

KOMPARASI EFEKTIVITAS REFRIGERAN PADA SISTEM PENDINGINAN BERKELANJUTAN DI SEKTOR MANUFAKTUR

Irza Kurniyanto^{1*}, Haryanto Hadipramudya¹

¹Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No.38, Cepu, Blora, 58315

**E-mail: irzakaruniyanto@gmail.com*

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi global mendorong perlunya pengembangan inovasi teknologi yang berorientasi pada efisiensi dan keberlanjutan lingkungan, khususnya pada sistem pendinginan di sektor manufaktur. Selama ini, penggunaan refrigeran sintetis seperti R22 dan R134a telah menjadi pilihan utama, namun keduanya diketahui memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, terutama melalui kontribusinya terhadap penipisan lapisan ozon dan peningkatan emisi gas rumah kaca. Kondisi tersebut menuntut adanya upaya untuk mencari alternatif refrigeran yang lebih ramah lingkungan tanpa mengurangi kinerja sistem pendinginan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan komparasi efektivitas antara refrigeran sintetis dan refrigeran organik, dengan menitikberatkan pada penggunaan R290 (propana) dan R600a (isobutana) sebagai kandidat pengganti yang berpotensi mendukung implementasi sistem pendinginan berkelanjutan. Metode penelitian yang digunakan meliputi studi literatur dan analisis deskriptif-komparatif, dengan penilaian berdasarkan parameter kinerja termodinamika, efisiensi energi, serta dampak lingkungan melalui nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan *Global Warming Potential* (GWP). Hasil kajian menunjukkan bahwa komparasi efektivitas refrigeran organik R290 dan R600a memiliki nilai ODP sebesar nol dan GWP yang relatif rendah dibandingkan dengan refrigeran sintetis konvensional. Selain itu, kedua jenis refrigeran tersebut juga menunjukkan peningkatan nilai *Coefficient of Performance* (COP), yang mengindikasikan efisiensi energi yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa R290 dan R600a memiliki potensi yang signifikan untuk diterapkan pada sistem pendinginan di sektor manufaktur sebagai solusi alternatif yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Efektivitas termodinamika, R290, R600a, Refrigeran organik, Sektor manufaktur, Sistem pendinginan berkelanjutan

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan kebutuhan fundamental dalam kehidupan masyarakat modern, dan peningkatan jumlah penduduk di Indonesia berdampak langsung terhadap meningkatnya konsumsi energi nasional. Kebutuhan tersebut tersebar di berbagai sektor, seperti pertanian, pendidikan, kesehatan, transportasi, serta industri yang menjadi pengguna energi terbesar [1]. Dalam konteks sektor manufaktur, sistem pendinginan memiliki peranan yang sangat penting, baik untuk menjaga kestabilan proses produksi maupun dalam mempertahankan kualitas produk. Namun demikian, sistem pendingin juga merupakan salah satu penyumbang utama terhadap konsumsi energi total pada sektor tersebut [2].

Salah satu sistem pendinginan yang paling umum digunakan adalah sistem dengan siklus kompresi uap, di mana proses pendinginan berlangsung melalui sirkulasi refrigeran yang berfungsi sebagai media perpindahan panas. Dalam proses ini, kondensor berperan penting sebagai komponen yang mengubah fase refrigeran dari gas menjadi cair dengan melepaskan kalor ke lingkungan. Pada sistem pendinginan industri, kondensor biasanya ditempatkan di luar area produksi agar proses pelepasan panas dapat terjadi secara efisien. Jika sistem pendingin menggunakan kondensor berpendingin udara, maka pelepasan kalor terjadi langsung ke udara sekitar.

Sebaliknya, pada kondensor berpendingin air, kalor disalurkan ke air pendingin sebagai media perpindahannya.

Meskipun berperan penting, sistem refrigerasi juga berkontribusi terhadap pemanasan global, baik secara langsung melalui kebocoran refrigeran ke atmosfer, maupun secara tidak langsung akibat tingginya konsumsi energi listrik selama proses operasional. Berdasarkan data yang dilaporkan, kontribusi pemanasan global dari sistem pendingin terbagi menjadi 37% dampak langsung akibat emisi refrigeran, dan 63% dampak tidak langsung akibat penggunaan energi [3].

Berbagai jenis refrigeran sintetis yang umum digunakan, seperti R22 dan R134a, diketahui mengandung senyawa klorin yang berpotensi merusak lapisan ozon. Karena dampak lingkungannya yang signifikan, penggunaan kedua jenis refrigeran tersebut secara bertahap mulai dibatasi dan diarahkan untuk dihentikan sepenuhnya sesuai kebijakan internasional. Berdasarkan ketentuan tersebut, penghentian total penggunaan refrigeran berklorin ditargetkan pada tahun 2030 untuk negara berkembang dan tahun 2040 bagi negara maju [4]. Oleh karena itu, pengembangan sistem pendinginan berkelanjutan melalui pemanfaatan refrigeran organik menjadi langkah strategis dalam mendukung efisiensi energi sekaligus menekan dampak lingkungan.

Sejumlah penelitian telah berupaya mengkaji alternatif refrigeran ramah lingkungan. Salah satunya meneliti siklus pendinginan dasar yang dilengkapi dengan ejector menggunakan refrigeran hidrokarbon, melalui pendekatan analisis energi dan eksergi. Hasilnya menunjukkan bahwa penerapan ejector mampu meningkatkan nilai *Coefficient of Performance* (COP), dengan refrigeran R290 memberikan peningkatan tertinggi dibandingkan R600, R600a, dan R1270 pada kondisi suhu penguapan 5 °C dan suhu kondensasi 40 °C. Temuan ini menunjukkan potensi besar refrigeran hidrokarbon dalam meningkatkan efisiensi sistem pendingin.

Penelitian oleh Wongwises juga melaporkan bahwa campuran tiga jenis hidrokarbon, yaitu propana (R290), butana (R600), dan isobutana (R600a) dengan komposisi [70:25:5] serta [50:40:10], memiliki karakteristik termodinamika yang sebanding dengan R134a [5]. Selain itu, campuran dua jenis refrigeran R290/R600 dan R290/R600a dengan rasio [60:40] juga diidentifikasi sebagai kandidat potensial untuk menggantikan R134a [4]. Hasil tersebut memperkuat pandangan bahwa refrigeran hidrokarbon memiliki karakteristik termodinamika yang kompetitif serta lebih ramah lingkungan dibandingkan refrigeran sintetis.

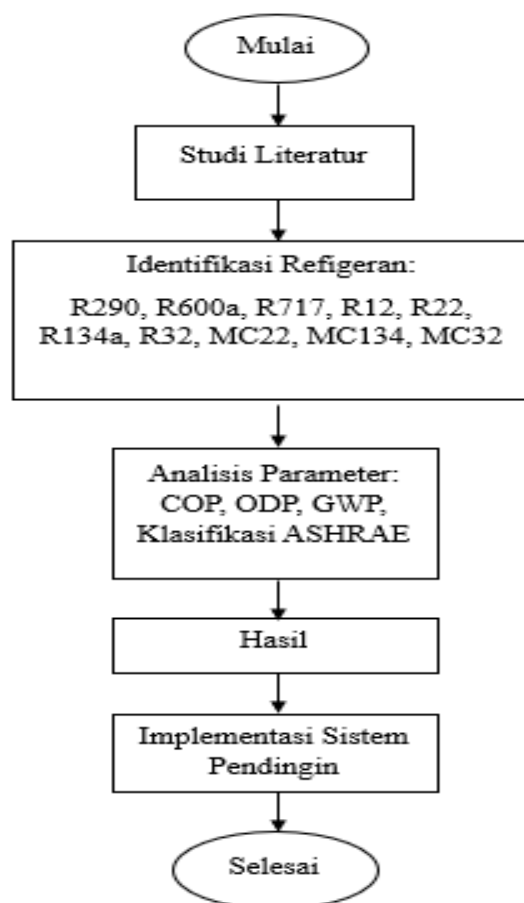
Refrigeran organik seperti R290 (propana) dan R600a (isobutana) diketahui memiliki *Ozone Depletion Potential* (ODP) sebesar nol serta *Global Warming Potential* (GWP) yang relatif rendah, sehingga dinilai sebagai alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan refrigeran sintetis yang masih banyak digunakan pada sistem pendinginan industri manufaktur [2]. Selain itu, sifat termodinamika yang unggul dan efisiensi energi yang lebih baik menjadikan refrigeran organik sebagai solusi potensial dalam mendukung penerapan sistem pendinginan berkelanjutan di masa depan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada komparasi efektivitas berbagai jenis refrigeran dalam mendukung penerapan sistem pendinginan berkelanjutan di sektor manufaktur. Fokus utama penelitian ini adalah menganalisis kinerja termodinamika dari siklus kompresi uap berbasis refrigeran organik, khususnya hidrokarbon R290 dan R600a, sebagai alternatif pengganti refrigeran sintetis. Kajian dilakukan melalui penilaian terhadap parameter efisiensi energi, nilai *Coefficient of Performance* (COP), serta dampak lingkungan berdasarkan nilai ODP dan GWP. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pendinginan industri yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dan analisis deskriptif-komparatif. Data yang didapatkan kemudian dianalisis untuk membandingkan kinerja refrigeran organik, khususnya R-290 dan R600a, dengan refrigeran sintetis lainnya seperti R22, R134a, R717, R12, R32, MC-22, MC-134, MC-32. Parameter yang dijadikan fokus perbandingan meliputi koefisien performa (COP), konsumsi energi, nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan *Global Warming Potential* (GWP), potensi praktis dalam sistem pendinginan manufaktur, perbandingan karakteristik refrigeran, dan mapping skor berdasarkan standar *ASHRAE Standard 34-Basic of Standard*.

Hasil analisis ini digunakan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan refrigeran organik sebagai alternatif ramah lingkungan dalam mendukung sistem pendinginan berkelanjutan di sektor manufaktur. Dimana metode penelitian yang dilakukan menggunakan skematik *flow-chart* pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. *Flowchart* penelitian

3. PEMBAHASAN

Pada bagian ini terdapat hasil analisis terkait kinerja sistem pendinginan berbasis refrigeran organik dibandingkan dengan refrigeran sintetis konvensional. Hasil pembahasan yang didapatkan ditinjau dari efisiensi energi, serta dampak lingkungan melalui parameter, *Coefficient of Performance* (COP), *Ozone Depletion Potential* (ODP), *Global Warming Potential* (GWP), potensi praktis, mapping skor berdasarkan standar *ASHRAE Standard 34-Basic of Standard*, dampak refrigeran terhadap lingkungan. Selain itu, ditinjau kembali terkait potensi

implementasi refrigeran ramah lingkungan di sektor manufaktur, yang relevan dengan indikasi efisiensi energi yang tinggi dan keberlanjutan.

A. *Coefficient of Performance (COP)*

Pada simulasi sistem freezer tipe Air Blast Freezer, penggunaan refrigeran organik R290 dan R600a yang dianalisis melalui perangkat lunak CoolPack terbukti mampu memberikan peningkatan kinerja termodinamika secara signifikan [6]. Hasil perbandingan menunjukkan adanya peningkatan rata-rata performa sebesar kurang lebih 14% dibandingkan dengan sistem berbasis refrigeran sintetis R404A dan R507A. Peningkatan ini tidak hanya mencerminkan keunggulan efisiensi energi yang ditunjukkan melalui peningkatan nilai *Coefficient of Performance (COP)*, tetapi juga mengindikasikan potensi penerapan refrigeran hidrokarbon sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan dalam mendukung kebutuhan pendinginan di sektor industri. Selain itu, studi penggunaan refrigeran R290 pada perguruan tinggi juga mencatat COP cukup tinggi yaitu pada beban pendinginan parsial, COP tertinggi mencapai 5,25 (pada 75% beban) dan 4,27 (pada 64% beban) [7].

B. *Ozone Depletion Potential & Global Warming Potential (ODP & GWP)*

Refrigeran R290 memiliki nilai *Ozone Depletion Potential (ODP)* = 0 dan *Global Warming Potential (GWP)* = 3, sehingga dapat dikategorikan sebagai refrigeran yang ramah lingkungan. Nilai tersebut jauh lebih rendah apabila dibandingkan dengan refrigeran sintetis konvensional, seperti R134a maupun R404A, yang masing-masing memiliki GWP mencapai ratusan hingga ribuan kali lebih besar [8]. Perbedaan signifikan ini menegaskan bahwa penggunaan R290 mampu memberikan kontribusi penting dalam mengurangi dampak pemanasan global sekaligus mendukung kebijakan internasional terkait pengurangan emisi gas rumah kaca berdasarkan nilai ODP dan GWP yang rendah. Dengan karakteristik tersebut, R290 dinilai sebagai salah satu kandidat utama untuk menggantikan refrigeran berbasis hidrofluorokarbon (HFC) di sektor pendinginan industri maupun manufaktur. Studi literatur komprehensif menyatakan bahwa hidrokarbon memiliki keunggulan termodinamika, sifat fisiko-kimia yang mendukung, biaya rendah, dan ramah lingkungan, sehingga menjadi alternatif jangka panjang yang menjanjikan untuk sistem refrigerasi dan pompa panas [9].

C. *Potensi praktis dalam sistem pendinginan manufaktur*

Refrigeran R290 menunjukkan kinerja termal yang unggul serta efisiensi energi yang tinggi, sehingga mampu meningkatkan performa sistem pendinginan secara keseluruhan. Selain itu, kebutuhan beban refrigeran yang relatif lebih kecil membuatnya lebih ekonomis dan efisien dalam pemakaian. Karakteristik tersebut menjadikan R290 sangat cocok diterapkan pada sistem pendingin dengan kapasitas sedang, seperti di sektor manufaktur, yang membutuhkan keseimbangan antara performa dan efisiensi [10]. Lebih jauh lagi, sifat ramah lingkungannya yang ditandai dengan nilai ODP nol dan GWP sangat rendah, menegaskan bahwa penggunaan R290 tidak hanya mendukung aspek teknis, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan dan keamanan lingkungan. Penggunaan R290 juga diulas sebagai “*drop-in alternative*”, mudah diterapkan pada sistem *existing* dengan penyesuaian minimal. Namun, tantangannya adalah tingkat kelayakan dan keselamatan karena sifatnya yang mudah terbakar [11].

D. *Perbandingan karakteristik refrigeran*

Dari studi literatur terbaru, refrigeran organik seperti R290 dan R600a diketahui memiliki keunggulan baik dari aspek termodinamika maupun lingkungan apabila dibandingkan dengan refrigeran sintetis konvensional, seperti R134a. Penelitian yang dilakukan oleh Kadhim menegaskan bahwa kedua jenis hidrokarbon tersebut mampu menunjukkan performa termal yang lebih tinggi sekaligus menghasilkan jejak lingkungan yang lebih rendah [11]. Meskipun pene-

rapannya sering kali membutuhkan penyesuaian atau penggantian kompresor untuk mencapai kinerja optimal, hasil penelitian tetap menunjukkan adanya efisiensi energi yang signifikan serta penurunan dampak pemanasan global melalui nilai ODP nol dan GWP yang sangat rendah [10]. Temuan ini mengindikasikan bahwa refrigeran organik tidak hanya layak digunakan sebagai alternatif, tetapi juga berpotensi menjadi solusi jangka panjang dalam mendukung pengembangan sistem pendinginan berkelanjutan di sektor manufaktur.

E. Mapping Skor Berdasarkan ASHRAE

Berdasarkan hasil studi literatur, diperoleh data karakteristik termodinamika dan dampak lingkungan dari beberapa refrigeran yang umum digunakan pada sistem pendinginan [4]. Namun ada hal yang menarik terkait pemberian skor pada tingkatan klasifikasi refrigeran, salah satunya adalah contoh metode *mapping* (penomoran bobot angka bukan dari standar, tapi hasil *engineering judgment* yang biasa dipakai di metode semi-kuantitatif risiko), seperti dibawah ini:

Toksisitas:

A → 10 (rendah)

B → 90 (tinggi)

Flammability

1 → 10 (aman)

2L → 45 (mild hazard)

2 → 65 (medium hazard)

3 → 90 (sangat mudah terbakar)

Metode semacam ini mirip dengan risk matrix (ISO 31010, IEC 60812 FMEA scoring) di mana kategori kualitatif diterjemahkan ke skor numerik. Jadi didapatkan untuk,

- Klasifikasi A1, A2L, A2, A3, B2 adalah sesuai standar ASHRAE.
- Bobot angka → bukan dari standar resmi, tapi hasil adaptasi dari metode risk supaya bisa dibandingkan dengan cara kuantitatif.

ASHRAE Standar 34, yaitu Penunjukan dan Klasifikasi Keselamatan untuk Refrigeran, dengan menetapkan cara sederhana yang merujuk pada refrigeran umum dengan menggunakan nama kimia, rumus kimia, dan juga *trade name* [12]. ASHRAE menetapkan nomor dan klasifikasi keselamatan untuk refrigeran berdasarkan data *toxicity* dan *flammability* yang diberikan pada refrigeran tersebut, seperti tampak pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Refrigeran

Refrigeran (nomor R-)	Kategori	ODP	GWP (100 years)	COP	Kelas Keamanan (ASHRAE)	Penggunaan	Nilai Umum
R-290 (Propana)	Organik — Hidrokarbon (HC)	0	3	4.0 - 4.5 (tinggi)	A3 (highly flammable)	Kulkas rumah, display/commercial cabinets, alternatif efisien rendah- GWP; berkembang secara komersial meskipun dibatasi oleh isu charge & kebakaran.	Sangat baik
R-600a (Isobutana)	Organik — HC	0	3	4.0 – 4.7 (tinggi)	A3 (highly flammable)	Umum pada kulkas rumah modern; pilihan pengganti R-134a pada sistem kecil	Sangat baik
R-717 (Amonia / NH ₃)	Organik / Natural (NH ₃)	0	0	5.0 – 6.0 (sangat tinggi)	B2/B2L (toxic, possibly flammable)	Digunakan luas pada industri besar (cold storage, pabrik pengolahan makanan). Efisiensi tinggi tetapi butuh proteksi kebocoran/toxicity.	Cocok industri
R-12 (CFC-12)	Sintesis — CFC	1.0 (refere nsi R- 11=1 skala)	10,900	3.5 – 4.0 (Sedang – tinggi)	A1 (non- flammable, low toxicity)	Dahulu luas (AC mobil, kulkas). Di fase-out oleh Protokol Montrea karena ODP tinggi.	Tidak boleh dipakai
R-22 (HCFC)	Sintesis — HCFC	0.05	1810	3.8 – 4.2 (sedang- tinggi)	A1(non- flammable, low toxicity)	Standar lama untuk AC & chiller; kini dibatasi / dihentikan (phase- out), banyak unit tua masih terpasang	Tidak direkomendasikan
R-134a (HFC)	Sintesis — HFC	0	1430	3.5 – 4.0 (sedang- tinggi)	A1 (non- flammable, low toxicity)	Luas di AC mobil, chiller, kulkas; mulai digantikan oleh HFO/HFC- HFO blend dan natural refrigerants karena GWP tinggi.	Menuju fase keuar
R-32 (difluoromethane)	Sintesis — HFC	0	675	3.7 – 4.1 (sedang – tinggi)	A2L (mildly flammable, low toxic)	Digunakan luas pada AC split modern (efisiensi lebih baik dibanding R-410A); GWP menengah.	Aman dan modern
MC-22 (Musicool MC-22 / R-290, Propana murni)	Organik / Natural (Hidrokarbon)	0	3	4.0 – 4.5 (tinggi)	A3 (highly flammable)	Digunakan sebagai pengganti R-22 (AC split, cold storage, chiller). Hemat energi hingga 20%, tidak merusak ozon	Sangat baik
MC-134 (Musicool MC- 134 / R-600a, Isobutana)	Organik / Natural (Hidrokarbon)	0	3	4.2 – 4.7 (tinggi)	A3 (highly flammable)	Banyak dipakai pada kulkas rumah tangga modern sebagai pengganti R-134a sintetik. Efisiensi tinggi dengan konsumsi listrik lebih rendah	Sangat baik
MC-32 (Breezon MC-32 / R-1270, Propena)	Organik / Natural (Hidrokarbon)	0	2	4.0 – 4.5	A3 (highly flammable)	Dikembangkan sebagai pengganti R-32 sintetik pada AC split modern. GWP jauh lebih rendah, efisiensi tinggi, hemat energi.	Terbaik dikategori Ac modern

F. Dampak terhadap lingkungan

Refrigeran sintetis, seperti R-12, R22 dan R134a, telah terbukti memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan memiliki nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) yang cukup tinggi, sehingga secara langsung berkontribusi terhadap proses penipisan lapisan ozon yang melindungi bumi dari radiasi ultraviolet berbahaya. Sementara itu, meskipun ODP = 0, penggunaannya tetap menimbulkan masalah lingkungan serius karena memiliki *Global Warming Potential* (GWP) yang sangat tinggi, sehingga mempercepat akumulasi gas rumah kaca dan berkontribusi pada pemanasan global. Sebaliknya, refrigeran organik seperti MC-22/R290 dan R600a/MC-134 memberikan keunggulan yang jauh lebih ramah lingkungan dengan nilai ODP nol dan GWP yang sangat rendah. Karakteristik ini menjadikan hidrokarbon tersebut tidak hanya lebih aman bagi lapisan ozon, tetapi juga lebih mendukung upaya global dalam mengurangi emisi karbon dan menekan laju perubahan iklim. Dengan demikian, penggunaan refrigeran organik sejalan dengan agenda transisi energi bersih serta kebijakan internasional, seperti Protokol Montreal dan Amandemen Kigali, yang menekankan penghapusan bertahap penggunaan refrigeran berbahaya.

Secara keseluruhan, hasil studi literatur dan analisis komparatif menunjukkan bahwa refrigeran organik, MC-22/R290 dan R600/MC-134, memiliki prospek yang sangat menjanjikan dalam mendukung sistem pendinginan berkelanjutan di sektor manufaktur. Dari sisi performa termodinamika, kedua refrigeran ini mampu memberikan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan refrigeran sintetis, sementara dari sisi lingkungan, nilai ODP nol dan GWP yang sangat rendah menjadikannya lebih ramah lingkungan serta sejalan dengan regulasi internasional

terkait pengurangan emisi. Meskipun demikian, penerapan di lapangan tetap membutuhkan perhatian khusus terhadap aspek keselamatan, mengingat sifat hidrokarbon yang mudah terbakar. Oleh karena itu, implementasi teknologi pendukung serta standar keselamatan yang ketat menjadi faktor penentu keberhasilan penggunaan refrigeran organik dalam skala industri.

4. SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa refrigeran organik MC-22/R290 dan R600a/MC-134 memiliki efektivitas tinggi dalam mendukung sistem pendinginan berkelanjutan di sektor manufaktur. Berdasarkan analisis komparatif, kedua refrigeran tersebut menunjukkan kinerja termodinamika yang unggul dengan nilai *Coefficient of Performance (COP)* lebih tinggi dibandingkan refrigeran sintetis konvensional seperti R22 dan R134a. Selain itu, karakteristik lingkungan yang ditunjukkan oleh nilai *Ozone Depletion Potential (ODP)* nol dan *Global Warming Potential (GWP)* yang sangat rendah menjadikan keduanya sebagai kandidat refrigeran ramah lingkungan yang potensial. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa penerapan refrigeran organik tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan mendukung transisi menuju sistem pendinginan industri yang hijau dan berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Di, E., Literatur Review, I. :, Ridlo, R., Hakim, A., Tengah, P. J., Sekretaris, T. W., Riset, J., Dem, K., Sekretariat, I., Bina, K., Jl, W. H., Soebrantas, K. 12, & Riau, P. “*Tinjauan Potensi Energi Terbarukan Untuk Ketahanan*”. ANDASIH Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Model Energi Indonesia, 2020.
- [2] Pranolo, S. H., Muzayanha, S. U., Yudha, C. S., Hasanah, L. M., & Shohih, E. N. (n.d.). “*Kajian Konsumsi Energi Spesifik Sektor Industri Kimia Di Indonesia Sebagai Acuan Efisiensi Energi*”. Seminar Nasional Teknik Kimia Ecosmart. 2018.
- [3] Hindratmo, D. B., Condro Purnomo, B., Satrio Wicaksono, A., & Habibi, I. “*Komparasi Kinerja AC Kendaraan dengan Menggunakan Refrigeran R-134a, dan R-290*”. *Borobudur Engineering Review*, 3(1), 1–11. 2023. <https://doi.org/10.31603/benr.8898>
- [4] NUGROHO, TRI AGUNG. “*ANALISIS THERMAL BEHAVIOR PADA KONDENSOR KULKAS YANG MENGGUNAKAN VARIASI REFRIGERAN CAMPURAN R-290/R-600a BASIS R-134a*”. Skripsi thesis, Universitas Pancasakti Tegal. 2021.
- [5] Sripattrapan, Wisis & Wongwises, Somchai. (2005). “*Two-phase flow of refrigerants during evaporation under constant heat flux in a horizontal tube*”. *International Communications in Heat and Mass Transfer - INT COMMUN HEAT MASS TRANS.* 32. 386-402. 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.05.013. 2005.
- [6] Selan, R. N., & Dwinanto, M. M. “*Studi Kinerja dan Konsumsi Energi Air Blast Freezer Menggunakan Refrigeran Hidrofluorokarbon dan Hidrokarbon*”. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 6(1), 26–34. 2021. <https://doi.org/10.21831/dinamika.v6i1.36728>
- [7] Fuadi, Z., “*Chiller performance study with refrigerant R290*”, in *The 10th International Meeting of Advances in Thermofluids (IMAT 2018): Smart City: Advances in Thermofluid Technology in Tropical Urban Development*, 2019, vol. 2062, no. 1, Art. no. 020061. doi:10.1063/1.5086608.
- [8] Irvan Tauvana, A., Rachmanu, F., Nulhakim, L., & dan Mokhammad Is Subekti, S. “*Analisis Kinerja R290 sebagai Pengganti R32 pada Unit AC-Split Kapasitas 9,000 Btuh/hr*”. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi* . 4, 221–230. 2022.
- [9] Ghanbarpour, M., Mota-babloni, A., Badran, B. E., & Khodabandeh, R. “*Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of hydrocarbons as low GWP alternatives to R134a in vapor compression refrigeration configurations*”. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13). 2021. <https://doi.org/10.3390/app11136226>

- [10] Yadav, S., Liu, J., & Kim, S. C. “*A comprehensive study on 21st-century refrigerants - R290 and R1234yf: A review*”. International Journal of Heat and Mass Transfer, 182, 121947. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121947>. 2022.
- [11] Ibrahim, O. A. A.-M., Kadhim, S. A., Hammoodi, K. A., Rashid, F. L., & Askar, A. H. “*Review of hydrocarbon refrigerants as drop-in alternatives to high-GWP refrigerants in VCR systems: The case of R290*”. Cleaner Engineering and Technology, 23, 100825. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100825>
- [12] ASHRAE, “Update on New Refrigerants Designations and Safety Classifications,” Fact Sheet. Nov. 2022. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/factsheet_ashrae_english_november2022.pdf. Diakses: 8 Oktober. 2025