

Analisis Pengaruh Modifikasi 3 Katup Ekspansi Paralel Terhadap Kinerja AC Menggunakan Refrigeran R-32

Ahmad Arifin¹, Vivi Apriyanti^{1*}, Marfizal¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Jambi

*Corresponding author, e-mail: viviapriyanti@stiteknas.ac.id

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of modifying three parallel capillary tubes on the performance of an environmentally friendly R-32-based air conditioning system, focusing on improvements in Coefficient of Performance (COP) and thermal efficiency. Experimental testing was conducted on a vapor-compression system using a 1 HP Mitsubishi Split AC unit (925 W, 9000 BTU/h). Two configurations were examined: (1) a standard single capillary tube (0.52 mm diameter) and (2) three parallel capillary tubes (0.42 mm diameter), each 70 cm in length. Performance parameters analyzed included actual COP, Carnot COP, system efficiency, refrigerant mass flow rate, refrigeration effect, compressor work, and heat rejection to the condenser. The three-parallel capillary tube configuration increased the actual COP from 3.904 to 4.973 (27.38%) and improved system efficiency from 48.5% to 64.4% (absolute increase of 15.9% or relative increase of 32.78%). Refrigerant mass flow rate rose by 22.5%, refrigeration effect by 3.84%, while compressor work decreased by 18.45%. Heat rejection to the condenser dropped by 0.71%, indicating improved thermal efficiency. The three-parallel capillary tube system operates closer to ideal conditions than the standard configuration, making it a recommended alternative design for efficient and environmentally friendly R-32-based air conditioning systems.

Keyword: parallel capillary tube, R-32, split air conditioner, COP, thermal efficiency.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh modifikasi tiga pipa kapiler paralel terhadap kinerja sistem pendingin AC berbasis refrigeran ramah lingkungan R-32, dengan fokus pada peningkatan Coefficient of Performance (COP) dan efisiensi termal. Pengujian dilakukan secara eksperimental pada sistem kompresi uap menggunakan AC Split 1 PK merek Mitsubishi (daya 925 W, kapasitas 9000 BTU/h). Dua konfigurasi diuji: (1) satu pipa kapiler standar (diameter 0,52 mm) dan (2) tiga pipa kapiler paralel (diameter 0,42 mm), masing-masing sepanjang 70 cm. Data kinerja dianalisis meliputi COP aktual, COP Carnot, efisiensi sistem, laju aliran massa refrigeran, efek refrigerasi, kerja kompresi, dan pembuangan kalor ke kondensor. Konfigurasi tiga pipa kapiler paralel meningkatkan COP aktual dari 3,904 menjadi 4,973 (27,38%), sementara efisiensi sistem meningkat dari 48,5% menjadi 64,4% (peningkatan absolut 15,9% atau relatif 32,78%). Laju aliran massa refrigeran naik 22,5%, efek refrigerasi bertambah 3,84%, dan kerja kompresi berkurang 18,45%. Pembuangan kalor ke kondensor menurun 0,71%, menandakan efisiensi termal yang lebih baik. Sistem tiga pipa kapiler paralel bekerja lebih mendekati kondisi ideal dibanding konfigurasi standar, sehingga direkomendasikan sebagai alternatif desain yang efisien dan ramah lingkungan untuk sistem pendingin AC berbasis R-32.

Kata kunci: pipa kapiler paralel, R-32, AC Split, COP, efisiensi termal

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi refrigerasi telah mengalami kemajuan pesat seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem pendingin yang efisien, andal, dan ramah lingkungan. Dalam siklus refrigerasi kompresi uap, salah satu komponen

krusial yang mempengaruhi kinerja sistem adalah alat ekspansi, yang berfungsi untuk menurunkan tekanan dan mengatur laju aliran refrigeran cair dari kondensor menuju evaporator, sehingga proses penyerapan panas dapat berlangsung optimal [1].

Di antara berbagai jenis alat ekspansi, pipa kapiler merupakan pilihan yang banyak digunakan karena desainnya sederhana, biaya rendah, dan kemudahan perawatan. Pipa ini memiliki diameter dalam yang kecil dan panjang tertentu, yang secara signifikan mempengaruhi distribusi tekanan dan laju aliran massa refrigeran. Studi oleh Darmawan dan Putra [2] menunjukkan bahwa peningkatan panjang pipa kapiler akan menurunkan tekanan hisap kompresor dan laju aliran massa refrigeran, sehingga berimplikasi pada penurunan kapasitas pendinginan dan Coefficient of Performance (COP). Namun, pada kondisi tertentu, pipa kapiler dengan dimensi optimal dapat meningkatkan efek pendinginan. Hasil penelitian Sutarsa et al. [3] mengindikasikan bahwa kombinasi diameter dalam 0,070 inci dan panjang 4,748 m menghasilkan COP tertinggi sebesar 3,74 pada sistem AC split.

Perhatian global terhadap isu lingkungan mendorong transisi dari refrigeran berpotensi perusakan ozon (Ozone Depletion Potential – ODP) dan berpotensi pemanasan global (Global Warming Potential – GWP) tinggi seperti R-22 dan R-134a, menuju refrigeran yang lebih ramah lingkungan. R-32 (difluorometana) merupakan salah satu kandidat utama pengganti R-410A karena memiliki ODP nol dan GWP sebesar 677, jauh lebih rendah dibanding R-410A yang mencapai 2090 [4], [5]. Selain itu, R-32 memiliki konduktivitas termal dan kapasitas pendinginan yang tinggi, sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi sistem. Meskipun dikategorikan A2L (mildly flammable), risiko penggunaannya dapat diminimalkan dengan desain sistem yang tepat dan prosedur keselamatan yang memadai.

Di Indonesia, khususnya di Provinsi Jambi, pemanfaatan R-32 mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Berdasarkan observasi lapangan, penggunaan R-32 pada sistem AC mampu mengurangi konsumsi energi hingga 10% dibanding R-22, serta memperoleh dukungan positif dari teknisi dan penyedia layanan pendingin karena ketersediaannya yang melimpah dan kemudahan penanganan.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas optimasi pipa kapiler tunggal, kajian mengenai konfigurasi multi-pipa kapiler paralel, khususnya tiga pipa kapiler yang

bekerja secara paralel, masih terbatas. Konsep ini berpotensi meningkatkan distribusi aliran refrigeran, mengurangi fluktuasi tekanan, serta meningkatkan stabilitas operasi sistem [6].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh modifikasi tiga katup ekspansi paralel terhadap kinerja sistem AC berbasis R-32, dengan fokus pada parameter performa termodinamika seperti COP, kapasitas pendinginan, konsumsi daya, serta efisiensi sistem secara keseluruhan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain sistem pendingin yang lebih efisien dan ramah lingkungan, sejalan dengan tren global menuju teknologi rendah emisi..

METODE

Perangkat Pengujian

Pengujian dilakukan pada seperangkat komponen AC yang terdiri dari 1 unit kompresor, 1 unit kondensor, 3 unit katup ekspansi dan 1 unit evaporator seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat Pengujian AC dengan 3 katup paralel

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental pada sistem pendingin berbasis siklus kompresi uap dengan refrigeran R-32. Unit pengujian menggunakan AC Split

merek Mitsubishi kapasitas 1 PK (9000 BTU/h atau sekitar 2,64 kW) dengan daya listrik masukan sebesar 925 W. Spesifikasi perangkat pengujian dapat dilihat pada Tabel 1..

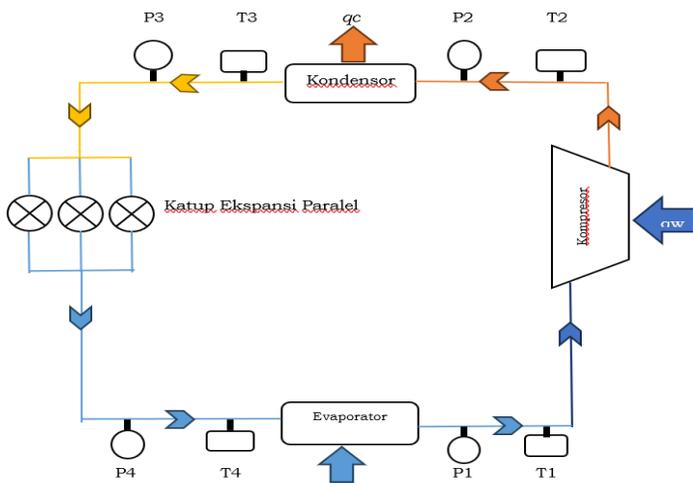
Dua konfigurasi alat ekspansi dibandingkan dalam penelitian ini, yaitu konfigurasi standar, satu pipa kapiler berdiameter dalam 0,52 mm dengan panjang 70 cm dan konfigurasi modifikasi: tiga pipa kapiler yang dirangkai secara paralel, masing-masing berdiameter dalam 0,42 mm dan panjang 70 cm. Alat ukur yang digunakan adalah thermometer digital dan *pressure gauge*.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Pengujian

Informasi Produk	Spesifikasi Produk
Merk AC	Mitsubishi
Kapasitas AC	1 PK
Tipe Refrigerant	R-32
Daya Listrik	925 Watt
Kapasitas Pendingin	9000 BTU/h
Ukuran Pipa Cair & Gas	1/4 + 3/8
Ampere	3.4 – 4.3 A

Parameter Perhitungan Kinerja AC

Untuk mengevaluasi kinerja sistem pendingin, beberapa parameter perhitungan digunakan. Perhitungan ini mengikuti pendekatan umum dalam analisis termodinamika sistem refrigerasi kompresi uap [7] dengan skema pengujian untuk pipa ekspansi paralel seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Skema Pengujian AC dengan 3 katup paralel

1. Kerja Kompresor

$$W_c = h_1 - h_2 \quad (1)$$

dimana :

W_c : Kerja yang dilakukan kompresor (J)

h_1 : Enthalpi refrigeran yang keluar evaporator (kJ/kg)

h_2 : Enthalpi refrigeran yang keluar kompresor (kJ/kg)

2. Laju aliran masa refrigeran

$$\dot{m} = P W_c \quad (2)$$

dimana :

\dot{m} : Laju aliran massa refrigeran (kg/s)

P : Daya kompresor (kW)

3. Pembuangan kalor di kondensor

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (3)$$

dimana :

q_c : Kalor yang dilepas oleh kondensor (J)

h_2 : Enthalpi refrigerant keluar kompresor (kJ/kg)

h_3 : Enthalpi refrigeran keluar kondensor (kJ/kg)

4. Efek refrigerasi di evaporator (q_e)

$$q_e = h_1 - h_3 \quad (4)$$

dimana:

q_e : Penyerapan kalor pada evaporator (kJ/kg)

h_1 : Enthalpi refrigeran keluar evaporator (kJ/kg)

h_3 : Enthalpi refrigeran keluar kondensor (kJ/kg)

5. COP Carnot digunakan sebagai acuan teoretis pada kondisi siklus ideal.

$$COP_c = T_1 / (T_3 - T_1) \quad (5)$$

dimana :

COP_c : Koefisien kinerja (Carnot)

T_1 : Temperatur evaporator (°K)

T_3 : Temperatur kondensor (°K)

6. COP Actual menunjukkan rasio antara daya pendinginan yang dihasilkan dengan daya listrik yang dikonsumsi kompresor

$$COP_{Ac} = q_e / W_c \quad (6)$$

7. Efisiensi sistem (*relative coefficient of performance*) menunjukkan kedekatan performa aktual terhadap batas ideal

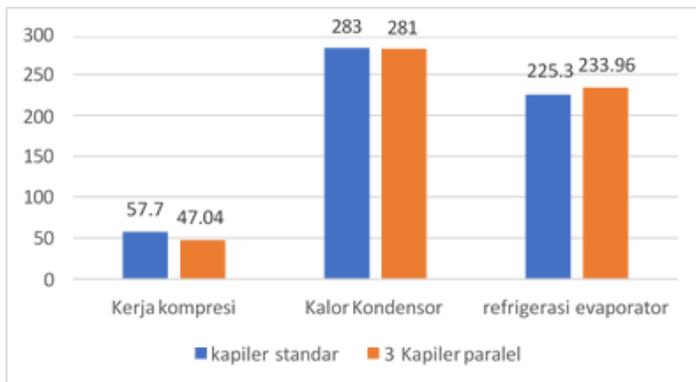
$$\eta = \frac{COP_{Ac}}{COP_c} \times 100\% \quad (7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan pada pengujian dengan penggunaan katup ekspansi standar dan 3 rangkaian paralel selama 2 menit, maka diperoleh data perhitungan seperti yang disajikan pada Tabel 2. Data kerja kompresor, jumlah kalor yang dibuang oleh kondensator dan panas yang diambil di evaporator disajikan pada Gambar 3.

Tabel 2. Hasil perbandingan kinerja sistem pendingin

Pengujian katup ekspansi	W _c (kJ/kg)	ṁ (kg/s)	q _c (kJ/kg)	q _e (kJ/kg)	COP _c	COP _{Ac}	η (%)
Standar	57,7kJ/kg	0,0160kg/s	283kJ/kg	225,3kJ/kg	8,040	3.904	48,5%
3 Paralel	47,04kJ/kg	0,0196kg/s	281kJ/kg	233,96kJ/kg	7,712	4,973	64,4%



Gambar 3. Grafik energi yang diperoleh pada sistem pendingin

Gambar 3 memperlihatkan perbandingan performa mesin kompresi uap/AC, sistem kerja kompresi (W_c) pada saat pengujian menggunakan pipa kapiler standar mendapatkan hasil sebesar 57,7 kJ/kg, sedangkan pada pengujian menggunakan 3 pipa kapiler paralel mendapatkan hasil yang lebih rendah yaitu 47,04 kJ/kg, terjadi penurunan sebesar 18,45%. Penurunan ini menunjukkan bahwa energi kompresi yang dibutuhkan pada sistem dengan 3 kapiler lebih kecil, yang berpotensi meningkatkan efisiensi.

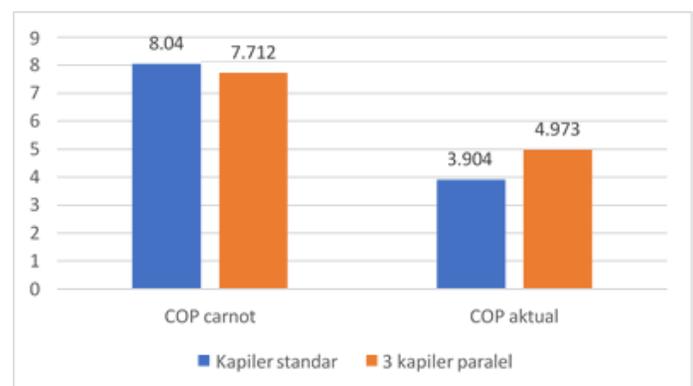
Pada pembuangan kalor di kondensator (Q_c), hasil pada pipa kapiler standar adalah 283 kJ/kg, dan pada sistem 3 kapiler paralel sebesar 281 kJ/kg, terdapat sedikit penurunan sebesar 0,71%. Penurunan ini masih dalam batas wajar dan

tidak signifikan, sehingga dapat dikatakan tidak berdampak besar terhadap keseluruhan performa.

Penurunan kalor di kondensator (Q_c) pada sistem dengan 3 kapiler paralel dapat disebabkan oleh beberapa faktor teknis. Salah satu penyebab utamanya adalah ketidakseimbangan aliran refrigeran antar kapiler, yang menyebabkan sebagian aliran tidak optimal dalam melepaskan kalor di kondensator. Selain itu, penurunan tekanan kondensasi akibat rendahnya hambatan aliran dalam sistem paralel turut mengurangi perbedaan suhu antara refrigeran dan media pendingin, sehingga efisiensi perpindahan panas menurun.

Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan beberapa langkah perbaikan. Di antaranya adalah dengan menggunakan flow distributor agar aliran refrigeran ke tiap kapiler merata, serta memastikan kapiler memiliki panjang dan diameter yang identik. Selain itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap kapasitas kondensator dan aliran udara pendingin, guna memastikan perpindahan panas berlangsung optimal. Terakhir, sistem perlu dikalibrasi dengan pemantauan tekanan dan temperatur kondensator secara berkala untuk menjaga kestabilan operasi sistem.

Efek refrigerasi di evaporator (q_e) pada penggunaan pipa kapiler standar adalah 225,3 kJ/kg, sedangkan pada penggunaan 3 pipa kapiler paralel meningkat menjadi 233,96 kJ/kg, menunjukkan peningkatan sebesar 3,84%, yang berarti proses penyerapan panas dari ruang lebih efektif pada sistem dengan 3 kapiler.



Gambar 4. Perbandingan COP pada sistem pendingin

Pada Gambar 4 terlihat koefisien performansi mesin pendingin Carnot (COP_c) pada pengujian dengan pipa kapiler standar adalah 8,040, sedangkan pada sistem dengan 3 pipa kapiler paralel turun menjadi 7,712, terjadi penurunan sebesar 4,08%. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh pendistribusian refrigeran yang kurang merata diantara pipa-pipa kapiler paralel. Penurunan ini kemungkinan besar disebabkan oleh penurunan suhu evaporasi atau peningkatan suhu kondensasi, yang dapat terjadi akibat ketidakseimbangan aliran refrigeran pada konfigurasi kapiler paralel. Ketidakseimbangan tersebut mengakibatkan sebagian bagian evaporator atau kondensor tidak beroperasi secara optimal, sehingga suhu kerja rata-rata sistem menjadi kurang ideal.

Penurunan COP Carnot pada sistem dengan tiga kapiler paralel dapat diminimalkan dengan memastikan distribusi aliran refrigeran yang merata melalui penggunaan flow distributor. Hal ini bertujuan agar suhu evaporasi dan kondensasi tetap stabil dalam rentang optimal. Selain itu, dimensi fisik seluruh pipa kapiler perlu diseragamkan, baik dari segi panjang maupun diameter, untuk mencegah ketidakseimbangan tekanan dan suhu kerja antar jalur yang dapat memengaruhi efisiensi termodinamika sistem secara keseluruhan.

Koefisien performansi aktual mesin pendingin (COP) mengalami peningkatan. Pada sistem standar nilainya adalah 3,904, dan meningkat menjadi 4,973 pada sistem 3 kapiler paralel, atau mengalami peningkatan sebesar 27,38%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa sistem menjadi lebih efisien dalam menghasilkan efek pendinginan dibandingkan dengan energi kompresi yang dibutuhkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan terhadap mesin pendingin kompresi uap/AC dengan membandingkan kemampuan antara katup ekspansi pipa kapiler standar dengan modifikasi 3 katup ekspansi pipa kapiler paralel menggunakan refrigeran R-32, maka diperoleh kesimpulan bahwa performa termodinamika sistem AC dengan modifikasi tiga katup ekspansi paralel mengalami peningkatan signifikan dibandingkan sistem

yang menggunakan pipa kapiler standar. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai koefisien performansi aktual (COP actual) sebesar 27,38%. Efisiensi sistem juga mengalami peningkatan sebesar 15,9%, meskipun nilai koefisien performansi Carnot mengalami sedikit penurunan sebesar 4,08%., hal ini tidak berdampak negatif secara keseluruhan karena sistem modifikasi tetap menunjukkan kinerja yang lebih dekat terhadap kondisi ideal serta lebih hemat energi dalam pengoperasiannya. Kinerja kompresi, laju aliran massa refrigeran, kalor yang dibuang di kondensor, dan efek refrigerasi di evaporator menunjukkan hasil yang lebih baik pada sistem dengan tiga katup ekspansi paralel. Hal ini membuktikan bahwa sistem paralel memiliki kapasitas pendinginan yang lebih tinggi dan efisiensi kerja termal yang lebih stabil. Modifikasi tiga katup ekspansi paralel terbukti menjadi alternatif desain yang lebih optimal dalam meningkatkan efisiensi sistem AC ramah lingkungan berbasis refrigeran R-32. Selain mampu meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem secara keseluruhan, modifikasi ini juga mendukung pengurangan konsumsi energi dan berkontribusi dalam upaya pengembangan sistem pendingin berkelanjutan yang mendekati kondisi kerja ideal. Oleh karena itu, desain ini memiliki potensi untuk diterapkan dalam pengembangan teknologi pendingin hemat energi di sektor rumah tangga maupun industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Jambi atas fasilitas penelitian yang diberikan, serta apresiasi juga disampaikan kepada pembimbing dan semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan eksperimen, analisis data, dan penyusunan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Aziz, Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Jakarta: Erlangga, 2013.
- [2] A. Darmawan and I. Putra, "Pengaruh Panjang Pipa Kapiler Terhadap Kinerja Sistem Refrigerasi," Jurnal Teknik Mesin, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2016.

- [3] I. M. Sutarsa, B. Sudira, and A. N. Suyadnya, “Analisis Kinerja AC Split dengan Variasi Dimensi Pipa Kapiler,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 11–18, 2023.
- [4] M. M. Dalkilic and S. Wongwises, “A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 9, pp. 1340–1349, 2010.
- [5] R. Pratama, A. Purnomo, and D. Saputra, “Evaluasi Kinerja Refrigeran R-32 pada Sistem Pendingin Ruangan,” *Jurnal Energi dan Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 55–62, 2021.
- [6] A. Purnomo, D. Santoso, and S. Hidayat, “Pengaruh Pipa Kapiler Paralel terhadap Distribusi Aliran Refrigeran,” *Jurnal Teknik Pendingin dan Tata Udara*, vol. 5, no. 1, pp. 25–32, 2019. Lisicki, W. Lubitz, and G. W. Taylor, “Optimal design and operation of Archimedes screw turbines using Bayesian optimization,” *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 1404–1417, 2016
- [7] ASHRAE, *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2017..