

POWERPLANT

Arief Suardi Nur Chairat
Vendy Antono

Rancang Bangun Metode Pembelajaran Praktikum CAD/CAM Dengan Menggunakan Perangkat Lunak Gratis

Hendri
Suhengki
Panji Ramadhan

Analisa Efisiensi Boiler Dengan Metode Heat Loss Sebelum dan Sesudah Overhaul PT. Indonesia Power UBP PLTU Lontar Unit 3

Eko Sulistyو
Fadel Muhammad

Analisis Kekuatan Pipa Glass-Fiber Reinforced Epoxy Terhadap Beban Impak, Beban Tekuk, dan Beban Tekan di JOB Pertamina-PetroChina East Java

Roswati Nurhasanah

Pengaruh Penggunaan LSHX terhadap Performance Mesin Pendingin Dengan Laju Aliran Massa yang Sama Pada Kondisi Transient

Utami Wahyuningsih
Kartiko Eko Putranto
Edy Supriyadi

Strategi Pengembangan dan Pelayanan Industri Optik Untuk Meningkatkan Minat Pelanggan Agar Kembali (Studi Optik XYZ Bekasi)

Suhengki
Prayudi

Pengaruh Beban Pendingin terhadap Kinerja Mesin Pendingin Dengan refrigerant R134a dan MC134

Prayudi
Hendri
Dimas Indra Wijaya

Analisis Performa Kondensor Sebelum dan Sesudah Overhaul di PT. Indonesia Power UJP PLTU Lontar Banten Unit 3



9 772356 151002

SEKOLAH TINGGI TEKNIK-PLN

JURNAL POWERPLANT

Vol. 4

No. 4

Halaman
211-287

Mei
2017

ISSN
2356-1513

PENGARUH PENGGUNAAN *LSHX* TERHADAP PERFORMA MESIN PENDINGIN DENGAN LAJU ALIRAN MASSA YANG SAMA PADA KONDISI *TRANSIENT*

Roswati Nurhasanah

Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik – PLN

Email : rosватinurhasanah@gmail.com

ABSTRACT

There are three things that affect the development of of vapor compression refrigeration system : energy saving, non-ODP and non-GWP refrigerant charges. Keep in mind that the effect on GWP refrigerant and ODP substances occurs only when the substance is released into the atmosphere due to leakage in the refrigeration machine or replacement and recycling of refrigerant. Vapor compression refrigeration system is still used, as well as the type of refrigerant used predominantly of HCFC R22 and HFC R404A environmentally damaging and is scheduled to be removed. So to find an alternative refrigerant that is environmentally friendly and has a good refrigeration capacity such as by adding LSHX technology (Liquid Suction Heat Exchanger). LSHX technology is the use of heat exchanger equipment between the liquid line out the condenser and compressor inlet suction line. The present experimental used three refrigerant different i.e HFC R404A, as a comparison used to replace HCFC R22 and for replacement synthetic refrigerant used hydrocarbon R290 in the vapor compression refrigeration system with LSHX In transient conditions until steady conditions. The refrigeration system was charged with 2 kg of mass, 27°C ambient temperature, and for the calculation using software REFPROP 6. This research conducted in Refrigeration Workshop (Bengkel Pendingin) STT-PLN Jakarta. The results obtained showed the effect LSHX with same mass flow rate, trend the steady state temperature of evaporation HCFC R22 decreased of -16,7°C be -18,2°C, HFC R404A of -19,9°C be -22,2°C and HC R290 of -24,2°C be -27,6°C. Increase the COP, for HCFC R22 from 3,29 to 3,39, HFC R404A from 2,76 to 2,85 and HC R290 from 3,43 to 3,50.

Keywords: *LSHX, R22, R404A, R290, COP*

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan Wankhede, U.S, 2009, pada siklus refrigerasi kompresi uap sederhana, fasa *refrigerant* keluar kondenser adalah *saturated liquid*. Untuk meningkatkan kinerja sistem pengkondisian udara dan refrigerasi kompresi uap biasanya digunakan beberapa metode, diantaranya yaitu *subcooling*. Jenis *heat exchanger* yang digunakan adalah jenis *Liquid Suction Heat Exchanger (LSHX)* karena efektif dalam (1) meningkatkan kinerja sistem (2) *subcooling refrigerant* cair untuk mencegah pembentukan gas *flash* pada lubang ke katub alat ekspansi (3) sisa cairan sepenuhnya menguap dalam *liquid-suction* sebelum mencapai Kompresor (Klein et.al, 2000).

Refrigerant HCFC R22 dan *HFC R404A* merupakan *refrigerant* yang dijadwalkan untuk dihapuskan masing-masing pada tahun 2030, mulai tahun 2019 akan dikurangi penggunaannya hingga 10% dan dijadwalkan

dihentikan pada tahun 2024 penggunaannya untuk negara-negara maju. Sedangkan untuk negara-negara berkembang, *HCFC* mulai dihapus mulai tahun 2040.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mencari pengganti *refrigerant* jenis R22. Penelitian sistem kompresi uap dengan *subcooling* dengan menggunakan *refrigerant* R410A, R507A, dan R407C sebagai pengganti R22 pada temperatur evaporasi antara -15 °C s.d 15 °C. Hasil penelitian diperoleh bahwa R410A dan R407C memiliki sifat fisik dan termodinamika yang mendekati R22. Kinerjanya serupa dengan R22. *Refrigerant* R410A memiliki *COP* yang lebih rendah, tetapi kapasitas pendinginannya lebih besar dari pada R22. Dengan membandingkan *COP*, rasio tekanan yang diuji dan dampak lingkungan terhadap ozon, *refrigerant* R410A dan R407C sebagai pengganti *refrigerant* R22 (Paharia, Ashish Kumar ang Gupta, R.C., 2013). Penggunaan *subcooling* dalam *LSHX* akan

meningkatkan performa sistem pendingin, menaikkan *COP*, mengurangi kerja kompresor dan *spesifik power* sistem.

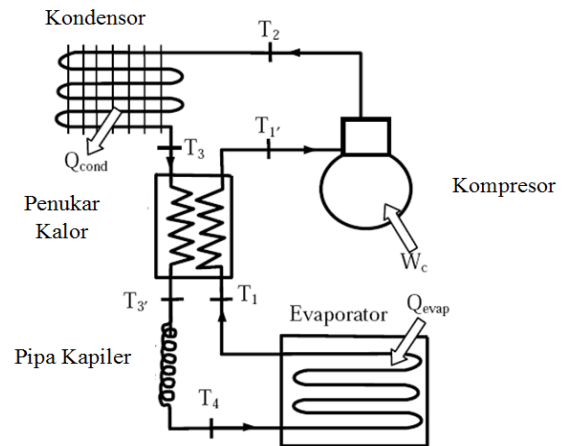
Penggunaan *LSHX* dengan R404A, mengakibatkan tekanan *discharge* mengalami kenaikan, sedangkan tekanan *suction* menurun. Temperatur evaporasi mencapai $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dari kondisi $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dari sisi *COP*, maka penggunaan *LSHX* mengakibatkan penurunan *COP* dari 2,18 ke 2,10. daya listrik menurun dari rata-rata 303,78 Watt menjadi 274,78 Watt (Nuriadi, dkk. 2010).

Refrigerant R290, R600, R600a sebagai alternatif R134a dalam sistem refrigerasi kompresi uap dengan *subcooling* pada temperatur kondensasi $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur evaporasi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tekanan dan temperatur jenuh R600 dan R600a memiliki karakteristik yang sama dengan R134a, tekanan jenuh R290 lebih besar daripada R134a. Kinerja R600 dan R600a dalam sistem refrigerasi dengan *subcooling* lebih baik daripada R290 dan R134a (Balaji, 2013).

Dari berbagai penelitian diatas, bahwa salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas refrigerasi dalam sistem pendingin kompresi uap standar digunakan teknologi *LSHX*, yang dipengaruhi pula oleh jenis *refrigerant* yang digunakan. Saat ini sistem refrigerasi *subcooling* masih didominasi menggunakan *refrigerant* sintetik yang memiliki potensi *ODP* dan *GWP*. *Cold storage* yang ada di STT-PLN merupakan miniatur dari *cold storage* yang ada di industri dan masih menggunakan *refrigerant* sintesis *HFC* R404A, yang memiliki potensi *GWP* hingga 3920. Sehingga menggantikan *refrigerant* sintetik menjadi *refrigerant* hidrokarbon dapat menjadi solusi yang saat ini masih dalam tahap pengembangan. Penelitian ini difokuskan pada pengaruh penggunaan *heat exchanger* jenis *liquid suction heat exchanger* sebagai salah satu cara untuk meningkatkan performa mesin pendingin dan untuk mengganti *refrigerant* sintetik digunakan *refrigerant* ramah lingkungan jenis hidrokarbon, yaitu R290 pada sistem refrigerasi kompresi uap dengan penggunaan *LSHX* pada kondisi *transient*. Sebagai pembandingan, dilakukan penelitian yang sama menggunakan *refrigerant* sintetik *HCFC* R22 dan *HFC* R404A.

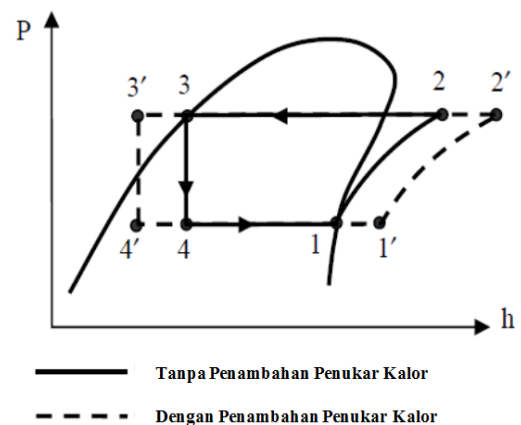
II. KAJIAN LITERATUR

Dalam skematik diagram, sistem refrigerasi kompresi uap dengan *subcooling* diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Skematik Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Dengan *Subcooling* (Balaji, 2010)

Berdasarkan gambar 1, cairan temperatur tinggi keluar dari kondensator pada kondisi *subcooling* dalam penukar kalor sebelum masuk pada katup ekspansi menuju tekanan evaporator. Penukar panas *subcooling* adalah alat penukar panas yang memindahkan panas secara tidak langsung dari cairan *refrigerant* pada tekanan dan temperatur tinggi keluar dari kondensator ke uap *refrigerant* temperatur rendah yang meninggalkan *evaporator*. Penukar panas *subcooling* ini berdampak pada sistem refrigerasi. Adapun untuk diagram p-h sistem Refrigerasi Kompresi uap dengan *subcooling* ditunjukkan oleh gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Diagram p-h Siklus Refrigerasi tanpa dan dengan *subcooling*

Berdasarkan gambar 2 Besarnya peningkatan kapasitas adalah fungsi dari *refrigerant* tertentu, efektivitas penukar panas, dan kondisi operasi sistem. RC_{sub} adalah kapasitas refrigerasi dengan *subcooling* dan RC adalah kapasitas refrigerasi tanpa *subcooling* yang ditunjukkan oleh persamaan (1) dan persamaan (2) (Bolaji, 2010)(Sukamto, 2014), yaitu :

$$RC=(h_1-h_4) \tag{1}$$

$$RC_{LSHX}=(h_1-h_4') \tag{2}$$

Kerja kompresor tanpa penggunaan *LSHX* ditunjukkan oleh persamaan (3) dan kerja kompresor tanpa penukar kalor *subcooling* dengan pemasangan penukar kalor *subcooling* ditunjukkan oleh persamaan (4))(Sukamto, 2014), yaitu :

$$w = (h_2 - h_1) \tag{3}$$

$$w_{LSHX} = (h_2' - h_1') \tag{4}$$

Sedangkan perbandingan tekanan *suction* dan *discharge* dinyatakan dalam *pressure ratio* (PR), yang ditunjukkan oleh persamaan (5) (Bolaji, 2012), yaitu :

$$PR = \frac{P_2}{P_1} \tag{5}$$

Pada kajian ini digunakan *efisiensi isentropik* pada kompresor dengan persamaan (6) (Sukamto, A.P, 2014)

$$\eta_{comp} = 0.874 - 0.0135 \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \tag{6}$$

Pendekatan lain yang digunakan untuk menghitung *COP* akibat penggunaan *subcooling* dikenalkan oleh Sukamto (2014), mengacu pada gambar 2 meskipun penyerapan kalor ini terjadi pada saluran evaporator, kuantitas kalor yang diserap yaitu $(h_1' - h_1)$ tidak dihitung sebagai kapasitas pendinginan pada mesin pendingin, oleh karena kapasitas pendinginan dari evaporator tersebut diserap oleh *subcooler* pada keluar kondenser. Sehingga nilai *COP* aktual mesin pendingin dengan *subcool* sesuai dengan persamaan (7)

$$COP_{LSHX} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \tag{7}$$

Refrigerant

HCFC Refrigerant R-22 adalah *refrigerant* yang paling umum digunakan pada mesin pengkondisian udara. *Refrigerant* ini memegang peranan penting dalam sistem refrigerasi, sejak ditemukan pada tahun 1930. Hal ini dikarenakan

memiliki properti fisika dan termal yang baik sebagai *refrigerant*, stabil, tidak mudah terbakar, tidak beracun dan kompatibel terhadap sebagian besar bahan komponen dalam sistem refrigerasi. *HCFC* dijadwalkan untuk dihapuskan pada tahun 2030 untuk negara-negara maju dan untuk negara-negara berkembang pada tahun 2040.

Kandidat lain *refrigerant* pengganti *refrigerant* jenis *CFC/HCFC* yang bebas klorin adalah *refrigerant* jenis campuran *HFC*. R404A sebagai pengganti R502 dan R22 dalam aplikasi pendinginan, sehingga berguna untuk aplikasi berbagai media dan pendinginan temperatur rendah. R404A telah disetujui oleh banyak produsen kompresor dan sistem pendingin untuk digunakan dalam peralatan pendingin baru seperti *display* makanan dan penyimpanan, ruang penyimpanan dingin, mesin es, transportasi, dan proses pendinginan. *Refrigerant* campuran *HFC* memiliki viskositas rendah dan *konduktivitas thermal* yang lebih tinggi, walaupun bebas klorin sehingga tidak mengakibatkan kerusakan ozon akan tetapi *HFC* masih memiliki pengaruh pemanasan global yang ditunjukkan dengan nilai *GWP* hingga mencapai 3920. Berdasarkan hasil amandemen *protocol monteneal* di Rwanda tahun 2016 untuk negara-negara maju penggunaannya akan dikurangi 10% mulai tahun 2019 dan dihentikan penggunaannya pada tahun 2024.

Berdasarkan Protokol Montreal, produksi dan penggunaan *CFC* telah dihapuskan pada tahun 2010, karena *CFC* merusak lapisan ozon. Sebagai *refrigerant* alternatif digunakan *hydro-flouro- carbon (HFC)*, akan tetapi walaupun tidak merusak ozon memiliki potensi penyebab pemanasan global yang lebih tinggi dari *CFC* dan *HCFC* sehingga perlu dicari *refrigerant* alternatif, yang diarahkan pada *refrigerant* alamiah. Salah satu kandidat yang mungkin dapat digunakan adalah adalah Hidrokarbon.

Refrigerant hidrokarbon merupakan *refrigerant* alami yang digunakan sebagai alternatif pengganti *refrigerant* sintetis baik *CFC/HCFC* maupun *HFC*. Karena *refrigerant* sintetis yang ada saat ini turut andil dalam proses menipisnya lapisan ozon dan meningkatnya pemanasan global di permukaan bumi. Dampak yang terjadi akibat kejadian itu adalah semakin bebasnya sinar ultraviolet masuk ke bumi sehingga berpengaruh pada kehidupan di bumi, seperti mengganggu pertumbuhan tanaman, merusak mata (katarak), kanker kulit, menurunkan kekebalan tubuh, mengganggu iklim dan mempercepat kerusakan bahan alam dan

sintetik, mulai dari kayu, karet sampai jenis plastik (Berman, Ega, 2012) maka perlu dicarikan *refrigerant* pengganti yang ramah lingkungan.

Pemakaian *refrigerant* hidrokarbon lebih efisien dibandingkan dengan *refrigerant* sintetik, ditinjau dari nilai *Coefficient Of Performance (COP)* yang lebih besar. Hal ini disebabkan sebagai berikut:

- a. Rasio tekanan (perbandingan tekanan dorong dengan tekanan hisap kompresor) yang lebih kecil dari rasio tekanan *refrigerant* sintetik. Hal ini mengakibatkan kecilnya kerja kompresor yang diperlukan sehingga menghemat konsumsi energi.
- b. Kalor laten dan kapasitas refrigerasi yang dimiliki lebih besar daripada *refrigerant* sintetik. Karakteristik ini mengakibatkan kapasitas pendinginan dan *cooling rate* yang lebih besar daripada kapasitas pendinginan dan *cooling rate* dengan *refrigerant* sintetik.
- c. Kerapatan (*density*) hidrokarbon yang lebih kecil dari kerapatan *refrigerant* sintetik. Hal ini mengakibatkan jumlah pemakaian hidrokarbon lebih sedikit, sekitar 30% dari berat penggunaan *refrigerant* sintetik untuk volume yang sama.
- d. Viskositas yang lebih kecil dari *refrigerant* sintetik. Hal ini mengakibatkan kecilnya rugi-rugi tekanan sepanjang sistem refrigerasi yang meringankan beban kompresor dan mengawetkan sistem refrigerasi.

Hidrokarbon dapat terbakar bila berada didalam daerah segitiga api yaitu tersedianya : hidrokarbon, udara dan sumber api. Jika salah satu dari ketiga faktor tersebut tidak terpenuhi maka proses kebakaran tidak akan terjadi. Hal ini mengakibatkan tidak akan terjadi kebakaran didalam sistem refrigrasi karena tidak adanya udara (tekanan sistem refrigrasi lebih tinggi dari tekanan atmosfer). Hidrokarbon termasuk kelompok refrigeran A3, yaitu refrigeran tidak beracun yang mempunyai batas nyala bawah (*Low Flammability Limit/LFL*).

R290 adalah nama umum untuk Propan murni (C₃H₈) cocok untuk digunakan dalam pendinginan dan industri AC. Seiring dengan pendingin alam lainnya, hidrokarbon seperti R290 digunakan dalam pendinginan dari pertengahan 1800-an hingga 1930-an. Karena dampak ramah lingkungan, R290 telah mendapatkan kembali popularitas sejak tahun 1990, dan sekarang menjadi alternatif umum *fluorocarbons* dalam berbagai aplikasi.

Dalam penelitian ini digunakan *refrigerant* ramah lingkungan R290, sebagai pembanding digunakan *refrigerant HCFC* R22 dan *HFC* R404A. Untuk mengetahui perbandingan *properties* dari ketiga *refrigerant* tersebut, maka dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 Perbandingan Properties R22, R404A dan R290

No	Parameter	Satuan	R22	R404A	R290
1	Rumus Kimia	-	CHCl F ₂	44%R125+ 52%R125a +4%R134a	C ₃ H ₈ / Propane
2	Massa Molekul	kg/ kmol	86,46 8	97,604	44,1
3	Titik Didih pada 101,325 kPa	°C	-40,81	-46,2	-42,1
4	Temperatur Kritis	°C	96,14 5	72,0 46	96,7
5	Tekanan Kritis	Bar	49,9	37,289	42,5
8	Flammability	-	Non-flammable	Non-flammable	2,3-7,3
9	ODP (Ozon Depleting Potential)	-	0,05	0	0
10	GWP (Global Warming Potential)	-	1810	3920	20

(Sumber : Venkataiah, 2014)

III. METODE PENELITIAN

Instalasi sistem refrigerasi yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua tipe, yaitu sistem refrigerasi seperti yang umum digunakan dengan kompresor Tecumseh/CAJ9480T ½ hp, kondenser *Shell and coils air coled condenser*, katup ekspansi jenis pipa kapiler panjang 90 cm, dan Evaporator Luvata, EVS40ED 0.291 kW. Kemudian tipe yang kedua yaitu sistem refrigerasi yang telah ditambahkan *heat exchanger* jenis *Tube in Tube Heat Exchanger*, sebagai alat penukar kalor antara fase *liquid* yang lebih rendah temperaturnya ke fase gas yang lebih tinggi temperaturnya. Sistem ini juga dilengkapi dengan alat ukur, aksesoris dan peralatan bantu lainnya seperti *Pressure gauge* dipasang pada bagian *suction* dan *discharge*. *Pressure gauge* jenis analog yang digunakan Merk REFCO, Nominal Range -30 psi s.d 230 psi, dengan akurasi pengukuran + 1,6%. Untuk keamanan, maka ditambahkan *pressure control* Merk Danfoss -0,2 s.d 8 bar dan HP yang diizinkan 17, maksimum 22 bar. *Differential (Bar)* 0.7–4 bar. Sedangkan alat ukur temperatur yang digunakan adalah termokopel digital Merk Elitect pada range temperatur -50°C s.d. 99°C, akurasi +1°C pada saat pengukuran -40°C ke 50°C, sedangkan akurasi +2°C pada rentang suhu yang lain seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Alat Uji yang Digunakan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan *LSHX* terhadap kinerja mesin pendingin dengan menggunakan *HFC* R404A, kemudian sebagai perbandingan digunakan *HCFC* R22 dan *HC* R290 pada kondisi *transient*. Berdasarkan pengujian awal, maka massa *refrigerant* R404A yang paling optimum adalah 2 kg. Dalam menentukan perbandingan, maka harus ada parameter yang dibuat sama, sehingga pada penelitian ini massa *refrigerant* yang ditetapkan sebesar adalah sama yaitu 2 kg dengan temperatur lingkungan dikondisikan 27°C dengan lamanya pengujian selama 120 menit. Adapun matrik pengujian seperti yang tercantum pada Tabel 2 dan Tabel 3 berikut ini.

Tabel 2. Matrik Pengujian tanpa menggunakan *LSHX*

No	Refrigerant	Massa Refrigerant Charging	P ₁	P ₂	T ₁	T ₁ '	T ₃	
1	HFC : R404A	Ditentukan (2 kg)						
2	HCFC : R22	Ditentukan (2kg)	Diukur pada saat eksperimental					
3	HC : R290	Ditentukan (2 kg)						

Tabel 2 menunjukkan pengujian tanpa menggunakan *LSHX*, parameter yang diukur terdiri dari tekanan pada sisi suction yaitu Tekanan masuk kompresor (p₁) dan tekanan pada sisi *discharge* yaitu tekanan keluar kompresor (p₂). Serta pengukuran temperatur pada tiga titik yang berbeda yaitu Temperatur keluar evaporator (T₁), Temperatur masuk suction kompresor (T₁'), temperatur keluar kondensor (T₃).

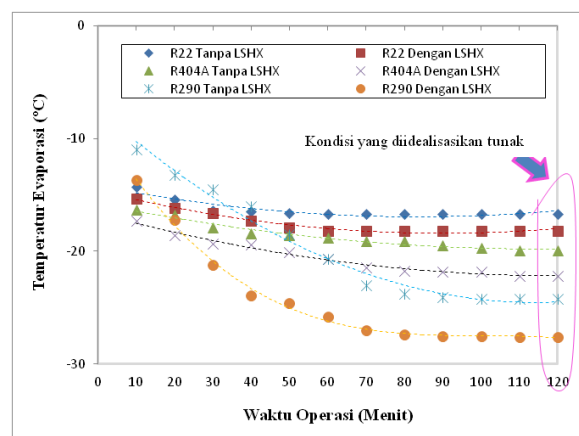
Tabel 3. Matrik Pengujian menggunakan *LSHX*

No	Refrigerant	Massa Refrigerant Charging	P ₁	P ₂	T ₁	T ₁ '	T ₃	T ₃ '
1	HFC : R404A	Ditentukan (2 kg)						
2	HCFC : R22	Ditentukan (2kg)	Diukur pada saat eksperimental					
3	HC : R290	Ditentukan (2 kg)						

Pada pengujian ini, maka *refrigerant* keluar kondensor sebelum masuk ke katup ekspansi (T₃), maka terlebih dahulu dialirkan ke *LSHX* hingga temperaturnya turun menjadi (T₃'). Sedangkan fluida yang mendinginkan berdasarkan aliran *refrigerant* keluar evaporator (T₁) dan keluar *LSHX* meningkat menjadi (T₁'). Sehingga pada pengujian ini parameter yang diukur terdiri dari tekanan pada sisi suction yaitu Tekanan masuk kompresor (p₁) dan tekanan pada sisi *discharge* yaitu tekanan keluar kompresor (p₂). Serta pengukuran temperatur pada empat titik yang berbeda yaitu Temperatur keluar evaporator (T₁), Temperatur masuk suction Kompresor setelah *LSHX* (T₁'), temperatur keluar kondensor sebelum *LSHX* (T₃), Temperatur keluar kondensor setelah *LSHX* (T₃').

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

HUBUNGAN WAKTU OPERASI TERHADAP TEMPERATUR EVAPORASI



Gambar 4 Hubungan Waktu Operasi dengan Perubahan Temperatur Evaporasi

Pada pengujian ini, temperatur awal pengoperasian pada kondisi 27°C. Berdasarkan Gambar 4 diatas, semakin lama mesin beroperasi, maka temperatur evaporasi memiliki kecenderungan menurun pada kondisi transien dan akibat adanya penggunaan *LSHX*

kecenderungan menyebabkan temperatur evaporasi yang dapat dicapai menjadi lebih rendah lagi dan konstan pada kondisi yang diidealisasikan tunak. Hal ini disebabkan oleh penurunan tekanan *suction* seiring dengan lamanya waktu operasi hingga kondisi tunak. Penggunaan *LSHX* mengakibatkan kecenderungan tekanan *suction* lebih rendah lagi dibandingkan tanpa penggunaan *LSHX*, sehingga temperatur evaporasi yang dapat dicapai pun menjadi lebih rendah akibat adanya penggunaan *LSHX*.

Pada pengujian ini, maka sistem refrigerasi mengalami perioda operasi transien, dimana keadaan temperatur evaporasinya masih berubah menurut waktu mulai dari *startup* sebagai akibat dari adanya produksi energi dalam yang digunakan untuk proses pemanasan hingga kondisinya yang diidealisasikan tunak. Idealisasi kondisi tunak pada penelitian ini adalah kondisi pengujian dimana parameter temperatur evaporasi yang dicapai tidak mengalami perubahan terhadap waktu. Jika ditinjau dari waktu operasi mesin, R22 cenderung lebih cepat mencapai kondisi tunak dibandingkan dengan *refrigerant* lainnya. R22 mencapai kondisi tunak mulai 55 menit pertama mesin beroperasi dengan temperatur yang dapat dicapai hingga $-16,7^{\circ}\text{C}$ tanpa tambahan *LSHX*, sedangkan akibat adanya penggunaan *LSHX* temperatur lebih rendah dapat dicapai, kondisi tunak mulai menit ke -59 hingga mencapai $-18,2^{\circ}\text{C}$. jika ditinjau pada kondisi tunak maka penurunan temperatur evaporasi mencapai 8,98%. Untuk *refrigerant* R404A temperatur *refrigerant* mencapai kondisi tunak hingga mencapai $-19,9^{\circ}\text{C}$ mulai menit ke 102 sebelum adanya penggunaan *LSHX*, sedangkan akibat adanya penggunaan *LSHX* temperatur yang dapat dicapai hingga $-22,2^{\circ}\text{C}$. Pada menit ke 105, pada kondisi tunak, prosentase penurunan temperatur evaporasi mencapai 11,56%.

Seperti halnya pada mesin refrigerasi yang menggunakan R22 dan R404A, maka penggunaan *LSHX* dengan menggunakan R290 juga mengakibatkan temperatur evaporasi menjadi lebih rendah. Sebelum penggunaan *LSHX* pada 97 menit mesin beroperasi, maka temperatur evaporasi $-24,2^{\circ}\text{C}$ dan bertahan hingga akhir pengujian, sedangkan akibat adanya penggunaan *LSHX* maka temperatur evaporasi cenderung menurun hingga mencapai $-27,6^{\circ}\text{C}$ mulai menit ke 104 mesin beroperasi hingga kondisi tunak pada akhir pengujian

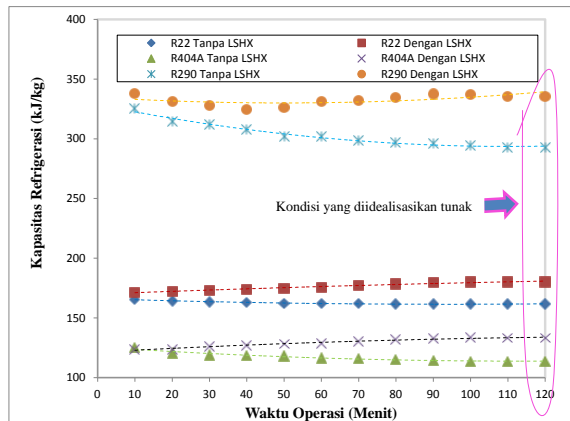
dengan prosentase penurunan temperatur evaporasi 14,05%.

Ditinjau dari karakteristik titik didihnya, maka titik didih dari R404A terendah mencapai $-46,2^{\circ}\text{C}$ sehingga temperatur evaporasi yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan temperatur evaporasi yang dapat dicapai dengan menggunakan R22, karena temperatur titik didih yang dimiliki R22 lebih tinggi yaitu sebesar $-40,81^{\circ}\text{C}$. sedangkan titik didih yang dimiliki oleh R290 mencapai $-42,1^{\circ}\text{C}$ akan tetapi temperatur evaporasi yang dapat dicapai paling rendah. Berdasarkan referensi, bahwa massa yang diperlukan oleh hidrokarbon untuk efek refrigerasi yang sama lebih rendah 30%, akan tetapi karena massa yang dicharging kedalam sistem sama, maka temperatur evaporasi yang dapat dicapai dengan R290 menjadi paling rendah. Sedangkan jika ditinjau dari waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi yang diidealisasikan tunak, maka yang paling cepat mencapai kondisi yang diidealisasikan tunak adalah R22, diikuti oleh R404A dan terakhir adalah R290. Salah satu kelebihan dari *refrigerant* sintetik adalah kondisinya lebih cepat stabil, karena R22 merupakan golongan *HCFC*, maka senyawa lebih stabil ditinjau dari ikatan molekulnya diikuti oleh *HFC* R404A, sedangkan *HC* R290 relatif lebih lambat mencapai kondisi yang diidealisasikan tunak karena memiliki senyawa hidrogen lebih banyak.

Secara umum ditinjau dari waktu operasi, maka penggunaan *LSHX* pada mesin refrigerasi memiliki kecenderungan mencapai kondisi tunak pada waktu yang lebih lama. Selain itu, penggunaan *LSHX* mengakibatkan temperatur evaporasi cenderung lebih rendah dibandingkan temperatur evaporasi mesin pendingin tanpa penggunaan *LSHX*. Temperatur evaporasi terendah dicapai oleh R290 dan lebih optimum jika ditambahkan *LSHX*.

HUBUNGAN WAKTU OPERASI TERHADAP KAPASITAS REFRIGERASI

Untuk mengetahui perubahan kapasitas refrigerasi sebagai fungsi waktu operasi mulai dari kondisi transien hingga kondisi tunak maka dapat dilihat pada gambar dibawah 5 dibawah ini.



Gambar 5 Hubungan Waktu Operasi dengan Perubahan Kapasitas Refrigerasi

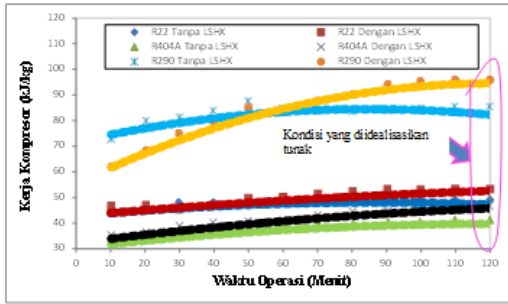
Berdasarkan gambar 5, ditinjau dari waktu operasi maka besarnya kapasitas refrigerasi cenderung menurun pada kondisi transien hingga mencapai kondisi tunak. Penurunan kapasitas refrigerasi ini diakibatkan oleh besarnya kalor yang diserap di dalam *box* pendingin semakin kecil sehingga perubahan entalpi masuk evaporator dan keluar evaporator cenderung lebih kecil. Jika ditinjau dari kenaikan kapasitas refrigerasi akibat penggunaan *LSHX*. Berdasarkan Sukamto, 2014 bahwa meskipun penyerapan kalor ini terjadi pada saluran evaporator, kuantitas kalor yang diserap antar keluar evaporator sebelum masuk *LSHX* dan keluar *LSHX* sebelum masuk kompresor tidak dihitung sebagai tambahan kapasitas refrigerasi pada mesin pendingin karena kapasitas pendinginan dari evaporator tersebut diserap oleh *subcooler* pada outlet kondenser. Sehingga besarnya kapasitas refrigerasi yang dianalisis adalah kapasitas refrigerasi antara keluar *LSHX* sebelum masuk ke pipa kapiler dan keluar evaporator.

Pada kondisi yang diidealisasikan tunak kenaikan kapasitas refrigerasi menggunakan R290 dari 293,10 kJ/kg menjadi 335,80kJ/kg atau meningkat sebanyak 14,57%. Sedangkan untuk R22 kenaikan kapasitas refrigerasi mencapai 11,46% dalam kondisi tunak dari 161,61 kJ/kg menjadi 180,13 kJ/kg akibat penggunaan *LSHX*. Selanjutnya R404A meningkat 17,08% dari 113,80 kJ/kg menjadi 133,24 kJ/kg. salah satu sifat *refrigerant* hidrokarbon adalah kalor laten dan kapasitas refrigerasi yang dimiliki lebih besar daripada *refrigerant* sintetik. Karakteristik ini mengakibatkan kapasitas pendinginan dan *cooling rate* yang lebih besar daripada kapasitas pendinginan dan *cooling rate* dengan *refrigerant*

sintetik. Sehingga kapasitas refrigerasi yang dihasilkan lebih besar dengan menggunakan R290 dibandingkan dengan menggunakan R22 dan R404A. Selain itu, besarnya kapasitas refrigerasi yang dihasilkan dipengaruhi pula oleh besarnya *density* yang dimiliki oleh *refrigerant*, karena dengan massa yang sama, untuk *density* yang rendah akan menghasilkan volume spesifik yang lebih besar. Pada kondisi tunak *density* untuk R22 menurun dari 11,63 kg/m³ menjadi 10,96 kg/m³, R404A dari 14,28 kg/m³ menjadi 13,67 kg/m³, dan R290 dari 4,00 kg/m³ menjadi 3,82 kg/m³. Pada pengujian ini jumlah massa yang disirkulasi dalam sistem adalah sama yaitu 2 kg, sehingga dengan jumlah massa yang sama akan tetapi karena *density* tiap refrigeran yang berbeda maka laju aliran volume refrigeran menjadi berbeda-beda. Semakin tinggi nilai *density* maka laju aliran volume semakin kecil kaapasitas refrigerasi yang dihasilkan lebih rendah, sedangkan semakin rendah nilai *density* suatu *refrigerant* maka laju aliran volume menjadi lebih besar akibatnya kapasitas refrigerasi yang dihasilkan lebih besar. Semakin besar kapasitas refrigerasi maka semakin besar kuantitas kalor yang diserap oleh evaporator. Dimana penggunaan *LSHX* akan menyebabkan peningkatan kapasitas pendinginan dari sistem refrigerasi. Berdasarkan analisis diatas, maka kapasitas refrigerasi terbesar menggunakan R290 dan lebih optimum setelah penggunaan *LSHX*.

HUBUNGAN WAKTU OPERASI TERHADAP KERJA KOMPRESOR

Kompresor merupakan komponen utama yang penting dalam suatu sistem refrigerasi, sehingga besarnya efisiensi kompresor akan berpengaruh terhadap performa suatu sistem pendingin. Adanya penggunaan *LSHX* menyebabkan kenaikan kapasitas refrigerasi, akan tetapi di sisi lainnya mengakibatkan pula kenaikan kerja kompresor. Untuk mengetahui perbandingan kerja kompresor maka dapat dilihat pada gambar 6 dibawah ini.



Gambar 6. Hubungan Waktu Operasi dengan Perubahan Kerja Kompresor

Berdasarkan gambar 6 jika ditinjau dari waktu operasi mesin refrigerasi, maka akibat dari penurunan temperatur evaporasi maka besarnya kerja kompresor cenderung meningkat dari kondisi transien hingga mencapai kondisi tunak. Peningkatan kerja kompresor dalam kondisi transien diakibatkan oleh kompresor yang melakukan kerja yang lebih besar untuk mengkompresi *refrigerant*, karena temperatur awal pengoperasian masih tinggi yaitu sama dengan temperatur lingkungan sebesar 27°C dan semakin lama semakin menurun hingga tercapai kondisi yang diidealisasikan tunak dengan temperatur evaporasi yang dicapai hingga mencapai -24,2°C untuk R290, -16,7°C untuk R22 dan -19,9°C untuk R404A tanpa penggunaan *LSHX* dan -27,6°C untuk R290, -22,2°C untuk R22 dan -18,2°C untuk R404A. Selain itu, besarnya kerja kompresor yang dilakukan dipengaruhi pula oleh besarnya *density* yang dimiliki oleh masing-masing *refrigerant*, karena dengan massa yang sama, untuk *density* yang rendah akan menghasilkan volume spesifik yang lebih besar.

Pada kondisi tunak *density* untuk R22 menurun dari 11,63 kg/m³ menjadi 10,96 kg/m³, R404A dari 14,28 kg/m³ menjadi 13,67 kg/m³, dan R290 dari 4,00 kg/m³ menjadi 3,82 kg/m³. Pada pengujian ini jumlah massa yang disirkulasi dalam sistem adalah sama yaitu 2 kg, sehingga dengan jumlah massa yang sama akan tetapi karena *density* tiap *refrigerant* yang berbeda maka laju aliran volume *refrigerant* menjadi berbeda-beda. Semakin rendah *density* suatu *refrigerant* maka laju aliran volume menjadi lebih besar akibatnya *refrigerant* yang dikompresi menjadi lebih besar dan kerja kompresor menjadi lebih besar. Sedangkan semakin tinggi *density* suatu *refrigerant* maka laju aliran volume menjadi lebih kecil akibatnya *refrigerant* yang dikompresi menjadi lebih sedikit dan kerja kompresor menjadi lebih kecil.

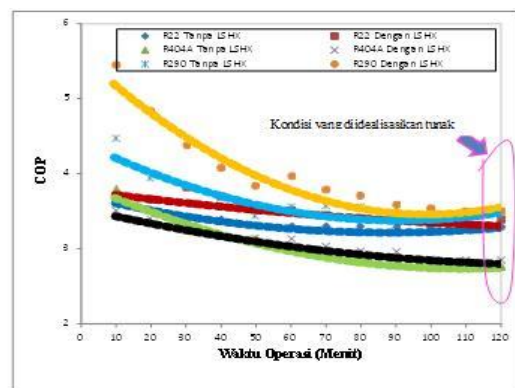
Parameter lain yang mengakibatkan kenaikan kerja kompresor pada kondisi transien adalah rasio tekanan, dimana kenaikan rasio kompresi mengakibatkan kerja kompresor menjadi lebih besar.

Penggunaan *LSHX* juga mengakibatkan kenaikan kerja kompresor, pada kondisi tunak kenaikan kerja kompresor untuk R22 sebesar 8,46% dari 49,05kJ/kg menjadi 53,20 kJ/kg akibat penggunaan *LSHX*. R404A mengalami kenaikan hingga 13,30% dari 41,21 kJ/kg menjadi 46,69 kJ/kg dan R290 adalah 12,24% dari 85,41 kJ/kg menjadi 95,86kJ/kg. Kenaikan kerja kompresor akibat penggunaan *LSHX* menunjukkan bahwa daya input pada kompresor menjadi lebih tinggi sehingga penggunaan *LSHX* mengakibatkan kerja kompresor yang lebih besar jika dibandingkan tanpa menggunakan *LSHX*.

Penggunaan *LSHX* mengakibatkan peningkatan kapasitas pendinginan dan mengakibatkan kenaikan kerja pada kompresor, sehingga besarnya total keuntungan penggunaan *LSHX* ditentukan oleh kinerja mesin pendingin yaitu *COP*.

HUBUNGAN WAKTU OPERASI TERHADAP KINERJA / COP

Kinerja mesin refrigerasi atau lebih dikenal dengan *COP* dipengaruhi oleh besarnya kapasitas refrigerasi dan juga kerja kompresor. Apabila kerja kompresor lebih besar dari kapasitas refrigerasi maka penggunaan *LSHX* akan mengakibatkan penurunan *COP*. Sedangkan apabila kapasitas refrigerasi yang ditimbulkan akibat penggunaan *LSHX* lebih besar dari kerja kompresor, maka penggunaan *LSHX* akan mengakibatkan kenaikan *COP*. Gambar 7 menunjukkan hubungan waktu operasi dengan perubahan *COP*.



Gambar 7. Hubungan Waktu Operasi dengan Perubahan *COP*

Dari gambar 7 diatas, terlihat bahwa pada kondisi transien maka *COP* cenderung menurun seiring lamanya pengoperasian mesin pendingin, hingga kondisi tunak besarnya *COP* stabil. Penurunan *COP* pada kondisi transien dipengaruhi oleh dua hal, yaitu semakin kecilnya kapasitas refrigerasi seiring waktu operasi mesin pendingin dan semakin besarnya kerja kompresor. Penurunan kapasitas refrigerasi ini diakibatkan oleh besarnya kalor yang diserap di dalam *box* pendingin semakin kecil sehingga perubahan entalpi masuk evaporator dan keluar evaporator cenderung lebih kecil, sedangkan peningkatan kerja kompresor dalam kondisi transien diakibatkan oleh kompresor yang melakukan kerja yang lebih besar untuk mengkompresi *refrigerant*, karena temperatur awal pengoperasian masih tinggi yaitu sama dengan temperatur lingkungan sebesar 27°C hingga tercapai kondisi yang diidealisasikan tunak dengan temperatur evaporasi yang dicapai hingga mencapai -24,2°C untuk R290, -16,7°C untuk R22 dan -19,9°C untuk R404A tanpa penggunaan *LSHX* dan -27,6°C untuk R290, -22,2°C untuk R22 dan -18,2°C untuk R404A sehingga kecenderungan nilai *COP* menurun pada kondisi transien hingga kondisi yang diidealisasikan tunak.

Pada kondisi tunak dengan menggunakan R290 kapasitas refrigerasi meningkat 14,57% dan kerja kompresor meningkat sebesar 12,24% sehingga karena kerja kompresor lebih rendah dari pada kenaikan kapasitas refrigerasi maka penggunaan *LSHX* akan memiliki kecenderungan meningkatkan *COP* yaitu dari 3,43 menjadi 3,50, Untuk R22 kapasitas refrigerasi meningkat 11,46% dan kenaikan kerja kompresor sebesar 8,46%, sehingga karena kerja kompresor lebih rendah dari pada kenaikan kapasitas refrigerasi maka penggunaan *LSHX* akan memiliki kecenderungan meningkatkan *COP* yaitu dari 3,29 menjadi 3,39. Selanjutnya R404A kapasitas refrigerasi pada kondisi tunak sebesar 17,08% dengan kenaikan kerja kompresor sebesar 13,30% sehingga karena kerja kompresor lebih rendah dari pada kenaikan kapasitas refrigerasi maka penggunaan *LSHX* akan memiliki kecenderungan meningkatkan *COP* yaitu dari 2,76 menjadi 2,85.

Sehingga secara umum walaupun penggunaan *LSHX* mengakibatkan kenaikan kerja kompresor, akan tetapi kenaikan kapasitas refrigerasinya lebih tinggi, maka penggunaan *LSHX* akan meningkatkan kinerja sistem refrigerasi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, dapat ditarik kesimpulan :

1. Pengaruh penggunaan *LSHX* dengan jumlah laju aliran massa yang sama, pada kondisi tunak memiliki kecenderungan menurunkan temperatur evaporasi, untuk R22 dari -16,7°C mulai menit ke-55 menjadi -18,2°C mulai menit ke-59, R404A dari -19,9°C mulai menit ke-102 menjadi -22,2°C mulai menit ke-105 dan R290 dari -24,2°C mulai menit ke-97 menjadi -27,6°C mulai menit ke-104.
2. Pengaruh penggunaan *LSHX* dengan jumlah laju aliran massa yang sama, maka memiliki kecenderungan meningkatkan *COP*, untuk R22 dari 3,29 menjadi 3,39, R404A dari 2,76 menjadi 2,85 dan R290 dari 3,43 menjadi 3,50.

DAFTAR PUSTAKA

- Bolaji and Zhongjie Huang. 2013. *Thermodynamic Analysis of hidrokarbon refrigerants in a sub cooling refrigeration system*. Journal of Engineering Research, Vol 1 No.1, pp. 317-333
- Bolaji B.O, 2014. *Influence Of Sub-cooling on the energy performance of two eco-friendly R22 alternative refrigerants*. Journal of Science and Technology, Vol. 34, No. 2, pp73-83.
- Bolaji B.O, Akintunde M.A., Falade T.O. 2010. *Theoretical Onvestigation of the Performance of Some Envoronment-Friendly Refrigerants ins Sub-Cooling Heat Exchanger Refrigeration System*, Journal of Science and Technology, Vol 30, No. 3, pp.101-108
- Nuriyadi, Muhammad, Samsul Kamal dan Hermawan. 2015. *Studi Eksperimental Pengaruh Aplikasi LSHX Terhadap Kinerja Sistem Refrigerasi Dengan Refrigeran R404A.*, IRWSN 2010. Hal 18.1-18.8
- Nuriyadi, Muhammad, Sumeru, Henry Nasution. 2015. *The effect of liquid suction heat exchanger subcooler on performance of a freezer using R404A as working fluid*, Jurnal Teknologi, Vol 76 No. 11, e-ISSN : 2180-3722, pp 57-61
- Paharia A.K., Gupta R.C., 2013. *Effect of Sub Cooling and Superheating on Vapor Compression Refrigerator Sistems Using R-*

- 22 *Alternative Refrigerants*, International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, Issue 3, Vol 1, ISSN : 2249-6149
- Sukanto, A.P. Edi, Triaji Pangripto P, Sumeru, dan Henry Nasution.2014. *Analisis Energi Peningkatan Kinerja Mesin Pendingin Menggunakan Liquid Suction Subcooler Dengan Variasi Temperatur Lingkungan*, SNTMUT 2014, ISBN 978-602-70012-0-6, pp KE09-1-8.
- Ariyanto. 2014. *Kaji Eksperimental Variasi Campuran Pronana dan Isobutana Sebagai Solusi Penggantian Refrigeran R22*. Prosiding SNTTAS Yogyakarta, ISSN 1907-5995. Hal. 419-424.
- Aziz, Azridjal. 2014. *Studi Eksperimental Mesin Refrigerasi Kompresi uap Menggunakan Refrigeran Hidrokarbon Substitusi R22 Pada Kondisi Tansient*. Prosiding SNTI-IV. ISSN : 2355-925X. hal 146-1-146-6.
- Berman, Ega. 2012. *Uji Performa Refrigeran Hidrokarbon MC 134 pada Refrigerator Dengan Tube in Tube Heat Exchanger* . TORSI, Volume X, No.2.
- S. Venkataiah et al. 2014. *Analysis of Alternative Refrigerants to R22 for Air-Conditioning Applications at Various Evaporating Temperatures*. Int. Journal of Engineering Research and Applications. ISSN : 2248. 9622, Vol. 4, Issue 3(Version 2), pp.39.4
- Nurhasanah, Roswati. Bambang Teguh.2017. *Pengaruh Penggunaan LSHX Terhadap Kinerja Mesin Pendingin Dengan Menggunakan Refrigeran HCFC, HFC dan Hidrokarbon*. Prosiding Sinergi 2017 ISSN : 2527-3108 hal 473-482.