

Contents list available at [Sinta](https://sinta)

ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>

Analisis *Energy Efficiency Ratio* (EER) pada AC *Split* yang Diretrofit dari Refrigeran R32 ke R290 dengan Massa Pengisian 40 Persen

Rizka Noor Miftakhul Ulum^{1*}, Gunawan Budi Santoso², Ngatmin³, Susanto⁴, Anang Budhi Nugroho⁵, M. Edi Pujianto⁶

^{1,3,4,5}Prodi D-IV Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Jurusan Teknik, Politeknik Maritim Negeri Indonesia, Jl. PTP Ngobo, Wringinputih, Bergas, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

²Prodi D-IV Teknologi Rekayasa Mekatronika, Jurusan Teknik, Politeknik Maritim Negeri Indonesia, Jl. PTP Ngobo, Wringinputih, Bergas, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

⁶Prodi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Muhammadiyah Semarang, Jl. Kedungmundu Raya No. 18, Kedungmundu, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

ARTICLE INFO

Keywords:
AC split
EER
R290
refrigeration system
retrofit

ABSTRACT

The extensive use of split-air conditioning in tropical countries raises environmental concerns due to the high global warming potential of R32 refrigerant. R290 offers a promising alternative with a very low GWP (<4) and near-zero ozone depletion potential, though its flammability and performance at reduced charge densities require further investigation. This study assesses the Energy Efficiency Ratio (EER) of a 1 PK split AC retrofitted from R32 to R290 at 40% charge weight. Experiments were conducted under five operating conditions at room temperatures of 23–27°C and ambient temperatures of 30–35°C. System parameters including pressures, temperatures, compressor power consumption, and refrigerant flow rate were measured, with REFPROP software used for thermodynamic analysis and EER calculation. Results show that R32 achieves a higher EER (24.59–26.35 Btu/kWh) than R290 (15.33–17.21 Btu/kWh), a reduction of 30–45%. Although R290 showed lower power consumption (0.446–0.476 kW vs. 0.76–0.82 kW), the reduced mass flow rate lowered cooling capacity. The study concludes that a 40% R290 retrofit reduces energy consumption but compromises energy efficiency, necessitating further research on optimised charge weight and system components.

*Corresponding author: rizkanoormu27@polimarin.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i1.10830>

Received 18 December 2025; Received in revised form 25 February 2026; Accepted 2 March 2026

Available online March 2026

Pendahuluan

Sistem pendingin ruangan AC *split* telah menjadi kebutuhan penting di negara tropis seperti Indonesia [1]. Mayoritas sistem AC komersial masih menggunakan refrigeran sintetik R32 yang memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) tinggi, berkontribusi terhadap pemanasan global dan deplesi ozon [2]. Peralihan ke refrigeran yang ramah lingkungan menjadi kebutuhan mendesak untuk mengurangi dampak perubahan iklim, sembari mempertahankan atau bahkan meningkatkan parameter kinerja energi seperti *Energy Efficiency Ratio* (EER) guna memastikan efisiensi operasional sistem pendingin [3].

Refrigeran hidrokarbon R290 (propana) menjadi alternatif menjanjikan dengan GWP sangat rendah (di bawah 4) dan ODP mendekati nol [4][5]. Hasil penelitian menunjukkan R290 memiliki performa termal yang baik dan tingkat , namun tantangan utama dalam penerapan R290 tidak hanya pada tingkat *flammability* yang dapat dikendalikan melalui sistem keselamatan yang tepat yang dapat dikendalikan melalui sistem keselamatan yang tepat, tetapi juga pada kesesuaian karakteristik termodinamika R290 terhadap komponen sistem yang awalnya dirancang untuk refrigeran dengan tekanan dan densitas berbeda seperti R32 atau R22 [6]. Penggunaan R290 bukan hanya menghadapi tantangan karena sifatnya yang mudah terbakar, tetapi juga terkait dengan kecocokannya pada sistem yang awalnya dirancang untuk refrigeran sintesis seperti R32, yang berdampak pada kinerja kompresor dan efisiensi keseluruhan sistem [7]. Penggunaan R290 dengan variasi massa 33-42% mampu menurunkan konsumsi daya kompresor secara signifikan, dengan nilai konsumsi daya sebesar 1,9293 kJ/s dan 0,3183 kJ/s pada beberapa konfigurasi dibandingkan R410A [8].

Pada penerapan R290 sebesar 50% dari massa R22, kapasitas pendinginan hanya turun 2,8% namun EER meningkat hingga 12,6% [9]. Evaluasi performa R290 pada sistem AC *split* berkapasitas 5,1 kW

menunjukkan nilai EER tertinggi sebesar 3,7 dengan muatan refrigeran 360 gram dan kapasitas pendinginan sebesar 4,90 kW [10]. Dengan kapasitas pendinginan tetap terjaga, penggunaan campuran refrigeran 70% R32 dan 30% R290 tanpa modifikasi sistem dapat meningkatkan *Coefficient of Performance* (COP) hingga 14% dan mengurangi konsumsi daya sebesar 47% [11].

Pengujian pada AC *split* berkapasitas 9.000 Btu/hr menunjukkan bahwa R290 memberikan efek refrigerasi sebesar 344,8 kJ/kg, COP sebesar 28,3, dan konsumsi arus yang lebih rendah dibandingkan R32 [12]. Optimalisasi sistem AC menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) menunjukkan bahwa R290 mampu mengurangi konsumsi daya hingga 42% dan beban kerja kompresor sebesar 67% dibandingkan dengan R22 [13]. Selain itu, refrigeran hidrokarbon varian MC22 menunjukkan efek refrigerasi lebih tinggi dan konsumsi daya 40% lebih rendah dibandingkan R32, dengan performa optimal dicapai pada massa refrigeran sebesar 90% [14].

Meskipun berbagai penelitian menunjukkan potensi R290, penelitian spesifik dengan massa 40% dari R32 masih terbatas. Sesuai standar keselamatan internasional, massa yang lebih rendah dapat mengurangi risiko kebakaran sambil mempertahankan kapasitas pendinginan yang memadai untuk aplikasi domestik [15]. Oleh karena itu, pemilihan massa 40% dianggap sebagai titik kompromi terbaik antara keselamatan dan kinerja sistem [16]. Konfigurasi ini berpotensi menurunkan risiko kebakaran sekaligus menjaga efisiensi sistem pada tingkat yang aman untuk aplikasi domestik. Namun, tantangan utama adalah sifat mudah terbakar dan dampaknya terhadap kinerja sistem pada massa pengisian rendah [17].

Berdasarkan *gap* penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis rasio efisiensi energi (EER) pada AC *split* yang di-*retrofit* dari R32 ke R290 dengan massa pengisian 40%, untuk memberikan data

eksperimental mengenai potensi efisiensi energi dan keamanan penggunaan refrigeran hidrokarbon dalam sistem pendingin ruangan pada kondisi operasi yang bervariasi.

Metode Penelitian

a). Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini, AC *split* berkapasitas 1 PK (9.000 Btu/h) dengan refrigeran R32 sebanyak 430 gram digunakan. Sistem beroperasi pada tegangan input 220V/50Hz dengan daya kompresor nominal 0,8 kW. Unit dilengkapi dengan kompresor *rotary hermetik* tipe *fixed speed* (*non-inverter*) yang dirancang khusus untuk refrigeran R32, dengan *displacement* 9,2 cm³ dan kecepatan putaran 2.900 rpm. Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1. Sistem pengukuran dirancang untuk merekam parameter termodinamika secara simultan pada berbagai titik strategis dalam siklus pemanasan. Sensor LM35 dipasang pada permukaan pipa pemanas dengan metode *surface mount* dan diisolasi secara termal untuk mengurangi kehilangan panas ke lingkungan.

Tabel 1. Spesifikasi alat ukur dan parameter pengukuran yang digunakan dalam penelitian

Parameter	Alat Ukur	Spesifikasi
Tekanan sisi rendah	Refco pressure gauge	0-250 psi, Class 1.6
Tekanan sisi tinggi	Refco pressure gauge	0-500 psi, Class 1.6
Temperatur refrigeran	Sensor LM35 + NI USB 6000	Range 0-100°C, metode <i>surface mount</i>
Temperatur ruangan dan lingkungan	Sensor LM35 + NI USB 6000	Range 0-100°C
Tegangan, Arus, Daya	Wattmeter Keweisi KWS-AC300	0-3000 W
Faktor daya	Wattmeter Keweisi KWS-AC300	Digital display

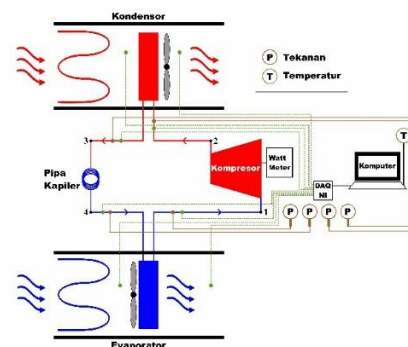
Dalam dokumentasi setup eksperimen, Gambar 1 menunjukkan sistem pengujian AC *split* lengkap, yang terdiri dari unit *indoor* (evaporator) dan unit *outdoor* (kompresor dan kondensor) yang

ditempatkan dalam sebuah *ducting*. Peralatan instrumentasi digunakan untuk memantau dan merekam data, panel kontrol yang mengatur kondisi operasi, dan berbagai alat ukur yang terhubung dengan sensor pada sistem AC.



Gambar 1. Setup eksperimen sistem pengujian AC *split*

Skema untuk memasang sistem pengujian yang mencakup empat elemen utama dalam siklus refrigerasi yakni kompresor, kondensor, pipa kapiler, dan evaporator ditampilkan pada Gambar 2. Pengukuran tekanan ditempatkan di empat lokasi strategis yang ditandai dengan simbol (P) untuk mengukur tekanan pada bagian *suction*, *discharge*, inlet kondensor, dan outlet pipa kapiler. Sensor temperatur dipasang pada bagian *inlet* dan *outlet* evaporator serta kondensor, serta pada beberapa titik di sepanjang pipa refrigeran, menggunakan metode *surface mount*. *Wattmeter* dipasang pada rangkaian listrik kompresor untuk memantau penggunaan daya, tegangan, arus, dan faktor daya. Semua sensor tersebut terhubung ke sistem akuisisi data (DAQ NI 6000) yang dilanjutkan ke komputer untuk pencatatan dan analisis data secara langsung.



Gambar 2. Skema sistem uji AC *split*

Bahan refrigeran yang dipakai adalah R32 (difluoromethane, CH₂F₂) dengan massa pengisian 430 gram sebagai kondisi *baseline*, serta R290 (propane, C₃H₈) dengan massa pengisian 172 gram (40% dari massa R32) untuk kondisi *retrofit*. Sebelum proses pengisian refrigeran, *vacuum pump* digunakan untuk mengevakuasi sistem.

b). Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini mencakup dua aspek utama, yaitu jenis refrigeran yang digunakan dan kondisi operasi sistem. Refrigeran yang diuji terdiri atas R32 dengan muatan sebesar 430 gram serta R290 dengan muatan sebesar 172 gram, yang setara dengan 40% dari muatan R32. Sementara itu, kondisi operasi ditentukan berdasarkan kombinasi antara suhu di dalam ruangan dan suhu udara luar. Terdapat lima skenario kondisi operasi yang diujikan, yakni: (1) suhu ruangan 23°C dengan suhu luar 30°C, (2) suhu ruangan 25°C dengan suhu luar 30°C, (3) suhu ruangan 27°C dengan suhu luar 30°C, (4) suhu ruangan 25°C dengan suhu luar 35°C, serta (5) suhu ruangan 27°C dengan suhu luar 35°C. Dengan memadukan kedua jenis refrigeran tersebut dengan kelima kondisi operasi yang ada, diperoleh total sepuluh variasi pengujian secara keseluruhan.

Variabel terikat yang diukur mencakup *Energy Efficiency Ratio* (EER) dalam satuan Btu/Wh, kapasitas pendinginan (Q_e) dalam kW, konsumsi daya kompresor (W_k) dalam kW, efek refrigerasi (q_e) dalam kJ/kg, kerja kompresor (q_w) dalam kJ/kg, tekanan *suction* (P_1) dan *discharge* (P_2) dalam kPa, serta temperatur refrigeran pada enam titik pengukuran dalam °C.

Panjang dan diameter pipa kapiler, kelembaban relatif ruangan (50-60%), tegangan input (220V ±5%), dan kecepatan kipas evaporator dan kondensor adalah semua variabel yang dapat dikontrol dalam setting standar.

c). Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap. Sistem AC split pertama kali diuji dengan refrigeran R32 sebanyak 430 gram sesuai dengan spesifikasi pabrikan. Setelah data dikumpulkan, sistem divakum dan diisi dengan refrigeran R290 sebanyak 40% dari massa R32 (172 gram). Tekanan suction dan discharge kompresor, suhu pada berbagai titik sistem, tegangan, arus, dan faktor daya motor kompresor diukur dalam lima variasi suhu ruangan dan lingkungan. Pengukuran dilakukan setelah sistem berada dalam kondisi tetap selama enam puluh menit dengan tujuan memastikan seluruh komponen sistem telah mencapai kesetimbangan termal dan tekanan operasi stabil sesuai standar ASHRAE 37-2009 untuk pengujian sistem pendingin, sehingga data yang diperoleh merepresentasikan performa sistem pada kondisi *steady-state* yang dapat diandalkan untuk analisis komparatif, dengan interval lima menit untuk setiap data yang diukur [18].

d). Analisis Data

Data eksperimen diolah menggunakan software REFPROP untuk menentukan sifat termodinamika refrigeran pada setiap titik pengukuran. Dari data tersebut dihitung efek refrigerasi (q_e), kerja kompresor (q_w), kapasitas pendinginan (Q_e), konsumsi daya (W_k), Coefficient of Performance (COP), dan *Energy Efficiency Ratio* (EER).

Laju aliran massa refrigeran dihitung menggunakan korelasi tak berdimensi untuk pipa kapiler melingkar heliks. COP aktual dihitung dengan Persamaan 1 yaitu:

$$\text{COP}_{\text{aktual}} = \frac{q_e}{q_w} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (1)$$

Besar kerja kompresi yang dilakukan (q_w) adalah kJ/kg, dan h_1 adalah entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg) dan h_2 adalah entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg). Di sisi lain, q_e adalah besarnya kalor yang diserap di evaporator (kJ/kg).

EER atau rasio efisiensi energi adalah nilai efisiensi untuk peralatan pada pasangan suhu eksternal dan internal tertentu [19]. EER dihitung dengan mengonversi nilai COP aktual ke satuan Btu/Wh menggunakan faktor konversi 3,413, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$EER = 3,413 \times COP_{\text{aktual}} \quad (2)$$

Nilai EER yang lebih tinggi menunjukkan kinerja sistem pendingin yang lebih efisien, karena mampu menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih besar dengan konsumsi energi listrik yang lebih rendah.

Analisis ketidakpastian dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kepercayaan hasil pengukuran menggunakan metode propagasi ketidakpastian berdasarkan GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*) [20]. Ketidakpastian standar untuk parameter yang diukur langsung dihitung menggunakan distribusi *rectangular* dengan Persamaan 3 [21]:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Dimana a_i adalah setengah lebar interval ketidakpastian berdasarkan spesifikasi akurasi alat ukur. Ketidakpastian standar dihitung menggunakan faktor $1/\sqrt{3}$ yang sesuai untuk distribusi *rectangular*, dimana hanya batas atas dan bawah yang diketahui tanpa informasi probabilitas di antara keduanya. Spesifikasi dan ketidakpastian standar dari masing-masing alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Akurasi *pressure gauge* Class 1.6 merujuk pada standar akurasi $\pm 1.6\%$ dari skala penuh (*full scale*), sehingga untuk *gauge* 0-250 psi diperoleh akurasi ± 4 psi dan untuk *gauge* 0-500 psi diperoleh akurasi ± 8 psi. Pengukuran temperatur refrigeran dilakukan dengan metode *surface mount* dimana sensor LM35 ditempel pada permukaan pipa refrigeran dan diisolasi secara termal untuk meminimalkan heat loss ke lingkungan. Ketidakpastian total untuk pengukuran temperatur refrigeran

mencakup kontribusi dari akurasi sensor dan ketidakpastian pemasangan [22].

Tabel 2. Ketidakpastian alat ukur

Parameter	Spesifikasi Alat	Ketidakpastian Standar
Tekanan sisi rendah	<i>Pressure gauge</i> 0–250 psi (Class 1.6, ± 4 psi)	± 2.31 psi
Tekanan sisi tinggi	<i>Pressure gauge</i> 0–500 psi (Class 1.6, ± 8 psi)	± 4.62 psi
Temperatur refrigeran	Sensor LM35 + NI USB 6000 (0–100 °C, ± 0.5 °C)	± 0.289 °C
Temperatur lingkungan	Sensor LM35 + NI USB 6000 (0–100 °C, ± 0.5 °C)	± 0.289 °C
Tegangan listrik	<i>Wattmeter</i> KWS-AC300 ($\pm 1\%$ reading)	$\pm 0.58\%$ reading
Arus listrik	<i>Wattmeter</i> KWS-AC300 ($\pm 1\%$ reading)	$\pm 0.58\%$ reading
Faktor daya	<i>Wattmeter</i> KWS-AC300 (± 0.02)	± 0.012

Dalam penelitian ini, analisis ketidakpastian terbatas pada ketidakpastian alat ukur yang digunakan. Ketidakpastian sistem secara keseluruhan, serta ketidakpastian parameter turunan, tidak dipelajari lebih lanjut dan berada di luar lingkup penelitian ini.

e). Validasi Eksperimen

Validasi eksperimen dilakukan melalui perbandingan dengan literatur terdahulu dan *database* termodinamika standar, mencakup dua aspek: validasi performa R32 sebagai *baseline* dan validasi hasil *retrofit* R290. Hasil dinyatakan valid apabila deviasi terhadap data referensi tidak melebihi 15%.

Validasi *baseline* R32 dilakukan dengan membandingkan nilai COP terhadap Widodo et al. (2022) pada AC *split* 9.000 Btu/h dengan kondisi operasi serupa. Validasi *retrofit* R290 mencakup tiga parameter: (1) penurunan *cooling capacity*, dibandingkan dengan Fajar et al. (2020) pada sistem R410A dengan variasi massa 33–42%; (2) penurunan konsumsi daya, dibandingkan dengan Tanaka et al. (2018) pada sistem R22 dan Widodo et al. (2022) pada sistem R32 9.000 Btu/h; serta (3)

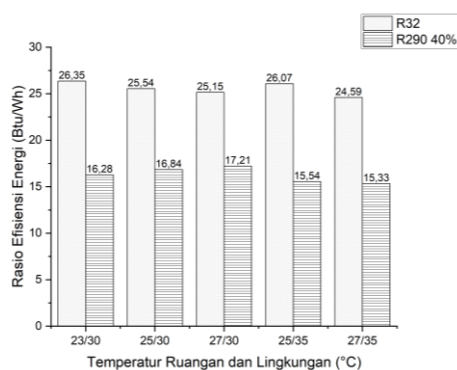
massa pengisian optimal, divalidasi terhadap Fajar et al. (2020), Padalkar (2010), dan Wu et al. (2012).

Hasil dan Pembahasan

a). Energy Efficiency Ratio (EER)

Gambar 1 menunjukkan perbandingan nilai EER antara R32 dan R290. EER adalah parameter utama dalam penelitian ini. Faktor yang menunjukkan efisiensi energi sistem pendingin adalah rasio kapasitas pendinginan terhadap konsumsi daya listrik, yang diwakili dalam satuan Btu/Wh. Nilai EER yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan efek pendinginan yang lebih besar dengan konsumsi daya listrik yang sama. Dengan kata lain, sistem tersebut lebih efisien secara energi.

Gambar 3 menunjukkan perbandingan nilai EER antara R32 dan R290. EER adalah parameter utama dalam penelitian ini. Faktor yang menunjukkan efisiensi energi sistem pendingin adalah rasio kapasitas pendinginan terhadap konsumsi daya listrik, yang diwakili dalam satuan Btu/Wh. Nilai EER yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sistem dapat menghasilkan efek pendinginan yang lebih besar dengan konsumsi daya listrik yang sama. Dengan kata lain, sistem tersebut lebih efisien secara energi.



Gambar 3. Skala perbandingan rasio efisiensi energi refrigeran R32 dan R290

Kedua refrigeran memiliki EER yang lebih tinggi ketika kondisi temperatur lebih rendah, seperti yang ditunjukkan pada grafik. R32 sangat stabil, dengan penurunan EER hanya 6,7% antara kondisi terbaik dan

terburuk, sementara R290 mengalami penurunan 10,9%, menunjukkan sensitivitas yang lebih besar terhadap perubahan kondisi operasi.

Massa pengisian refrigeran hanya 40% menurunkan laju aliran massa, menurunkan total kalor yang diserap dari ruangan. Ini terjadi meskipun efek refrigerasi per kilogram R290 (293,94-308,23 kJ/kg) lebih tinggi dari R32 (229,42-239,80 kJ/kg). Nilai COP R290 (4,49-5,04) jauh lebih rendah daripada R32 (7,21-7,72) karena ketidakcocokan kompresor untuk R32 dengan karakteristik termodinamika R290. Perlu dicatat bahwa jika terjadi penurunan efisiensi pada R290 dalam penelitian retrofit ini, hal tersebut merupakan akibat dari penggunaan komponen sistem yang awalnya dirancang untuk R32, bukan menunjukkan kelemahan inheren dari sifat termodinamika R290 [4].

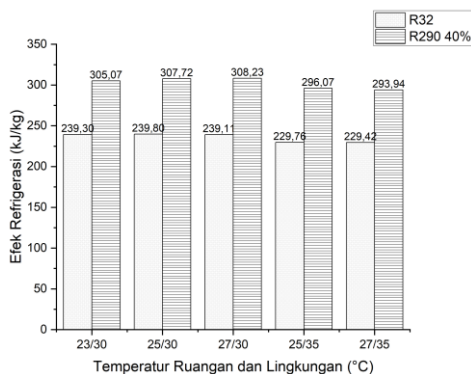
Hasil menunjukkan bahwa *retrofit* sederhana dengan massa pengisian 40% tanpa mengubah komponen sistem tidak dapat mempertahankan efisiensi energi sebanding dengan sistem asli [8]. Meskipun R290 memiliki GWP yang sangat rendah dan konsumsi daya yang lebih rendah, penurunan EER sebesar 30-45% menunjukkan bahwa konfigurasi ini belum ideal untuk aplikasi yang nyata.

b). Faktor Termodinamika yang Mempengaruhi EER

Parameter termodinamika yang membentuk nilai EER harus diperiksa secara menyeluruh untuk memahami perbedaan antara R32 dan R290. Karena EER secara langsung dipengaruhi oleh Coefficient of Performance (COP), yang merupakan rasio antara efek refrigerasi (q_e) dan kerja kompresor (q_w), maka analisis kedua parameter ini menjadi kunci untuk menjelaskan perbedaan efisiensi energi yang signifikan antara kedua refrigeran.

Gambar 4 menunjukkan perbandingan efek refrigerasi (q_e) antara refrigeran R32 dan R290 pada berbagai variasi temperatur dari ruangan dan dari lingkungan. Efek pendinginan atau

refrigerasi merupakan kemampuan sistem untuk menyerap kalor dari ruangan yang didinginkan per kilogram refrigeran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa R290 memiliki efek refrigerasi yang lebih tinggi dibandingkan R32 pada semua kondisi operasi. Efek refrigerasi yang lebih tinggi per kilogram memungkinkan penggunaan massa pengisian refrigeran yang lebih rendah pada sistem AC domestik. Ini dapat mengurangi risiko keselamatan terkait sifat mudah terbakar R290 sekaligus memungkinkan desain kompresor dan penukar kalor untuk mencapai efisiensi energi setara dengan refrigeran sintetik [2]. Efek refrigerasi R32 berkisar antara 229,42-239,80 kJ/kg, dengan nilai tertinggi sebesar 239,80 kJ/kg dicapai pada kondisi temperatur ruangan 25°C dan lingkungan 30°C. Sementara itu, R290 menunjukkan efek refrigerasi yang lebih besar yaitu 293,94-308,23 kJ/kg, dengan nilai tertinggi 308,23 kJ/kg pada kondisi temperatur ruang 27°C dan 30°C pada kondisi sekitar.

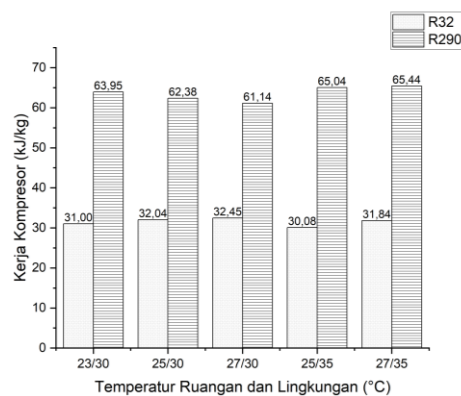


Gambar 4. Skala perbandingan efek refrigerasi R32 dan R290

Perbedaan efek refrigerasi ini mengindikasikan bahwa R290 memiliki kapasitas penyerapan kalor yang lebih besar per kilogram refrigeran, mencapai 22-28% lebih tinggi dibandingkan R32. Hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat termodinamika kedua refrigeran, khususnya pada entalpi penguapan (*latent heat of vaporization*) yang lebih tinggi pada R290 [23]. Peningkatan temperatur ruangan dan lingkungan cenderung sedikit menurunkan efek refrigerasi pada kedua refrigeran, namun penurunan ini tidak signifikan, menunjukkan stabilitas performa sistem

dalam rentang temperatur operasi yang diuji. Meskipun efek refrigerasi R290 lebih tinggi, hal ini belum cukup untuk menghasilkan EER yang lebih baik karena harus diimbangi dengan analisis kerja kompresor.

Pada Gambar 5 menampilkan perbandingan kerja kompresor (q_w) yang diperlukan untuk mengompresi refrigeran dari tekanan evaporasi ke tekanan kondensasi. Kerja kompresor merupakan energi yang harus disuplai untuk menggerakkan siklus refrigerasi. Hasil pengujian menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan antara kedua refrigeran. Kerja kompresor R32 berkisar 30,08-32,45 kJ/kg, sedangkan R290 memerlukan kerja kompresor yang jauh lebih besar yaitu 61,14-65,44 kJ/kg, hampir dua kali lipat dibandingkan R32.

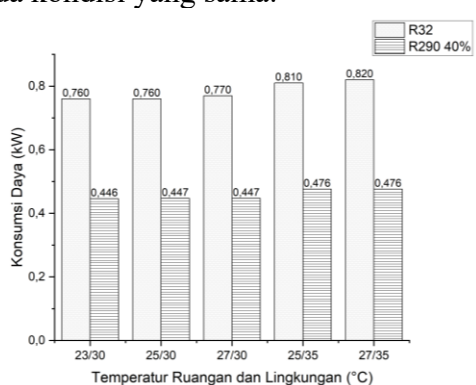


Gambar 5. Skala perbandingan kerja kompresor R32 dan R290

Peningkatan kerja kompresor pada R290 disebabkan oleh beberapa faktor termodinamika. Pertama, perbedaan rasio tekanan antara sisi *discharge* dan *suction* pada sistem yang menggunakan R290. Kedua, volume spesifik R290 yang berbeda menyebabkan kompresor harus bekerja lebih keras untuk memampatkan refrigeran. Ketiga, massa pengisian R290 yang hanya 40% dari R32 menyebabkan rasio kompresi per siklus menjadi lebih tinggi [12]. Meskipun efek refrigerasi R290 lebih tinggi, peningkatan kerja kompresor yang signifikan ini berdampak negatif pada efisiensi sistem secara keseluruhan, yang tercermin dalam nilai COP dan EER yang lebih rendah.

c). Pengaruh Konsumsi Daya terhadap EER
Parameter operasional yang menentukan biaya energi listrik sistem pendingin adalah konsumsi daya kompresor. Meskipun EER dihitung berdasarkan parameter termodinamika ideal (rasio q_e/q_w), konsumsi daya kompresor menentukan kinerja sistem dalam aplikasi nyata. Analisis konsumsi daya sangat penting untuk menentukan apakah penurunan EER pada R290 diikuti dengan penghematan energi listrik yang signifikan.

Perbedaan konsumsi daya kompresor antara sistem yang menggunakan R32 dan R290 pada berbagai kondisi operasi ditunjukkan pada Gambar 6. Salah satu faktor penting yang menentukan biaya operasional sistem pendingin adalah konsumsi daya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa R290 memiliki konsumsi daya yang jauh lebih rendah dibandingkan R32 pada semua kondisi suhu yang diuji. Konsumsi daya kompresor R32 berkisar antara 0,76-0,82 kW, dengan nilai tertinggi 0,82 kW pada kondisi suhu ruang 27°C dan lingkungan 35°C. Sebaliknya, daya yang dikonsumsi R290 hanya 0,446-0,476 kW, dengan nilai tertinggi 0,476 kW pada kondisi yang sama.



Gambar 6. Skala perbandingan konsumsi daya refrigeran R32 dan R290

Menguntungkan dalam hal penghematan energi listrik, konsumsi daya R290 turun antara 41 dan 42 persen dibandingkan R32. Konsumsi daya kedua refrigeran meningkat jika suhu lingkungan naik dari 30 °C menjadi 35 °C, seperti yang ditunjukkan pada grafik. Pada R32,

konsumsi daya meningkat dari 0,76-0,77 kW pada 30 °C menjadi 0,81-0,82 kW pada 35 °C. Pada R290, konsumsi daya meningkat sedikit, dari 0,446-0,447 kW menjadi 0,476 kW, yang menunjukkan stabilitas yang lebih baik pada berbagai kondisi beban termal.

Massa pengisian refrigeran R290 hanya 40% dari R32 (172 gram daripada 430 gram), sehingga jumlah refrigeran yang harus dikompresi dalam setiap siklus berkurang, yang berarti beban kerja kompresor berkurang dan konsumsi daya lebih rendah [2]. Hal ini mendemonstrasikan bahwa efisiensi energi tidak dapat dievaluasi semata dari konsumsi daya, tetapi harus mempertimbangkan output pendinginan yang dihasilkan.

d). Validasi Hasil Eksperimen

Validasi eksperimen dilakukan untuk memastikan keandalan data yang diperoleh melalui perbandingan dengan penelitian. Tabel 3 menunjukkan ringkasan hasil validasi yang mencakup dua aspek utama: validasi performa R32 sebagai *baseline* dan validasi hasil *retrofit* R290 pada berbagai kondisi operasi.

Tabel 3. Hasil validasi eksperimen

Parameter Validasi	Hasil Penelitian	Referensi Acuan
COP (<i>Baseline</i> R32)	7,20–7,64	Widodo et al. (2022): 7,4–7,6
Penurunan <i>cooling capacity</i> (R290)	31–40%	Fajar et al. (2020): 31,3%
Penurunan konsumsi daya (R290)	10–13%	Tanaka et al. (2018): R290 < R22
Penurunan konsumsi daya (R290)	10–13%	Widodo et al. (2022): 13,3%
Massa pengisian optimal (R290)	172 g (40%)	Fajar et al. (2020): 45–55%
Massa pengisian optimal (R290)	172 g (40%)	Padalkar (2010): ~50%
Massa pengisian optimal (R290)	172 g (40%)	Wu et al. (2012): 50–55%

Validasi *baseline* R32 menunjukkan deviasi COP sebesar 0,6–2,8% terhadap Widodo et al. (2022), mengkonfirmasi akurasi sistem pengukuran dan integritas

sistem selama proses *retrofit*. Validasi hasil *retrofit* R290 memperlihatkan konsistensi pada tiga parameter: (1) penurunan *cooling capacity* sebesar 31–40% selaras dengan karakteristik umum *retrofit* hidrokarbon pada massa pengisian rendah; (2) penurunan konsumsi daya 10–13% yang konsisten dengan densitas R290 lebih rendah sehingga mengurangi beban kompresor; dan (3) massa pengisian optimal 172 g (40%) yang sebanding dengan rentang 45–55% pada literatur, menandakan kecenderungan umum *retrofit* R290 pada sistem yang dirancang untuk refrigeran bertekanan dan densitas lebih tinggi.

Secara keseluruhan, seluruh parameter validasi memenuhi kriteria yang ditetapkan, sehingga data eksperimen dinyatakan valid dan layak digunakan sebagai acuan analisis komparatif performa R32 dan R290 pada AC *split* 1 PK.

Kesimpulan

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa R32 mencapai EER yang lebih tinggi (24,59-26,35 Btu/Wh) dibandingkan R290 (15,33-17,21 Btu/Wh), menunjukkan penurunan efisiensi energi sebesar 30-45%. Meskipun R290 memiliki konsumsi daya yang lebih rendah (0,446-0,476 kW) dibandingkan R32 (0,76-0,82 kW), penurunan kapasitas pendinginan akibat rendahnya laju aliran massa menyebabkan efisiensi energi keseluruhan sistem menurun signifikan.

Meskipun retrofit massa 40% dapat menurunkan konsumsi listrik, hal tersebut tidak dapat mempertahankan efisiensi energi sistem. Kompresor yang dibuat untuk R32 tidak bekerja dengan baik dengan R290 karena massa pengisian yang rendah, yang menyebabkan laju aliran massa yang sangat rendah. Studi lebih lanjut tentang variasi massa R290 yang lebih tinggi (50–80%) dan penggunaan kompresor yang dibuat khusus untuk refrigeran hidrokarbon disarankan untuk mencapai kinerja terbaik sambil mempertahankan aspek keselamatan terkait sifat flammability R290.

Referensi

- [1] Althouse AD. Modern Refrigeration and Air Conditioning. 2004.
- [2] Choudhari CS. Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems. *Energy Procedia* 2017;109:346–52.
- [3] Shah N, Wei M, Letschert V, Phadke A. Benefits of Leapfrogging to Superefficiency and Low Global Warming Potential Refrigerants in Room Air Conditioning 2015.
- [4] Wu JH. Experimental performance study of a small wall room air conditioner retrofitted with R290 and R1270. *Int J Refrig* 2012;35:1860–8.
- [5] Calm JM, Domanski PA. R-22 replacement status. *ASHRAE J* 2004;46:29–39.
- [6] Palm B. Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems - A review. *Int J Refrig* 2008;31:552–63.
- [7] Ibrahim OAA-M, Kadhim SA, Hammoodi KA, Rashid FL, Askar AH. Review of hydrocarbon refrigerants as drop-in alternatives to high-GWP refrigerants in VCR systems : The case of R290. *Clean Eng Technol* 2024;23:100825. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100825>.
- [8] Fajar B, Restu Bagas P, Ukhi S, Alhamid MI, Lubis A. Energy and exergy analysis of an R410A small vapor compression system retrofitted with R290. *Case Stud Therm Eng* 2020;21:100671.
- [9] Tanaka IR, Fajar B, Suryo Utomo T, Yohana E, Mustaqim. Experimental Study Performance R-22 AC Split Retrofitted with Propane. *MATEC Web Conf* 2018;159:1–6.
- [10] Padalkar AS. Performance Assessment of Air Conditioners with HC-290 2010.
- [11] Temaja IW. KAJIAN EKSPERIMENTAL CAMPURAN R-32 / R-290 PENGGANTI

- REFRIGERAN R-32 PADA AC SPLIT DOMESTIK. Matrix 2018.
- [12] Widodo, Ade Irvan Tauvana, Fatkur Rachmanu, Lukman Nulhakim, Syafrizal, Mokhammad Is Subekti. Analisis Kinerja R290 sebagai Pengganti R32 pada Unit AC-Split Kapasitas 9,000 Btuh/hr. *J Asimetrik J Ilm Rekayasa Inov* 2022;4:221–30. <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v4i1.3466>.
- [13] Raharjo S, Irawan RB, Pujianto ME. Optimization of Compressor Work, Power and Heat on Efficiency Refrigerant R290 on Split AC. *SINTEK J J Ilm Tek Mesin* 2022;16:77. <https://doi.org/10.24853/sintek.16.2.77-81>.
- [14] Pujianto ME, Nugroho A. Performance Air Conditioner On Retrofitted Refrigerant Hydrocarbon. *J Polimesin* 2024;22.
- [15] International Electrotechnical Commission. IEC 60335-2-40:2022 Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers. Geneva, Switzerland: 2022.
- [16] Yu C, Teng T. Retrofit assessment of refrigerator using hydrocarbon refrigerants. *Appl Therm Eng* 2014;66:507–18. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>.
- [17] Corberán JM. Review of standards for the use of hydrocarbon refrigerants in A/C, heat pump and refrigeration equipment. *Int J Refrig* 2008;31:748–56.
- [18] ASHRAE. ASHRAE STANDARD Methods of Testing for Rating Electrically Driven Unitary Air-Conditioning and Heat Pump Equipment 2009;2009.
- [19] Purushothama B. Definitions of terms used in humidification engineering. *Humidification Vent. Manag. Text. Ind.*, 2009, p. 227–52.
- [20] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. First edit. Sèvres, France: Joint Committee for Guides in Metrology; 2008.
- [21] Taylor BN, Kuyatt CE. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology (NIST); 1994.
- [22] ASHRAE. 2017 ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI). Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; 2017.
- [23] Zhang J, Zeng H, Djapa DD, Rugwizangoga BK. Physical Property Calculation and Refrigeration Cycle Analysis of Mixed Refrigerant R32 / R290. *Buildings* 2025;2. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings15071071>.