

ANALISIS KINERJA EVAPORATOR PADA VAPORS COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEM MENGGUNAKAN REFRIGERANT R410A

Sukarman^{1*}, Khoirudin¹, Murtalim¹, Ahmad Fauzi², Ricko Valderama³, Amri Abdulah³, Anwar Ilmar Ramadhan⁴

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Buana Perjuangan Karawang Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 41361

²Program Studi Teknik Informatika, Universitas Buana Perjuangan Karawang Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 41361

³Program Studi Teknik Mesin, STT Wastukencana Jl. Cikopak No.53, Purwakarta, Jawa Barat, 41151

⁴Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta 10510

*Email: sukarman@ubpkarawang.ac.id

Diterima: 17 Oktober 2021

Direvisi: 28 November 2021

Disetujui: 31 Desember 2021

ABSTRAK

VCR system merupakan salah satu mesin konversi energy yang menggunakan siklus kompresi uap mekanis dalam prosesnya. Kinerja VCR system menggunakan refrigerant yang ramah lingkungan menjadi isu utama dan banyak penelitian masih berlangsung untuk mengevaluasi dan meningkatkan efisiensi sistem yang digunakan. Oleh karena itu, makalah ini menyajikan penyelidikan eksperimental kinerja siklus refrigerasi. Sebuah VCR system digunakan sebagai alat uji. Koefisien kinerja (CoP) dipelajari dengan menggunakan desain VCR system dengan beban evaporator yang bervariasi. Variasi beban evaporator dilakukan dengan mengintervensi rpm kipas pada lima tingkat rpm. VCR system menggunakan kompresor berkapasitas 365 watt dengan menggunakan refrigerant R410. Refrigerant R410A merupakan salah satu refrigerant alternatif pengganti R22 yang tidak ramah lingkungan. Data eksperimen dilakukan validasi dengan menggunakan perangkat lunak Genetron Properties 1.1. Data analisis eksperimental menunjukkan bahwa CoP tertinggi didapatkan pada rpm terendah dengan nilai 3,17. Sedangkan CoP terendah adalah 3,02 yang didapatkan pada rpm tertinggi. Pembebanan evaporator dengan rpm kipas menghasilkan nilai CoP yang berbanding terbalik dengan nilai rpm kipas. Hasil validasi perangkat lunak Genetron 1.1 menghasilkan nilai CoP yang lebih tinggi sekitar 2%-3% jika dibandingkan dari data eksperimental.

Kata kunci: Evaporator, Genetron properties 1.1, Koefisien kinerja, Refrigerant R410A, VCR-system.

ABSTRACT

VCR system is an energy conversion device that uses a mechanical vapour compression cycle in the process. The performance of the VCR system using environmentally friendly refrigerants is a significant issue, and much research is still underway to evaluate and improve the efficiency of the systems used. Therefore, this paper presents an experimental investigation of the performance of the refrigeration cycle. A VCR system was used as a test tool. The coefficient of performance (CoP) was studied using a VCR system design with varying evaporator loads. Variation of an evaporator load is done by intervening fan rpm at five rpm levels. The VCR system uses a compressor with a capacity of 365 watts using R410A refrigerant. Refrigerant R410A is one of the alternative refrigerants to replace R22 which is not environmentally friendly. Experimental data was validated using Genetron Properties 1.1 software. Experimental analysis data showed that the highest CoP was obtained at the lowest rpm with a value of 3.17. Meanwhile, the lowest CoP is 3.02, obtained at the highest rpm. Loading the evaporator with fan rpm produces a CoP value indirectly proportional to the fan rpm value. Genetron 1.1 software validation results produce a higher CoP value of about 2%-3% than experimental data.

Keywords: Coefficient of performance, Evaporator, Genetron properties 1.1, Refrigerant R410A, VCR-system.

PENDAHULUAN

Regulasi pemerintah Republik Indonesia melalui Departemen Perindustrian dan Perdagangan nomor: 41/M-IND/PER/5/2014, 40/M-DAG/PER/7/2014 dan 55/M-DAG/PER/9/2014 telah menetapkan diberlakukannya *hydrochlorofluorocarbons Phase-Out Management Plan (HPMP)* sejak tahun 2016. Data uji *Scientific Assessment of Ozone Depletion* tahun oleh badan internasional NASA, NOAA, UNEP, EC dan WMO, didapatkan indek *Ozone Depletion Potential (ODP)* dan *Global Warming Potential (GWP)* yang dimiliki R22 adalah yang tertinggi (WMO 2019) (Sukarman, et al. 2019).

Protokol Montreal menetapkan batas untuk konsumsi HCFC, yang didefinisikan sebagai produksi ditambah impor dikurangi ekspor dan penghancuran yang ditentukan: pada tahun 1996 (pembekuan pada batas yang dihitung), 2004 (65% dari batas), 2010 (25%), 2015 (10 %), dan 2020 (0,5%) dengan penghentian konsumsi penuh pada tahun 2030 di negara-negara non-Pasal 5 (UNEP 2007). Setiap negara mengadopsi pendekatan respons yang berbeda. Sebagian besar negara-negara Eropa Barat dan Tengah mempercepat penghentian penggunaan HCFC, sementara sebagian besar negara maju lainnya mewajibkan penghentian R-22 (sebagai refrigeran yang paling tinggi pemakaiannya saat ini) pada tahun 2010, dan kemudian melarang semua penggunaan HCFC pada peralatan baru pada tahun 2020. Jadwal untuk Pasal 5 negara dimulai dengan pembekuan jumlah HCFC pada tahun 2013 (berdasarkan tingkat produksi dan konsumsi 2009-2010) dengan batas penurunan 90%, 65%; 32.5%, dan 25% masing-masing untuk tahun 2015, 2020, 2025, dan 2030 yang selanjutnya diikuti dengan penghentian pada tahun 2040 (UNEP 2007). Tabel 1 menunjukkan indek ODP dan GWP untuk R-410A dan beberapa refrigerant.

Tabel 1. Indek GWP dan ODP untuk beberapa refrigerant (Azmi et al. 2017)

Refrigerant	GWP-20 tahun	ODP
HCFC-22/R22	5130	0,055
HFC-134/R134	3420	0
HFC-236fa /FE-36	8100	0
R410A	2,088	0

Refrigerant R410A memasuki arena sebagai pengganti refrigeran biner berbasis *hydrofluorocarbons (HFCs)* untuk R22 dalam aplikasi AC dan pompa kalor untuk aspek komersial dan rumah tinggal. Aplikasi R410A pada AC dan pompa kalor, memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi daripada R22 karena densitas uapnya 50 persen lebih besar dan tekanan uapnya 60 persen lebih tinggi. Kondisi ini menyembawa sisi positif yaitu R410A memiliki peringkat efisiensi energi (EER) sekitar 5-6 persen lebih tinggi daripada R22 (ASHRAE 2013). Terkait dengan factor keamanan, refrigerant R410A memiliki klasifikasi tingkat keamanan ASHRAE A1, yang berarti memiliki kadar toksisitas rendah dan tidak mudah terbakar. Meskipun R410A adalah campuran refrigeran seri 400, ia memiliki luncuran suhu yang sangat kecil dan potensi fraksinasi yang dapat diabaikan. R410A dapat memiliki tekanan operasi sekitar 60 persen lebih tinggi daripada R22 dalam aplikasi AC dan pompa kalor. Ini berarti bahwa pada suhu kondensasi 37.8 °C (100 ° F), sistem R22 akan memiliki tekanan kondensasi 196 psig sedangkan sistem R410A akan memiliki tekanan kondensasi 317 psig. Karena itu, peralatan servis R22, seperti set pengukur, perpipaan, peralatan pemulihan, dan silinder, tidak dapat digunakan dengan R410A kecuali jika telah disertifikasi untuk digunakan dengannya. Perancang sistem R410A telah menentukan ketebalan dinding yang lebih besar untuk kompresor dan bahkan pengering filter. Sistem pengukur dan *manifold* yang digunakan pada sistem R410A memiliki rentang tekanan yang jauh lebih tinggi yaitu 800 psi di sisi tinggi dan 250 psig di sisi rendah. Kebanyakan kasus, peralatan yang dirancang untuk R22 tidak dapat menggunakan R410A karena perbedaan tekanan operasi. Ini adalah salah satu alasan kuat bahwa penggunaan sistem R22 ke R410A tidak direkomendasikan dan sangat disarankan bagi teknisi servis untuk disertifikasi dalam menangani tekanan pengoperasian yang lebih tinggi dari R410A.

Mempertimbangkan nilai GWP yang agak tinggi, *Environmental Protection Agency (EPA)* dan *Significant New Alternatives Policy (SNAP)*, telah mencantumkan R410A sebagai "tidak dapat diterima" dan telah menghapus zat pendingin dalam kategori penerapan sebagai berikut (EPA 2016):

- a. Mesin penjual otomatis baru per 1 Januari 2019;
- b. Unit baru suhu sedang mandiri dengan kapasitas kompresor di bawah 0.645 kW dan tidak mengandung *folding evaporator* per 1 Januari 2019;
- c. Unit baru suhu sedang berdiri sendiri dengan kapasitas kompresor sama dengan atau lebih besar dari 0.645 kW dan unit suhu sedang berdiri sendiri yang dengan foading evaporator per 1 Januari 2020;
- d. Unit baru bersuhu rendah yang berdiri sendiri per 1 Januari 2020, dan
- e. Aplikasi *chiller* baru per 1 Januari 2024.

Berdasarkan data pada program SNAP di atas tentang kategori refrigeran yang "tidak dapat diterima" atau dihapus dari daftar untuk R410A, tidak ada kategori yang menyebutkan untuk aplikasi pada AC, pompa kalor, atau pendingin. Hal ini bisa dimaklumi karena sejauh ini belum ada refrigerant alternatif yang tidak mudah terbakar di pasar untuk menggantikan aplikasi R410A.

Beberapa penelitian yang pernah dilakukan dengan tema sistem refrigerasi menggunakan fluida *alternative* antara lain dilakukan oleh (Aprea and Maiorino 2011)-(Sarntichartsak and Thepa 2013). Peneliti menggunakan refrigerant R422D dilakukan oleh (Aprea and Maiorino 2011). Dalam makalah ini refrigeran baru R422D diperkenalkan sebagai pengganti R22. Fluida baru ini tidak merusak lapisan ozon dan *compatible* dengan minyak mineral tetapi memiliki GWP yang tinggi. Analisis eksperimental menegaskan bahwa ketika sistem dipasang dengan R422d menyebabkan peningkatan *total equivalent warming impact* (TEWI). Penelitian lanjutan dilakukan oleh (Al-Rashed 2011) dengan menggunakan 4 fluida refrigerant yaitu R600a, R290, R134a, R410A, dan R32. Penelitian difokuskan pada COP dan efek evaporator yang dilakukan dengan perbaikan di evaporator *finned-tube*. Parameter suhu kondensor sebagai variable bebas, diatur pada 38°C dan 45°C. Nilai COP yang dimiliki isobutana (R-600a), R134a, dan propane (R290) lebih tinggi dari pada R22. Sedangkan COP yang dibawah R22 adalah refrigerant R410A dan R32 dengan prosentase sebesar 9.5%. Pengujian juga dilakukan oleh

(Yashar, Lee, and Domanski 2015) menggunakan refrigerant R410 yang diaplikasikan pada RTU (*rooftop unit*) yang memiliki daya 26,4 kW. Penelitian dilakukan menggunakan RTU prototype untuk menggantikan evaporator tipe lama. Pengujian menghasilkan peningkatan COP sebesar $2,9 \pm 1,5\%$ dan efek refrigerasi sebesar $2 \pm 1,5\%$. Penelitian menggunakan refrigerant R410A juga dilakukan oleh (Sarntichartsak and Thepa 2013). Penelitian dilakukan untuk menginvestigasi performansi sistem AC inverter R410A. Metode penelitian menggunakan dilakukan secara eksperimental dan numerik. Parameter yang digunakan adalah variasi frekuensi debit air dan suhu penyemprotan. Ditemukan bahwa model yang diusulkan memberikan persetujuan yang sesuai dengan data uji.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, artikel ini menyajikan hasil penelitian kinerja evaporator menggunakan *refrigerant* R410A dengan menggunakan system pendingin kompresi uap atau *vapour compression refrigeration system* (VCR system) dengan kapasitas kompresor 365 Watt. Penelitian ini menggunakan metode ekperimental yang divalidasi dengan menggunakan software genetron 1.1. Pengujian dilakukan dengan melakukan variasi putaran kipas menggunakan 5 tingkat kecepatan. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui *coefficient of performance* (COP) dari fluida R410A pada level kecepatan kipas yang divariasikan. Dalam penelitian ini, kinerja energi dari siklus *VCR system* telah dianalisis menggunakan refrigerant R410A untuk tingkat *subcooling* yang berbeda, suhu *evaporator*, dan efisiensi *isentropik* kompresor.

METODE PENELITIAN

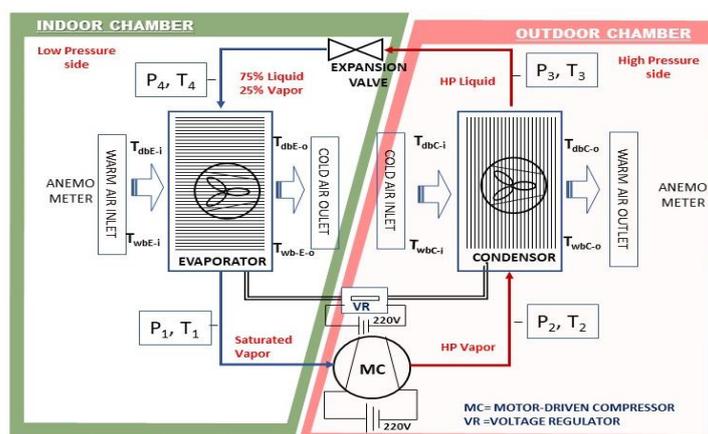
Pengaturan Eksperimen

Uji eksperimental ini dilakukan dengan memenuhi standar keamanan yang ditetapkan. Sebelum proses uji ekperimental dimulai, semua kondisi sub system peralatan yang digunakan dicek dan dipastikan memenuhi persyaratan *safety*. Pengambilan data ekperimental dilakukan menggunakan *VCR system* berkapasitas kompresor 365 W dan menggunakan *refrigerant* R-410A. Gambar 1 menunjukkan skema pengujian menggunakan alat uji *VCR system*.

Dari Gambar 1 dapat dijelaskan bahwa T_1 merupakan suhu keluar evaporator/masuk ke *compressor*, T_2 merupakan suhu keluar kompresor/ masuk ke kondensor, T_3 merupakan suhu keluar kondensor dan T_4 merupakan suhu masuk ke evaporator. Sementara P_1 merupakan tekanan keluar evaporator/masuk ke *compressor*, P_2 merupakan tekanan keluar kompresor/ masuk ke kondensor, P_3 merupakan tekanan keluar kondensor dan P_4 merupakan tekanan masuk ke evaporator. Pada titik P_1 dan P_2 dipasang *pressure gauge* dengan kapasitas 500 psi, sementara P_3 dan P_4 dihitung berdasarkan suhu refrigerant pada titik T_3 dan T_4 yang datanya tersaji pada termal properties R410A (Chemours 2019). *Pressure gauge* P_1 dan P_2 memiliki resolusi/tingkat ketelitian 5 psi, jika pada pembacaan *pressure* tidak berada tepat pada skala pembacaan pada resolusi tersebut, maka *pressure* ditentukan berdasarkan tabel properties dari refrigerant R410A. Selanjutnya data *pressure* dikonversi dari satuan psi ke kPa, dimana 1 psi ekuivalen dengan 6.89476 kPa. Untuk suhu udara masuk dan keluar evaporator dipasang 4 glass termometer yang diidentifikasi dengan T_{dbE-i} , T_{dbE-o} untuk suhu bola kering masuk dan keluar evaporator (*dry bulb temperature*), T_{wbE-i} , T_{wbE-o} untuk suhu bola basah (*wet bulb temperature-WBT*) masuk dan keluar evaporator. Pada suhu udara masuk dan keluar kondensor juga dipasang 4

glass *thermometer* yang diidentifikasi dengan T_{dbC-i} , T_{dbC-o} untuk suhu bola kering masuk dan keluar kondensor (*dry bulb temperature-DBT*), T_{wbC-i} , T_{wbC-o} untuk WBT masuk dan keluar kondensor. Suhu bola basah, suhu bola kering dan kelembaban *relative* di dalam *indoor chamber* merupakan *variable bebas* (Kim et al. 2009). Tabel 2 menunjukkan ringkasan peralatan yang digunakan untuk melakukan percobaan.

Uji *evaporator effect* pada *VCR system* dilakukan dengan memvariasikan kecepatan putaran kipas. Kecepatan putaran kipas divariasikan dalam 5 level yang nilainya berbanding lurus dengan rpm baling-baling kipas. Kondisi ini dapat diartikan bahwa semakin tinggi level putaran kipas maka semakin tinggi rpmnya. Setingan level 1 sampai dengan 5 berturut-turut adalah 400 rpm, 600 rpm, 800 rpm, 1000 dan 1200 rpm. Pengaturan kecepatan putaran kipas dilakukan dengan menggunakan *voltage regulator* yang terpasang secara simultan pada *wiring system* kipas di evaporator dan kondensor. Kecepatan udara yang masuk ke dalam evaporator dan kondensor diukur dengan menggunakan *anemometer*. Luas penampang saluran udara di evaporator dan kondensor adalah 0.16 m^2 . Laju aliran masa udara dan aliran energi melalui evaporator dan kondensor dihitung dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 (W. F 2005) (S. K. Wang 2000).



Gambar 1. Skema pengujian kinerja refrigerant pada VCR system

Tabel 2. Ringkasan ketidaktelitian instrument penelitian

Parameters	Full scale	Resolusi	Sub-sistem
Pressure gauge, psi	500	5	P_1, P_2
Thermometer digital, °C	-50-110	0.1	T_1, T_2, T_3, T_4
Glass thermometer, °C	-5 to 10	1	T_{db}, T_{wb}
Anemometer, m/s	0.0 to 30.0	0.1	v

$$\dot{m}_u = \rho_u \cdot A \cdot v \quad (1)$$

$$Q_u = \dot{m}_u \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (2)$$

Dimana \dot{m}_u merupakan laju aliran massa udara disalurkan udara evaporator atau kondensor dalam satuan kg/detik, A merupakan luas penampang saluran udara evaporator/kondensor dalam satuan m^2 , v menyatakan kecepatan udara dalam saluran udara evaporator dan kondensor dalam satuan m/detik, Q_u menyatakan kalor yang diserap oleh refrigerant dari udara akibat terjadinya perubahan suhu masuk dan keluar evaporator yang dinyatakan dalam Joule/detik atau watt, sedangkan h_{in} , h_{out} adalah entalpi udara akibat perubahan suhu di saluran masuk/keluar evaporator/kondensor yang dinyatakan dalam J/kg.

Refrigerant R410A

Pada *VCR system*, saturasi refrigeran merupakan parameter penting untuk dilakukan evaluasi. Saturasi suhu merupakan titik dimana pada kondisi suhu tersebut, suatu fluida (atau refrigerant dalam pembahasan ini) akan berubah wujudnya dari cair menjadi gas atau dari gas menjadi cair tergantung dari aliran kalornya. Saturasi suhu mengacu pada titik di mana cairan (atau zat pendingin dalam hal ini) akan berubah keadaan dari cair ke gas atau gas ke cair. Refrigeran R410A terbentuk dari tiga jenis refrigeran tunggal yaitu R-143a (52%) + R-125 (44%) + R-134a (4%). Masing-masing refrigeran pembentuk R410A memiliki titik jenuh yang berbeda. Titik didid pada tekanan 1 atm untuk ketiga refrigeran R-125, R-143a, dan R-134a berturut-turut adalah -48,45 °C, -47,6 °C, dan -26.3 °C. Ketika kalor diterapkan ke refrigeran R410A, R-125 mendidih terlebih dahulu, diikuti oleh R-143a, dan akhirnya R-134a. Jika refrigeran mengeluarkan panas, R-134a akan mencair terlebih dahulu.

Perhitungan Kinerja *VCR system*

Pemodelan analisis pada *VCR system* mengacu pada hukum pertama termodinamik di mana proses bekerja pada kondisi tunak digunakan untuk mengoptimalkan hasil analisis energi. Beberapa asumsi yang akan digunakan adalah *pressure drop* dalam pipa dan bagian-bagiannya, dan perpindahan panas antara sistem dengan lingkungan diabaikan. Perubahan energi kinetik, kimia, dan potensial

sistem diabaikan [7, 8]. Beberapa sifat penting termodinamika akan digunakan meliputi tekanan, suhu, berat jenis, volume spesifik, entalpi, entropi, dan sifat cair-uap pada suatu keadaan [9, 10]. Kompresor pada *VCR system* bekerja dengan cara menciptakan perbedaan tekanan sehingga refrigerant mengalir dari sub sistem ke sub sistem lainnya. Perbedaan tekanan pada sub sistem tekanan tinggi dan rendah menyebabkan refrigeran mengalir ke evaporator melalui regulator/katup. Tekanan refrigerant di evaporator lebih tinggi dibandingkan di saluran hisap sehingga refrigerant dingin dari evaporator dapat mengalir melalui saluran hisap menuju kompresor. Kondisi refrigeran di kondensor-evaporator selalu berada pada fasa campuran cair-uap. Kondisi ini dikarenakan karakteristik laten refrigerant sehingga refrigerant mampu menyerap dan membuang kalor sebanyak kalor jenisnya. Selama siklus di dalam *VCR system*, refrigerant bercampur dengan minyak pelumas yang bertujuan untuk meminimalisir gesekan/friction di dalam pipa instalasi. Diagram tekanan-entalpi pada siklus *VCR system* bisa dilihat pada gambar 1 (Kim et al. 2009)(K. Wang n.d.).

Selama pengujian refrigerant R410A diperoleh data suhu dan tekanan pada setiap sub sistem yang ditentukan. Kedua parameter digunakan untuk menganalisis besarnya entalpi pada setiap subsistem dengan mengacu pada thermal properties R410A (Chemours Company. 2019). Pada saat suhu dan tekanan tidak terdapat pada tabel entalpi, nilai enthalpi dihitung menggunakan ekstrapolasi atau interpolasi. Pada pengujian *refrigerant* R410A dengan menggunakan *VCR system*, energi yang diserap refrigerant dianggap sama dengan perubahan energi yang terjadi di saluran udara evaporator dan kondensor. Perubahan energi di saluran udara evaporator dan kondensor di indikasikan dengan adanya perubahan suhu di saluran masuk dan keluar pada kedua sub sistem tersebut. Besarnya laju aliran masa *refrigerant* $\dot{m}_{Rfg.}$ di dalam pipa evaporator dan kondensor dihitung dengan menggunakan persamaan 3 (W. F 2005) (Z. Wang, Zheng, and Xue 2019):

$$\dot{m}_{Rfg.} = \frac{Q_u}{(h_1 - h_4)} = \frac{Q_u}{(h_3 - h_2)} \quad (3)$$

di mana h_1 , h_2 , h_3 dan h_4 adalah nilai entalpi pada titik dari setiap sub sistem yang dijelaskan pada gambar 1 dan gambar 2, semetara itu \dot{m}_{Rfg} menjelaskan laju aliran massa refrigeran (kg/s), h_1 dan h_2 menunjukkan entalpi pada titik 1 dan 2 (kJ/kg). Penguapan refrigeran terjadi pada saat refrigeran melewati evaporator, hal ini terjadi karena refrigeran menyerap kalor dari udara di ruang dalam (*indoor chamber*) sehingga terjadi kenaikan suhu refrigeran. Perubahan energi kinetik dan potensial selama proses penguapan dan kondensasi diabaikan, maka nilai v_2^2 dan g_z pada sub sistem kompresor adalah nol. Selama siklus refrigerasi, tidak ada kerja luar pada evaporator dan kondensor, $W = 0$. Besarnya laju perpindahan energi pada proses evaporasi dapat dihitung menggunakan persamaan 4 (W. F 2005) (Wang et al. 2019).

$$Q_e = \dot{m}_{Rfg} \cdot (h_1 - h_4) \quad (4)$$

dengan Q_e menunjukan energi yang diserap refrigerant di evaporator dan menunjukan kerja proses evaporasi yang memberikan gambaran kapasitas refrigerasi yang dinyatakan dalam J/s atau Watt, \dot{m}_{Rfg} merupakan laju aliran masa refrigeran di evaporator dalam satu kg/s, dan h_1 , h_4 menunjukan nilai entalpi di titik 1 dan 4 yang dinyatakan dalam J/kg. Di dalam siklus ideal *VCR system*, kerja kompresor didapatkan dari perkalian laju aliran massa refrigeran dengan perubahan entalpi pada siklus kompresi isentropik (Setiyo et al. 2017). Kompresi isentropik pada kompresor diasumsikan terjadi secara adiabatik sehingga pertukaran energi dari dan keluar kompresor (sebagai sub sistema) dianggap tidak ada (Sukarman et al. 2019). Persamaan 5 digunakan untuk menghitung kerja kompresor W_c yang dinyatakan dalam J/s atau Watt (W. F 2005) (Wang et al. 2019):

$$W_c = \dot{m}_{Rfg} \cdot (h_2 - h_1) \quad (5)$$

Efek/kapasitas refrigerasi dihitung berdasarkan banyaknya kalor dari udara yang diserap *evaporator* dan besarnya penurunan kalor pada udara. Efek refrigerasi/ kapasitas pendinginan jika dihitung menggunakan besarnya kalor diserap oleh evaporator dan kalor yang dilepas oleh udara. Beban pendinginan dalam eksperimen adalah udara yang melewati pipa evaporator, oleh karenanya besarnya kalor yang mampu diserap oleh udara

dihitung menggunakan persamaan 6 (W. F 2005) (Wang et al. 2019).

$$Q_{uc} = \dot{m}_u \cdot C_p \cdot \Delta T_u \quad (6)$$

dengan Q_{uc} menunjukan besarnya efek refrigerasi yang dinyatakan dalam J/s atau W, C_p merupakan kalor jenis udara pada kondisi *isobaric* (tekanan konstan) yang memiliki nilainya sebesar 0,2403 (kJ/kg. K), \dot{m}_u menunjukan besarnya laju aliran massa udara dalam satuan kg/s, dan ΔT_u menunjukan adanya perubahan suhu udara melewati *evaporator* yang nilainya dihitung dengan menggunakan persamaan 1.

Pada kondisi suhu dan tekanan yang teridentifikasi, besarnya nilai massa jenis udara pada suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan 7. Perpindahan panas dari refrigeran ke lingkungan yang lebih dingin terjadi pada saat melewati kondensor dan menghasilkan kondensasi refrigeran. Persamaan 8 menyatakan laju perpindahan kalor dalam proses kondensasi ini (W. F 2005) (Wang et al. 2019).

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (7)$$

$$Q_c = \dot{m}_{Rfg} \cdot (h_2 - h_3) \quad (8)$$

dengan P menunjukan tekanan mutlak udara dalam N/m^2 , R merupakan konstanta dari fluida ideal udara sebesar 2,4061 (kJ/kg. K); Q_c merupakan laju aliran energi yang dilepas ke udara selama proses kondensasi (J/s atau W); dan h_2 , h_3 merupakan entalpi pada titik 2 dan 3 (kJ/kg). Selanjutnya adalah *proses throttling* yang terjadi di pipa kapiler yang berfungsi sebagai katup ekspansi. Pada *throttling process* tidak ada kerja dari luar sehingga $W = 0$. Perubahan energi potensial dan kinetik dianggap nol (Ramadhan, et al. 2021). Karena prosesnya terjadi secara adiabatik, maka pada proses ini tidak terjadi perubahan entalpi sehingga entalpi di titik 3 dan 4 dianggap sama. Kondisi ini dijelaskan pada persamaan 10 (Sarntichartsak and Thepa 2013):

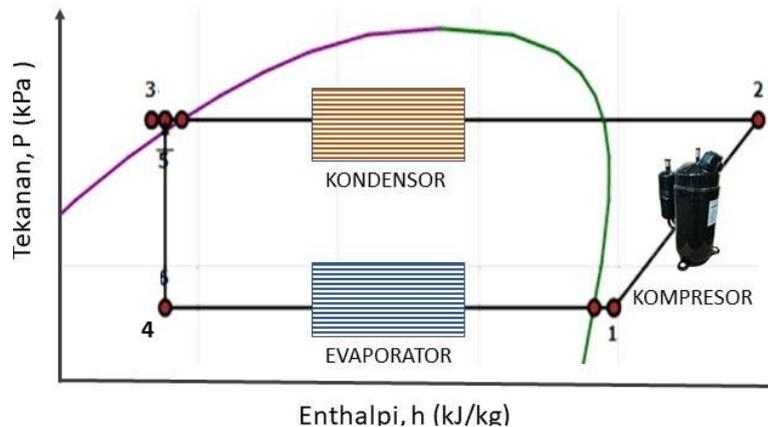
$$h_3 = h_4 \quad (10)$$

Energi mekanik kompresor diperlukan untuk mensirkulasikan refrigeran ke setiap bagian dari sub *VCR system*. Ekstraksi kalor terjadi di evaporator dan kalor dialirkan ke kondensor. Katup ekspansi mengurangi refrigeran di kondensor untuk meningkatkan kinerja

evaporator. Terjadi *trade-off* di sini antara tekanan refrigeran bertekanan rendah, diikuti oleh suhu rendah, dan laju aliran massa refrigeran yang bersirkulasi. Persamaan 11

digunakan untuk menghitung kinerja VCR system (W. F 2005) (Wang et al. 2019).

$$CoP = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{\dot{m}_{Rfg} \cdot (h_1 - h_4)}{\dot{m}_{Rfg} \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_1 - h_4)} \quad (11)$$

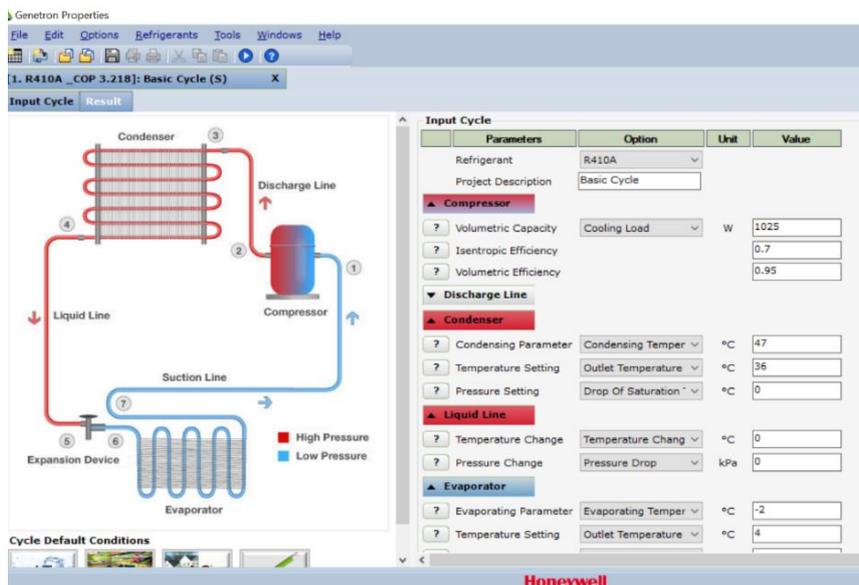


Gambar 2. Diagram tekanan-entalpi

Software refrigeration model

Software Genetron properties 1.1 digunakan untuk memvalidasi hasil eksperimen pada VCR system. Hasil validasi digunakan untuk membandingkan kinerja sistem VCR system dengan data eksperimen. Genetron Properties 1.1 merupakan perangkat lunak yang dapat secara akurat mampu memprediksi kinerja fluida selama siklus sistem pendingin. Genetron Properties merupakan program sistem refrigerasi yang diterbitkan oleh Honeywell yang dapat digunakan untuk menghitung titik-titik keadaan fluida atau campuran dan juga untuk melakukan perhitungan siklus. Aplikasi ini menyediakan antarmuka pengguna yang fleksibel yang memungkinkan Anda memasukkan data input dengan pemberitahuan kesalahan validasi. Parameter input untuk *refrigerant* dan *project*

description berturut-turut adalah R410A dan *Basic Cycle*. Data input yang digunakan dalam validasi adalah data kompresor yang meliputi *cooling load* (beban pendinginan) diseting pada 1025 Watt, *isentropic efficiency* ditetapkan sebesar 70% dan *volumetric efficiency* yang digunakan adalah 0.95 %. Data *cooling load* diambil dari spesifikasi kompresor yang digunakan. Data input lainnya adalah *temperature change* di *discharge line*; *condensing temperature* dan *outlet temperature* pada kondensator; *evaporating temperature* dan *outlet temperature* di evaporator. *Pressure drop* pada subsistem *discharge line*; *condenser*, *liquid line*, *evaporator* dan *suction line* dianggap nol. Parameter input pada *Genetron properties* 1.1 untuk tingkat kecepatan kipas pada level ke -1 tersaji pada gambar 3.



Gambar 3. Parameter yang diinput ke dalam program Genetron properties 1.1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data pengukuran suhu dan tekanan untuk sisi kompresor dilakukan pada lima tingkat pengujian. Data pengujian digunakan untuk menghitung kinerja kompresor. Tabel 3 menyajikan data suhu dan tekanan yang dihasilkan pada pengujian refrigerant R410A menggunakan *VCR system*.

Data pengukuran suhu dan tekanan untuk sisi kondensor dilakukan pada lima tingkat pengujian. Data pengujian digunakan untuk menghitung laju perpindahan kalor selama proses kondensasi dan evaporasi tersaji pada tabel 4 dan 5. Tabel 4 menyajikan data suhu dan tekanan yang dihasilkan selama proses kondensasi pada pengujian refrigerant R410A menggunakan *VCR system*. Tabel 5 menyajikan data suhu dan tekanan yang dihasilkan selama proses evaporasi pada pengujian refrigerant R410A menggunakan *VCR system*.

Analisis Energi pada pada *VCR system*

Analisis energi pada *VCR system* di fokuskan pada evaporator, kondensor dan kompresor. Mengacu pada hukum kekekalan energi maka besarnya energi yang diserap oleh refrigeran di sisi kondensor, Q_c haruslah sama dengan energi yang dilepas oleh kondensor melalui udara Q_{uc} . Selanjutnya besarnya Q_c atau Q_{uc} haruslah sama dengan besarnya kerja total dari *VCR system* W_{tot} . Namun demikian terdapat selisih antara rugi kalor di kompresor dan kalor yang dibuang di kondensor dengan kalor yang diserap di evaporator. Kerja total dari *VCR system* adalah kalor yang dibuang selama proses kondensasi, Q_c ditambah dengan kerja pompa W_c dikurangi dengan kalor yang diserap di evaporator (Dwinanto and Prajitno 2018). Besarnya energi yang masuk ke evaporator (diserap evaporator), kerja kompresor (pompa kalor) dan energi yang dilepas oleh kondensor tersaji pada gambar 4.

Tabel 3. Profil suhu dan tekanan pada sisi kompresor

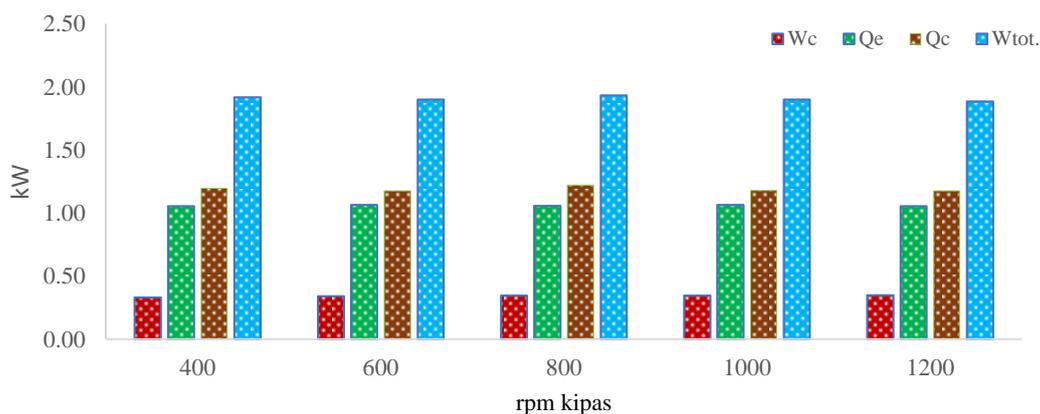
Rpm kipas	Suhu (°C)			Tekanan (kPa)		
	T ₁	T ₂	ΔT _{MC}	P ₁	P ₂	ΔP _{MC}
400	4.0	87.0	-83.0	749.3	2856.5	-2107.2
600	4.0	82.0	-78.0	737.2	2664.7	-1927.5
800	4.0	85.0	-81.0	737.2	2728.7	-1991.5
1000	3.0	85.0	-82.0	761.5	2836.6	-2075.1
1200	4.0	82.0	-78.0	737.2	2632.4	-1895.2

Tabel 4. Profil suhu dan tekanan pada proses kondensasi

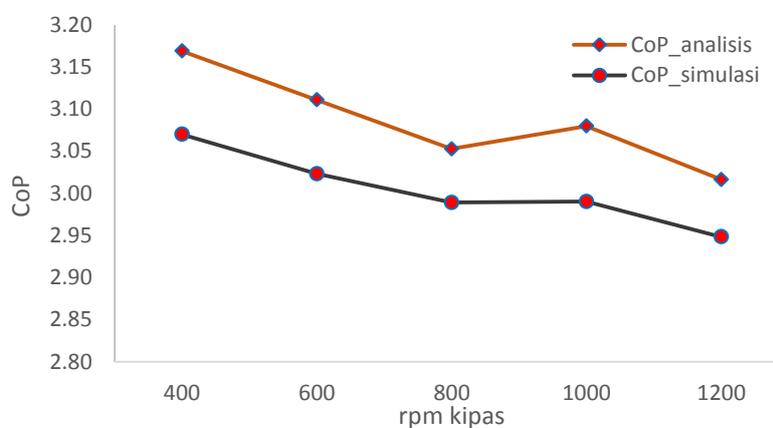
Rpm kipas	Suhu (oC)			Tekanan (kPa)		
	T ₂	T ₃	ΔT _{Cond.}	P ₂	P ₃	ΔP _C
400	67.0	36.0	31.0	2863.6	2864.7	-1.09
600	67.0	41.5	25.5	2732.2	2733.5	-1.28
800	41.0	43.0	-2.0	2731.4	2733.5	-2.07
1000	38.0	43.0	-5.0	2748.5	2733.5	-21.14
1200	41.0	43.0	-2.0	2731.4	2733.5	-2.07

Tabel 5. Profil suhu dan tekanan pada proses evaporasi

Rpm kipas	Suhu (oC)			Tekanan (kPa)		
	T ₂	T ₃	ΔT _{Cond.}	P ₂	P ₃	ΔP _E
400	-2.0	4.0	-6.00	734.6	734.6	0
600	-2.0	4.0	-6.00	734.6	734.6	0
800	-2.5	4.0	-6.50	725.6	725.6	0
1000	-1.5	3.0	-4.50	741.7	741.7	0
1200	-2.5	4.0	-6.50	725.6	725.6	0



Gambar 4. Kalor pada setiap sub sistem pada VCR system



Gambar 5. Coefficient of performance VCR system

Kinerja *VCR system* pada tiap rpm kipas dihitung dengan menggunakan persamaan 11. Kinerja *VCR system* berdasarkan hitungan teoritis dan hasil validasi menggunakan software Genetron tersaji pada gambar 5. Dari gambar 5 terlihat bahwa performa dari *VCR system* menggunakan R410A dengan indicator *coefficient of performance* berada para rentang 2,90-3,20. Hal ini relevan dengan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Taib et al. 2010) yang menghasilkan penelitian dengan CoP pada kisaran 2,75-3,50.

Data analisis performa *VCR system* tertinggi didapat pada rpm kipas 800 dengan nilai CoP 3,17 sedangkan nilai CoP terdah dicapai pada rpm 1200 dengan nilai CoP 3,02. Hasil validasi dengan menggunakan software Genetron 1.1 didapatkan nilai yang lebih rendah dibandingkan data eksperimental dengan nilai sekitar 3%. Data validasi performa *VCR system* tertinggi didapat pada rpm kipas 800 dengan nilai COP 3,07 sedangkan nilai CoP terdah dicapai pada rpm 1200 dengan nilai CoP 2,95.

KESIMPULAN

Kinerja *VCR system* menggunakan refrigerant R410A diselidiki dengan indikator COP pada rentang 2,95-3,20 dan kapasitas pendinginan berkisar antara 1.024 watt hingga 1.065 watt. Selain itu, metode pengembangan alat uji *VCR system* yang telah disajikan dalam karya ini memainkan peran penting untuk menyelidiki kinerja *VCR system*. Secara umum kinerja *VCR system* dengan indikator CoP akan semakin menurun dengan meningkatnya rpm kipas. Data yang benar dari percobaan dapat dihasilkan dari alat uji yang andal seperti yang disajikan dan metodenya harus paralel dengan keterampilan kerja yang tinggi dan perangkat pengukuran yang andal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Buana Perjuangan Karawang yang telah mendukung dan mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA:

Al-Rashed, Abdullah A.A.A. 2011. "Effect of Evaporator Temperature on Vapor Compression Refrigeration System."

Alexandria Engineering Journal 50(4): 283–90.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2010.08.003>.

Apra, Ciro, and Angelo Maiorino. 2011. "An Experimental Investigation of the Global Environmental Impact of the R22 Retrofit with R422D." *Energy* 36(2): 1161–70.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.032>.

ASHRAE. 2013. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE: Atlanta, GA, USA.

Azmi, W. H. et al. 2017. "Potential of Nanorefrigerant and Nanolubricant on Energy Saving in Refrigeration System – A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69(October 2016): 415–28.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.207>.

Chemours Company. 2019. *3 Freon™ 410A Thermodynamic Properties (SI Units)*.

Dwinanto, Matheus M, and Suhanan Prajitno. 2018. "Optimization of a Dual-Evaporator Vapor Compression Refrigerator." In , 181–87.

Environmental Protection Agency. 2016. *Federal Register*. USA: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2016-04-18/pdf/2016-08163.pdf>.

K. Wang, Shan. *Air-Conditioning and Refrigeration Mechanical Engineering Handbook*.

Kim, Minsung et al. 2009. "Performance of a Residential Heat Pump Operating in the Cooling Mode with Single Faults Imposed." *Applied Thermal Engineering* 29(4): 770–78.

Ramadhan, Anwar Ilmar, Wan Hamzah Azmi, and Rizalman Mamat. 2021. "Experimental Investigation of Thermo-Physical Properties of Tri-Hybrid Nanoparticles in Water-Ethylene Glycol Mixture." *Walailak Journal of Science and Technology* 18(8).

Sarntichartsak, Pongsakorn, and Sirichai Thepa. 2013. "Modeling and Experimental Study on the Performance

- of an Inverter Air Conditioner Using R-410A with Evaporatively Cooled Condenser.” *Applied Thermal Engineering* 51(1–2): 597–610. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.08.063>.
- Setiyo, Muji, Sudjito Soeparman, Nurkholis Hamidi, and Slamet Wahyudi. 2017. “Caractéristiques de l’effet Refroidissant d’un Système Frigorifique à Demi-Cycle Sur Un Système Au GPL.” *International Journal of Refrigeration* 82: 227–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.06.009>.
- Sukarman, Sukarman et al. 2019. “Energy Analysis Of Vapor-Compression Refrigeration (VCR) System.” *International Journal of Scientific & Technology* 8(09): 1285–89.
- Sukarman, Sukarman, Amri Abdullah, and R. Hengki Rahmanto. 2019. “Analisis Kinerja Mesin Pendingin Kompresi Uap Menggunakan HFC-236fa Sebagai Alternatif Pengganti R-22.” *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)* 4(1): 131.
- Taib, M. Y, A. A Aziz, and A. B. S Alias. 2010. “Performance Analysis Of A Domestic Refrigerator.” In *1st NCMER 2010, 26-27 May, 2010*, , 582–91. <http://umpir.ump.edu.my/1593/>.
- UNEP. 2007. *Decisions Adopted by the Nineteenth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP) Ozone Secretariat*;
- W. F, Stoecker. 2005. *Refrigersi Dan Pengkondisian Udara*. Jakarta: Erlangga.
- Wang, S. K. 2000. *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. McGraw-Hill.
- Wang, Zanxin, Fangyuan Zheng, and Shiya Xue. 2019. “The Economic Feasibility of the Valorization of Water Hyacinth for Bioethanol Production.” *Sustainability (Switzerland)* 11(3).
- World Meteorological Organization. 2019. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*. <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-05/SAP-2018-Assessment-report.pdf>.
- Yashar, D. A., S. Lee, and P. A. Domanski. 2015. “Rooftop Air-Conditioning Unit Performance Improvement Using Refrigerant Circuitry Optimization.” *Applied Thermal Engineering* 83: 81–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.012>.

