed regional approach', *Energy*, 79, pp. 20–32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.081>.
- Dupont, J. L. (2019) *The Role of Refrigeration in the Global Economy (2019), 38th Note..., Record ID: 30027313*. doi: <https://doi.org/10.18462/iif.NItec38.06.2019>.
- Ghanbarpour, M. *et al.* (2021) 'ANN modeling to analyze the R404A replacement with the low GWP alternative R449A in an indirect supermarket refrigeration system', *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). doi: [10.3390/app112311333](https://doi.org/10.3390/app112311333).
- Lemmon, E. W. *et al.* (2018) 'NIST Standard Reference Database 23: reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP'. Gaithersburg: Standard Reference Data Program.
- Makhnatch, P. *et al.* (2017) 'Retrofit of lower GWP alternative R449A into an existing R404A indirect supermarket refrigeration system', *International Journal of Refrigeration*, 76, pp. 184–192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.02.009>.
- Makhnatch, P. and Khodabandeh, R. (2014) 'The role of environmental metrics (GWP, TEWI, LCCP) in the selection of low GWP refrigerant', *Energy Procedia*, 61, pp. 2460–2463. doi: [10.1016/j.egypro.2014.12.023](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.023).
- Matsuda, V. A. *et al.* (2022) 'Thermodynamic Irreversibility Analysis of Dual-Skin Chest-Freezer', *Entropy*, 24(4). doi: [10.3390/e24040453](https://doi.org/10.3390/e24040453).
- Mota-Babiloni, A. *et al.* (2014) 'Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline', *International Journal of Refrigeration*, 44, pp. 81–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.015>.
- Mota-Babiloni, A. *et al.* (2015) 'Analysis based on EU Regulation No 517/2014 of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high GWP refrigerants in refrigeration and HVAC systems', *International Journal of Refrigeration*, 52, pp. 21–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.12.021>.
- Oruç, V., Devecioğlu, A. G. and Ender, S. (2018) 'Improvement of energy parameters using R442A and R453A in a refrigeration system operating with R404A', *Applied Thermal Engineering*, 129, pp. 243–249. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.035>.

- Sawalha, S. *et al.* (2017) 'Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part II: Analysis of HFC refrigeration systems and comparison to CO₂ trans-critical', *Applied Thermal Engineering*, 111(2017), pp. 170–182. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.073.
- Shakouri G., H. (2019) 'The share of cooling electricity in global warming: Estimation of the loop gain for the positive feedback', *Energy*, 179, pp. 747–761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.170>.
- The European Regulation (2014) *EUR-Lex - 32014R0517 - EN - EUR-Lex, REGULATION (EU) No 517/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. doi: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj>.
- Wang, H. and Chen, Q. (2014) 'Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States', *Energy and Buildings*, 82, pp. 428–436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.034>.
- Zhang, L. *et al.* (2022) 'Flammable performance and experimental evaluation of a new blend as R404A lower-GWP alternative', *International Journal of Refrigeration*, 135, pp. 113–120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.12.019>.