

Kaji performa mesin refrigerasi siklus kompresi uap dengan refrigeran R134a dan refrigeran hidrokarbon sebagai *drop-in substitute* dengan alat ekspansi berbeda

Iqbal Parija^a, Azridjal Aziz^a, Rahmat Iman Mainil^a,

^aJurusan Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293

¹Email korespondensi: azridjal.aziz@lecturer.unri.ac.id

Abstract. Refrigerant is an essential working fluid in a refrigeration system. However, the use of synthetic refrigerants such as R-134a is now restricted due to their high Global Warming Potential (GWP) value. As an alternative, MC-134, as a hydrocarbon refrigerant, offers a more environmentally friendly solution. This research aims to compare the performance of R-134a and MC-134 in a vapor-compression refrigeration cycle system, as well as to analyze the influence of expansion devices, namely capillary pipes and Thermostatic Expansion Valves (TEV). The test results show that for R-134a, increasing the length of the capillary pipe increases the Coefficient of Performance (COP) by 20.83% due to a decrease in compression work. In contrast, for MC-134, COP decreases by 3.35%. TEV delivers the best performance, with a 6.05% increase in refrigeration effect and a COP of 25.07%. However, TEV is not suitable for MC-134 because the low condensing pressure inhibits the phase change to liquid. Using 1.25 m and 1.5 m capillary pipes, MC-134 even has a higher COP of up to 16.65% compared to R-134a. Despite this, MC-134 still shows potential as a replacement for R-134a, with 30% of the mass capable of producing twice the refrigeration effect and 7.52% lower electric current consumption.

Keywords: R-134a, MC-134, capillary tube, thermostatic expansion device, COP

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/d8day211>

PENDAHULUAN

Seiring dengan kemajuan teknologi di berbagai aspek kehidupan, mesin pendingin telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari aktivitas manusia. Penggunaannya meluas ke berbagai sektor, dari industri makanan, kesehatan, transportasi dan energi, serta pengkondisian udara. *Internasional Institute of Refrigeration* (IIR) memperkirakan bahwa jumlah total mesin pendingin, pengkondisian udara, dan pompa kalor yang beroperasi di seluruh dunia adalah sekitar 5 miliar, termasuk 2,6 miliar unit AC (stasioner dan bergerak) serta 2 miliar unit lemari es dan *freezers* [1]. Selain itu, permintaan global pada mesin pendingin bisa meningkat lebih dari dua kali lipat pada tahun 2050 [2].

Sistem pendingin berbasis siklus kompresi uap masih mendominasi karena efisiensinya, dengan empat komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, evaporator, dan alat ekspansi. Alat ekspansi berperan dalam menurunkan tekanan dan temperatur refrigeran secara adiabatik, serta mengatur aliran refrigeran ke evaporator. Secara umum, ada dua jenis alat ekspansi yang biasa digunakan, yaitu pipa kapiler (*capillary tube*) dan katup ekspansi termostatik (*thermostatic expansion valve*). Aziz [3] Telah melakukan komparasi penggunaan pipa kapiler 1,2 m dan katup ekspansi termostatik (KET) terhadap temperatur dan tekanan mesin pendingin, dan didapatkan bahwa penggunaan KET akan memberikan tekanan dan temperatur kerja yang lebih rendah dibanding pipa kapiler. Aziz dan Hartanto [4] melanjutkan penelitian mengenai

pengaruh penggunaan katup ekspansi termostatik (KET) dan pipa kapiler dengan tiga variasi panjang (1,25 m; 1,5 m, dan 2,7 m) terhadap efisiensi mesin pendingin siklus kompresi uap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan KET mampu mengatur dan menurunkan tekanan refrigeran lebih baik serta COP (*Coefficient of Performance*) yang lebih tinggi dibandingkan dengan pipa kapiler. Dhumal dan Dange [5] Juga melakukan komparasi pengaruh penggunaan katup ekspansi termostatik (KET) dan pipa kapiler dengan diameter 0,50 in dan 0,55 in, dan didapatkan hasil bahwa KET meningkatkan efek refrigerasi sebesar 86% dengan hanya meningkatkan kerja kompresor sebesar 14%, sedangkan dengan menggunakan pipa kapiler 0,50 in meningkatkan efek refrigerasi sebesar 50% namun meningkatkan kerja kompresor 90%. Beberapa penelitian tersebut juga sejalan terhadap penelitian [6] Yang melakukan eksperimental analisis terhadap penggunaan katup ekspansi termostatik (KET), katup ekspansi konstan, dan pipa kapiler, didapatkan hasil bahwa KET mengungguli kedua jenis alat ekspansi lainnya dalam hal efisiensi dan pengendalian superheat refrigeran serta COP (*coefficient of performance*) yang lebih unggul. Selain faktor alat ekspansi, jenis refrigeran yang digunakan juga berperan penting dalam menentukan efisiensi energi serta mendukung sistem pendingin yang lebih ramah lingkungan.

Dalam suatu sistem pendingin, refrigeran berfungsi sebagai fluida kerja yang bersirkulasi untuk menjalankan proses perpindahan kalor di dalam mesin pendingin. Namun, refrigeran sintetis seperti

hydrofluorocarbon (HFC) R-134a memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang tinggi. Sejak Amandemen Kigali pada tahun 2016 [7] serta implementasi Peraturan Presiden RI No.129 Tahun 2022 [8], penggunaan HFC dibatasi secara bertahap. Kondisi ini mendorong kebutuhan akan refrigeran alternatif yang ramah lingkungan namun tetap memiliki performa termodinamika yang setara atau bahkan lebih baik. Salah satu kandidat adalah refrigeran hidrokarbon (HC) seperti Musicool-134 (MC-134) produksi PT Pertamina, yang memiliki GWP rendah, efisiensi termal tinggi, dan dapat menjadi pengganti langsung (*drop-in substitute*). Namun, karena sifatnya yang mudah terbakar, penggunaan hidrokarbon sebagai refrigeran harus ditangani dengan prosedur keamanan yang ketat [9]. Penggunaan hidrokarbon (HC) sebagai alternatif pengganti refrigeran bukanlah hal baru. Telah banyak penelitian dengan berbagai macam aplikasi yang menyatakan bahwa refrigeran hidrokarbon memiliki performa yang lebih baik sebagai alternatif pengganti R-134a.

Sejumlah penelitian sebelumnya mendukung potensi hidrokarbon sebagai alternatif R-134a. Muliawan, dkk [10] telah melakukan perbandingan performa antara R-134a dan MC-134 pada aplikasi *ice slush machine* dan didapatkan COP (*Coefficient of Performance*) dari sistem yang menggunakan MC-134 lebih besar (2,8) jika dibandingkan dengan sistem yang menggunakan R-134a (2,6) dengan massa refrigeran hanya 40%. Zheng, dkk [11] Telah melakukan studi eksperimental untuk mengetahui kemungkinan penggantian R-134a dengan R-290 pada aplikasi cold storage system, dan didapatkan hasil bahwa sistem yang menggunakan R-290 memiliki kapasitas pendinginan 52% lebih besar dan COP yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan R-134a, dengan massa refrigeran yang hanya 43 – 46% dari massa refrigeran R-134a. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Aziz, dkk [12] pada aplikasi boks pendingin, Subagyo, dkk [13] pada sistem AC mobil, dan Susila, dkk [14] pada mesin freezer, penggunaan refrigeran hidrokarbon secara konsisten menunjukkan bahwa penggunaan refrigeran hidrokarbon mampu meningkatkan efek refrigerasi dan COP dibandingkan dengan R-134a.

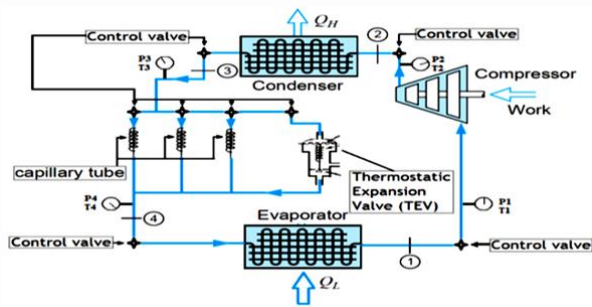
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan alat ekspansi yang berbeda (pipa kapiler dengan variasi panjang dan katup ekspansi termostatik (KET)) terhadap perbandingan performa boks pendingin yang menggunakan refrigeran R-134a dan refrigeran hidrokarbon (MC-134) sebagai pengganti R-134a. Hasil yang disajikan dalam penelitian ini meliputi pencapaian temperatur pada lemari es, tekanan evaporator dan kondensor, konsumsi arus listrik, efek refrigerasi, serta COP

(*Coefficient of Performance*). Prosedur eksperimental yang dilakukan juga diharapkan dapat bermanfaat bagi pengembangan sistem refrigerasi dan upaya penghematan energi di masa mendatang.

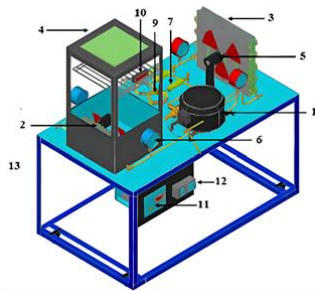
METODOLOGI

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini merupakan metode eksperimental untuk menguji performa dari sebuah mesin pendingin yang menggunakan refrigeran R-134a dan refrigeran hidrokarbon (MC-134) dengan perbedaan alat ekspansi (pipa kapiler dengan variasi panjang dan Katup Ekspansi Termostatik (KET)). Pengujian eksperimental dilakukan dengan alat uji mesin pendingin siklus kompresi uap di Laboratorium Temal, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Riau. Alat uji dirancang untuk memudahkan pengendalian perangkat ekspansi yang digunakan serta penggantian refrigeran sebagai fluida kerja. Alat uji ini awalnya dirancang untuk refrigeran R-134a dengan massa ± 190 gram dan daya kompresor 120 Watt, dan pengujian kedua menggunakan refrigeran MC-134 (refrigeran hidrokarbon) dengan muatan refrigeran 30% (55 gram) dibandingkan dengan R-134a.

Pada **Error! Reference source not found.** terlihat diagram skematik alat peraga mesin pendingin siklus kompresi uap dengan titik pengambilan data. Alat ekspansi yang digunakan pada mesin peraga tersebut terdiri dari pipa kapiler dengan 3 panjang 1,25 m, 1,5 m, dan 2,7 m serta satu jenis katup ekspansi termostatik dengan *bulb sensor* yang berisi R-134a. Setiap alat ekspansi terhubung dengan katup refrigeran. Jika pengujian dilakukan menggunakan pipa kapiler 1,25 m, maka katup pada pipa kapiler 1,25 m dibuka sementara katup pada alat ekspansi yang lainnya dalam keadaan tertutup. **Error! Reference source not found.** [12] terlihat pandangan isometrik alat peraga mesin pendingin siklus kompresi uap. Adapun komponen dari alat peraga mesin pendingin siklus kompresi uap tersebut yaitu (1) Kompresor; (2) Evaporator; (3) Kondensor; (4) Box; (5) Kipas; (6) *Pressure gauge*; (7) Saringan (*filter*); (8) Katup Ekspansi Termostatik (KET); (9) Pipa kapiler; (10) Termometer; (11) *Controller temperature*; (12) Saklar; (13) Rangka. Pengambilan data dilakukan setiap 5 menit selama 2 jam atau 120 menit. Data diambil dari alat ukur temperatur, tekanan, dan arus listrik. Perhitungan performa menggunakan prinsip-prinsip termodinamika [15] dan *properties* termodinamika dari refrigeran yang diambil dari perangkat lunak REFPROP versi 9.



Gambar 1 Diagram Skematik Alat Peraga Mesin Pendingin Siklus Kompresi Uap



Gambar 2 Pandangan Isometrik Alat Peraga Mesin Pendingin Siklus Kompresi Uap [12]

Dalam menyatakan perfroma atau unjuk kerja suatu sistem refrigerasi dengan siklus kompresi uap [15] yang diperhatikan adalah efek pendinginan, kerja kompresi, dan *Coefficient of Performance* (COP). Efek refrigerasi adalah jumlah kalor yang dapat diserap oleh refrigeran per satuan massa.

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (1)$$

Kerja kompresi adalah energi yang diberikan kepada refrigeran per satuan massa untuk meningkatkan tekanan dan temperaturnya.

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

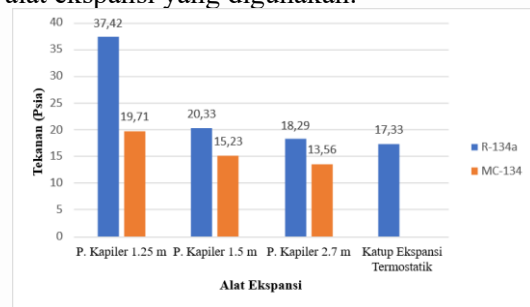
Coefficient of Performance (COP) adalah rasio antara jumlah kalor yang diserahkan oleh refrigeran (efek refrigerasi) dalam evaporator dengan kerja kompresor.

$$COP = \frac{q_e}{w_k} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (3)$$

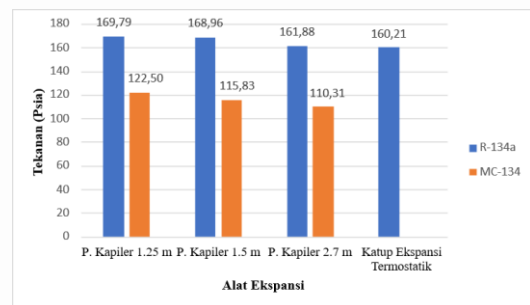
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan Gambar 33 dan Gambar 44 terlihat bahwa tekanan pada sisi evaporator dan kondensor mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya panjang dari pipa kapiler 1,25 m ke pipa kapiler 2,7 m. Pola penurunan ini terjadi pada kedua jenis refrigeran, baik R-134a maupun MC-134. Namun, apabila dibandingkan dengan penggunaan Katup Ekspansi Termostatik (KET), tekanan evaporator yang dihasilkan oleh KET justru menunjukkan nilai yang paling rendah di antara seluruh variasi alat ekspansi yang diuji. Hal tersebut dapat terjadi karena tekanan yang dihasilkan KET bisa disesuaikan dengan kondisi

uap *superheated* yang berada di ujung evaporator, sedangkan tekanan yang dihasilkan pipa kapiler hanya dipengaruhi dari dimensi pipa kapiler itu sendiri. Selain itu dapat dilihat bahwa refrigeran MC-134 memiliki tekanan kerja yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan R-134a baik pada kondensor maupun evaporator. Pada refrigeran MC-134 tidak ada data untuk penggunaan KET. Hal tersebut dikarenakan tekanan kondensasi yang terlalu rendah menyebabkan refrigeran MC-134 tidak sepenuhnya berubah menjadi fase cair pada kondensor. Hal yang sama pernah terjadi pada penelitian yang dilakukan Widiantra, dkk [16] yang mengevaluasi performa sistem pendingin dengan variasi alat ekspansi berupa diameter pipa kapiler dan KET. Dalam penelitian tersebut, disebutkan bahwa penggunaan KET menjadi tidak dapat digunakan ketika tekanan kondensor terlalu rendah, memperkuat temuan bahwa karakteristik tekanan kerja sangat memengaruhi kompatibilitas antara jenis refrigeran dan alat ekspansi yang digunakan.



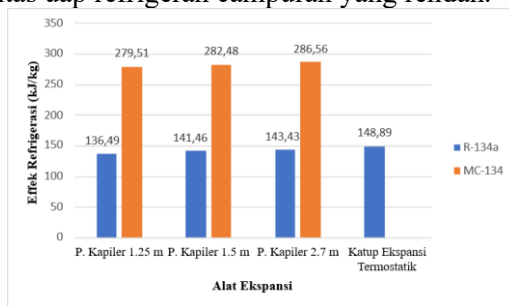
Gambar 3 Grafik Perbandingan Tekanan Rata-rata pada Evaporator



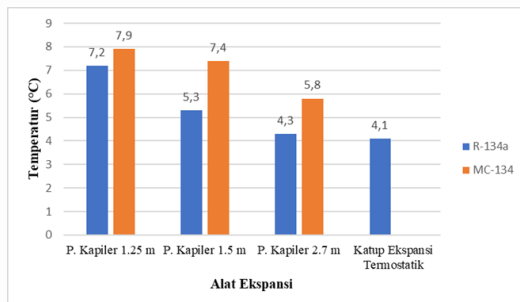
Gambar 4 Grafik Perbandingan Tekanan Rata-rata pada Kondensor

Berdasarkan Gambar 5, secara umum penambahan panjang pipa kapiler menunjukkan kenaikan akibat efek refrigerasi. Pada seluruh variasi pipa kapiler (1,25 m; 1,5 m dan 2,7 m), refrigeran MC-134 menghasilkan efek refrigerasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan R-134a. Nilai tertinggi dari R-134a ditemukan pada penggunaan katup ekspansi termostatik (KET), yaitu sebesar 148,89 kJ/kg, yang menandakan bahwa KET lebih optimal untuk R-134a dibandingkan dengan pipa kapiler. Jika dilihat pada Gambar 6 temperatur akhir terendah dicapai oleh sistem secara keseluruhan, yaitu menggunakan refrigeran R-134a dengan alat

ekspansi berupa Katup Ekspansi Termostatik (KET), yaitu sebesar $4,1^{\circ}\text{C}$. Kinerja optimal KET dalam menurunkan temperatur boks ini disebabkan oleh kemampuannya menghasilkan efek refrigerasi yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis alat ekspansi lainnya. Refrigeran MC-134 memiliki efek refrigerasi yang jauh lebih tinggi, namun jika dilihat, temperatur boks yang dihasilkan tidak lebih baik daripada R-134a. Hal tersebut dikarenakan beberapa faktor, seperti faktor massa dari refrigeran MC-134 yang belum tepat, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mencari massa yang paling tepat. Selain itu dari nilai volumetric cooling capacity, MC-134 memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan R-134a [17]. Selain itu, Mohanraj dkk. [18] pada penelitiannya menjelaskan bahwa campuran R-290 dan R600a (campuran MC-134) memiliki pull-down time (waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai suhu target yang diinginkan) yang lebih lama jika dibandingkan dengan refrigeran R-134a karena viskositas dan densitas uap refrigeran campuran yang rendah.



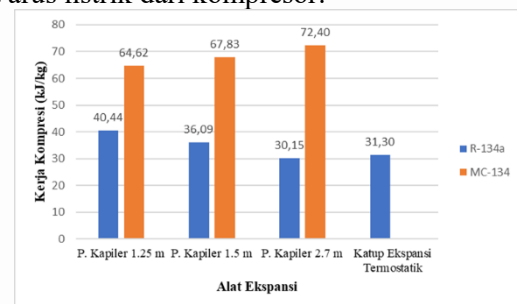
Gambar 5 Grafik Perbandingan Efek Refrigerasi Rata-rata



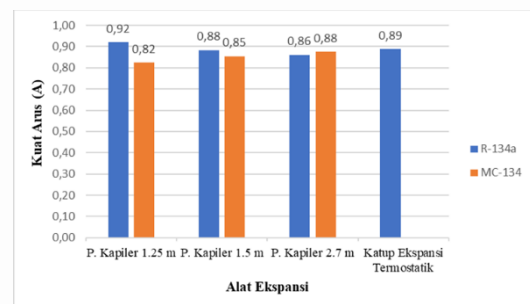
Gambar 6 Grafik Perbandingan Temperatur Boks Akhir

Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa kerja kompresi rata-rata untuk refrigeran MC-134 secara konsisten lebih tinggi dibandingkan refrigeran R-134a pada seluruh variasi alat ekspansi yang diuji. Pada refrigeran R-134a, kerja kompresi rata-rata menurun seiring bertambahnya panjang pipa kapiler, kemudian mengalami sedikit kenaikan kembali saat menggunakan katup ekspansi termostatik (KET) jika dibandingkan dengan pipa kapiler 2,7 m. Jika dilihat dari rasio kompresi (perbandingan antara tekanan suction dan tekanan discharge), pipa kapiler 1,25 memiliki rasio yang jauh lebih kecil. Namun, pada pipa kapiler 1,25 m, tekanan discharge juga selalu besar.

Hal ini menyebabkan kerja kompresi juga semakin besar. Besarnya tekanan discharge ini disebabkan oleh sedikitnya tahanan dari refrigeran yang keluar dari kondensor sehingga menyebabkan banyak massa refrigeran yang harus dikompresi oleh kompresor. Namun, kebalikannya dari R-134a, pada MC-134 penambahan panjang pipa kapiler menyebabkan peningkatan kerja kompresi. Jika dilihat pada Gambar 8 penggunaan kuat arus listrik rata-rata refrigeran R-134a menghasilkan konsumsi arus listrik yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan MC-134 untuk setiap variasi alat ekspansi. Kondisi ini berhubungan dengan kerja kompresi, dengan kata lain, peningkatan kerja kompresi juga akan menghasilkan peningkatan besar kuat arus listrik dari kompresor.



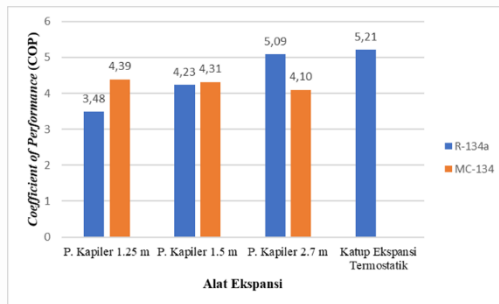
Gambar 7 Grafik Perbandingan Kerja Kompresi Rata-rata



Gambar 8 Grafik Perbandingan Kuat Arus Listrik Rata-rata

Berdasarkan Gambar 9 secara umum, refrigeran R-134a menunjukkan peningkatan COP seiring dengan bertambahnya panjang pipa kapiler. COP meningkat dari 3,48 pada pipa kapiler 1,25 menjadi 4,23 pada panjang 1,5 m dan mencapai 5,09 pada panjang 2,7. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan panjang pipa kapiler pada R-134a menghasilkan penurunan tekanan yang lebih optimal sebelum memasuki evaporator dan mengurangi kerja kompresi sehingga meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Meskipun COP tertinggi untuk R-134a diperoleh pada penggunaan katup ekspansi termostatik (KET) karena menghasilkan efek refrigerasi yang lebih besar dibandingkan dengan pipa kapiler dengan nilai COP sebesar 5,2. Pada sistem yang menggunakan refrigeran MC-134 terjadi penurunan nilai COP seiring dengan bertambahnya panjang pipa kapiler. Nilai COP menurun dari 4,39 pada pipa kapiler 1,25 m menjadi

4,31 pada 1,5 m dan turun lagi menjadi 4,10 pada panjang 2,7 m. Namun, jika dibandingkan dengan penggunaan refrigeran R-134a pada pipa kapiler dengan panjang 1,25 m dan 1,5 m tentu MC-134 memiliki nilai COP yang lebih besar. Dengan demikian, penambahan panjang pipa kapiler menguntungkan bagi R-134a karena menurunkan kerja kompresi dan meningkatkan COP, sedangkan untuk MC-134, hal tersebut berdampak sebaliknya karena meningkatkan kerja kompresi dan menurunkan COP.



Gambar 9 Grafik Perbandingan *Coefficient of Performance (COP)* Rata-rata

KESIMPULAN

Dari hasil analisis perbandingan performa refrigeran R-134a dan MC-134 dengan variasi alat ekspansi, dapat disimpulkan bahwa penggunaan alat ekspansi terbukti berpengaruh signifikan terhadap performa

sistem pendingin. Baik pada refrigeran R-134a maupun MC-134, penambahan panjang pipa kapiler menyebabkan penurunan tekanan yang berdampak pada peningkatan efek refrigerasi. Pada R-134a, penambahan panjang pipa kapiler memberikan peningkatan nilai COP sebesar 20,83% karena penurunan kerja kompresi. Sebaliknya, pada MC-134, kerja kompresi justru meningkat seiring bertambahnya panjang pipa kapiler yang menyebabkan penurunan COP sebesar 3,35%. Meskipun demikian, penggunaan katup ekspansi termostatik (KET) tetap menunjukkan performa terbaik dengan peningkatan efek refrigerasi 6,05% dan peningkatan COP sebesar 25,07% dibandingkan dengan penggunaan pipa kapiler. Namun, KET tidak dapat diaplikasikan pada sistem menggunakan MC-134 akibat tekanan kondensasi yang terlalu rendah sehingga refrigeran tidak mencapai fase cair sepenuhnya di kondensor. Selain itu, refrigeran MC-134 menunjukkan potensi sebagai alternatif pengganti (*drop-in substitute*) dari refrigeran R-134a dengan performa yang setara bahkan lebih baik. Dengan sifatnya yang lebih ramah lingkungan, 30% massa MC-134 memberikan efek refrigerasi dua kali lebih besar dengan konsumsi arus listrik 7,52% lebih kecil jika dibandingkan dengan R-134a. Dalam penggunaan pipa kapiler 1,25 m dan 1,5 m MC-134 bahkan memiliki COP yang lebih tinggi sebesar 16,65% jika dibandingkan refrigeran R-134a.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IIR, "The Role of Refrigeration in the Global Economy." International Institute of Refrigeration (IIR), 2019. doi: 10.18462/IIF.NITEC38.06.2019.
- [2] UNEP, "Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. 2022 Assessment Report." United Nations Environment Programme, 2022. [Daring]. Tersedia pada: <https://ozone.unep.org/system/files/documents/RTOC-assessment%20-report-2022.pdf>
- [3] A. Aziz, "Komparasi Katup Ekspansi Termostatik dan Pipa Kapiler terhadap Temperatur dan Tekanan Mesin Pendingin," *Pros. SNTK TOPI*, 2013.
- [4] A. Aziz dan B. H. Hartanto, "Pengaruh Penggunaan Katup Ekspansi Termostatik dan Pipa Kapiler terhadap Efisiensi Mesin Pendingin Siklus Kompresi Uap," *Proceeding Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin XIII SNTTM XIII*, 2014.
- [5] A. H. Dhumal dan H. M. Dange, "Investigation of Influence of the Various Expansion Devices on the Performance of A Refrigerator Using R407C Refrigerant," *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. V, no. II, hlm. 96–99, 2014, doi: 10.13140/RG.2.2.11013.96483.
- [6] R. Joshi, V. Patil, D. A. Patil, dan T. Koli, "Experimental Analysis of Thermostatic Expansion Valve, Constant Expansion Device & Cap Tube on Vapour Compression Refrigeration System," *Int. J. Sci. Eng. Appl. Sci. IJSEAS*, vol. 2, no. 6, 2016.
- [7] UNEP, "Kigali Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer." United Nations Environment Programme, 2016.
- [8] Peraturan Presiden, "Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 129 Tahun 2022." 2022.
- [9] R. I. Mainil, N. Deswita, A. K. Mainil, dan A. Aziz, "Kondisi Kerja Mesin Refrigerasi Kompresi Uap Pada Variasi Massa Refrigeran Hidrokarbon," *J. Sains Dan Teknol. 19 2 Sept. 2020*, hlm. 63–68, 2020.
- [10] R. Muliawan, A. A. A. T. Sutandi, dan N. Nurrohmah, "Cooling System Performance Comparison of Refrigerant R-134a and MC-134 on Ice Slush Machine," *FLYWHEEL J. Tek. Mesin Untirta*, hlm. 1, Mei 2021, doi: 10.36055/fwl.v0i0.9237.

- [11] H. Zheng, G. Tian, Y. Zhao, C. Jin, F. Ju, dan C. Wang, "Experimental Study of R290 Replacement R134a in Cold Storage Air Conditioning System," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 36, hlm. 102203, Agu 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102203.
- [12] A. Aziz, Izzudin, dan A. K. Mainil, "Performance Comparison of a Refrigerator System Using R134a and Hydrocarbon Refrigerant (HCR134a) with Different Expansion Devices," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 237, hlm. 012008, Sep 2017, doi: 10.1088/1757-899X/237/1/012008.
- [13] R. S. Subagyo, F. Oktapiyanor, Fadliyanur, Muchsin, dan H. Y. Nanlohy, "Analisis Kinerja AC Mobil dengan Variasi Freon R-134a, HFC-134, dan MC-134," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 6, no. 2, hlm. 119–128, Des 2021, doi: 10.20527/sjmekinematika.v6i2.193.
- [14] I. D. M. Susila, D. S. Anakottapary, I. W. A. Subagia, P. W. Sunu, dan I. N. Ardita, "Penggunaan Refrigeran Hidrokarbon MC-134 Pada Mesin Freezer untuk Pedagang Es Krim Keliling," *J. Appl. Mech. Eng. Green Technol.*, vol. 3, hlm. 48–52, 2022.
- [15] S. K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, 2nd ed. New York, N.Y: McGraw-Hill Education LLC, 2001.
- [16] I. B. G. Widiantera, I. G. A. Negara, dan A. I Made Anom, Ed., "Improved Efficiency and Temperature Control in Single Evaporator Domestic Refrigerators: A Study of the Impact of Thermostatic Expansion Valves," dalam *Proceedings of the International Conference on Sustainable Green Tourism Applied Science - Engineering Applied Science 2024 (ICoSTAS-EAS 2024)*, vol. 249, dalam *Advances in Engineering Research*, vol. 249. , Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2024, hlm. 120–125. doi: 10.2991/978-94-6463-587-4_14.
- [17] S. R. Yennawar, P. P. Borkar, A. S. Harkare, dan V. A. Bhandari, "Performance Analysis And Comparison Of Vapour Compression Refrigeration System Using R-134a And R-600a Refrigerants," *Vol. E*, 2015.
- [18] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, dan P. Chandrasekar, "Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 5, hlm. 1036–1042, Mei 2009, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.08.001.