



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Karbon dioksida refrigeran alami untuk sistem refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial

Ketut Bangse¹, I Nyoman Suamir^{1*}, I Dewa Made Susila², I Ketut Suparwika³ dan I Putu Sandi Raditya³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364 Indonesia

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364 Indonesia

³Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Badung, Bali 80364 indonesia

*Email: nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstrak

Paper ini mengevaluasi sifat-sifat termo-fisik dari karbon dioksida yang memiliki potensi sebagai refrigeran alternatif ramah lingkungan dengan nama standar R744. Refrigeran R744 merupakan senyawa alami yang memiliki potensi merusak ozon (ODP) nol dan potensi pemanasan global (GWP) yang sangat rendah yaitu 1 kgCO₂/kg. Evaluasi dilakukan secara komprehensif mencakup keuntungan utama R744 dibandingkan dengan refrigeran alami lainnya dalam berbagai aplikasi khususnya pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. R744 memiliki sifat termo-fisik yang menarik seperti viskositas rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas spesifik tinggi, dan massa jenis uap tinggi. Sifat termo-fisik ini dapat memberikan keunggulan kepada R744 pada perpindahan panas yang baik di evaporator, kondensor, dan pendingin gas (gas cooler). Dengan demikian penggunaan R744 memungkinkan pemilihan komponen dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan sistem dengan refrigeran HFC. Pemanfaatan R744 pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial juga dibahas. Ditemukan pada aplikasi pompa kalor untuk pemanas air di negara-negara yang beriklim tropis, sistem transkritikal R744 dengan sangat mudah dapat mencapai temperature air panas di antara 65 °C dan 80 °C dengan COP sistem bisa mencapai 5,4.

Kata kunci: refrigeran R744, senyawa alami, refrigerasi supermarket, pompa kalor

Abstract: This paper evaluates the thermo-physical properties of carbon dioxide which has the potential as an environmentally friendly alternative refrigerant with the code R744. Refrigerant R744 is a natural compound that has zero ozone depleting potential (ODP) and very low global warming potential (GWP) of 1 kgCO₂/kg. Evaluations were comprehensively conducted which covered the main advantages of R744 compared to other natural refrigerants in various applications, especially in supermarket refrigeration and commercial building heat pumps. CO₂ as a refrigerant has attractive thermo-physical properties such as low viscosity, high thermal conductivity, high specific heat capacity, and high vapor density. These thermo-physical properties can give the R744 an advantage in good heat transfer in the evaporator, condenser, and gas cooler. Thus the use of R744 allows the selection of components with a smaller size compared to systems with HFC refrigerants. The use of R744 in supermarket refrigeration and commercial building heat pumps is also discussed. Found in heat pump applications for water heating in tropical countries, the R744 transcritical system can easily reach hot water temperatures between 65 °C and 80 °C with a system COP of up to 5.4.

Keywords: R744 refrigerant, natural compound, supermarket refrigeration, heat pump

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

CO₂ adalah senyawa alami yang telah digunakan dalam industri refrigerasi sejak tahun 1866. Setelah mencapai puncak penggunaan untuk sistem pendingin aplikasi kenyamanan pada tahun 1920-an, penggunaannya menurun hingga hampir nol ditemukan dan diperkenalkan refrigeran chlorofluorocarbon (CFC) pada tahun 1930-an [1,2]. Tetapi dengan ditemukannya bahwa refrigeran jenis

CFC memberikan dampak buruk terhadap lingkungan karena memiliki potensi merusak lapisan ozon ODP (Ozone Depleting Potential) dan potensi pemanasan global GWP (Global Warming Potential). Penurunan yang sangat drastis sistem CFC sejak tiga dekade terakhir telah menimbulkan peningkatan yang luar biasa dalam penelitian refrigerasi untuk refrigeran alternatif baru yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini meliputi penggunaan refrigeran

alami meliputi penggunaan refrigeran alami yang sudah tua termasuk CO₂ (R744) dan ammonia (R717). Sejak periode itu, CO₂ telah kembali sebagai pilihan praktis untuk berbagai aplikasi sistem refrigerasi [3].

R744 adalah refrigeran ramah lingkungan. Refrigeran ini memiliki ODP nol dan potensi pemanasan global (GWP) yang rendah. Keuntungan utama CO₂ dibandingkan dengan refrigeran alami lainnya adalah tidak beracun dan tidak mudah terbakar, yang sering membatasi penerapan refrigeran alami lainnya, seperti hidrokarbon dan amonia. R744 juga memiliki sifat termo-fisik yang menarik: viskositas rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas spesifik tinggi, dan massa jenis uap tinggi. Keunggulan sifat termo-fisik ini berpengaruh baik terhadap perpindahan panas di evaporator, kondensor, dan gas cooler yang memungkinkan penggunaan komponen yang lebih kompak dibandingkan dengan sistem refrigerasi HFC.

Berbagai penerapan refrigeran R744 terutama untuk supermarket juga dibahas dalam paper ini. Konsep-konsep penerapan refrigeran R744 meliputi unit yang berdiri sendiri (integral), kondensasi (kaskade), dan unit terpusat (*centralized system*) [4]. Untuk unit refrigerasi supermarket yang terpusat, beberapa solusi desain dapat diterapkan seperti sistem sub-kritikal dan trans-kritikal. Pengoperasian sistem kaskade sub-kritikal pada tekanan sedang dan menggunakan dua sistem yaitu sistem untuk refrigerasi dan sistem untuk pembuangan kalor (heat rejection). Sedangkan pengoperasian sistem trans-kritikal pada tekanan tinggi dan hanya memanfaatkan refrigeran R744.

Sistem refrigerasi R744 sub-kritikal dievaluasi di dalam paper [5] yang kinerjanya pada aplikasi supermarket sudah juga dilaporkan oleh sejumlah peneliti [6,7]. Aplikasi R744 bersama penggunaan refrigeran alami lainnya dalam susunan bertingkat (kaskade) juga telah diteliti [8,9]. Dilaporkan bahwa sistem kaskade bisa memberikan kinerja energi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional menggunakan R404a. Sistem refrigerasi kaskade antara R744 dengan refrigeran R717 juga dilaporkan dapat memberikan kinerja lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional [10-15]. Sedangkan aplikasi sub-kritikal R744 yang diintegrasikan dengan sistem trigeneration untuk penerapan di supermarket juga memberikan kinerja sistem yang lebih baik dari sistem konvensional, baik dari aspek konsumsi energi maupun dampaknya terhadap lingkungan [16-18].

Penerapan penggunaan refrigeran R744 lebih luas lagi dan semakin populer termasuk di negara-negara tropis adalah pada aplikasi sistem pompa kalor (heat pump). Sebuah sistem komersial R744 transkritikal secara eksperimental menunjukkan kinerja yang sangat baik untuk aplikasi pompa kalor yang difungsikan sebagai pemanas air pada rentang temperatur 65-80 °C. Kinerja sistem pompa kalor R744 untuk aplikasi ini dapat mencapai COP dari 3,8 sampai dengan 5,4 [19]. Aplikasi pompa kalor R744 menjadi sangat strategis pada gedung komersial di negara-negara yang beriklim tropis, seperti di industri hotel yang kebutuhan air panas domestiknya cukup signifikan dan bersifat kontinyu. Penerapan dan kinerja R744 pada sistem pompa kalor juga sudah banyak diteliti yang antara lain sudah dilaporkan oleh beberapa peneliti ini [20-22]. Secara umum dilaporkan bahwa sistem refrigerasi R744 transkritikal memberikan kinerja yang positif untuk aplikasi pompa kalor termasuk untuk negara yang beriklim tropis.

Paper ini menyajikan evaluasi berbagai keunggulan termo-fisik R744 dibandingkan refrigeran lain khususnya pada aplikasi refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Kelemahan utama dari R744 yang bertekanan tinggi juga dievaluasi termasuk teknik praktis untuk melindungi sistem refrigerasi R744 dari kelemahan tersebut.

2. Metode

Evaluasi R744 sebagai refrigeran alami dengan berbagai keunggulan dilakukan dengan metode kajian literatur. Sumber-sumber informasi tentang refrigeran R744 dan aplikasinya pada sistem refrigerasi supermarket dan pompa kalor untuk gedung komersial telah dievaluasi secara komprehensif. Kajian dari berbagai literatur tentang R744 dan refrigeran alami lain yang sudah dipublikasikan juga dibandingkan untuk memperoleh analisis komparasi sifat-sifat termo-fisik dengan berbagai refrigeran beserta berbagai teknologi penerapannya pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Parameter termo-fisik yang dievaluasi meliputi: kinerja energi pada aplikasi temperatur medium (MT) dan rendah (LT); rugi-rugi tekanan pada sistem baik pada pipa refrigeran gas maupun pipa refrigeran cair; termasuk rugi-rugi tekanan yang diperbolehkan pada sistem refrigerasi. Sifat-sifat termo-fisik dari refrigeran dalam penelitian ini diturunkan dari program EES (Engineering Equation Solver) versi 11.112-3D.

3. Hasil dan Pembahasan

Salah satu karakteristik yang membedakan R744 adalah sifat perubahan fasanya; titik tripel relatif tinggi pada -56,6 °C (5,2 bar_a) dan temperatur kritis 31 °C (73,8 bar_a) yang dianggap relatif rendah [23]. Karakteristik ini dapat membatasi fleksibilitas aplikasi sistem refrigerasi R744 dan juga sifat perubahan fasa dari padat, cair, dan uap seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Semua sifat dan karakteristik R744 harus dipertimbangkan secara menyeluruh dalam setiap aplikasi yang potensial.

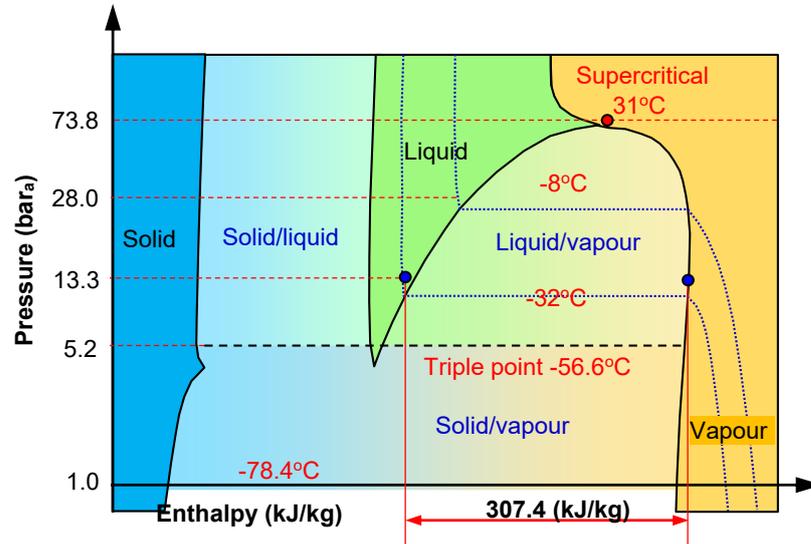
Kinerja komparatif R744 dan refrigeran terpilih untuk aplikasi refrigerasi temperatur sedang (MT) dan rendah (LT) dengan kondisi operasi yang sama ditunjukkan pada Tabel 1. Efek refrigerasi R744 lebih tinggi daripada R404a tetapi lebih rendah dari refrigeran alami lainnya. Hal ini secara langsung mempengaruhi jumlah refrigeran yang perlu disirkulasikan dalam sistem refrigerasi. Tabel juga menunjukkan bahwa R744 memiliki rasio tekanan terendah di antara refrigeran yang diamati yaitu sekitar 5% sampai 30% lebih rendah untuk sistem MT dan 15% sampai 50% untuk sistem LT. Memiliki rasio tekanan yang lebih rendah menunjukkan bahwa R744 dapat memberikan efisiensi volumetrik dan isentropik yang lebih besar. Keuntungan lain dari refrigeran R744 yang dapat dilihat dengan jelas pada tabel adalah memiliki volume spesifik gas hisap yang sangat kecil sekitar 3 sampai 30 kali lebih rendah dari refrigeran lain untuk sistem MT dan bahkan lebih rendah untuk sistem LT. Ini berarti bahwa sistem refrigerasi R744 akan membutuhkan kompresor berukuran lebih kecil dan membutuhkan diameter pipa hisap yang lebih kecil untuk kondisi operasi yang sama.

Kondisi operasi yang dipertimbangkan untuk Tabel 1 mencakup: kapasitas refrigerasi 1 kW, derajat superheat 5 K, tanpa sub-cooling, temperatur evaporasi masing-masing

-8 dan -32 °C untuk refrigerasi MT dan LT dan temperatur kondensasi 28 °C untuk kedua sistem [24].

R744 juga menunjukkan kinerja penurunan tekanan yang sangat baik dibandingkan dengan kebanyakan refrigeran lainnya. Untuk mendemonstrasikan keuntungan dari refrigeran R744 sehubungan dengan penurunan tekanan, tiga grafik berbeda telah diplot seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4. Data penurunan tekanan R744 dan refrigeran terpilih lainnya diturunkan menggunakan program EES (Engineering Equation Solver) untuk geometri, kondisi operasi, dan beban refrigerasi yang sama.



Gambar 1. Diagram P-h refrigeran R744 (Dimodifikasi dari: ASHRAE [23])

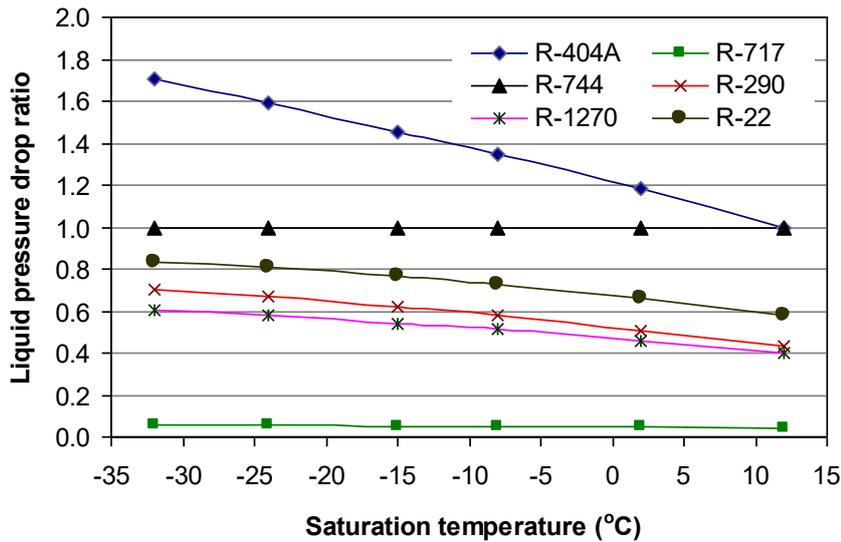
Tabel 1. Perbandingan kinerja refrigeran R744 dengan berbagai refrigeran lainnya per kW kapasitas refrigerasi untuk aplikasi refrigerasi MT dan LT

Refrigeran	P_{evap} (bar _a)	P_{cond} (bar _a)	Rasio tekanan	Efek refrigerasi (kJ/kg)	Laju massa refrigeran $\times 10^{-3}$ (kg/s)	Volume jenis gas sisi hisap $\times 10^{-3}$ (m ³ /kg)
Aplikasi sistem refrigerasi MT (Medium Temperature)						
R-22	3.8	11.3	3.0	170.1	5.9	62.6
R404A	4.7	13.6	2.9	124.2	8.1	42.8
R-290	3.7	10.3	2.9	300.5	3.3	126.1
R-1270	4.6	12.5	2.7	306.4	3.3	105.4
R-717	3.2	11.0	3.5	1134.1	0.9	396.8
R-744	28.0	68.9	2.6	153.1	6.5	13.9
Aplikasi sistem refrigerasi LT (Low Temperature)						
R-22	1.5	11.3	7.5	159.4	6.3	150.3
R404A	1.9	13.6	7.0	110.1	9.1	101.3
R-290	1.5	10.3	6.6	271.7	3.7	285.4
R-1270	2.0	12.5	6.3	281.3	3.6	234.4
R-717	1.1	11.0	10.2	1100.1	0.9	1082.2
R-744	13.3	68.9	5.2	153.3	6.5	29.9

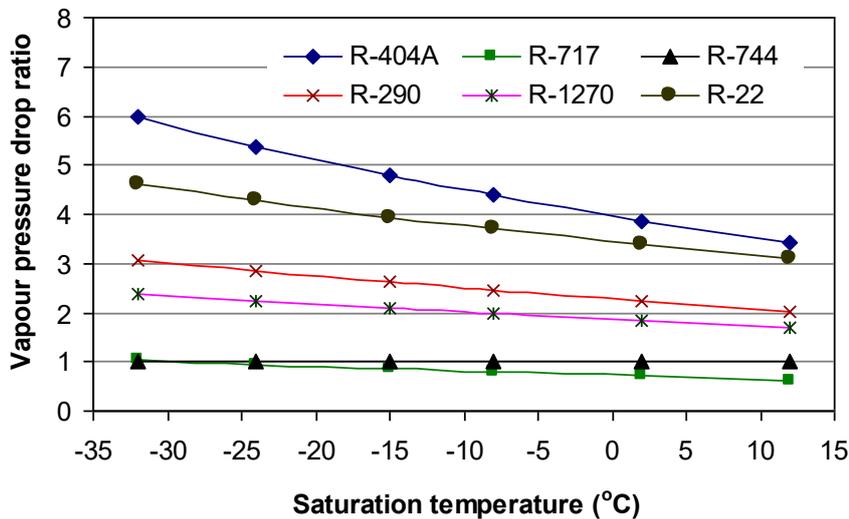
P_{evap} = tekanan evaporasi dan P_{cond} = tekanan kondensasi

Gambar 2 menunjukkan perbandingan penurunan tekanan cairan jenuh dari refrigeran lain dengan penurunan tekanan R744. Dapat dilihat bahwa penurunan tekanan cairan refrigeran R744 secara signifikan lebih kecil dari R404a khususnya pada temperatur saturasi yang lebih rendah tetapi sekitar 1,7 hingga 2,5 kali lebih tinggi dari R1270, R290 dan R22. Amonia (R717) memberikan penurunan tekanan cairan jenuh terendah untuk rentang

temperatur evaporasi yang diberikan. Akan tetapi, penurunan tekanan cairan jenuh R744 yang dapat diterima adalah 5 hingga 9 kali lebih besar daripada refrigeran lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa R744 dapat bekerja lebih baik dibandingkan dengan refrigeran lain yang dipilih kecuali amonia dalam hal penurunan tekanan cairan jenuh yang juga membuatnya cocok untuk digunakan sebagai cairan sekunder.



Gambar 2. Perbandingan rugi-rugi tekanan pipa cair untuk R744 dan berbagai refrigeran pada temperatur evaporasi yang diamati dan pada kondisi operasional yang sama



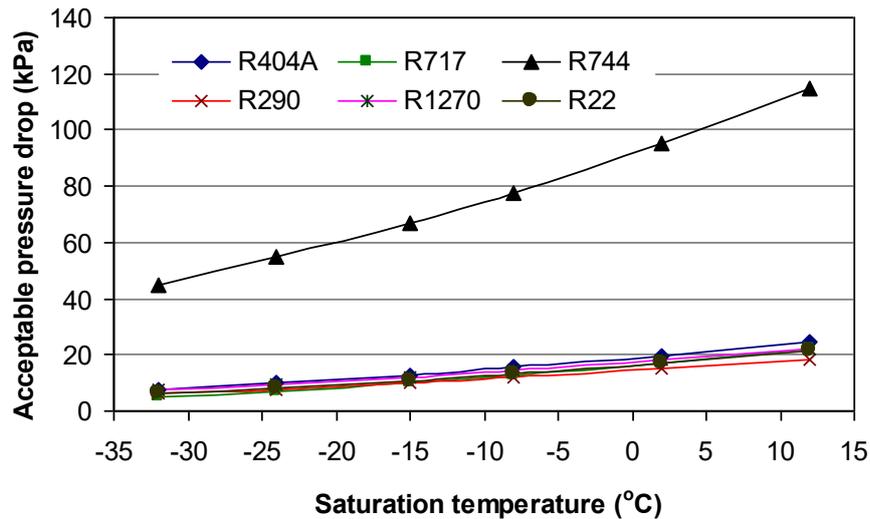
Gambar 3. Perbandingan rugi-rugi tekanan pipa gas untuk R744 dan berbagai refrigeran pada temperatur evaporasi yang diamati dan pada kondisi operasional yang sama

Rasio penurunan tekanan uap jenuh refrigeran lain terhadap refrigeran R744 disajikan pada Gambar 3. R744 memiliki penurunan tekanan uap yang jauh lebih rendah daripada refrigeran lain selain amonia. Gambar 3 juga menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur saturasi, refrigeran R744 lebih menguntungkan dibandingkan dengan refrigeran lain yang dipilih sehubungan dengan penurunan tekanan uap jenuh. [25].

Gambar 4 menjelaskan penurunan tekanan yang diperbolehkan dari pipa cairan dan gas jenuh yang setara dengan penurunan temperatur jenuh 1 K. Untuk temperatur saturasi yang sama, penurunan tekanan R744 yang diperbolehkan secara signifikan lebih tinggi daripada refrigeran terpilih lainnya. R744 dapat mentolerir penurunan tekanan sekitar 45 kPa untuk sistem LT dan 80 kPa untuk aplikasi MT. Sedangkan refrigeran lainnya dapat menerima pressure drop hanya setinggi 5 kPa dan 15 kPa untuk masing-masing aplikasi LT dan MT. Fakta bahwa penurunan tekanan yang lebih tinggi dapat ditoleransi

dengan R744 di evaporator dan saluran hisap sebelum kinerja sistem terpengaruh secara serius, temperatur penguapan yang lebih tinggi dapat dicapai dan diameter pipa yang lebih kecil dapat digunakan dibandingkan dengan refrigeran lainnya.

Komponen dan diameter pipa yang lebih kecil yang dapat digunakan dengan R744 menyebabkan pengurangan yang signifikan dalam muatan refrigeran yang dibutuhkan untuk beban refrigerasi tertentu dibandingkan dengan refrigeran HCFC dan HFC. Untuk sistem refrigerasi supermarket terpusat, muatan refrigeran R744 diperkirakan sekitar 50% dari refrigeran jenis HCFC dan HFC. Muatan refrigeran spesifik R744 dalam aplikasi supermarket berada dalam kisaran 1 hingga 2,5 kg/kW. R744 juga merupakan refrigeran yang relatif murah. Harganya sekitar 50% lebih rendah dari amonia dan sekitar 6-9 kali lebih rendah dibandingkan dengan harga refrigeran HCFC, HFC dan HC seperti dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 4. Rugi-rugi tekanan yang diizinkan pada pipa refrigeran R744 dan refrigeran lain dalam wujud gas dan cair

Tabel 2. Perbandingan harga refrigeran R744 dan refrigeran lain

Refrigeran	Harga (Rp/kg)	Rasio harga
R-22	306.000	7.3
R404A	234.000	5.7
R-290	346.500	8.3
R-1270	397.800	9.5
R-717	100.800	2.4
R-744	41.580	1.0

Sumber: Dean & Wood [26]

Seperti semua refrigeran lainnya, pilihan pelumas juga sangat penting dengan sistem refrigerasi R744. Fungsi utama pelumas adalah untuk mengurangi gesekan dan meminimalkan keausan pada kompresor. Pelumas memberi lapisan minyak di antara permukaan geser untuk mengurangi kontak langsung padatan ke padat dan menurunkan koefisien gesekan. Pelumas yang kompatibel akan dapat terus menjaga lapisan pelumasan di kompresor. Pelumas yang cocok untuk R744 termasuk minyak mineral (MO), dan poli alfa olefin (PAO). Oli poli ester (POE) yang biasa digunakan untuk refrigeran HFC juga memiliki daya larut yang baik dengan R744 [25].

Terlepas dari keuntungan tersebut, R744 juga memiliki beberapa kelemahan. Salah satu kelemahan utama R744 sebagai refrigeran adalah tekanan kerjanya yang tinggi dibandingkan dengan refrigeran alami dan sintesis. Ini berarti bahwa untuk sistem R744, komponen harus dirancang untuk menahan tekanan tinggi dan untuk mengurangi risiko keselamatan akibat tekanan tinggi terutama untuk sistem dengan biaya besar seperti sistem supermarket [27]. Karena R744 memiliki kapasitas volumetrik yang jauh lebih tinggi, masalah tekanan kerja yang lebih tinggi dapat diatasi dengan desain optimal yang melibatkan komponen yang lebih kecil dan lebih kuat. Selain itu, pengembangan material modern, teknik desain dan teknologi dalam proses manufaktur telah secara

dramatis mengurangi risiko yang terkait dengan tekanan tinggi [28]. Namun, untuk mengurangi biaya beberapa komponen di pabrik R744 seperti pada sistem tidak langsung dan sistem kaskade temperatur rendah biasanya dirancang untuk tekanan operasi maksimum (MOP) 40 hingga 46 bar. Dalam praktiknya, cara paling umum dan termudah untuk melindungi dari tekanan tinggi adalah dengan melepaskan sebagian muatan R744 dari sistem melalui katup pengaman (safety valve) ketika tekanan mencapai nilai yang ditetapkan. Jika sistem tetap diam, maka katup pelepas akan berulang kali membuka dan menutup untuk menjaga tekanan tetap rendah. Dalam kasus seperti itu, sistem dapat kehilangan banyak refrigeran dan perlu diisi lagi untuk mengkompensasi R744 yang terbuang melalui safety valve. Untuk sistem refrigerasi R744 yang dirancang untuk downtime yang lama, unit refrigerasi independen kecil dapat dipasang untuk mendinginkan cairan R744 ke tingkat di mana tekanan jenuh kurang dari tekanan desain. Teknik lain adalah dengan menggunakan receiver yang dapat menahan tekanan lebih tinggi dari tekanan jenuh R744 pada temperatur lingkungan. Jika sistem berhenti, sistem di-pump-down dan semua refrigeran R744 disimpan di receiver.

Masalah keamanan lainnya dengan refrigeran R744 adalah tingkat konsentrasi gas CO₂ di area yang ditempati jika terjadi kebocoran. R744 lebih berat daripada udara dan cenderung menggantikan udara dari area yang ditempati dekat lantai. R744 juga tidak berbau dan tidak dapat tercium. Kebocoran dari sistem R744 dapat membuat tingkat konsentrasi CO₂ terlalu tinggi yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Risiko serupa juga ada pada refrigeran CFC, HCFC, dan HFC. Dalam praktiknya, ini dianggap sebagai risiko terkendali yang dapat dicegah dengan deteksi kebocoran dan ventilasi ruang yang tepat. Detektor CO₂ yang andal diperlukan untuk memastikan ruang kerja aman bagi manusia dan untuk menjaga tingkat konsentrasi CO₂ dalam kisaran kualitas udara yang baik untuk kenyamanan manusia dan tidak boleh melebihi 1000 ppm [29].

4. Kesimpulan

Paper ini menyajikan evaluasi berbagai keunggulan termofisik R744 dibandingkan refrigeran lain khususnya pada aplikasi refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Kelemahan utama dari R744 yang bertekanan tinggi juga dielaborasi termasuk teknik praktis untuk melindungi sistem refrigerasi R744 dari kelemahan tersebut. Sifat-sifat termofisik dari R744 yang memiliki potensi sebagai refrigeran alternatif ramah lingkungan dievaluasi secara komprehensif mencakup keuntungan utama R744 dibandingkan dengan refrigeran alami lainnya dalam berbagai aplikasi khususnya pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. R744 terbukti memiliki sifat termofisik yang menarik seperti viskositas rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas spesifik tinggi, dan massa jenis uap tinggi. Sifat termofisik ini dapat memberikan keunggulan kepada R744 pada perpindahan panas yang baik di evaporator, kondensator, dan pendingin gas (gas cooler). Dengan demikian penggunaan R744 memungkinkan pemilihan komponen dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan sistem dengan refrigeran HFC.

Daftar Pustaka

- [1] M. Bellstedt, F. Elefsen, S.S. Jensen, "Application of CO₂ (R744) refrigerant in industrial cold storage plant", *Forum*, 2002, pp. 25-30.
- [2] W.S. Bodinus, "The rise and fall of carbon dioxide systems", *ASHRAE Journal*, 1999, 37-42.
- [3] A. Pearson, "Carbon dioxide - new uses for an old refrigerant", *Int. J. Refrigeration* 28, 2005, pp. 1140-1148.
- [4] IPCC, "Safeguarding the ozone layer and the global climate system. UN-Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005, 478 pgs.
- [5] J.M. Rhiemeier, J. Harnisch, C. Ters, M. Kauffeld, A. Leisewitz, "Comparative assessment of the climate relevance of supermarket refrigeration systems and equipment", *Federal Environment Agency*, 2009, 270 pgs.
- [6] A. Campbell, G.G. Maidment, J.F. Missenden, "A natural refrigeration system for supermarkets using CO₂ as a refrigerant", *Proc. CIBSE National Conference*, London, UK, 2006.
- [7] D. Hinde, S. Shitong Zha, L. Lan, "Carbon dioxide in North American supermarkets", *ASHRAE Journal* 51, 2009, pp. 18-26.
- [8] J. Fernandez-Seara, J. Sieres, and M. Va'zquez, "Compression-absorption cascade refrigeration system", *Appl. Therm. Eng.*, 26, 2006, pp. 502-512.
- [9] S. Sawalha, K.A. Soleimani, J. Rogstam, "Experimental and theoretical evaluation of NH₃/CO₂ cascade system for supermarket refrigeration in laboratory environment", *Proc. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*, Trondheim, Norway, 2006.
- [10] T.S. Lee, C.H. Liu, T.W. Chen, "Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems", *Int. J. Refrigeration*, 29, 2006, pp. 1100-1108.
- [11] H.M. Getu, and P.K. Bansal, "Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 45-54.
- [12] W. Bingming, W. Huagen, L. Jianfeng, and X. Ziwen, "Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with twin-screw compressor", *Int. J. Refrigeration*, 32, 2009, 1358-65.
- [14] J.A. Dopazo, J. Fernández-Seara, J. Sieres, and F.J. Uña, "Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures", *Appl. Therm. Eng.*, 29, 2009, 1577-83.
- [15] P.K. Bansal, and S. Jain, "Cascade systems: past, present, and future", *ASHRAE Transactions*, 113, 2007, pp. 245-252.
- [16] I.N. Suamir, "Integration of trigeneration and CO₂ based refrigeration systems for energy conservation", *PhD Thesis*, in Department of Mechanical Engineering, Brunel University, 2012, 272 pgs.
- [17] I.N. Suamir, S.A. Tassou, "Performance evaluation of integrated trigeneration and CO₂ refrigeration systems", *Appl. Therm. Eng.*, 50, 2013, pp. 1487-1495.
- [18] I.N. Suamir, S.A. Tassou, D. Marriott, "Integration of CO₂ refrigeration and trigeneration systems for energy and GHG emission savings in supermarkets", *Int. J. Refrig.*, 35, 2012, pp. 407-417.
- [19] A. Soh and S. Dubey, "Performance study of CO₂ heat pump under tropical conditions of Singapore", *Energy Procedia*, 158, 2019, pp. 1366-1371.
- [20] L. Yang, X. Qin, L. Zhao, S. Ye, X. Wei, D. Zhang, "Analysis and comparison of influence factors of hot water temperature in transcritical CO₂ heat pump water heater: An experimental study", *Energy Conversion and Management*, 198, 2019, pp. 111836.
- [21] Y. Chen, "Optimal heat rejection pressure of CO₂ heat pump water heaters based on pinch point analysis", *Int. J. Refrig.*, 106, 2019, pp. 592-603.
- [22] S. Wang, H. Tuo, F. Cao, Z. Xing, "Experimental investigation on air-source transcritical CO₂ heat pump water heater system at a fixed water inlet temperature", *Int. J. Refrig.*, 36, 2013, pp. 701-716.
- [23] ASHRAE, "ASHRAE handbook of refrigeration", *ASHRAE, Inc.*, Atlanta, 2018, 749 pgs.
- [24] EES, "Engineering equation solver V.11.112-3D", 2021, www.fChart.com.
- [25] C.A. Lommers, "Air conditioning and refrigeration industry refrigerant selection guide", 7th ed. Melbourne, AIRAH, 2003, 66 pgs.
- [26] Dean & Wood, "Refrigerant price", 2011, Available from: <http://dean-wood.com/products/refrigerant-price/>.
- [27] IIR, "5th Informatory note on refrigerants: Carbon dioxide as a refrigerant", 2000.
- [28] Proklima, 2008. Natural refrigerants. GTZ GmbH, Eschborn, Germany, 208 pgs.
- [29] ASHRAE, "ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", *ASHRAE, Inc.*, Atlanta, 2013, 58 pgs.