

EVALUASI KINERJA SISTEM PENDINGIN KOMPRESI UAP VRF DENGAN SIKLUS INJEKSI

Arfidian Rachman^{1)*}, Arfita Yuana Dewi²⁾, Asnal Effendi³⁾, Lisa Nesti⁴⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, ^{2),3)} Jurusan Teknik Elektro, ⁴⁾Jurusan TM.Industri
Fakultas Teknik

^{1,2,3)}Institut Teknologi Padang

⁴⁾Politeknik ATI Padang

E-mail: drarfidianrachman@gmail.com

Abstract

As a result of a decrease in the mass flow rate at the inlet section of a variable refrigerant flow (VRF) cooling system, the refrigerant flow system performs poorly. To increase efficiency the steam injection cycle method is used. The effects of steam injection are theoretically explored in this study over a wide range of medium pressures and ambient temperatures, and the findings are supported by experimental data. Compressor heating capacity, input power, coefficient of performance (COP), and isentropic efficiency are all affected by pressure. At low ambient temperatures, the increase in COP by steam injection is remarkable. In this study, the performance of the cooling system with the injection cycle was evaluated, the system with this injection cycle resulted in an increase in cooling capacity of 3.26% and an energy efficiency ratio (EER) of 2.32%.

Keywords: Injection cycle, VRF, COP, EER

Abstrak

Akibat dari penurunan laju aliran massa pada bagian hisap pada sistem pendinginan variable refrigerant flow (VRF), sistem aliran pendingin berkinerja buruk. Untuk meningkatkan efisiensi metode siklus injeksi uap digunakan. Dampak injeksi uap secara teoritis dieksplorasi dalam kajian ini pada berbagai tekanan menengah dan suhu lingkungan luar, dan temuan didukung oleh data eksperimen. Kapasitas pemanasan kompresor, daya input, koefisien kinerja (COP), dan efisiensi isentropik semuanya dipengaruhi oleh tekanan. Pada suhu sekitar yang rendah, peningkatan COP dengan injeksi uap sangat luar biasa. Dalam kajian ini, kinerja sistem pendingin dengan siklus injeksi dievaluasi, sistem dengan siklus injeksi ini menghasilkan peningkatan kapasitas pendinginan sebesar 3,26% dan rasio efisiensi energi (EER) sebesar 2,32%.

Kata Kunci : Siklus Injeksi, VRF, COP, EER.

1. PENDAHULUAN

Penghematan energi menggunakan sistem efisiensi energi tinggi penting untuk mengatasi perubahan iklim. Teknik injeksi gas telah digunakan dalam pompa kalor dan sistem refrigerasi untuk meningkatkan efisiensi sistem dalam kondisi pengoperasian yang berat. Teknik injeksi dapat mencapai dua keuntungan utama dari pemisahan fasa dalam flash tank: penurunan suhu pelepasan karena fasa uap yang diinjeksikan ke kompresor dan peningkatan kapasitas pendinginan karena penurunan entalpi fasa cair.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan, Ma et.al [1] melaporkan bahwa sistem pendingin injeksi gas dengan flash tank memiliki koefisien kinerja (COP) yang lebih tinggi daripada sistem dengan penukar panas internal. Sistem refrigerasi injeksi gas dengan flash tank dapat meningkatkan kapasitas refrigerasi dan menurunkan temperatur pelepasan kompresor [2], [3]. Xu dkk. [4] menemukan bahwa kapasitas refrigerasi dapat ditingkatkan menggunakan teknik injeksi gas dengan volume langkah kompresor yang tetap. Selain itu, Heo et al. [5] melaporkan bahwa penurunan tekanan evaporator dalam sistem refrigerasi injeksi gas berkurang 30-35% dibandingkan dengan sistem non-injeksi. Namun, penelitian sebelumnya pada sistem refrigerasi injeksi gas telah menggunakan refrigeran konvensional seperti hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) dan hydrofluorocarbons (HFCs), yang

memiliki potensi pemanasan global yang relatif tinggi (GWP100). Oleh karena itu, perlu dikembangkan sistem refrigerasi injeksi yang lebih efektif menggunakan refrigeran alternatif dengan GWP yang relatif rendah.

Sistem VRF multi-split baru-baru ini digunakan sebagai unit pendingin atau pemanas di daerah panas atau dingin di struktur perumahan dan komersial, termasuk kantor, pusat ritel, dan hotel, karena fitur ini. Ada dua siklus refrigerasi yang berbeda dalam sistem VRF multi-split yang menggunakan sub-pendingin untuk menghentikan pembuatan flash gas. Yang pertama adalah siklus injeksi, dan yang kedua adalah siklus bypass. Skema siklus bypass dan siklus injeksi ditunjukkan pada Gambar 1.

Cara paling efektif untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi sistem dalam mode pemanasan adalah dengan menggunakan pendekatan injeksi uap. Siklus injeksi uap tangki flash (FTVI) dan siklus injeksi uap sub-dingin (SCVI) adalah dua jenis utama siklus injeksi uap. Dengan bantuan flash tank atau sub-cooler, refrigeran uap didorong masuk ke kompresor, Heo et al. [6].

Ada banyak penelitian tentang evaluasi dan peningkatan siklus injeksi uap. Domanski menguji kinerja siklus FTVI sempurna secara hipotesis [7]. Dengan penyesuaian tekanan menengah dalam penyelidikannya, peningkatan kemampuan kapasitas dan koefisien kinerja (COP). Baik di iklim panas maupun dingin, Wang et al. [8] melihat kinerja sistem pompa panas dua tahap dengan kompresor gulir injeksi uap dan kemungkinan siklus untuk dua siklus ini. Temuan menunjukkan bahwa dibandingkan dengan siklus FTVI, siklus SCVI memiliki rentang kerja tekanan injeksi yang lebih besar. Dengan siklus SCVI, kapasitas pemanasan maksimum dan COP ditingkatkan masing-masing sekitar 26% dan 20%. Efektivitas siklus FTVI dengan kompresor putar kembar inverter dalam berbagai kondisi operasi diuji oleh Heo et al [9]. Mereka sampai pada kesimpulan bahwa kondisi suhu lingkungan yang rendah meningkatkan COP dan kapasitas pemanasan siklus FTVI. Analisis simulasi pada siklus R410A dengan kompresor gulir injeksi uap dilakukan oleh Siddharth et al [10]. Pendekatan injeksi uap diharapkan dapat meningkatkan COP sebesar 6-8% menurut model simulasi.

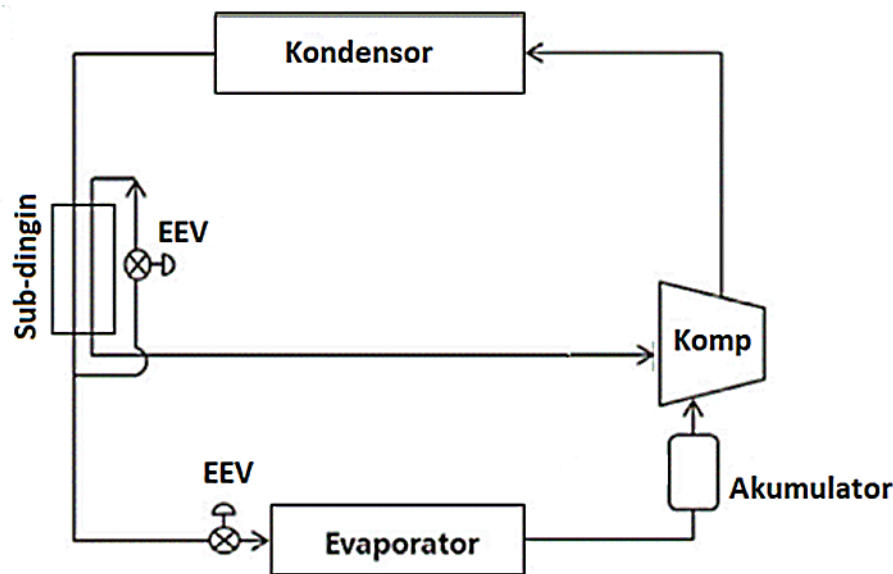
Choi et.al [11] menilai secara kuantitatif posisi injeksi kompresor gulir yang ideal dan rasio tekanan menengah yang memaksimalkan kapasitas pemanasan pompa panas dan koefisien kinerja (COP) untuk kendaraan listrik. Posisi lubang injeksi yang ideal ditemukan pada sudut sekitar 300°, diukur sepanjang involute dari lubang hisap ke arah dalam. Selain itu, pada kondisi awal, rasio tekanan menengah yang ideal terjadi di bawah 0,25.

Kwon et.al [12] meneliti dampak penukar panas sub-pendingin pada kinerja sistem VRF multi-split. Mereka sampai pada kesimpulan bahwa penukar panas sub-dingin adalah cara yang efisien untuk meningkatkan kinerja dan keandalan sistem VRF dengan jalur pipa yang panjang. Dalam penyelidikan mereka, teknik injeksi uap tidak digunakan; sebagai gantinya, penukar panas sub-dingin digunakan untuk mendinginkan refrigeran cair. Cho et.al [13] menggunakan siklus SCVI untuk menilai kemampuan pendinginan dan pemanasan pompa multi-panas R410A dan R32. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa, dibandingkan dengan pompa tanpa injeksi uap, kapasitas pendinginan dan pemanasan pompa multi-panas R410A dan R32 ditingkatkan masing-masing sebesar 2,1%-6,3% dan 7,5%-13,9%.

Wang et.al [14] mengadopsi penukar panas internal (sub-pendingin) dalam sistem pompa panas unit tunggal dengan siklus injeksi untuk meningkatkan kinerja sistem di iklim panas dan dingin. Injeksi uap dalam kompresor gulir meningkatkan kinerja sistem pompa panas karena penukar panas antara aliran utama dan injeksi di sub-pendingin mengurangi entalpi refrigeran di saluran masuk evaporator dengan peningkatan derajat sub-pendinginan. Cho et.al [15] mengukur dan membandingkan kapasitas pendinginan dan pemanasan sistem pompa multi-panas R410A dan R32 dengan injeksi uap. Kapasitas pendinginan dan pemanasan sistem dengan R410A dan R32 ditingkatkan dengan injeksi uap karena peningkatan derajat sub-pendinginan di saluran masuk EEV menggunakan sub-pendingin.

2. METODOLOGI

Diagram skema sistem VRF multi-split dengan siklus injeksi ditunjukkan pada Gambar.1. Unit luar ruang terdiri dari kompresor yang digerakkan oleh inverter, pemisah oli, katup periksa, katup empat arah, pemisah gas-cair, kondensor, katup ekspansi elektronik luar ruang (EEV), katup solenoid pengembalian oli (SV1) dan katup solenoid (SV2). SV1 dibuka untuk meningkatkan tekanan sistem selama periode peluncuran ketika P_s lebih rendah dari 0,11 MPa dan untuk menurunkan tekanan sistem ketika P_d lebih tinggi dari 3,7 MPa. Jika sistem terus beroperasi selama 60 menit dengan frekuensi putaran kompresor kurang dari 35Hz. Kemudian SV2 dibuka dan oli di separator dikembalikan ke kompresor.



Gambar 1. Skema siklus Injeksi

Unit dalam ruangan terutama terdiri dari evaporator dan EEV dalam ruangan. Untuk sistem VRF, strategi kontrol sistemnya, termasuk strategi kontrol kompresor, strategi kontrol outdoor dan indoor, serta strategi kontrol SV1 dan SV2, adalah teknologi utama untuk menjamin sistem mencapai parameter suhu dan tekanan yang stabil dan sesuai. Laju aliran refrigerant disesuaikan dengan frekuensi putaran kompresor dan rasio pembukaan EEV dalam ruangan. Beberapa titik pengukuran suhu dan tekanan dipasang di sistem untuk mengontrol frekuensi putaran kompresor, rasio pembukaan EEV outdoor dan indoor, serta kecepatan putaran kipas outdoor. Dalam kondisi pendinginan, rasio pembukaan EEV luar ruangan adalah 100%. Frekuensi putaran kompresor ditingkatkan dengan peningkatan kapasitas unit dalam ruang yang dioperasikan dan perbedaan suhu antara T_i dan T_s . Rasio pembukaan EEV dalam ruangan ditentukan oleh tingkat superheat evaporator (Perbedaan suhu antara T_g dan T_1). Dan tingkat superheat dari refrigerant yang keluar. Proses komprehensif ini dapat dijelaskan untuk mengontrol derajat superheat dari pelepasan refrigeran ke nilai targetnya yaitu 30°C. Rasio pembukaan EEV dalam ruangan meningkat ketika derajat panas berlebih dari zat pendingin yang keluar lebih besar dari nilai target, begitu pula sebaliknya. Saat SV2 dibuka, frekuensi putaran kompresor akan dinaikkan menjadi 35 Hz dengan variasi kecepatan 2,0 Hz/s, dan sistem terus beroperasi selama 1 menit dengan frekuensi putaran kompresor 35Hz. Dalam kondisi pendinginan, refrigeran dikeluarkan dari kompresor. Kemudian refrigeran mengalir berturut-turut melalui pemisah oli, katup periksa, katup empat arah, kondensor, EEV luar ruangan, EEV dalam ruangan, evaporator, dan pemisah gas-cair.

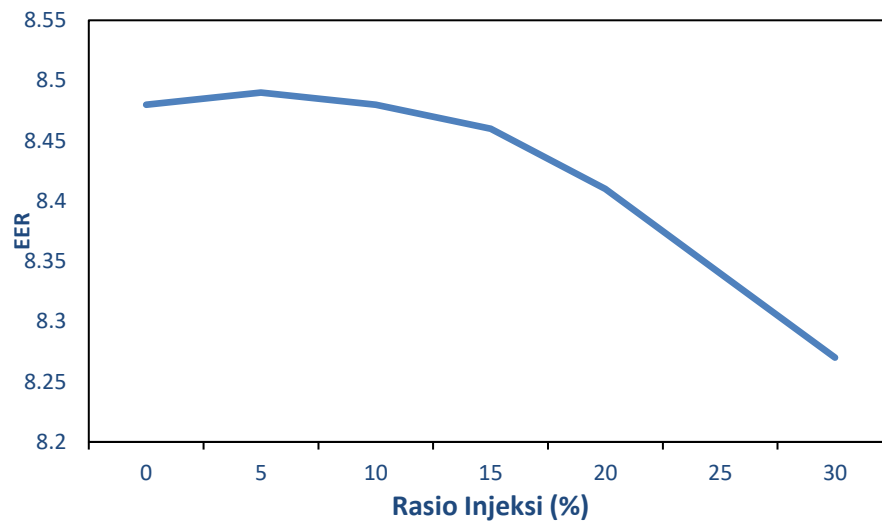
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dari pengujian sistem pendingin dengan siklus injeksi ini adalah peningkatan dari prestasi kerja (COP) dan efisiensi energi (EER). Sistem pendingin ini untuk aplikasi multi-split variable refrigerant flow (VRF). Dari pengujian ini didapatkan karakteristik operasi sistem menggunakan siklus injeksi. Karena rasio injeksi adalah faktor penting untuk menentukan kinerja sistem VRF multi-split, yang dapat meningkatkan derajat sub pendinginan di bagian sisi masuk katup ekspansi electric (EEV) sehingga dari penerapan siklus injeksi ini diharapkan meningkatnya efficiency dan prestasi sistem. Pada siklus ini refrigerant yang keluar dari sub cooler akan disuntikkan bagian kompresor. Pada gambar 1 dan 2 menunjukkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan diperoleh pada siklus kompresi uap dengan siklus injeksi terjadi peningkatan kapasitas pendinginan sebesar 3,26% (max 2,6 kW) dan tingkat rasio hemat energi listrik (EER) 2,32% (max 8,47).

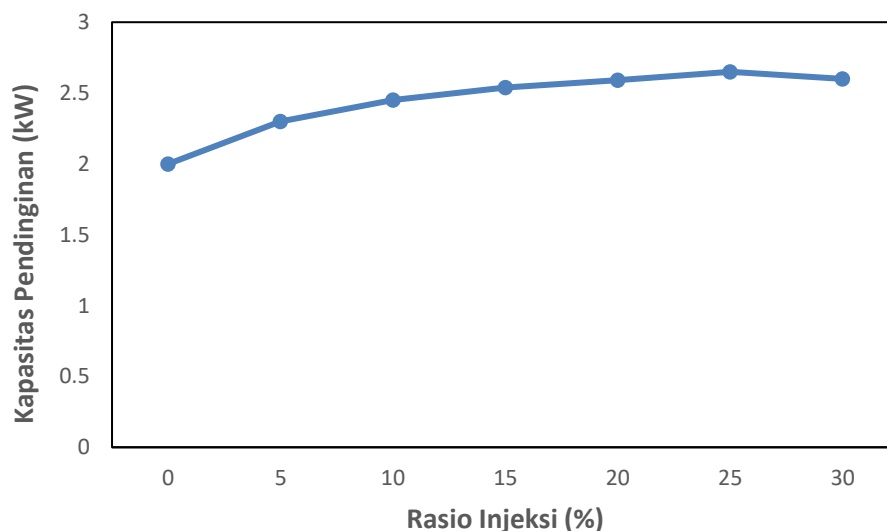
Tabel 1. Kondisi operasi pada pengujian

Penyetingan operasi	Tetapan
Kompresor	65 Hz
Fan	650 rpm
Evaporator(superheating) keluaran dari evap	2° C
Sub-dingin (keluaran dari kondensor)	2° C
Temperatur dalam dan luar	26° C dan 32° C
Penyetingan operasi	Tetapan
Kompresor	65 Hz
Fan	650 rpm
Evaporator(superheating) keluaran dari evap	2° C
Sub-dingin (keluaran dari kondensor)	2° C
Temperatur dalam dan luar	26° C dan 32° C

Dari pengujian didapati juga bahwa derajat sub-pendingin dan derajat superheating terjadi peningkatan pada saluran masuk EEV dan tingkat superheating. Baseline dengan injeksi perolehan panas dari lingkungan dan penurunan tekanan dalam pipa cair. Perolehan panas dan penurunan tekanan dalam pipa cair menyebabkan kenaikan flash gas di katup ekspansi (EEV) dengan derajat sub-pendinginan rendah pada saluran masuk EEV lebih tinggi dari pada saat keluar kondensor. Oleh karena itu memungkinkan untuk mencegah pembentukan flash gas dalam pipa cair sesuai dengan selesainya pertukaran panas dengan refrigeran di aliran utama. Oleh karena itu, tingkat superheating pada hisap kompresor dipengaruhi oleh tingkat superheating di pintu keluar jalur injeksi. Didapati juga laju aliran massa di evaporator menurun dengan meningkatnya perbandingan injeksi laju aliran massa total yang dikeluarkan kompresor dan laju aliran masa di evaporator. Pada siklus injeksi ini didapati bahwa laju aliran masa total tidak berubah secara signifikan di awal proses injeksi, tetapi sedikit meningkat seiring dengan peningkatan rasio karena penurunan derajat superheating pada bagian hisap kompresor. Laju aliran massa di evaporator menurun terus menerus dengan peningkatan rasio injeksi karena peningkatan kecepatan aliran, juga suhu pelepasan meningkat di awal karena peningkatan derajat superheating pada hisap kompresor, tetapi suhu pelepasan menurun seiring rasio injeksi meningkat lebih jauh karena penurunan derajat superheating pada hisap kompresor. Didapati juga pada siklus injeksi ini bahwa kapasitas pendinginan meningkat dengan meningkatnya rasio injeksi, yang menyebabkan laju aliran massa di evaporator terus menurun meskipun peningkatan derajat sub-pendinginan dengan peningkatan rasio injeksi. Dalam siklus injeksi daya input sedikit meningkat dengan peningkatan rasio injeksi karena peningkatan suhu hisap dari kompresor dan laju aliran masa total.



Gambar 2. Kapasitas Pendinginan



Gambar 3. Energi Efisiensi Ratio (EER)

Dari data pengujian daya input meningkat juga dalam suhu ambien yang tinggi, dikarenakan rasio kompresi yang tinggi. Didapati juga dari pengujian bahwa EER akan meningkat pada titik terakhir meskipun ada penurunan kapasitas pendinginan karena kerja kompresi menurun seiring dengan derajat superheating pada sisi hisap kompresor. Peningkatan EER tertinggi pada kondisi 42°C. EER tertinggi yang didapatkan dalam suhu ambien dicapai pada rasio injeksi 25% akibat kapasitas pendinginan dipengaruhi oleh laju aliran masa tertinggi pada rasio injeksi ini. EER tertinggi yang didapati pada pengujian ini adalah 8,47. Pada siklus ini tingkat superheating di bagian sisi hisap kompresor dipengaruhi rasio pencampuran refrigerant dengan penguapan di evaporator dan suhu hisap turun karena rasio injeksi meningkat yang menghasilkan peningkatan kapasitas pendinginan sebesar 3,26%.

4. KESIMPULAN

Sebuah tinjauan ekstensif dari studi eksperimental dan teoritis telah dibuat untuk memberikan ringkasan peningkatan kinerja sistem untuk sistem refrigerasi kompresi uap multi split dengan siklus injeksi. Modifikasi sistem menggunakan teknik yang berbeda seperti siklus injeksi telah disajikan melalui penilaian mendalam dari literatur. Hasilnya mengungkapkan bahwa teknik injeksi memberikan konsumsi energi yang rendah, tinggi kinerja dan mengurangi tekanan termal pada kompresor karena menurunkan suhu pelepasan. Metode subcooling injeksi dapat meningkatkan COP. Metode subcooling injeksi dapat menurunkan suhu pelepasan. Siklus Injeksi dapat digunakan dengan kompresor gulir untuk meningkatkan COP. Teknik intercooling dapat meningkatkan COP sebesar 3,26%. Dari kajian yang telah dilakukan perlu validasi kajian perbandingan pada eksperimen dan pemodelan numerik CFD. Kesimpulan cukup menyatakan jawaban dari hipotesis dan/atau tujuan penelitian yang telah dinyatakan di bagian pendahuluan. Kesimpulan bukan berisi perulangan dari hasil dan pembahasan, tetapi lebih kepada ringkasan hasil temuan seperti yang diharapkan di tujuan atau hipotesis. Bila perlu, di bagian akhir kesimpulan dapat juga dituliskan hal-hal yang akan dilakukan terkait dengan gagasan selanjutnya dari penelitian tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Institut Teknologi Padang, beserta Kemdikbudristek Republik Indonesia atas Dana Hibah untuk mempromosikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yi Fan, Xudong Zhao, Jing Li, Guiqiang Li, Steve Myers, Yuanda Cheng, Ali Badiei, Min Yu, Yousef Golizadeh Akhlaghi, Samson Shittu, Xiaoli Ma, 2020, An Economic and environmental analysis of a novel rural house heating and cooling system using a solar-assisted vapour injection heat pump, *Applied Energy*, Volume 275, 1 October 2020, 115323.
- [2] Daryoush Dadpour, Esmail Lakzian, Mohammad Gholizadeh, Hongbing Ding, Xu Han, 2022 Numerical modeling of droplets injection in the secondary flow of the wet steam ejector in the refrigeration cycle, *International Journal of Refrigeration*, Volume 136, April 2022, Pages 103-113.
- [3] Changhyun Baek, Jaehyeok Heo, Jongho Jung, Honghyun Cho, Yongchan Kim, 2014, Effects of flash tank vapor injection on the heating performance of an inverter-driven heat pump for cold regions, *J. Applied Thermal Engineering*, Volume 67, Issues 1–2, June 2014, Pages 89-96.
- [4] Xu Shuxue, Ma Guoyuan, Liu Qi, Liu Zhongliang, 2013, Experiment study of an enhanced vapor injection refrigeration/heat pump system using R32, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 68, June 2013, Pages 103-109.
- [5] Changhyun Baek, Jaehyeok Heo, Jongho Jung, Eungchan Lee, Yongchan Kim, 2014 Effects of vapor injection techniques on the heating performance of a CO₂ heat pump at low ambient temperatures, *International Journal of Refrigeration*, Volume 43, July 2014, Pages 26-35.
- [6] Changhyun Baek, Jaehyeok Heo, Jongho Jung, Honghyun Cho, Yongchan Ki, 2014, Performance characteristics of a two-stage CO₂ heat pump water heater adopting a sub-cooler vapor injection cycle at various operating conditions, *J. Energy*, Volume 77, 1 December 2014, Pages 570-578.
- [7] Domanski, Theoretical Evaluation of the Vapor Compression Cycle with a Liquid line/Suction-line Heat Exchanger, Economize, and Ejector. In: *Proceedings of the NIST*. Gaithersburg, MD, USA NISTIR 5606, 1995.

- [8] Wang, et al., 2009. Two-stage heat pump system with vapor-injected scroll compressor using R410A as a refrigerant. *Int. J. Refrigeration* 32 (6), 1442–1451.
- [9] Heo, et al., 2010. Effects of flash tank vapor injection on the heating performance of an inverter-driven heat pump for cold regions. *Int. J. Refrigeration* 33 (4), 848–855.
- [10] Siddharth, et al., 2004. Vapor injection in scroll compressor. In: *Proceedings of the International Compressor engineering Conference* Paper 1642.
- [11] Choi, et al., 2017. Performance analysis of vapor injection heat pump system for electric vehicle in cold startup condition. *Int. J. Refrigeration* 80, 24–36.
- [12] Kwon, et al., 2012. Field performance measurement of a VRF system with sub-cooler in educational building for the cooling season. *Energy Build.* 49, 300–305.
- [13] Cho, et al., 2017. Performance comparison between R410A and R32 multi-heat pumps with a sub-cooler vapor injection in the heating and cooling modes. *Energy* 112, 179–187.
- [14] Wang, C.C., et al., 1999. Heat transfer and friction correlation for compact louvered fin-and-tube heat exchangers. *Int. J. Heat Mass Transf.* 42 (11), 1945–1956.