

POTENSI PENINGKATAN EFISIENSI EKSERGI PADA MESIN KOMPRESI UAP UNTUK REFRIGERAN HALOKARBON DAN HIDROKARBON

Potential for Improving Exergy Efficiency in Vapor Compression Machines for Halocarbon and Hydrocarbon Refrigerants

Omil Charmyn Chatib

Jurusan Teknik Pertanian dan Biosistem - Fakultas Teknologi Pertanian - Universitas Andalas

*Korespondensi, Email: omilcchatib@ae.unand.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2022.3.2.7179>

Naskah ini diterima pada 07 November 2022; revisi pada 22 November 2022;
disetujui untuk dipublikasikan pada 20 Januari 2023

ABSTRAK

Proses penggunaan energi pada dasarnya mengacu kepada hukum termodinamika pertama, tetapi hukum tersebut dianggap kurang mempertimbangkan beberapa aspek-aspek penting dari penggunaan energi. Oleh karena itu perlu dilakukan pendekatan eksergi untuk melihat seberapa efisien suatu alat dapat bekerja. Potensi untuk meningkatkan efisiensi eksergi dapat mengacu pada hukum termodinamika kedua yang menitikberatkan kepada available energy. Berdasarkan hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa dengan mengisolasi setiap komponen pada mesin kompresi uap terhadap lingkungan sekitar dapat meningkatkan efisiensi eksergi. Sedangkan jika dilihat dari besarnya peluang untuk meningkatkan efisiensi tersebut, refrigeran MC-22 menjadi fluida yang paling besar peluangnya dibandingkan dengan refrigeran hidrokarbon dan halokarbon yang lain.

Kata kunci: eksergi, kompresi uap, refrigeran

ABSTRACT

The process of using energy basically refers to the first law of thermodynamics, but this law is considered to be lacking in considering some important aspects of energy use. Therefore, an exergy approach must be taken to see how efficiently a tool can work. The potential to increase exergy efficiency can refer to the second law of thermodynamics, which emphasizes available energy. Based on the results of this study, it was found that isolating each component in a vapor compression engine from the surrounding environment could increase exergy efficiency. Meanwhile, when viewed from the significant opportunity to increase efficiency, refrigerant MC-22 has the most significant opportunities compared to other hydrocarbon and halocarbon refrigerants.

Keywords: exergy, vapor compression, refrigerant

PENDAHULUAN

Kebutuhan masyarakat untuk melakukan aktifitas sehari-hari selalu bergantung pada penggunaan energi. Biasanya energi yang mudah sekali untuk dikonsumsi dan diaplikasikan serta dikonversi menjadi energi yang berguna berupa energi dalam bentuk listrik. Energi ini merupakan energi yang paling fleksibel pemakaiannya karena dapat didistribusikan melalui kabel dan dapat digunakan secara langsung baik sebagai sumber

energi penggerak (mekanis), energi penerangan, maupun kebentuk energi lainnya. Energi listrik biasanya bisa dikatakan sebagai energi sekunder, karena pada awalnya energi tersebut berasal dari konversi dari energi solar, mekanis (potensial dan kinetik) dan energi kimia. Kedua energi tersebut timbul karena memanfaatkan kondisi lingkungan ataupun kandungan yang ada sehingga dengan bantuan komponen yang lain (contohnya generator) energi primer tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Proses penggunaan energi pada dasarnya mengacu kepada hukum termodinamika pertama, dimana energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan tetapi dapat dikonversi menjadi energi yang lain. Penggunaan hukum tersebut dianggap kurang mempertimbangkan beberapa aspek-aspek penting dari penggunaan energi. Oleh karena itu perlu dilakukan pendekatan eksergi yang berlandaskan pada hukum termodinamika kedua agar didapatkan ketepatan besarnya efisiensi yang terjadi pada beberapa komponen yang bekerja dengan cara melakukan analisis eksergi. Analisis tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis, penyebab, serta tempat terjadinya kerugian panas pada sistem, sehingga perbaikan-perbaikan dan peningkatan kualitas dapat dilakukan (Bejan et al., 1996). Salah satu usaha untuk meningkatkan efisiensi panas dari komponen yang bekerja dapat dilakukan dengan mengurangi irreversibilitas dari masing-masing komponen tersebut, sehingga analisis tersebut dipandang perlu dilakukan.

Hukum termodinamika kedua menitikberatkan kepada efisiensi eksergi yang mengacu kepada *available energy* dan *unavailable energy*. Titik berat pertama (*available energy*) dikelompokkan pada sebuah energi yang dapat ditransfer melalui kerja dan panas, sedangkan yang kedua merupakan kehilangan eksergi akibat terbentuknya sebuah entropi. Entropi merupakan suatu derajat keacakan dalam termodinamika yang kehadirannya tidak diinginkan karena dapat melemahkan nilai dari suatu efisiensi. Oleh karena itu, didalam sebuah sistem salah satu properti dari termodinamika ini perlu diukur agar diketahui seberapa besar nilai dari efisiensi atau seberapa besar energi yang tidak dapat dimanfaatkan lagi.

Analisis dengan menggunakan hukum termodinamika kedua telah dilakukan oleh Chatib (Chatib, 2008). Penelitian tersebut menjelaskan tentang perbandingan refrigeran halokarbon dengan hidrokarbon berdasarkan analisis eksergi pada mesin pendingin kompresi uap Refrigeration Test Bench Model RNP-3000E buatan Tokyo Meter Jepang. Hasil yang didapat dalam penelitian tersebut disampaikan bahwa pengaplikasian analisis eksergi memberikan gambaran bahwa setiap komponen memberikan kontribusi terhadap nilai irreversibilitas yang terjadi, dengan menjadikan kondensor sebagai komponen yang paling berdampak terhadap irreversibilitas tersebut. Tetapi penelitian tersebut mengasumsikan selain kondenser yang menggunakan air sebagai media pendingin, tidak ada proses transfer panas yang hilang ke lingkungan melalui fluida ataupun udara. Artinya, setiap komponen diasumsikan terisolasi dari suhu lingkungan. Oleh karena itu perlu ditinjau kembali seberapa besar *available energy* yang dapat dimanfaatkan secara maksimal apabila asumsi tersebut dihilangkan atau diganti. Chatib (2008) juga menyatakan bahwa peningkatan laju aliran air pada kondensor dapat meningkatkan efisiensi eksergi pada masing-masing refrigeran. Oleh karena itu, dalam pembahasan ini dipilih aliran pendingin yang paling besar, yaitu 600 liter/jam.

LANDASAN TEORI PADA MESIN PENDINGIN KOMPRESI UAP

Konsep Neraca Energi

Perubahan energi dalam suatu sistem merupakan total selisih antara energi masuk dengan energi yang keluar dari sistem (Cengel & Boles, 2020). Sehingga prinsip tersebut dapat didefinisikan dalam persamaan dibawah ini.

$$\begin{bmatrix} \text{Total} \\ \text{Energi} \\ \text{Masuk} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Total} \\ \text{Energi} \\ \text{Keluar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Perubahan} \\ \text{Energi} \\ \text{Sistem} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots [1]$$

Untuk keseimbangan energi pada sistem steady-flow, total energi mengacu pada control volume konstan ($E_{cv} = \text{konstan}$), sehingga perubahan energi pada kontrol volume tersebut sama dengan nol ($\Delta E_{cv} = 0$). Oleh karena itu energi yang masuk pada kondisi ini akan sama dengan energi keluar dari sistem tersebut, seperti yang ditampilkan pada persamaan dibawah ini.

$$E_{In} - E_{out} = \Delta E_{sistem} \rightarrow \Delta E_{sistem} = 0 \quad \dots\dots\dots [2]$$

Tabel 1. Konsep neraca energi disetiap komponen (Chatib, 2008)

Komponen	Persamaan
Kompresor	$W_{in} = Q_{out} + \dot{m}(h_2 - h_1)$
Kondenser	$\dot{m}_r h_2 + \dot{m}_{air} h_{air\ in} = \dot{m}_r h_3 + \dot{m}_{air} h_{air\ out}$
Katup Ekspansi	$\dot{m}_r(h_2 - h_3) = 0$
Evaporator	$Q_{in} + \dot{m}_r(h_4 - h_1) = 0$

Konsep Neraca Entropi

Entropi merupakan suatu derajat keacakan. Menurut Stoecker *et al.* (1982) entropi memiliki suatu sifat dimana akan bernilai tetap apabila jika suatu gas atau uap ditekan atau diekspansikan tanpa adanya gesekan dan perpindahan kalor dari sistem. Keseimbangan entropi dirumuskan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} \text{Total} \\ \text{Entropi} \\ \text{Masuk} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Total} \\ \text{Entropi} \\ \text{Keluar} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Total} \\ \text{Entropi} \\ \text{Pembentukan} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Perubahan} \\ \text{Entropi} \\ \text{Sistem} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots [3]$$

$$S_{In} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sistem} \quad \dots\dots\dots [4]$$

$$\Delta S_{sistem} = S_2 - S_1 = \int \frac{\partial Q}{T} + S_{gen} \quad \dots\dots\dots [5]$$

$$S_{gen} = S_2 - S_1 - \int \frac{\partial Q}{T} \quad \dots\dots\dots [6]$$

Dimana $\int \frac{\partial Q}{T}$ adalah jumlah integral pertambahan diferensial panas ∂Q yang masuk atau keluar dari sistem pada temperatur T selama proses panas tersebut.

Tabel 2. Konsep neraca entropi (Chatib, 2008)

Komponen	Persamaan
Kompresor	$s_{gen} = s_2 - s_1$
Kondenser	$s_{gen} = s_3 - s_2 - \left(\frac{h_3 - h_2}{T_{kd}} \right)$
Katup Ekspansi	$s_{gen} = s_4 - s_3$
Evaporator	$s_{gen} = s_1 - s_4 - \left(\frac{h_1 - h_4}{T_{ev}} \right)$

Konsep Neraca Eksergi

Peningkatan dan penurunan eksergi di dalam suatu sistem dipengaruhi oleh jumlah total eksergi yang masuk kedalam sistem dikurangi dengan total eksergi keluar dan total eksergi yang musnah (destroy) (Cengel & Boles, 2020).

$$\left[\begin{matrix} Total \\ Eksergi \\ Masuk \end{matrix} \right] - \left[\begin{matrix} Total \\ Eksergi \\ Keluar \end{matrix} \right] - \left[\begin{matrix} Total \\ Eksergi \\ Pemusnahan \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} Perubahan \\ Eksergi \\ Sistem \end{matrix} \right] \quad \dots\dots\dots [7]$$

Hubungan ini mengacu pada keseimbangan eksergi. Dimana perubahan eksergi di dalam suatu sistem selama proses berlangsung sebanding dengan perbedaan antara batasan transfer eksergi yang melewati sistem (*available exergy*) dan eksergi hancur (*unavailable exergy*) di dalam batasan sistem sebagai hasil dari proses irreversibilitas.

$$X_{in} - X_{out} - X_{destroy} = \Delta X \quad \dots\dots\dots [8]$$

Available exergy terdiri dari energi yang ditransfer melalui kerja dan perpindahan panas, sedangkan *unavailable exergy* dikategorikan sebagai irreversibilias (*destoy*). Menurut Cengel dan Boles (2020), energi yang diransfer melalui proses perpindahan panas serta irreversibilitas dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$X_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) Q \quad \dots\dots\dots [9]$$

$$I = X_{destroy} = T_0 s_{gen} \quad \dots\dots\dots [10]$$

Energi yang masuk ke dalam kompresor dihitung berdasarkan keseimbangan eksergi yang terjadi didalam komponen itu sendiri. Chatib (2008) telah membuat sebuah persamaan, tetapi proses tersebut diasumsikan bahwa tidak ada panas yang lepas ke lingkungan. Sedangkan dalam persamaan berikut, asusmsinya diganti sehingga kehilangan panas ke lingkungan dikalkulasikan.

Cengel dan Boles (2020) mengatakan, kalor yang mengalir secara konveksi, menggunakan persamaan :

$$Q = h \cdot A \cdot (T_d - T_o) \quad \dots\dots\dots [11]$$

koevisien perpindahan panas konveksi dapat ditelusuri dengan persamaan berikut (Cengel, 2002) :

$$h = \frac{Nu.k}{L} \dots\dots\dots [12]$$

Koefisien perpindahan panas konveksi bebas rata-rata untuk berbagai situasi dapat didekati dengan persamaan empiris Nusselt Number.

$$Nu = C.(Ra)^n \dots\dots\dots [13]$$

Tabel 3. Persamaan Irreversibilitas untuk Masing-Masing Komponen (Chatib, 2008)

Komponen	Persamaan
Kompresor	$I_{kp} = \dot{m}T_0 (s_2 - s_1)$
Kondenser	$I_{kd} = \dot{m}T_0 \left[(s_3 - s_2) + \left(\frac{h_2 - h_3}{T_{kd}} \right) + Cp g_2 \ln \left(\frac{T_2}{T_3} \right) \right]$
Katup Ekspansi	$I_{exp} = \dot{m}T_0 (s_4 - s_3)$
Evaporator	$I_{ev} = \dot{m}T_0 \left[(s_4 - s_3) + \left(\frac{h_1 - h_4}{T_{ev}} \right) + Cp g_2 \ln \left(\frac{T_2}{T_3} \right) \right]$
Irreversibilitas total	$W_L = I_{kp} + I_{kd} + I_{exp} + I_{ev}$

Tabel 4. Perhitungan untuk benda tegak nilai Nusselt Number (Cengel, 2002).

Posisi benda	Ra	Nu
Tegak	$10^4 - 10^9$	$Nu = 0,59.Ra^{1/4}$
	$10^9 - 10^{13}$	$Nu = 0,1Ra^{1/3}$
Silinder datar	$Ra \leq 10^{12}$	$Nu = \left[0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2$

Bilangan Rayleigh (Ra) menjadi acuan berikutnya untuk menghitung nilai perpindahan panas secara konveksi, dimana persamaan tersebut ditampilkan dalam bentuk sebagai berikut :

$$Ra = Gr.Pr \dots\dots\dots [14]$$

Selain bilangan Grashof (Gr), koefisien perpindahan panas pada konveksi bebas juga dipengaruhi oleh bilangan Prandtl (Pr).

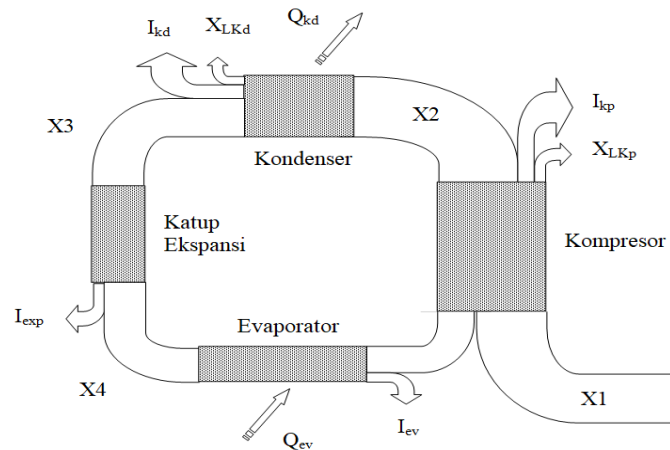
$$Pr = \frac{\mu.c_p}{k} \dots\dots\dots [15]$$

Penyelesaian umum pada persamaan perpindahan panas konveksi memunculkan suatu parameter berupa bilangan tak berdimensi yang disebut dengan bilangan Grashof (Gr).

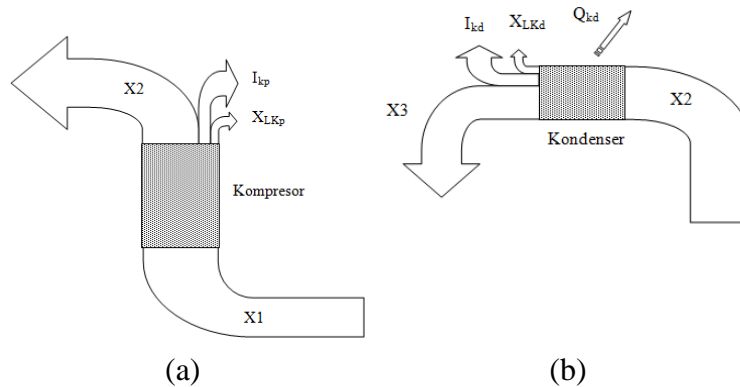
$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_d - T_o) \cdot L^3}{\nu^2} \dots\dots\dots [16]$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{\frac{T_d - T_o}{2}} = \frac{2}{T_d - T_o} \dots\dots\dots [17]$$

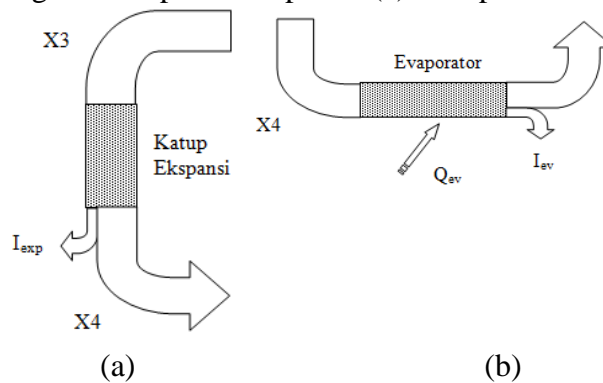
Analisis eksergi diperlukan untuk melihat ketersediaan energi yang mampu diambil atau digunakan untuk sebuah proses. Pada sistem kompresi uap dilihat ketersediaan dan penggunaan energi dapat dilihat pada masing-masing proses. Sehingga aliran proses pada sistem kompresi uap ditampilkan pada Gambar dibawah ini.



Gambar 1. Skema aliran eksergi sistem kompresi uap



Gambar 2. Eksergi Sistem pada komponen (a) Kompresor dan (b) Kondenser



Gambar 3. Eksergi Sistem pada komponen (a) Katup Ekspansi dan (b) Evaporator

$$X_L = Q \left| 1 - \frac{T_{in}}{T_{out}} \right| \dots\dots\dots [18]$$

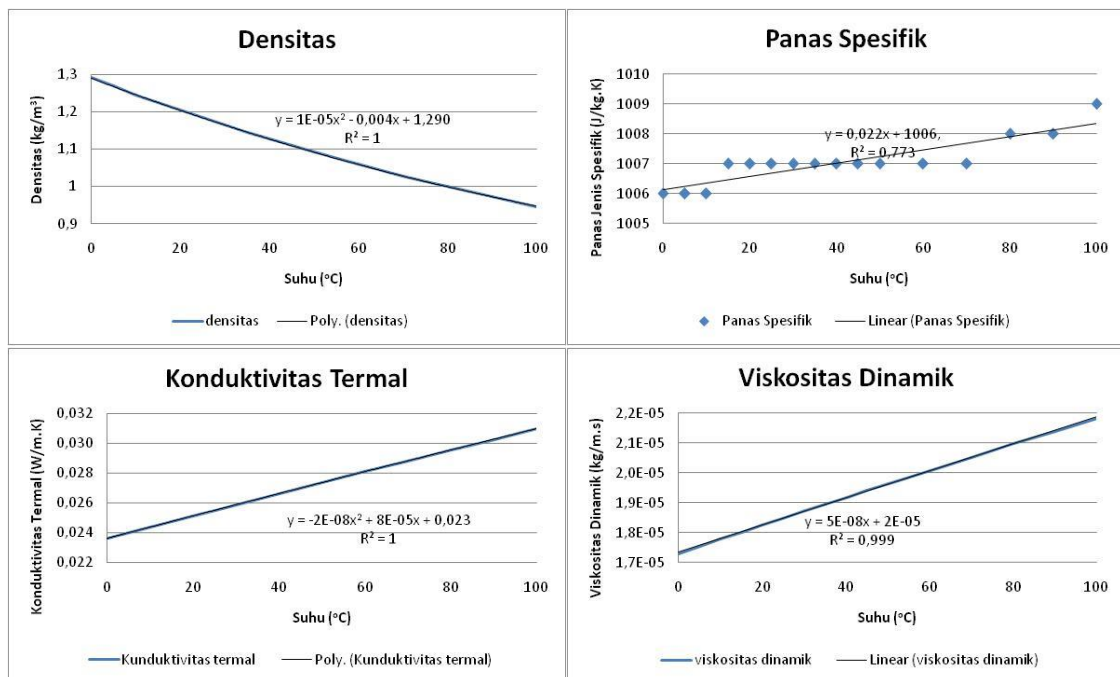
HASIL DAN PEMBAHASAN

Properti Termodinamika Udara Lingkungan

Cengel dan Boles (2020) telah menentukan sifat-sifat termodinamika untuk udara lingkungan. Sifat tersebut pada awalnya dibuat dalam persamaan linier atau polinomial yang selanjutnya dihitung dengan menggunakan *microsoft excel* sehingga dapat diketahui berapa kualitas dari desitas (ρ), panas jenis (c_p), konduktivitas termal (k), serta viskositas dinamik (μ). Ini merupakan langkah awal untuk menentukan berapa nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi yang terjadi pada beberapa komponen mesin pendingin kompresi uap. Persamaan tersebut ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 4. Sifat-Sifat Termodinamika Udara

No.	Sifat	Simbol	Satuan	Persamaan
1	Densitas	ρ	kg/m ³	$y = 1E-05x^2 - 0,004x + 1,290$
2	Panas Jenis	Cp	J/kg.K	$y = 0,022x + 1006$
3	Konduktivitas Termal	K	W/m.K	$y = -2E-08x^2 + 8E-05x + 0,023$
4	Viskositas Dinamik	μ	kg/m.s	$y = 5E-08x + 2E-05$



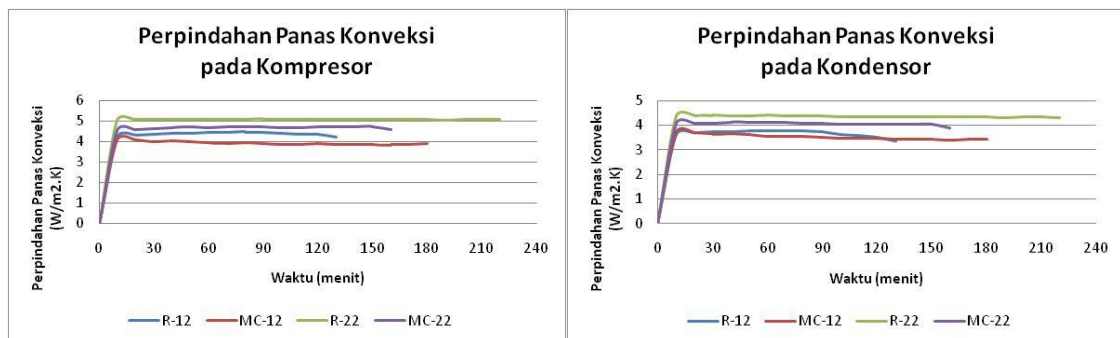
Gambar 4. Diagram sifat-sifat termodinamika untuk udara lingkungan

Gambar diagram diatas menjelaskan bentuk persamaan polinomial ordo 2 dan linier yang digunakan untuk menentukan berapa besarnya sifat-sifat termodinamika pada

udara lingkungan. Nilai y berarti nilai dari sifat termodinamika tersebut dan sedangkan nilai x adalah variabel untuk suhu lingkungan yang terukur. Parameter yang menjadikan pemilihan ordo 2 maupun linier adalah bentuk dari distribusi data pada masing-masing sifat termodinamika yang terkandung pada udara lingkungan. Menurut Nurkhamim *et al.* (2015) penggunaan persamaan matematis regresi polinomial maupun linier dapat mengurangi kesulitan dalam menginterpretasikan data akibat ketidakaturan dari distribusi data. Hal ini akan memperkecil resiko kegagalan menemukan daerah target.

Koefisien Perpindahan Panas Konveksi

Komponen yang dianalisis hanya pada kompresor serta kondensor, tetapi untuk komponen lain seperti katup ekspansi serta evaporator tidak diukur. Kedua komponen terakhir tersebut diasumsikan terisolasi dengan baik sehingga tidak ada panas yang lepas atau masuk dari atau ke lingkungan, sedangkan untuk kompresor dan kondensor diasumsikan berbeda. Berdasarkan hasil pengamatan, koefisien perpindahan panas konveksi didapatkan dari interaksi antara dinding komponen yang diamati (kompresor dan kondensor) dengan udara lingkungan. Karena secara alami terdapat perbedaan suhu antara kedua tersebut, maka koefisien perpindahan panas konveksi ini dikategorikan sebagai konveksi bebas. Pada gambar dibawah ditampilkan nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi untuk komponen Kompresor dan Kondensor. Gambar tersebut juga menjelaskan bahwa pada saat pengukuran, interaksi antara suhu lingkungan maupun dinding komponen relatif konstan. Keadaan ini terbukti karena hampir seluruh tren dari garis koefisien perpindahan panas konveksi berjalan datar. Disamping itu refrigeran R-22 menjadi refrigeran yang paling tinggi koefisien perpindahan panas konveksinya, karena suhu dinding yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan oleh refrigeran lain. Oleh karena itu semakin tinggi perbedaan suhu dinding terhadap suhu lingkungan maka akan semakin besar nilai dari koefisien perpindahan panas konveksinya.

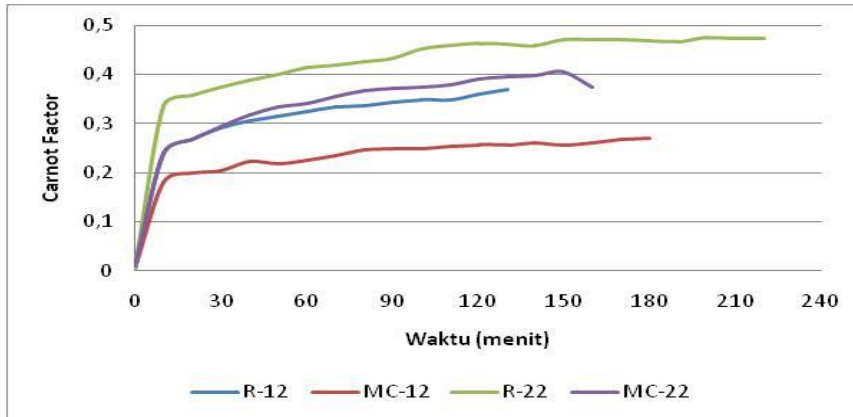


Gambar 5. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi untuk kompresor dan kondensor

Faktor Carnot

Carnot faktor dapat dijadikan acuan seberapa persen efisiensi yang dapat dihasilkan oleh suatu komponen yang berinteraksi dengan panas. Semakin besar perbedaan suhu antara suhu pada saat refrigeran masuk terhadap suhu yang keluar, maka akan semakin besar pula faktor Carnot yang didapatkan. Gambar dibawah mepresentasikan hasil jumlah dari faktor Carnot yang dihasilkan oleh kedua komponen yang diukur terhadap masing-masing refrigeran. Refrigeran R-22 menjadi fluida yang paling besar nilai faktor Carnotnya jika dibandingkan dengan refrigeran yang lain. Ini disebabkan karena

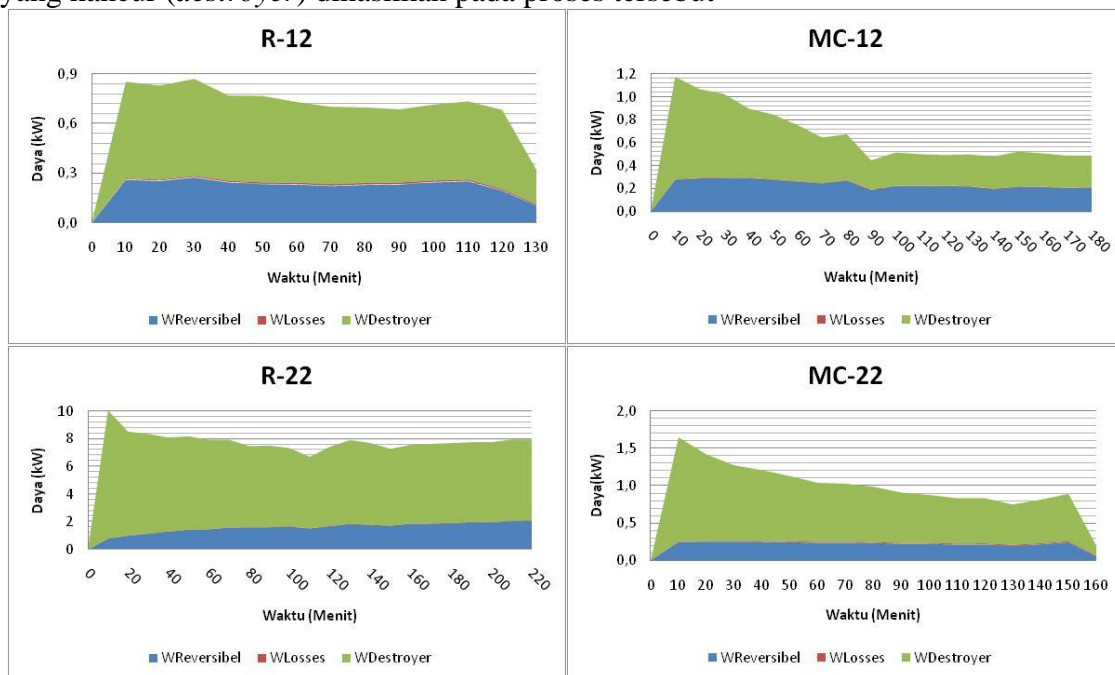
perbedaan suhu antara suhu masuk dengan suhu keluar terhadap masing-masing komponen paling besar.



Gambar 6. Nilai total faktor carnot pada beberapa refrigeran

Sebaran Analisis Eksergi

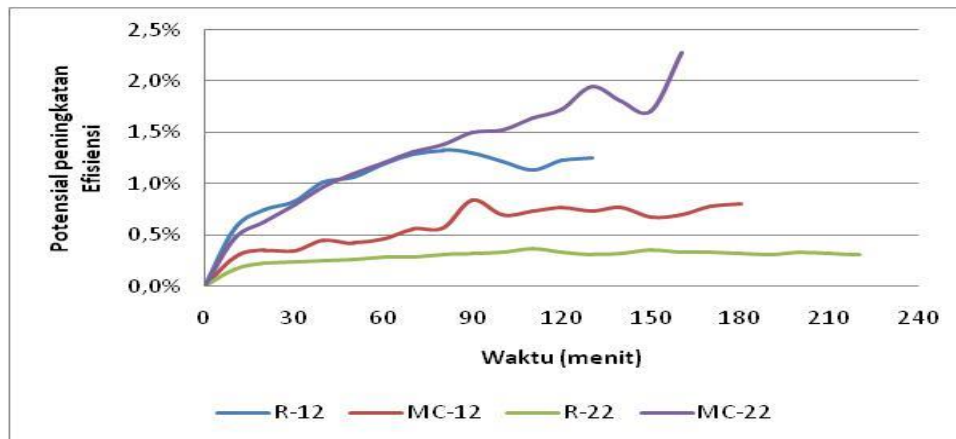
Energi yang terlepas ke lingkungan pada mesin pendingin kompresi uap ini tidaklah besar. Nilai tersebut disebabkan karena perbedaan suhu antara dinding komponen dari setiap mesin pendingin tersebut terhadap suhu lingkungan sangat kecil, bahkan tidak lebih dari 20 °C. Padahal apabila perbedaan suhu tersebut bernilai besar, maka masih ada kemungkinan untuk memingkatkan nilai dari efisiensi eksergi pada alat tersebut. Disamping itu, apabila setiap komponen dikondisikan terisolasi dengan lingkungan, maka tidak akan ada panas yang lepas ke lingkungan sehingga efisiensi dari penggunaan kalor dapat ditingkatkan. Gambar dibawah mengilustrasikan bagaimana perbandingan antara kerja refersibel, kerja hilang (*losses*), serta kerja yang hancur (*destroyer*). Hampir tidak terlihat sama sekali besarnya kerja yang hilang pada gambar tersebut. Bahkan sangat kecil sekali peluang untuk meningkatkan efisiensi eksergi karena besarnya kerja yang hancur (*destroyer*) dihasilkan pada proses tersebut



Gambar 7. Sebaran daya untuk masing-masing refrigeran

Persentase Potensial Peningkatan Efisiensi Eksergi

Berdasarkan hasil yang telah ditampilkan pada gambar sebelumnya, bahwa tidak banyak nilai efisiensi eksergi yang dapat ditingkatkan. Tetapi berdasarkan kondisi tersebut sudah selayaknya diketahui bahwa dengan mengisolasi setiap komponen pada sistem pendingin kompresi uap ini maka peluang untuk meningkatkan efisiensi eksergi yang terjadi masih ada. Berdasarkan gambar dibawah dapat dilihat bahwa refrigeran MC-22 memiliki peluang peningkatan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan refrigeran lainnya. Ini disebabkan karena perbedaan irreversibilitas yang dihasilkan oleh refirgeran tersebut tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan kerja hilang maupun kerja refersibel.



Gambar 8. Potensial peningkatan efisiensi eksergi

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa dengan mengisolasi setiap komponen pada mesin kompresi uap terhadap lingkungan sekitar dapat meningkatkan efisiensi eksergi. Sedangkan jika dilihat dari besarnya peluang untuk meningkatkan efisiensi tersebut, refrigeran MC-22 menjadi fluida yang paling besar peluangnya dibandingkan dengan refrigran yang lain.

DAFTAR SIMBOL

A	= luas permukaan	[m ²]
c _p	= panas jenis	[J/kg.K]
C, n	= konstanta pada geometri dan daerah aliran	
Gr	= Bilangan Grashof	
g	= percepatan gravitasi	[m/s ²]
h	= koefisien perpindahan panas secara konveksi	[W/m ² K]
k	= konduktifitas termal	[W/m.K]
L	= panjang benda	[m]
Nu	= Bilangan Nusselt	
Pr	= Bilangan Praditl	
Q	= Laju aliran panas ke lingkungan	[Watt]
T _d	= suhu permukaan dinding	[K]
T _o	= suhu lingkungan	[K]

ν	= viskositas kinematik fluida	$[m^2/s]$
β	= koefisien ekspansi volume	$[/K]$
μ	= viskositas dinamik	$[kg/m.s]$
ρ	= massa jenis fluida	$[kg/m^3]$
μ	= viskositas	$[kg/m.s]$

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). Thermal design and optimization. In *Energy* (Vol. 21, Issue 5). John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(96\)90000-6](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(96)90000-6)
- Cengel, Y. A. (2002). Heat transfer: a practical approach. In *Agenda for a Free Society: Essays on Hayek's The Constitution of Liberty* (Vol. 12). McGraw-Hill, Inc.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020). *Thermodynamics an Engineering-Approach 5th Edition* (Vol. 21, Issue 1).
- Chatib, O. C. (2008). *Perbandingan Performa Refrigeran Halokarbon dengan Refrigeran Hidrokarbon Berdasarkan Analisis Eksergi*. Magister. thesis, IPB University, Bogor.
- Nurkhamim, Idrus, A., Harijoko, A., & Endrayanto, I. (2015). Pengurangan Resiko Terhadap Penetapan Daerah Target Eksplorasi Mineral Dengan Menggunakan Regresi Berganda. *Proceeding, Seminar Nasional Kebumihan Ke 8, Academia-Industry Linkage, 15-16 Oktober 2015. GRHA Sabha Pramana*.
- Stocker, W. F., Jones, J. W., & S. Hara. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning Second Edition*. McGraw-Hill, Inc.