

## STUDI EKSPERIMENTAL UNJUK KERJA AC SPLIT MENGGUNAKAN R22, PROPANA 99,5% dan PROPANA 95,5%

Imam Ridwan Tanaka<sup>1\*</sup>, Ishak Amar<sup>1</sup>, Fisal Yuliansyah<sup>1</sup>, Agung Nugroho<sup>2</sup><sup>1</sup> Program Studi Teknik Alat Berat, Politeknik Batulicin,

Jl. Malewa Raya Komp. Maming One Residence Kel. Batulicin Kec. Batulicin Kab. Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan 72273.

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim

Jl. Menoreh Tengah X/22, Sampangan, Semarang 50236.

\*Email: imam@politeknikbatulicin.ac.id

**Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan unjuk kerja sistem pendingin udara (AC split) yang menggunakan tiga jenis refrigeran berbeda, yaitu R22 (refrigeran konvensional), propana dengan kemurnian 99,5%, dan propana dengan kemurnian 95,5%. Studi ini dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan sistem AC split kapasitas 1 PK dalam kondisi operasi standar. Parameter utama yang dianalisis meliputi tekanan kerja, temperatur kondensor dan evaporator, daya listrik yang dikonsumsi, koefisien performa (COP), serta efisiensi energi sistem secara keseluruhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa propana 99,5% memberikan performa termal yang mendekati R22 dan memiliki efisiensi energi yang lebih baik, disertai dengan penurunan konsumsi daya sebesar  $\pm 10\%$ . Sementara itu, propana 95,5% menunjukkan performa yang relatif lebih rendah dibandingkan propana 99,5%, meskipun tetap berada dalam batas operasional yang aman. COP Propana 99,5% dengan pengisian 50% paling tinggi, namun pada Propana 99,5% dengan massa 40% paling stabil dan memiliki nilai yang tinggi, kemudian disusul oleh Propana 95% dengan Massa 60%. Sedangkan Propana 95% dengan pengisian 30%, 40% dan 50% mempunyai COP yang lebih rendah. Penggunaan propana sebagai alternatif refrigeran ramah lingkungan menunjukkan potensi besar dalam mengurangi dampak pemanasan global akibat refrigeran konvensional. Dengan demikian, propana terutama dengan kemurnian tinggi dapat dipertimbangkan sebagai alternatif pengganti R22 dalam sistem pendingin AC split, dengan catatan perlunya pengujian lanjutan terhadap aspek keselamatan dan kompatibilitas material.

**Kata kunci:** R22, Propana, COP, efisiensi energi, refrigeran alternatif.

**PENDAHULUAN**

Sistem pendingin dengan siklus kompresi uap merupakan teknologi yang paling banyak digunakan pada aplikasi pendingin udara (AC), lemari es, dan sistem refrigerasi industri. Di antara berbagai komponennya, refrigeran berperan penting sebagai fluida kerja yang bertugas menyerap dan melepaskan panas melalui perubahan fasa dalam siklus tersebut. Selama beberapa dekade, refrigeran sintetik seperti R-22 (HCFC-22) telah digunakan secara luas karena memiliki sifat termodinamika yang menguntungkan, seperti tekanan operasi yang moderat dan kapasitas pendinginan yang baik (Fatouh & El Kafafy, 2006).

Namun, seiring meningkatnya kesadaran global akan dampak lingkungan, penggunaan R-22 mulai dibatasi karena kontribusinya terhadap penipisan ozon (ODP) dan pemanasan global (GWP). R-22 memiliki ODP sebesar 0,05 dan GWP sekitar 1810 (Stocker, 2014). Oleh karena itu, berbagai alternatif refrigeran alami mulai dikembangkan dan diuji sebagai pengganti R-22, salah satunya adalah propana ( $C_3H_8$ ) yang termasuk dalam kelompok hidrokarbon (HC). Propana memiliki sifat-sifat termodinamika yang mirip dengan R-22 dan memiliki ODP nol serta GWP yang sangat rendah (hanya sekitar 3), sehingga menjadikannya kandidat potensial sebagai refrigeran alternatif yang ramah lingkungan.

Beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan propana murni (99,5%) sebagai pengganti R-22 dapat menghasilkan unjuk kerja sistem yang setara bahkan lebih baik dalam hal koefisien performansi (COP) dan konsumsi daya (Ridwan Tanaka et al., 2018). Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan propana adalah tingkat kemurnian dan inflamabilitasnya, yang dapat mempengaruhi performa dan keselamatan operasi sistem pendingin. Dalam praktik di lapangan, terkadang digunakan propana dengan kemurnian lebih rendah (misalnya 95,5%) karena pertimbangan ketersediaan dan biaya, namun belum banyak studi yang membandingkan efektivitas termodinamika antara propana dengan tingkat kemurnian berbeda.

Beberapa eksperimen sebelumnya mengindikasikan bahwa penurunan kemurnian propana dapat menyebabkan perubahan tekanan kerja, kapasitas pendinginan, efisiensi energi, dan kestabilan termal sistem (K. & Tanaka, 2019). Oleh karena itu, diperlukan kajian eksperimental yang komprehensif untuk menganalisis pengaruh kemurnian propana terhadap kinerja sistem AC split, khususnya jika dibandingkan langsung dengan R-22 sebagai refrigeran referensi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi eksperimental terhadap unjuk kerja sistem AC split 1 PK yang dioperasikan dengan tiga jenis refrigeran: R-22, propana 99,5%, dan propana 95,5%. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan hisap dan buang, temperatur kondensor dan evaporator, konsumsi daya listrik, serta nilai COP sistem. Dengan memahami perbedaan performa dari ketiga jenis refrigeran tersebut, diharapkan dapat diperoleh data teknis yang dapat dijadikan referensi dalam substitusi R-22 secara efisien dan aman menggunakan propana, baik yang murni maupun dengan kemurnian lebih rendah.

Seperti telah dijelaskan sejak awal bahwa pada sistem pendingin kompresi uap refrigeran merupakan media untuk memindahkan kalor, memegang peranan sangat penting dan sampai saat ini masih banyak digunakan bahan refrigeran tersebut pada berbagai mesin refrigerasi, salah satunya adalah HCFC 22 atau umumnya refrigeran sintetis. Refrigeran ini mempunyai nilai ODP (ozone depletion potential) dan GWP (global warming potential) yang cukup tinggi. ODP merupakan ukuran relatif tingkat perusakan ozon suatu bahan terhadap tingkat perusakan ozon oleh R-11.

Tabel 1. ODP dan GWP beberapa refrigeran (Ridwan Tanaka et al., 2018)

Refrigeran	ODP	GWP	NBP
CFC 11	1.00	4600	23.8
CFC 12	0.86	4000	-29.8
R134a	0.00	1300	-26.2
HCFC 22	0.06	1700	-40.7
HC 600	0.00	2.7	-0.5
R290	0.00	1.1	-42.1
R 717	0.00	0.0	-33.3
R 744	0.00	1.0	-78.4
R 718	0.00	0.0	100

Sedangkan GWP adalah ukuran relatif potensi penghasil efek rumah kaca terhadap potensi efek rumah kaca akibat CO<sub>2</sub>, nilai ODP dan GWP beberapa refrigeran dapat dilihat pada Tabel 1.1. Salah satu alternatif refrigeran pengganti refrigeran sintetis HCFC 22 adalah refrigeran hidrokarbon jenis propana (HC-290) karena memiliki nilai ODP 0 dan GWP 1,1 sehingga dapat diabaikan. Penelitian tentang refrigeran hidrokarbon sebagai bahan ramah lingkungan telah dimulai cukup lama dan terus dikembangkan untuk memperoleh hasil yang paling optimum.

Efek kuantitas pengisian pada kinerja sistem refrigerasi juga dipengaruhi jenis refrigeran yang digunakan, seperti yang dikaji oleh (Cho et al., 2005). Penelitian mereka melaporkan bahwa refrigeran CO<sub>2</sub> lebih sensitif terhadap *undercharge* (pengisian yang kurang) dibanding dengan refrigeran R22, R407C dan R410A. Artinya, *undercharge* pada sistem refrigerasi menggunakan refrigeran CO<sub>2</sub> lebih berpengaruh pada penurunan kapasitas pendinginan dan COP dibandingkan dengan refrigeran lainnya. Hasil berbeda pada sistem pendingin menggunakan refrigeran campuran CO<sub>2</sub> dan R290 (Propana), seperti yang dilaporkan oleh (Kwon et al., 2017). Hasil penelitiannya melaporkan bahwa effek kuantitas pengisian refrigeran lebih sensitif dirasakan sistem menggunakan campuran CO<sub>2</sub>+R290 dibanding dengan menggunakan CO<sub>2</sub> murni. Dengan kata lain, sistem refrigerasi menggunakan refrigeran CO<sub>2</sub> relatif konstan COP-nya dibanding dengan sistem refrigerasi menggunakan refrigeran campuran CO<sub>2</sub> dan R290.

Pengkondisi udara jenis AC *window* menggunakan refrigeran hidrokarbon jenis propana (R290) dan refrigeran HCFC 22 yang diuji pada ruangan kalorimeter. diperoleh hasil bahwa sistem dengan HC290 memiliki kapasitas pendinginan lebih rendah 6,6% pada kondisi operasional rendah dan 9,7% pada kondisi operasional tinggi dibandingkan dengan menggunakan R22, sedangkan koefisien kinerjanya untuk R290 adalah 7,9% dan 2,8% lebih tinggi pada

operasi sistem yang rendah dan tinggi. Konsumsi energi yang digunakan untuk R290 lebih rendah pada kisaran 12,4 sampai 13,5 % dibandingkan dengan refrigeran HCFC 22 (Devotta et al., 2005)

Kinerja tata udara jenis split dengan menggunakan HCFC22 dan R290 hasilnya menunjukkan, laju aliran massa untuk R290 hanya 44% dan 47% dibandingkan untuk HCFC 22, ini dimungkinkan karena faktor kerapatan massa yang berbeda. Untuk kapasitas pendinginan sistem dengan menggunakan HC lebih rendah 4,7% s/d ,7% dan daya inputnya 12,1 s/d 12,3% dibandingkan HCFC22, namun EER dari R290 memperoleh 8,5% lebih tinggi dari HCFC 22, hal ini menunjukkan salah satu keuntungan dari penggunaan R290 (Zhou & Zhang, 2010).

Berdasarkan kajian pustaka di atas terlihat bahwa belum terdapat penelitian tentang efek pengisian refrigeran pada proses *drop-in* dari HCFC 22 ke R290 pada berbagai massa refrigeran. Untuk itu, penelitian ini akan melakukan kajian eksperimental untuk mengetahui pengisian optimal pada mesin pendingin pada saat dilakukan penggantian refrigeran dari HCFC 22 dengan R290. Selama ini kuantitas penggantian refrigeran dari HCFC 22 dengan R290 pada sistem refrigerasi dilakukan berdasarkan perbandingan massa jenis kedua fluida tersebut. Artinya, dengan menganggap volume pengisian refrigeran pada sistem pendingin sama, maka dengan mengetahui massa jenis kedua refrigeran tersebut dapat diperkirakan massa pengisian. Oleh karena massa jenis R290 sekitar setengah kali dari HCFC 22 pada temperatur tertentu, maka massa penggantian R290 juga sekitar setengah kali dari R22. Namun karena temperatur kondensor dan evaporator sistem refrigerasi tidaklah tetap, maka perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui seberapa tepat pengisian yang optimal agar dihasilkan kinerja yang maksimal.

## METODE

### Langkah Pembuatan Alat Dan Pengujian



**Gambar 1. Set Up Peralatan Uji**

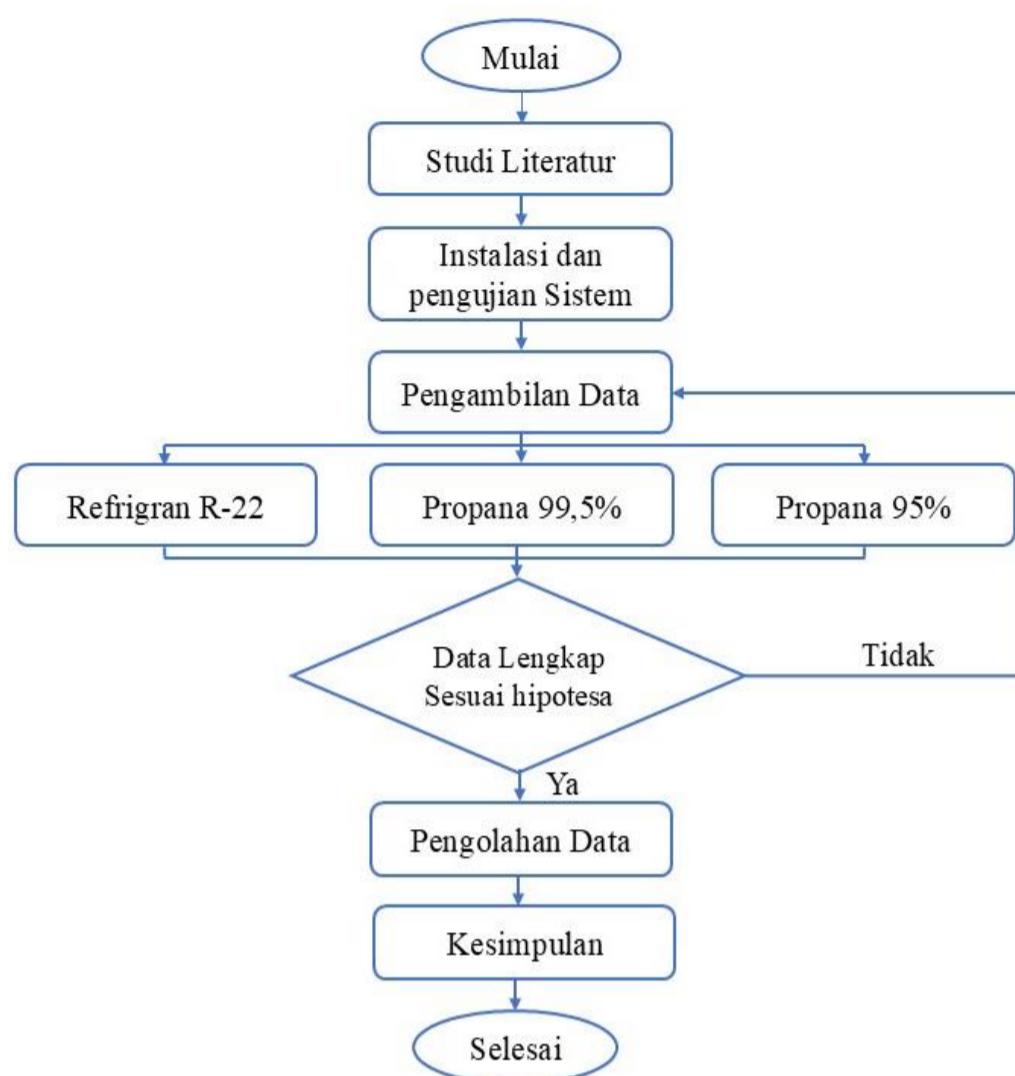
## PROSEDUR PENGUJIAN

Prosedur pengujian yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengujian mesin pendingin dilakukan di ruangan Laboratorium Refrigerasi (*Training Center*) Universitas Diponegoro Semarang.
  2. Pengujian sistem dilakukan dengan menggunakan variasi temperatur masuk evaporator sebagai beban pendinginannya. Temperatur yang digunakan masing-masing 20°C, 23°C, 25°C, 29°C.
  3. Pengujian dilakukan dengan berat (massa) pengisian refrigeran HCFC 22 sesuai spesifikasi.
  4. Sebagaimana pengujian dengan HCFC 22, pengujian refrigeran Propana dilakukan dengan beban pendinginan yang sama.
- Besaran-besaran yang diperoleh datanya, diberikan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Besaran-besaran yang akan diukur pada pengujian**

No	Besaran	Satuan
1	Temperatur keluar evaporator TDB/TWB	°C
2	Temperatur keluar condenser TDB/TWB	°C
3	Temperatur Masuk Evaporator TDB/TWB	°C
4	Temperatur Masuk Kondensor TDB/TWB	°C
5	Temperatur masuk katup ekspansi	°C
6	Temperatur keluar katup ekspansi	°C
7	Temperatur masuk Kompresor	°C
8	Temperatur Keluar Kompresor	°C
9	Tekanan Masuk Kompresor	Psig
10	Tekanan Keluar Kompresor	Psig
11	Tekanan Masuk Ekspansi	Psig
12	Tekanan Keluar Ekspansi	Psig
13	Temperatur Ruang	°C
14	Arus	Amper
15	Tegangan	Volt
16	Kecepatan Udara Keluar Evaporator	m/s



Gambar 4. Diagram alir penelitian

#### Teknik Analisa Data

Selesai pengujian, tahapan penelitian dilanjutkan dengan pengolahan data. Dengan bantuan perangkat lunak **Refprop**, kemudian hasilnya dibandingkan antara sistem yang menggunakan refrigeran HCFC 22 dengan Propana 99,5% dan Propana 95% pada berbagai variasi temperatur, sehingga kinerjanya sistem dapat diketahui.

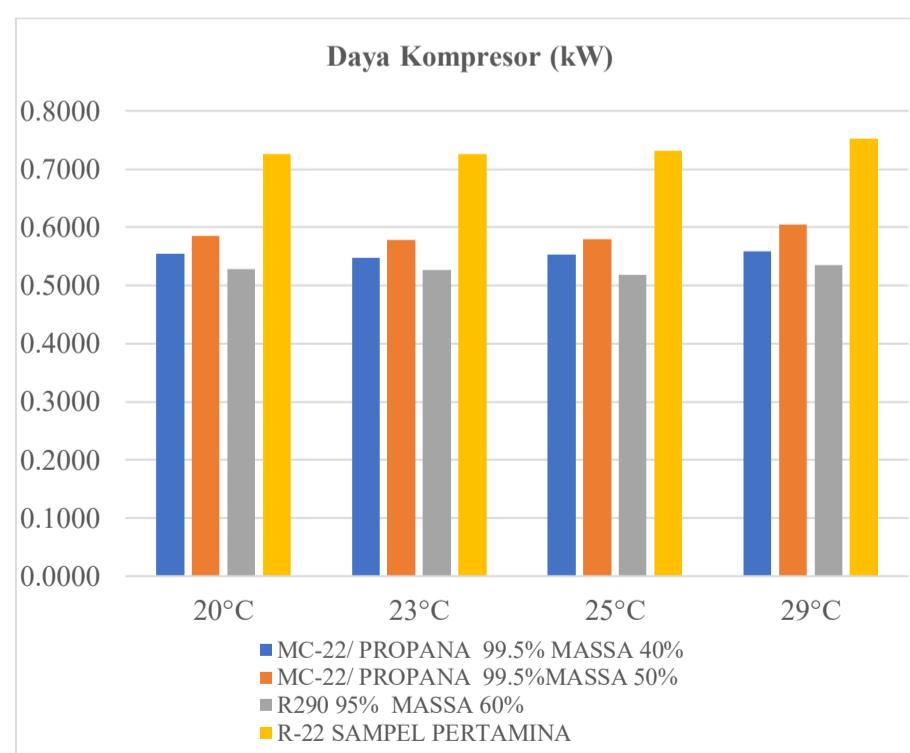
#### HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Hasil Terbaik Dilihat Dari Daya Kompresor

Daya kompresor adalah parameter penting yang menunjukkan kebutuhan energi sistem pendingin dalam menjalankan siklus kompresi uap. Berdasarkan hasil pengujian, sistem AC split 1 PK yang menggunakan R22 memiliki konsumsi daya tertinggi pada semua variasi temperatur udara masuk evaporator, khususnya pada suhu 29°C, dengan daya mendekati 0,83 kW.

Sebaliknya, penggunaan refrigeran hidrokarbon seperti MC22 (Propana 99,5%) menunjukkan penurunan daya yang signifikan, dengan rata-rata penghematan energi sekitar 10–15% dibanding R22. Mesin AC yang diisi MC22 dengan pengisian 50% menunjukkan kebutuhan daya paling tinggi di antara MC22 lainnya, namun masih lebih rendah dibanding R22. Sementara itu, pengisian propana 95% pada massa 50% memiliki konsumsi daya yang lebih rendah dari R22, meskipun sedikit lebih tinggi dari MC22.

Hasil ini diperkuat oleh penelitian (Devotta et al., 2005) yang menyimpulkan bahwa penggunaan R290 sebagai pengganti R22 dalam sistem AC tipe window menghasilkan efisiensi konsumsi energi yang lebih baik, dengan pengurangan daya sebesar 12,4–13,5%. Studi lain oleh (Fatouh & El Kafafy, 2006) juga mendukung bahwa propana murni memiliki performa termal yang setara atau bahkan lebih efisien daripada R134a dan R22 dalam kondisi operasional tertentu.



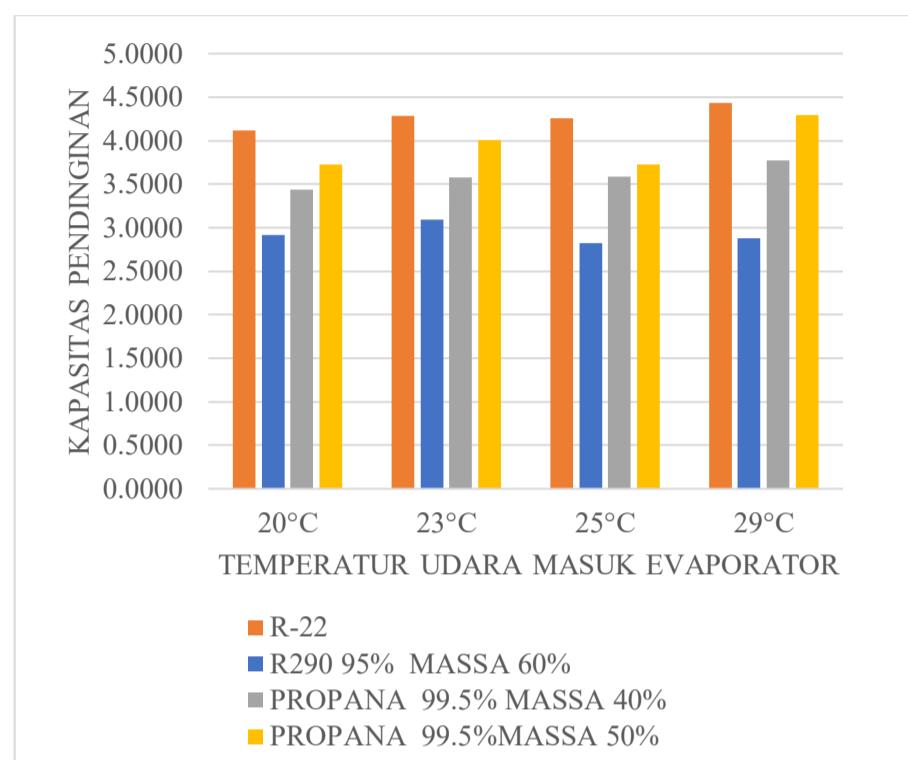
Gambar 5. Daya kompresor untuk MC22 (variasi massa 40% dan 50%) , propana 95% (massa 50%) dan R22 untuk temperatur udara masuk evaporator divariasikan 20°C, 23°C, 25°C dan 29°C

### Hasil Terbaik Dilihat Dari Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan (cooling capacity) merupakan kemampuan sistem untuk menyerap panas dari ruang melalui evaporator, yang dipengaruhi oleh perbedaan entalpi dan laju aliran massa refrigeran. Dalam pengujian ini, MC22 (massa 50%) dan R22 menunjukkan performa kapasitas pendinginan yang mendekati atau bahkan sebanding pada temperatur udara masuk evaporator 25°C dan 29°C. Hal ini menunjukkan bahwa MC22 pada muatan tertentu memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap beban pendinginan tinggi.

Namun, pada suhu lebih rendah (20°C dan 23°C), R22 tetap unggul dalam menghasilkan kapasitas pendinginan. Hal ini disebabkan oleh densitas R22 yang lebih tinggi, sehingga laju aliran massa lebih besar. Sebaliknya, propana memiliki densitas yang lebih rendah sehingga membutuhkan volume pengisian yang presisi untuk mencapai performa maksimal.

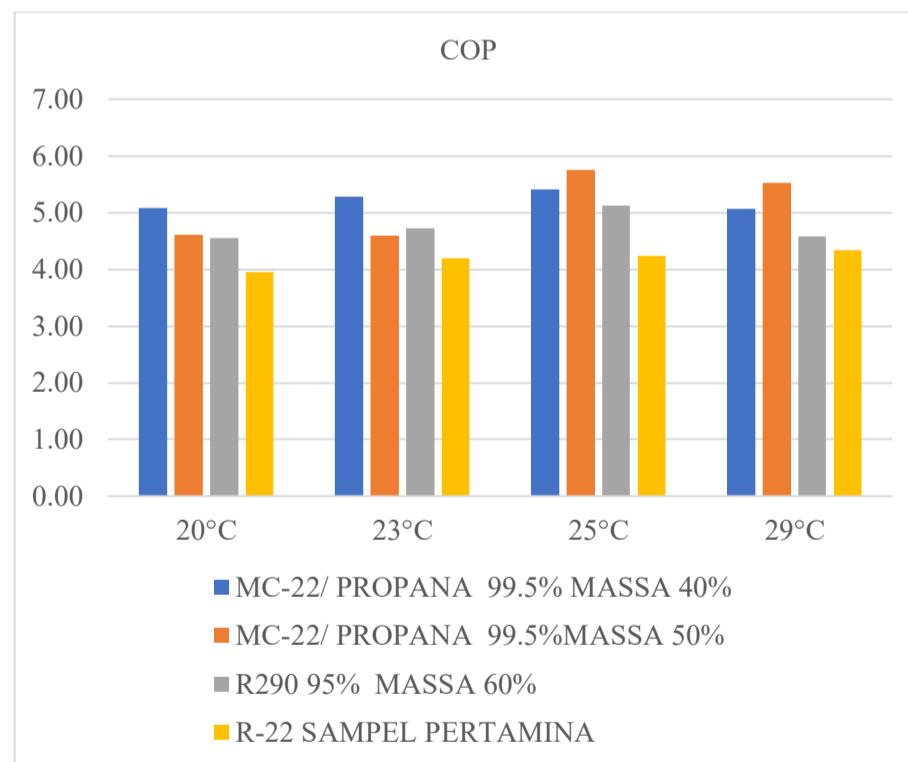
Studi oleh (Zhou & Zhang, 2010) mendukung temuan ini, di mana disebutkan bahwa pada suhu tinggi, R290 menunjukkan kinerja termal yang kompetitif terhadap R22. Selain itu, menurut (Kwon et al., 2017), sensitivitas sistem terhadap pengisian refrigeran menjadi faktor penting dalam mempertahankan kapasitas pendinginan optimal, terutama pada sistem dengan refrigeran hidrokarbon.



**Gambar 6. Kapasitas pendinginan untuk Propana (variasi massa 40% dan 50%), propana 95% (massa 50%) dan R22 untuk temperatur udara masuk evaporator divariasikan 20°C, 23°C, 25°C dan 29°C.**

### Hasil Terbaik Dilihat Dari *Coefficient of Performance* (COP).

COP menunjukkan MC22 (variasi massa 40% dan 50%), propana 95% (massa 50%) dan R22 untuk temperatur udara masuk evaporator divariasikan 20°C, 23°C, 25°C dan 29°C. Dari Gambar 7, COP MC 22 dengan muatan 40% ada temperatur udara masuk evaporator 200C, 230C mempunyai nilai lebih tinggi dibanding dengan refrigeran yang lainnya. Sedangkan COP MC 22 dengan muatan 50% ada temperatur udara masuk evaporator 25°C, 29°C mempunyai nilai lebih tinggi dibanding dengan refrigeran yang lainnya. Atau dengan perkataan lain, COP mesin AC yang diisi MC 22 40% mempunyai nilai tertinggi untuk beban pendinginan rendah, sedangkan MC 22 50% mempunyai nilai tertinggi untuk beban pendinginan tinggi.



**Gambar 7. COP untuk MC22 (variasi massa 40% dan 50%) , propana 95% (massa 50%) dan R22 untuk temperatur udara masuk evaporator divariasikan 20°C, 23°C, 25°C dan 29°C.**

### KESIMPULAN

1. Pada penelitian ini diketahui bahwa kapasitas pendinginan dan arus listrik naik dengan bertambahnya temperatur udara masuk evaporator begitu pula COP dan arus listrik naik dengan bertambahnya temperatur udara masuk evaporator.
2. Hidrokarbon/Propana mempunyai efek refrigerasi yang hampir dua kali lipat dari efek refrigerasi R22. Efek refrigerasi ini semata-mata ditentukan oleh sifat termodinamika suatu zat, oleh karena itu hidrokarbon sangat baik untuk dijadikan refrigeran untuk suatu mesin AC.
3. Kapasitas pendinginan R22 lebih baik dibandingkan dengan kapasitas pendinginan Propana 95%, hal ini disebabkan oleh pengisian R22 yang jauh lebih tinggi dari pengisian hidrokarbon. Jumlah refrigeran yang dimasukkan di mesin AC menentukan laju aliran massa refrigeran.
4. daya atau kebutuhan energi listrik terbesar adalah R22, kemudian diikuti oleh Propana 95% dengan pengisian 60%, 50%, 40% dan 30%. Kebutuhan daya listrik R22 lebih besar 1,5 kalinya kebutuhan daya listrik untuk refrigeran hidrokarbon.

5. COP Propana 95% dengan pengisian 60% paling tinggi, kemudian disusul oleh R22. Sedangkan Propana 95% dengan pengisian 30%, 40% dan 50% mempunyai COP yang lebih rendah.
6. MC-22/Popana 99.5% mempunyai efek refrigerasi yang hampir dua kali lipat dari efek refrigerasi R22, Efek refrigerasi paling besar terjadi pada MC22 dengan variasi Massa sebesar 40%.
7. kapasitas pendinginan R22 pada semua pembebanan lebih baik dibandingkan dengan kapasitas pendinginan MC-22/Propana 99.5% kecuali pada MC-22 pada massa 50% dengan pembebanan 25°C dan 29°C, hal ini disebabkan oleh pengisian R22 yang jauh lebih tinggi dari pengisian hidrokarbon.
8. Daya atau kebutuhan energi listrik terbesar adalah R22, kemudian diikuti oleh MC-22/Propana 99.5% dengan pengisian 60%, 50%, 40% dan 30%. Kebutuhan daya listrik R22 lebih besar 1,5 kalinya kebutuhan daya listrik untuk refrigerasi hidrokarbon.
9. COP MC-22/Propana 99.5% dengan pengisian 50% paling tinggi, kemudian disusul oleh massa 40%. Sedangkan R22 dan MC-22/Propana 99.5% dengan pengisian 30% dan 60% mempunyai COP yang lebih rendah.
10. Popana 95% dengan variasi Massa 40% memiliki refrigerasi yang paling besar dari efek refrigerasi MC-22/Propana 99.5%.
11. kapasitas pendinginan MC-22/Propana 99.5% pada variasi Massa 40% lebih baik dan stabil dibandingkan dengan kapasitas pendinginan dengan variasi massa yang lainnya serta Propana 95%.
12. daya atau kebutuhan energi listrik terbesar adalah MC-22/Propana 99.5% dengan massa 60%, kemudian diikuti oleh MC-22/Propana 99.5% dengan pengisian 50%, 40%, Propana massa 60%, Mc-22 30%, Propana 95% dengan massa 50% 40% dan 30%.
13. COP MC-22/Propana 99.5% dengan pengisian 50% paling tinggi, namun pada MC-22/Propana 99.5% dengan massa 40% paling stabil dan memiliki nilai yang tinggi, kemudian disusul oleh Propana 95% dengan Massa 60%. Sedangkan Propana 95% dengan pengisian 30%, 40% dan 50% mempunyai COP yang lebih rendah.

## REFERENSI

- Cho, H., Ryu, C., Kim, Y., & Kim, H. Y. (2005). Effects of refrigerant charge amount on the performance of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump. *International Journal of Refrigeration*, 28(8), 1266–1273. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.09.011>
- Devotta, S., Padalkar, A. S., & Sane, N. K. (2005). Performance assessment of HC-290 as a drop-in substitute to HCFC-22 in a window air conditioner. *International Journal of Refrigeration*, 28(4), 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.09.013>
- Fatouh, M., & El Kafafy, M. (2006). Assessment of propane/commercial butane mixtures as possible alternatives to R134a in domestic refrigerators. *Energy Conversion and Management*, 47(15–16), 2644–2658. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.018>
- K., B. F. T., & Tanaka, I. R. (2019). Experimental study of small wall room air conditioner for R-22 retrofitted with R290 95.5%. *AIP Conference Proceedings*, 2062, 020019. <https://doi.org/10.1063/1.5086566>
- Kwon, C., Kim, M. S., Choi, Y., & Kim, M. S. (2017). Performance evaluation of a vapor injection heat pump system for electric vehicles. *International Journal of Refrigeration*, 74, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.10.004>
- Ridwan Tanaka, I., Fajar, B., Suryo Utomo, T., Yohana, E., & Mustaqim. (2018). Experimental Study Performance R-22 AC Split Retrofitted With Propane. *MATEC Web of Conferences*, 159, 02021. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815902021>
- Stocker, T. (Ed.). (2014). *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Zhou, G., & Zhang, Y. (2010). Performance of a split-type air conditioner matched with coiled adiabatic capillary tubes using HCFC22 and HC290. *Applied Energy*, 87(5), 1522–1528. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.005>