

Pengaruh Pelumas Refrijeran pada Kinerja Alat Penukar Kalor Microchannel Sistem Tata Udara

Ardiyansyah Yatim^{1, a *}

¹Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, Jawa Barat, Indonesia 16424, Ph. 62-21-7270032, email: ardiyansyah@eng.ui.ac.id

Abstrak

Dalam sistem refrijerasi kompresi uap, sebagian kecil pelumas kompresor bercampur dan bersirkulasi bersama refrijeran melalui alat penukar kalor, sementara sebagian besar pelumas tetap di kompresor. Keberadaan pelumas mengakibatkan kerugian tekanan dan menjadi tambahan hambatan dalam proses pertukaran kalor di alat penukar kalor. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki retensi pelumas dan dampaknya pada perpindahan kalor dan jatuh tekanan refrijeran dan campuran pelumas dalam alat penukar kalor microchannel kondenser dan evaporator. Pengujian pengaruh pelumas dilakukan pada tipe alat penukar kalor *microchannel* tipe *louvered-fin* terbuat dari alumunium yang dipasang sebagai kondenser dan evaporator. Pasangan refrijeran-pelumas yang diuji adalah R410A+POE yang merupakan penerapan umum pada sistem pengkondisian udara.

Untuk jenis kondenser microchannel, hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pelumas yang tertahan dalam kondenser sangat tergantung pada fraksi massa pelumas (FMP) dalam campuran. Volume retensi pelumas meningkat jika FMP meningkat dan diukur hingga mencakup 11% dari total volume internal kondenser. Volume retensi pelumas untuk kondisi fluks massa refrijeran yang tinggi lebih tinggi daripada untuk kondisi fluks massa rendah dan efek fluks massa pada retensi pelumas kecil untuk FMP lebih rendah 3 wt.%. Pelumas mempengaruhi laju perpindahan kalor dari kondenser dan mengakibatkan penalti pada kapasitas perpindahan kalor sebanyak 10 %. Pelumas juga meningkatkan jatuh tekanan refrijeran pada kondenser hingga 19% lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi tanpa pelumas. Untuk evaporator microchannel diperoleh hasil bahwa volume retensi pelumas di evaporator diukur hingga 13% dari total volume internal evaporator. Pelumas mempengaruhi perpindahan kalor dari evaporator microchannel dan penalti kapasitas perpindahan kalor sebanyak 11%. Untuk sistem tata udara, ketika FMP yang sama atau kurang dari 1 wt. %, penurunan kapasitas perpindahan kalor berada pada jangkauan 4% dibandingkan dengan kondisi tanpa pelumas. Pelumas menurunkan tingkat perpindahan kalor dan dampaknya juga tergantung pada fluks massa. Penurunan tekanan pada sisi refrijeran di evaporator microchannel meningkat sebesar 10 sampai 25 persen ketika pelumas hadir dalam penukar kalor dan OMF berada di kisaran 1 wt.%.

Kata kunci : Pelumas, Refrijeran, Alat Penukar Kalor, Perpindahan Kalor, Jatuh Tekanan

Pendahuluan

Sistem pendingin berbasis kompresi uap membutuhkan minyak pelumas dalam operasi kompresornya. Fungsi pelumas tersebut adalah untuk mencegah kontak permukaan-ke-permukaan, menyerap panas, menyediakan penyegelan (*sealing*), mencegah kontaminan, mencegah korosi, dan untuk membuang kotoran akibat keausan. Dalam sistem tersebut, sebagian kecil pelumas kompresor

bercampur dan bersirkulasi bersama refrijeran melalui alat penukar kalor, sementara sebagian besar pelumas tetap di kompresor. Sebagian pelumas yang melewati alat penukar kalor tertahan di komponen tersebut dalam bentuk lapisan tipis di dinding komponen atau dalam campuran homogen dengan refrijeran di kantong-kantong kosong bagian dari alat penukar kalor. Retensi pelumas ini merupakan fungsi saling terkait dari sifat-sifat fluida campuran refrijeran-pelumas, geometri

penukar kalor dan konfigurasi aliran di dalamnya. Keberadaan retensi pelumas tersebut mengakibatkan kerugian tekanan dan menjadi tambahan hambatan dalam proses pertukaran kalor di alat penukar kalor baik sebagai hambatan termal maupun pengurang volume penukar kalor.

Studi pustaka mengenai pengaruh pelumas pada sistem pendingin dan pengkondisian udara dapat dilihat pada referensi [1-4]. Studi lebih awal pada pengaruh karakteristik pelumas dalam sistem pompa panas perumahan menggunakan R22, R407C, dan R410A dengan pelumas mineral (MO) dan polyolester sintetis (POE). Dari hasil pengujian direkomendasikan POE untuk refrijeran campuran baru seperti R407C dan R410A[5]. Upaya eksperimental dan analitis untuk menentukan karakteristik sirkulasi pelumas dari R134a/POE dan R134a/MO diterapkan dalam sistem *heat pump* perumahan dan dibandingkan dengan perilaku campuran R22/MO[6]. Laju aliran minimum untuk skenario terburuk pada aliran pelumas ditentukan pada kecepatan kritis yang terjadi pada *suction line* vertikal kompresor secara visual pada kecepatan 1,8-1,9 m/s (354-374 fpm). Karakteristik aliran kembali pelumas juga diselidiki oleh Mehendale dan Radermacher [7].

Meskipun upaya dalam meningkatkan sirkulasi pelumas, sebagian pelumas tidak dapat kembali ke kompresor dan dalam komponen sistem tata udara dan sistem pendingin, terutama alat penukar panas kondenser dan evaporator. Oleh karena itu, sangat penting untuk memperhitungkan jumlah retensi pelumas dalam rangka memberikan pemahaman yang lebih baik tentang pengaruhnya pada perpindahan panas dan penurunan kinerja jatuh tekanan dari alat penukar panas.

Dalam rangka untuk menentukan volume retensi pelumas, salah satu pilihan adalah dengan mengukur ketebalan film pelumas pada aliran annular [8]. Pendekatan yang sama dilakukan untuk menggambarkan karakteristik dari aliran viskos annular dari udara dan air atau udara dan pelumas SUS 300 Alkybenzene[9]. Visualisasi aliran eksperimental di pipa horisontal dan vertikal

diperlukan dan ketebalan lapisan pelumas berkorelasi dengan fluks massa dan diameter pipa. Korelasi tegangan geser dikembangkan dan diverifikasi dengan data eksperimen. Sayangnya teknik ini membutuhkan akses optik untuk aliran refrijeran dan mungkin tidak layak untuk tabung kecil di penukar panas microchannel. Kemudian pola aliran selama kondensasi dan evaporasi refrijeran dalam aplikasi tata udara dari penukar panas microchannel walaupun sebagian besar bersifat annular namun ketebalan film pelumas umumnya tidak seragam sepanjang jalur penukar panas sehingga metode ini tidak cukup baik diterapkan.

Beberapa peneliti menyelidiki pola aliran untuk campuran refrijeran-pelumas yang digunakan dalam sistem pendingin udara sementara banyak peneliti mempelajari karakteristik aliran untuk campuran bercampur udara/air atau udara/pelumas murni. Penelitian awal mengenai aliran campuran pelumas-refrijeran dilaporkan oleh Reidle et al.[10]. Analisis dilakukan untuk kecepatan gas minimum, fraksi void dan pelumas yang terperangkap dalam aliran uap refrijeran dan ketebalan lapisan pelumas. Baru-baru ini, tinjauan ekstensif dari karakteristik aliran dididih dan pola aliran campuran refrijeran pelumas disajikan oleh Bandarra Filho et al. [11] untuk aplikasi condenser dan evaporator.

Sebuah penelitian yang lebih baru pada pengukuran retensi pelumas di evaporator sirip-dan-tabung dan kondensor tata udara dan sistem pendingin diterbitkan oleh Cremaschi dkk. [12], Jenis refrijeran yang diadopsi meliputi R22, R410A, dan R134a dalam kombinasi dengan tiga jenis pelumas: pelumas mineral, POE dan polyalkylene glycole (PAG). Retensi pelumas ditemukan sebanding dengan fraksi massa pelumas (FMP) dari campuran refrijeran-pelumas di penukar panas, yang juga sering disebut sebagai rasio sirkulasi pelumas (*oil circulation ratio*, OCR). Retensi pelumas juga diamati sebanding dengan rasio antara viskositas lapisan cairan dengan viskositas uap refrijeran. Pada fluks massa yang tetap, peningkatan viskositas pelumas mengakibatkan peningkatan volume retensi

pelumas. Untuk kasus R410A-POE dengan FMP yang meningkat dari 1 sampai 5%, menyebabkan retensi pelumas dalam kondenser meningkat dari 1 hingga 8% dari total massa pelumas awal pada sistem. Untuk campuran R134a-POE retensi pelumas meningkat hingga 15% dari total pelumas awal di kondensor. Kehadiran pelumas di kondensor juga menyebabkan kenaikan jatuh tekanan hingga 1,13 kali dibandingkan dengan kondisi bebas pelumas.

Studi eksperimental efek pelumas pada kondensasi perpindahan panas dan karakteristik penurunan tekanan pelumas R410-POE dalam tabung *microchannel* tunggal dilakukan oleh Huang dkk. [13]. Efek dari pelumas yang signifikan terjadi pada fraksi massa pelumas 3-5%. Kehadiran pelumas ditemukan menurunkan koefisien perpindahan panas. Namun, menarik untuk dicatat bahwa jauh tekanan friksi dengan kehadiran pelumas lebih kecil daripada refrijeran murni. Penulis beralasan bahwa penurunan *pressure drop* adalah akibat perubahan rezim aliran ke dalam rezim aliran laminar ketika pelumas hadir. Investigasi efek pelumas pada distribusi refrijeran dalam penukar panas *microchannel* baru-baru ini dilaporkan oleh Li dan Hrnjak [14] dan mereka fokus pada evaporator. Para penulis mengusulkan model untuk distribusi refrijeran, yang dipengaruhi oleh pelumas yang beredar melalui evaporator. Penelitian lebih lanjut oleh penulis yang sama memasukkan model dan eksperimen untuk retensi pelumas di sistem pendingin udara otomotif yang memiliki kondensor *microchannel*[15].

Penelaahan terhadap hasil penelitian di menggambarkan bahwa belum ada studi yang menyediakan data retensi pelumas dalam kondenser dan evaporator *microchannel*. Studi tentang efek pelumas terhadap kinerja laju perpindahan panas refrijeran dan tekanan dalam jenis penukar panas juga masih sporadis dalam literatur. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki retensi pelumas dan dampaknya pada perpindahan kalor dan jatuh tekanan refrijeran dan campuran pelumas dalam alat penukar kalor *microchannel* kondenser dan evaporator.

Pengujian pengaruh pelumas dilakukan pada tipe alat penukar kalor *microchannel* tipe *louvered-fin* terbuat dari aluminium yang dipasang sebagai kondenser dan evaporator. Pasangan refrijeran-pelumas yang diuji adalah R410A+POE yang merupakan penerapan umum pada sistem pengkondisian udara.

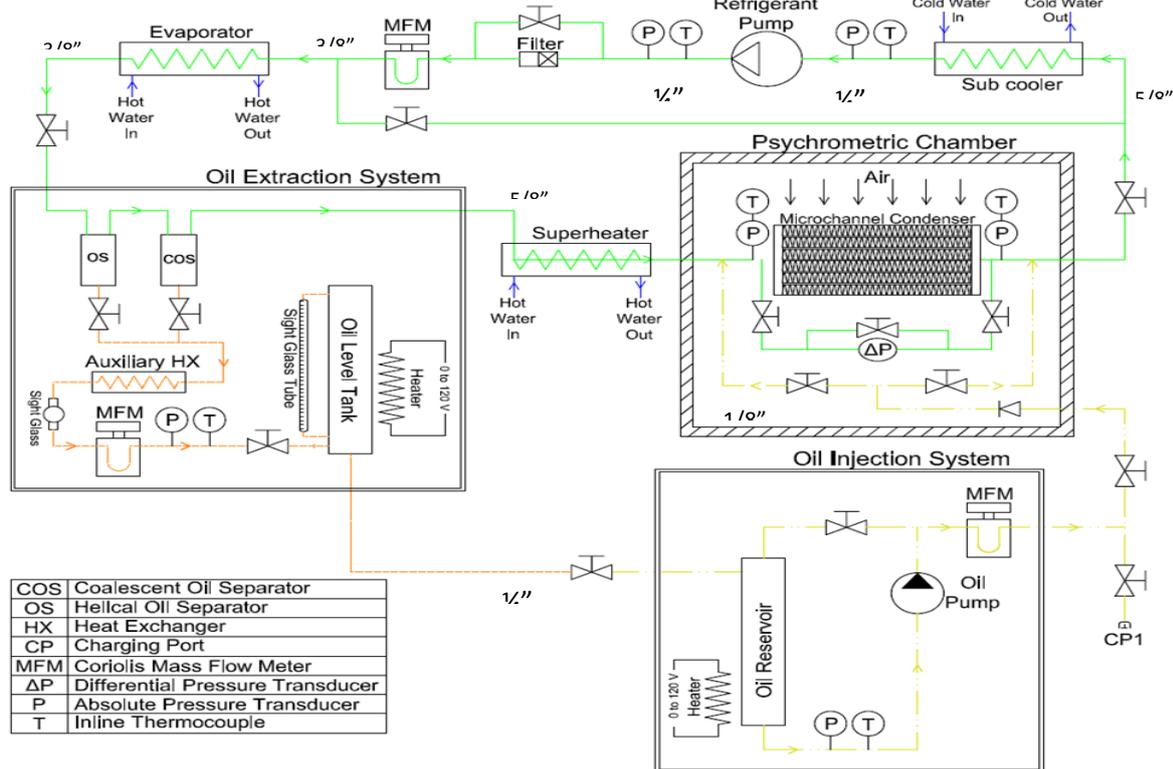
Setup Pengujian

Skema dari sistem pompa-boiler untuk pengukuran retensi pelumas dan efeknya pada perpindahan kalor dan jatuh tekanan ditunjukkan pada Gambar 1. Setup eksperimen ini meliputi loop refrijeran, sistem injeksi dan sistem ekstraksi dari pelumas.

Loop refrijeran berfungsi untuk mengatur laju aliran refrijeran dan kondisi masukan penukar kalor. Untuk pengujian kondenser, loop ini berfungsi untuk membuat kondisi refrijeran dalam kondisi panas lanjut sebelum memasuki kondenser. Sementara untuk pengujian evaporator, loop refrijeran diatur sehingga refrijeran masuk ke dalam evaporator dalam kondisi sub-cooled.

Tepat sebelum saluran masuk dari *microchannel*, dibuat saluran pelumas yang didorong dengan menggunakan pompa dan penyedia tekanan dari luar. Hal ini untuk menjaga pelumas masuk dan tercampur dengan refrijeran ke dalam alat penukar kalor. Dari alat penukar kalor yang diuji, campuran refrijeran-pelumas dialirkan ke sistem ekstraksi di mana pelumas dipisahkan dari sistem menggunakan alat pemisah pelumas (*oil separator*) yang terdiri dari dua tipe masing-masing *helical* dan *coalescence*. Saluran transparan juga dipasang untuk mengamati secara visual bahwa tidak ada pelumas yang tersisa setelah melalui sistem ekstraksi.

Selama injeksi dan ekstraksi dalam keadaan tunak, dilakukan pengukuran kapasitas alat penukar kalor dari sisi udara sesuai dengan ASHRAE 41.2[16, 17]. Selain itu juga dilakukan pengukuran tekanan pada saluran masuk dan keluar dari alat penukar kalor. Hasil pengukuran tersebut dibandingkan dengan pengukuran yang dilakukan dalam kondisi yang sama namun tanpa injeksi pelumas.



Gambar 1. Setup eksperimen

Massa pelumas yang tertahan dapat dihitung dari integrasi laju aliran massa pelumas dalam campuran refrigeran-pelumas terhadap waktu. Pada injeksi di saluran masuk, massa tersebut disimbolkan dengan M_a , sedangkan pada saat injeksi di saluran keluar, massa pelumas tertahan disimbolkan M_b . Sehingga massa pelumas yang tertahan pada bagian pengujian dapat dihitung sebagai berikut:

$$M_{oil,retention} = M_a - M_b \dots\dots\dots (1)$$

Alat penukar kalor yang diujikan adalah tipe louvered-fin terbuat dari aluminium dengan volume internal 2,4 liters. Tiap tabung terdiri dari 4 saluran mikro dengan diameter 1,7 mm. Refrigeran yang diujikan adalah R410A yang dipasangkan dengan pelumas *Mixed Acid POE ISO VG 32*. Kondisi pengujian dilakukan pada tiga temperatur saturasi yang dijelaskan pada Table 1 untuk kondenser dan Table 2 untuk evaporator. Fraksi massa pelumas diatur 0 sampai 5%.

Perhitungan dan Reduksi Data

Jumlah volume retensi pelumas disajikan dalam bentuk rasio antara volume yang

dipenuhi oleh pelumas dengan total volume internal alat penukar kalor sebagai berikut:

$$VRP = \frac{Volume\ pelumas}{Volume\ internal\ APK} \dots\dots\dots (2)$$

Untuk menyajikan pengaruh dari pelumas, besaran tak berdimensi berupa rasio kapasitas perpindahan kalor alat penukar kalor dalam kondisi bersama dengan pelumas dengan kapasitas pada alat dan kondisi yang sama namun tanpa injeksi pelumas sebagai berikut:

$$FPK = \frac{kapasitas\ refrigeran+pelumas}{kapasitas\ refrigeran} \dots\dots\dots (3)$$

Untuk kondisi yang sama juga disajikan faktor jatuh tekanan sebagai berikut:

$$FJT = \frac{jatuh\ tekanan\ refrigeran+pelumas}{jatuh\ tekanan\ refrigeran} \dots\dots\dots (4)$$

Hasil dan Diskusi

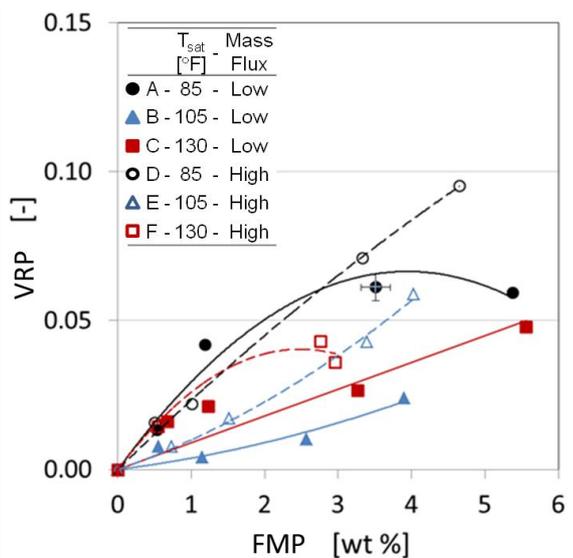
Kondenser Microchannel

Hasil eksperimen pada kondenser microchannel ditampilkan pada Gambar 2 dengan keterangan symbol ditampilkan di

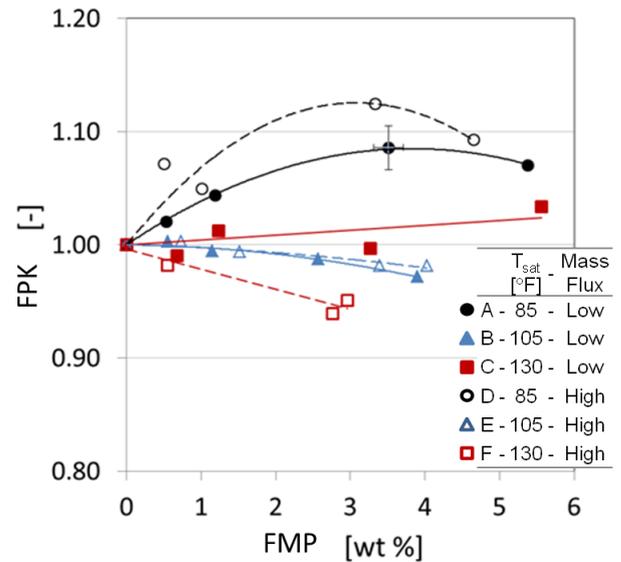
Tabel 1. Hasil pada retensi pelumas menunjukkan bahwa VRP sangat bergantung pada fraksi massa pelumas. Volume retensi meningkat hingga 11% dari total volume internal kondenser. Semakin tinggi fluks massa campuran maka semakin tinggi pula retensi pelumas dan efeknya sangat jelas pada fraksi massa pelumas lebih dari 3%. Hal ini disebabkan oleh lebih tingginya fase cairan pada campuran dengan bertambahnya fluks massa sementara temperatur dan laju volumetrik udara sebagai penerima panas kondenser tetap. Fase cairan yang mempunyai kecepatan lebih rendah dalam alat penukar kalor menyebabkan lebih banyak pelumas yang berada di dalamnya.

Table 1. Kondisi pengujian kondenser

Symbol Letter	T_{sat} °F (°C)	$G_{condenser}^*$ lb/ft ² .s (kg/m ² .s)	$G_{subcooler}^*$ lb/ft ² .s (kg/m ² .s)	Solubility** % wt. R410A/ wt. POE oil	Miscibility***
●	A - 85 (29)	16 (80)	36 (173)	16.6-22.8	Miscible
▲	B - 105 (41)	16 (80)	36 (173)	49.3-76.7	Miscible
■	C - 130 (54)	16 (80)	36 (173)	47.6-64.2	Immiscible
○	D - 85 (29)	24 (120)	53 (260)	16.6-22.8	Miscible
△	E - 105 (41)	24 (120)	53 (260)	49.3-76.7	Miscible
□	F - 130 (54)	24 (120)	53 (260)	47.6-64.2	Immiscible



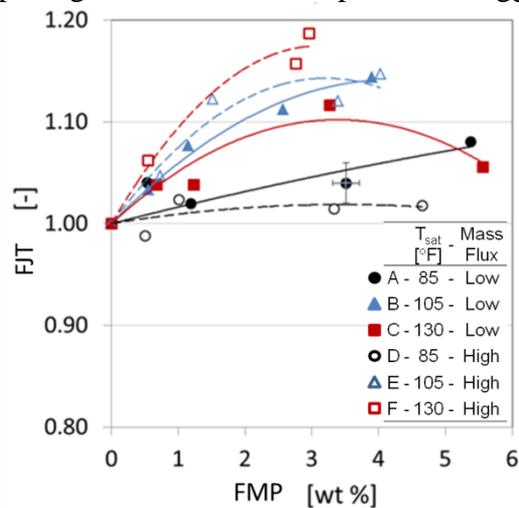
Gambar 2. Retensi pelumas pada kondenser



Gambar 3. Pengaruh pelumas pada kapasitas perpindahan kalor kondenser

Bagian panas lanjut dari kondenser adalah bagian dengan jumlah retensi pelumas terendah karena kecepatan yang tinggi dari uap refrigeran yang membawa pelumas dalam bentuk droplet.

Pengaruh pelumas pada kapasitas perpindahan kalor disajikan pada Gambar 3 sebagai fungsi dari fraksi massa pelumas dan fluks massa campuran. Dari Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa kapasitas perpindahan kalor dari kondenser microchannel menurun hingga 10% dibandingkan kondisi tanpa pelumas. Hasil yang menarik terjadi pada temperatur jenuh yang lebih rendah di mana peningkatan fraksi massa pelumas hingga 3%



Gambar 4. Pengaruh pelumas pada jatuh tekanan kondenser

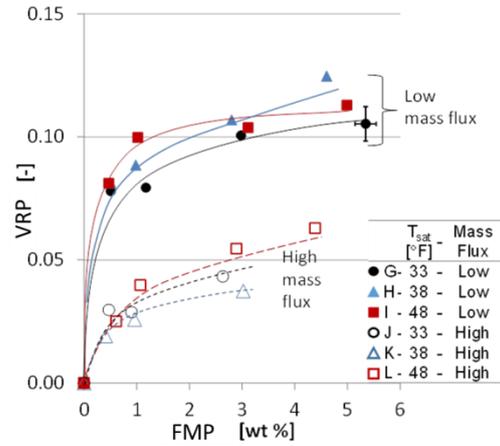
justru meningkatkan kapasitas perpindahan kalor. Tren ini menurun pada fraksi massa pelumas lebih dari 3%. Beberapa penelitian menyarankan adanya efek foaming dengan adanya pelumas dan perbaikan distribusi refrijeran untuk konsentrasi pelumas tertentu. Secara intuitif, pelumas dapat dianggap kontaminan dan memberikan hambatan tambahan pada proses perpindahan kalor. Hasil yang berlawanan ini membutuhkan penelitian lebih lanjut untuk dapat menjelaskan efek tersebut.

Gambar 4 menunjukkan pengaruh pelumas pada jatuh tekanan kondenser microchannel di sisi refrijeran. Pelumas meningkatkan jatuh tekanan hingga 19% dibandingkan dengan jatuh tekanan pada kondisi tanpa pelumas. Hal ini dapat dijelaskan karena tingginya viskositas pelumas sehingga meningkatkan komponen jatuh tekanan gesekan dari aliran fluida refrijeran

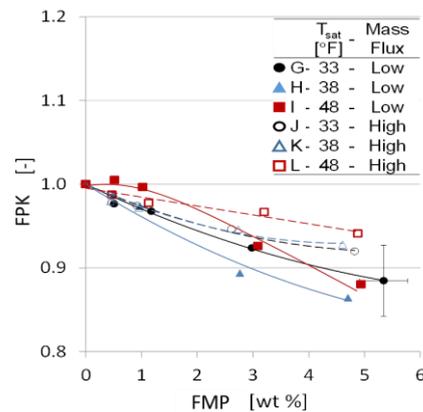
Evaporator Microchannel

Kondisi tes pada evaporator ditampilkan pada Table 2. Pada proses evaporasi konsentrasi local pelumas dalam fraksi cairan meningkat sepanjang tabung microchannel. Hal ini menyebabkan lebih banyak pelumas yang tertahan pada bagian panas lanjut dari evaporator di mana viskositas fraksi cairan paling tinggi. Volume retensi pelumas mencapai 13% dari total volume internal alat penukar kalor. Untuk aplikasi umum tata udara di mana fraksi massa pelumas di bawah

1%, total retensi pelumas mencapai 3-10% total volume internal evaporator. Volume retensi pelumas ditampilkan pada Gambar 5.



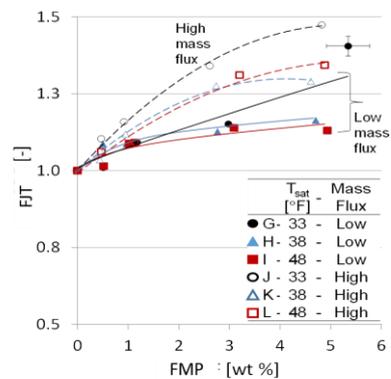
Gambar 5. Retensi pelumas pada evaporator



Gambar 6. Pengaruh pelumas pada kapasitas perpindahan kalor evaporator

Table 2. Kondisi pengujian evaporator

Symbol	Letter	T_{sat} °F (°C)	$G_{Evaporator A}$ lb _m /ft ² -s (kg/m ² -s)	$G_{Evaporator B}$ lb _m /ft ² -s (kg/m ² -s)
●	G	33 (0.5)	4.2 (20.4)	4.7 (23)
▲	H	38 (3.3)	4.2 (20.4)	4.7 (23)
■	I	48 (9)	4.2 (20.4)	4.7 (23)
○	J	33 (0.5)	7.5 (36.7)	7.7 (37.8)
△	K	38 (3.3)	8.4 (41.0)	8.4 (41.0)
□	L	48 (9)	8.4 (41.0)	8.4 (41.0)



Gambar 7. Pengaruh pelumas pada jatuh tekanan evaporator

Pengaruh pelumas pada kapasitas perpindahan kalor evaporator mencapai penalti hingga 11% dibandingkan dengan kondisi tanpa adanya pelumas di evaporator. Pelumas menurunkan kapasitas perpindahan kalor di evaporator secara nyata pada fraksi massa pelumas di atas 1% seperti digambarkan pada Gambar 6. Pengaruh fluks massa campuran juga dapat di lihat berbanding lurus. Semakin besar fluks massa campuran, semakin besar pula penurunan kapasitas perpindahan kalor pada evaporator. Pada aplikasi tata udara, peningkatan fluks massa dapat diakibatkan oleh perubahan mode operasi dari part load ke full load. Sehingga dapat disimpulkan bahwa retensi pelumas lebih banyak terjadi pada kondisi operasi part load.

Gambar 7 menunjukkan pengaruh pelumas pada jatuh tekanan di evaporator microchannel. Pada kondisi fraksi massa pelumas dan mass fluks campuran yang sama, pengaruh pelumas pada jatuh tekanan evaporator relative kecil di bawah FMP 1% yang merupakan tingkat pelumas yang umum ditemui pada sistem stasioner. Untuk jumlah pelumas yang lebih besar dari 3%, jatuh tekanan terbesar diukur pada kondisi temperatur jenuh terendah. Walaupun perubahan viskositas pada temperature jenuh yang diujikan relative kecil, terjadi penurunan tegangan permukaan yang signifikan. Hal ini menyebabkan peningkatan jatuh tekanan. Efek ini diperkuat pada FMP yang lebih tinggi di mana terjadi perubahan viskositas yang cukup besar akibat peningkatan jumlah pelumas. Kedua faktor tersebut dapat menjelaskan terjadinya peningkatan jatuh tekanan pada evaporator. Jatuh tekanan pada evaporator meningkat pada kisaran 10-25% pada saat pelumas berada di evaporator dengan fraksi massa sekitar 1%.

Kesimpulan

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pelumas yang tertahan dalam kondenser sangat tergantung pada fraksi massa pelumas (FMP) dalam campuran. Volume retensi pelumas meningkat jika FMP meningkat dan diukur hingga mencakup 11% dari total volume internal kondenser. Volume retensi

pelumas untuk kondisi fluks massa refrijeran yang tinggi lebih tinggi daripada untuk kondisi fluks massa rendah dan efek fluks massa pada retensi pelumas kecil untuk FMP lebih rendah 3 wt.%. Pelumas mempengaruhi laju perpindahan kalor dari kondenser dan mengakibatkan penalti pada kapasitas perpindahan kalor sebanyak 10 %. Pelumas juga meningkatkan jatuh tekanan refrijeran pada kondenser hingga 19% lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi tanpa pelumas. Untuk evaporator microchannel diperoleh hasil bahwa volume retensi pelumas di evaporator diukur hingga 13% dari total volume internal evaporator. Pelumas mempengaruhi laju perpindahan kalor dari evaporator microchannel dan penalti kapasitas perpindahan kalor sebanyak 11%. Untuk sistem tata udara dan sistem pendinginan, ketika FMP yang sama atau kurang dari 1 wt. %, penurunan kapasitas perpindahan kalor berada pada jangkauan 4% dibandingkan dengan kondisi tanpa pelumas. Pelumas menurunkan tingkat perpindahan kalor dan dampaknya juga tergantung pada fluks massa. Penurunan tekanan pada sisi refrijeran di evaporator microchannel meningkat sebesar 10 sampai 25 persen ketika pelumas hadir dalam penukar kalor dan OMF berada di kisaran 1 wt.%.

Acknowledgment

Sebagian penelitian ini merupakan hasil penelitian yang didanai oleh ASHRAE RP 1564-2014 dengan peneliti utama Dr. Lorenzo Cremaschi dari Oklahoma State University. Penulis juga memberikan penghargaan pada program Fulbright-Dikti untuk dukungan pembiayaan.

Referensi

1. Wang, C.C., et al., *An overview of the effect of lubricant on the heat transfer performance on conventional refrigerants and natural refrigerant R-744*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(7): p. 5071-5086.
2. Youbi-Idrissi, M. and J. Bonjour, *The effect of oil in refrigeration: Current research issues and critical review of thermodynamic*

- aspects. *Int. J. of Refrigeration*, 2008. **31**(2): p. 165-179.
3. Shen, B. and E.A. Groll, *Review Article: A Critical Review of the Influence of Lubricants on the Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerants, Part I: Lubricant Influence on Pool and Flow Boiling*. HVAC&R Research, 2005. **11**(3): p. 341-359.
 4. Shen, B. and E.A. Groll, *Review Article: A Critical Review of The Influence of Lubricants on the Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerants-Part II: Lubricant Influence on Condensation and Pressure Drop*. HVAC&R Research, 2005. **11**(4): p. 511-526.
 5. Sundaresan, S.G. and R. Radermacher, *Oil return characteristics of refrigerant oils in split heat pump system*. ASHRAE Journal, 1996. **38**(8): p. 57-61.
 6. Biancardi, F.R., et al., *Study of Lubrication Circulation in HVAC Systems - ARTI MCLR Project Number 665-53100, DOE/CE/23810-71 in The Air Conditioning and Refrigeration Technology Institute*, ARTI, Editor. 1996, United Technologies Research Center (UTRC): East Hartford, Connecticut (US).
 7. Mehendale, S.S. and R. Radermacher, *Experimental and theoretical investigation of annular film flow reversal in a vertical pipe: Application to oil return in refrigeration systems*. HVAC&R, 2000. **6**(1): p. 55-74.
 8. Shedd, T.A. and T.A. Newell, *Characteristics of the liquid film and pressure drop in horizontal, annular, two-phase flow through round, square and triangular tubes*. *J. of Fluids Eng. Trans.*, 2004. **126**(5): p. 807-817.
 9. Schubring, D., et al. *Optical measurement of base film thickness in annular two-phase flow*. 2009. Jacksonville, FL, United states: American Society of Mechanical Engineers.
 10. Riedle, K.J., N.A. Macken, and S.W. Gouse Jr, *Oil Transport by Refrigerant Vapor: A literature Survey and Proposed Analytical Model*. ASHRAE Transactions, 1972. **78**(Part 2): p. 124-134.
 11. Bandarra Filho, E.P., L. Cheng, and J.R. Thome, *Flow boiling characteristics and flow pattern visualization of refrigerant/lubricant oil mixtures*. *International Journal of Refrigeration*, 2009. **32**(2): p. 185-202.
 12. Cremaschi, L., Y. Hwang, and R. Radermacher, *Experimental investigation of oil retention in air conditioning systems*. *International Journal of Refrigeration*, 2005. **28**(Compendex): p. 1018-1028.
 13. Huang, X., et al., *Condensation heat transfer characteristics of R410A oil mixture in 5 mm and 4 mm outside diameter horizontal microfin tubes*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010. **34**(7): p. 845-856.
 14. Li, H. and P. Hrnjak, *Effect of lubricant on two-phase refrigerant distribution in microchannel evaporator*. *Int. J. of Material and Manufacture*, 2013. **6**(3).
 15. Li, H. and P. Hrnjak, *Lubricant Effect on Performance of R134a MAC Microchannel Evaporators*. SAE Technical Paper, 2014. **SAE 2014-01-0692**.
 16. ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 41.4-1996 (RA 2006) -- Standard Method for Measurement of Proportion of Lubricant in Liquid Refrigerant (ANSI approved)*. 1996, ASHRAE: USA.
 17. ASHRAE, *ANSI/ASHRAE 41.2-1987, Standard methods for laboratory airflow measurements*. 1987, ASHRAE.