

Tinjauan Sistem Pengkondisian Udara Sistem Variabel Refrigerant Volume

Overview of Variable Refrigerant Flow Air Conditioning System

Arfidian Rachman

Department of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Padang
Jl. Gajah Mada Kandis Nanggalo, Padang, Indonesia

[doi.10.21063/jtm.2021.v11.i1.37-46](https://doi.org/10.21063/jtm.2021.v11.i1.37-46)

Correspondence should be addressed to drarfidianrachman@gmail.com

Copyright © 2021 A. Rachman. This is an open access article distributed under the [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Article Information

Received:

March 19, 2021

Revised:

April 20, 2021

Accepted:

April 24, 2021

Published:

April 30, 2021

Abstract

Variable refrigerant flow air-conditioning (VRF) systems are important and widely used in building energy systems around the world. The system is gradually gaining popularity in commercial and residential buildings due to its satisfactory partial load performance, flexible control, ease of installation and maintenance. Variable refrigerant flow air-conditioning (VRF) is a multi-split Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system that controls refrigerant flow to control separate zones for the needs of residential consumers and commercial buildings. The objective of this review is to identify VRF systems that affect various aspects of operation and performance. Special VRF components regulate refrigerant volume control for system performance and reliability. The findings show that specific testing through different compressor settings, electronic expansion valve (EEV) position, and airflow operation affects performance, thermal comfort and potential energy savings. The main conclusions drawn from this detailed review provide a comprehensive overview of VRF and inspire new insights and viable solutions for relevant researchers, product developers, practitioners and policy makers in this field. Previous experimental investigations will be more helpful in the future direction of progress as the development of an extensive VRF system is still in the main stages.

Keywords: VRF system; Coefficient of performance; Control strategy; Thermal comfort

1. Pendahuluan

Peningkatan standar hidup ditambah dengan berkurangnya pasokan bahan bakar fosil, telah memaksa para peneliti dan insinyur untuk fokus pada masalah penggunaan energi di gedung-gedung. Sistem pemanas, ventilasi, dan pendingin udara (HVAC), yang memainkan peran penting dalam memastikan kenyamanan penghuni, adalah salah satu pengguna energi terbesar di gedung-gedung. Oleh karena itu, peningkatan kinerja pada sistem HVAC kompresi uap standar menawarkan peluang yang menarik untuk pengurangan konsumsi

energi yang signifikan. Hampir 50% dari kebutuhan energi digunakan untuk mendukung kondisi kenyamanan termal dalam ruangan pada bangunan komersial [1]. Selain itu, karena kebanyakan orang menghabiskan lebih dari 90% waktu mereka di dalam ruang yang udara dikondisikan [2], pengembangan sistem HVAC hemat energi yang tidak bergantung pada bahan bakar fosil akan memainkan peran kunci dalam mengurangi konsumsi energi. Pengamatan lebih terfokus pada konsumsi energi di seluruh dunia oleh peralatan HVAC menunjukkan nilai yang nyata: Sistem HVAC merupakan lebih dari

50% energi bangunan yang dikonsumsi di AS [3]. Di Cina, konsumsi energi bangunan telah meningkat sekitar 10% per tahun selama 20 tahun terakhir dan telah mencapai sekitar 20,7% dari total penggunaan energi nasional pada tahun 2004 [4]. Di Eropa, sekitar 40% dari konsumsi energi penggunaan dalam bangunan komersial dan perumahan [5]. Di Australia 70% konsumsi daya pada bangunan non-perumahan digunakan untuk sistem HVAC [6]. Di India, sistem pendingin udara menyumbang sekitar 32% dari konsumsi listrik sebuah bangunan [7]. Di subtropis Hongkong sistem pendingin udara dan pendingin menyumbang 33% pada tahun 2006 [8]. Lebih dari 70% konsumsi energi gedung adalah untuk mendukung sistem pendingin di Timur Tengah [9]. Diperkirakan konsumsi energi dunia meningkat sebesar 58% antara tahun 2001 sampai dengan 2005 [10]. Namun, sekitar 80% dari penggunaan energi masih berasal dari bahan bakar fosil [11,12]. Ketergantungan pada sistem HVAC di lingkungan perumahan, komersial dan industri telah menghasilkan peningkatan besar dalam penggunaan energi, terutama di bulan-bulan musim panas. Mengembangkan sistem HVAC yang hemat energi sangat penting, baik untuk melindungi konsumen dari lonjakan biaya listrik maupun untuk melindungi lingkungan dari dampak buruk emisi gas rumah kaca yang disebabkan oleh penggunaan peralatan listrik yang tidak hemat energi. Dengan pesatnya perubahan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini, ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mencapai sistem HVAC yang hemat energi. Namun, untuk mengembangkan sistem yang efisien, pemahaman yang jelas tentang kondisi kenyamanan bangunan diperlukan. Kenyamanan termal adalah semua tentang kepuasan manusia dengan lingkungan termal mereka. Desain dan perhitungan sistem pendingin udara untuk mengontrol lingkungan termal dengan standar kualitas udara yang dapat diterima di dalam gedung harus memenuhi standar ASHRAE 55-2004 [13].

Sebagai salah satu sistem pendingin udara yang paling menjanjikan untuk mengurangi konsumsi energi tanpa mengorbankan kenyamanan termal, sistem aliran refrigeran variabel (VRFS) telah banyak digunakan di bangunan komersial dan perumahan [14-16]. Dalam literatur yang tersedia, VRF juga disebut sistem volume refrigeran variabel [17], VRFS multi-split [18], sistem pendingin udara multi-evaporator [19], atau pompa multi-panas. VRF tipikal terdiri dari satu unit luar ruangan (OU), beberapa unit dalam ruangan (IU), dan pipa

pendingin yang terhubung. Laju aliran refrigeran diatur oleh kompresor variabel kapasitas dalam OU dan katup ekspansi elektronik (EEV) yang dipasang di setiap IU untuk pendinginan ruang atau beban pemanasan zona individu [20]. Menurut fungsinya, VRFS dapat dibagi menjadi dua jenis: pompa panas (HP-VRF) dan pemulihan panas (HR-VRF) [21]. HP-VRF dapat beroperasi dalam mode pendinginan atau pemanasan dengan mengatur katup empat arah untuk mengontrol arah aliran refrigeran [22]; HR-VRF dapat memulihkan panas dari pendinginan ke zona pemanasan, menyediakan pendinginan dan pemanasan simultan oleh unit pemulihan panas atau unit perubahan mode (MCU) [23,24]. Park dkk. [25] membangun sistem tanpa ventilasi, ventilasi pemulihan energi (ERV) dan model sistem aliran refrigeran variabel (VRF) dengan sistem udara luar khusus (DOAS) melalui program simulasi energi gedung, EnergyPlus. Model disimulasikan dan dibandingkan dengan konsumsi energi bangunan yang dipasang dengan sistem VRF. Zhang dkk. [26] mengembangkan model baru untuk sistem VRF dengan konfigurasi pemulihan panas (VRF-HR) dan membandingkannya dengan model VRF-HR saat ini dengan simulasi EnergyPlus. Hong dkk. [27] mengembangkan model baru sistem VRF simulasi dalam mode pompa panas (HP) (VRF-HP). Melalui simulasi oleh EnergyPlus dan dibandingkan dengan model VRF-HP lainnya, hasil simulasi menunjukkan bahwa model VRF-HP baru memiliki tingkat presisi yang tinggi. Chung dkk. [28] mengembangkan model jaringan saraf tiruan (ANN) untuk sistem VRF dan menguji kinerja model tersebut.

Dalam sistem VRF multi-split, ada dua jenis siklus pendinginan yang menggunakan sub-pendingin untuk mencegah timbulnya *gas flash*. Yang pertama adalah siklus bypass, dan yang lainnya adalah siklus injeksi.

Pada siklus bypass, refrigerant diekspansi pada temperatur rendah, yang serupa dengan respon temperatur evaporasi dalam sistem. Refrigeran suhu rendah di aliran bypass dipanaskan oleh pertukaran panas dengan suhu tinggi di aliran utama, dan refrigeran akhirnya dicampur dengan refrigeran yang mengalir keluar dari evaporator di akumulator. Dalam siklus injeksi, refrigeran yang dikeluarkan diekspansi ke tekanan yang lebih tinggi daripada tekanan bypass. Refrigeran akhirnya disuntikkan ke dalam ruang kompresi di kompresor skrol. Dari kedua siklus, derajat sub-pendinginan yang lebih besar dari sistem dapat diperoleh dengan sub-pendingin dibandingkan

dengan sistem tanpa sub-pendingin, sehingga menghindari pembentukan *gas flash* dan meningkatkan kapasitas pendinginan. Selain itu, bila *bled* refrigerant dalam keadaan dua fasa dan temperatur *bled* refrigerant tidak lebih tinggi dari pada bagian hisap kompresor, maka temperatur keluar kompresor dapat menurun karena penurunan temperatur hisap kompresor di siklus bypass. Selain itu, suhu pelepasan dapat menurun dengan efek *intercooling* dari injeksi refrigeran dalam siklus injeksi.

Beberapa penelitian yang menyelidiki kinerja sistem VRF multi-split dengan menggunakan penukar panas sub-pendingin dengan siklus bypass dan siklus injeksi dalam literatur. Kwon dkk. menyelidiki pengaruh penukar panas sub-pendingin dengan siklus bypass pada kinerja sistem VRF multi-split, berdasarkan uji kinerja di laboratorium selama musim dingin. Dalam studi mereka, didapatkan bahwa sistem VRF multi-split dengan penukar panas sub-pendingin meningkatkan faktor kinerja pendinginan (CPF) sekitar 8,5% dibandingkan dengan sistem tanpa penukar panas sub-pendingin [29]. Li dkk. [30] menganalisis pengaruh pertukaran panas sub-pendingin dalam sistem VRF multi-split dengan siklus bypass dengan memvariasikan tiga faktor, yaitu, panjang pipa, kapasitas penukar panas sub-pendingin, dan rasio laju aliran massa refrigeran bypass. Hasil simulasi mereka menunjukkan bahwa COP dari sistem VRF multi-split dapat ditingkatkan dengan pipa yang panjang dengan mengendalikan rasio laju aliran massa bypass yang sesuai [31]. Tu dkk. [32] melakukan eksperimen untuk menganalisis efek sub-pendingin pada kapasitas pendinginan, rasio efisiensi energi, derajat sub-pendinginan, dan derajat/tingkat pelepasan *superheating* dalam sistem VRF dengan siklus bypass. Dari hasil eksperimen, mereka menemukan bahwa pembukaan EEV sub-pendingin yang optimal dapat meningkatkan kinerja sistem VRF multi-split dengan mengadopsi siklus bypass. Rasio efisiensi energi maksimum dari sistem dengan sub-pendingin meningkat hingga 3,3%, 3,1%, dan 3,0%, ketika satu, dua, dan empat unit dalam ruangan, masing-masing dioperasikan pada mode termo-on, [32]. Wang dkk. 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 pertukaran panas antara aliran utama dan yang disuntikkan di sub-pendingin mengurangi

entalpi refrigeran di saluran masuk evaporator dengan peningkatan derajat sub-pendinginan [33]. Cho dkk. [34] mengukur dan membandingkan kapasitas pendinginan dan pemanasan sistem pompa multipanas R410A dan R32 dengan injeksi uap. Kapasitas pendinginan dan pemanasan sistem dengan R410A dan R32 ditingkatkan dengan injeksi uap karena peningkatan derajat sub-pendinginan pada saluran masuk EEV menggunakan sub-pendingin.

2. Gambaran Ikhtisar

Berbeda dari prinsip yang diperkenalkan dari sistem refrigerasi kompresi uap standar, aliran refrigeran di seluruh sistem VRF dikontrol beroperasi pada kecepatan pengaturan kompresor satu atau dua tahap. Katup ekspansi set-posisi diganti dengan katup ekspansi elektronik (EEV) yang dikendalikan bersama dengan sistem lainnya. Sebuah EEV dikalibrasi untuk ukuran lubang yang berbeda untuk memungkinkan sejumlah aliran refrigeran melalui evaporator. Penempatan ukuran lubang EEV berkorelasi dengan berapa banyak beban yang diperlukan untuk mengontrol suhu di zona. Umumnya, kompresor bekerja dengan variabel kecepatan untuk menyesuaikan beban yang dibutuhkan oleh sistem secara keseluruhan. Efisiensi energi meningkat karena kompresor mampu beroperasi dari berbagai kecepatan tergantung pada beban yang diperlukan untuk mempertahankan suhu di seluruh zona tunggal atau pengaturan beberapa zona. Seharusnya sistem bekerja pada kapasitas penuh untuk waktu yang singkat untuk mendinginkan suatu zona, sistem VRF dapat bekerja untuk jumlah waktu yang sama tetapi hanya pada kecepatan kompresor yang diperlukan yang menghasilkan kontrol suhu zona yang sama tetapi dengan biaya lebih rendah karena konsumsi energi lebih sedikit.

Siklus kompresi uap memiliki persyaratan penting untuk memastikan umur panjang peralatan dan pengoperasian yang tepat. Refrigeran yang masuk kompresor harus berupa uap *superheated* karena setiap cairan yang masuk ke kompresor berpotensi merusak internal kompresor. Hal ini dicapai dengan menyeimbangkan jumlah udara kembali hangat yang dimasukkan melalui kumparan evaporator untuk menguapkan campuran refrigeran. Refrigeran tidak mampu mengalami perubahan fase lengkap dari cair menjadi uap super panas tanpa sifat aliran udara yang tepat melalui kumparan evaporator. Memiliki uap super panas memastikan bahwa refrigeran tidak

memiliki cairan di saluran selama fase ini, sehingga EEV berada di tempat untuk mengatur aliran refrigeran dan memungkinkan lebih sedikit refrigeran mengalir melalui dan memperoleh uap super panas dengan sempurna. Variabel *superheat* ini dipertimbangkan selama investigasi yang ditinjau untuk memantau seberapa efektif aliran refrigeran. Atau, aliran udara melintasi kumparan evaporator dapat ditingkatkan untuk memanipulasi jumlah *superheat* keluar evaporator. Efisiensi dioptimalkan dengan mengembangkan keseimbangan operasi antara setiap komponen dalam sistem. Beberapa input dapat diubah untuk mencapai satu output. Di sinilah pengendalian sistem memainkan peran penting dalam hal efisiensi dan keandalan, dimana kontrol dilihat secara keseluruhan, namun masih sedikit pembahasan detail spesifik pengkodean dan logika.

Sistem VRF menawarkan unit penguapan dalam ruangan kecil yang membutuhkan ruang minimal dibandingkan dengan sistem saluran. Kustomisasi sistem VRF adalah di mana faktor bentuk kecil yang menguntungkan dan memainkan peran besar. Modularitas dan keserbagunaan sistem VRF hadir dengan kemampuan untuk menambahkan unit evaporasi dalam ruangan tambahan dengan penyesuaian aliran refrigeran ke setiap unit. Sistem multi-split mencakup sejumlah evaporator dalam ruangan yang mencakup EEV dan kipas aliran udara dalam unit kompak yang semuanya terhubung secara paralel ke saluran pendingin yang sama menuju dan dari unit luar ruangan yang terdiri dari kompresor dan kondensor. Karena zona yang berbeda memerlukan beban yang bervariasi untuk mempertahankan suhu udara yang diinginkan, EEV akan mengontrol aliran refrigeran untuk meningkatkan kapasitas membuang panas. Setiap posisi EEV unit indoor dihubungkan ke Unit Outdoor (ODU), agar kompresor beroperasi sesuai dengan kapasitas laju aliran.

A. Pendingin Udara Multi Evaporator

Konfigurasi multi-evaporator umumnya terdiri dari dua sampai lima untuk perumahan dan lebih dari lima untuk penggunaan komersial. Karena sistem VRF bersifat ekspansif, segmen tinjauan pertama menyelidiki bahwa sebagai komponen selanjutnya akan menghasilkan kondisi ekspansi unit evaporator. Pemodelan dan simulasi disertakan dalam tinjauan ini karena perhitungan untuk lebih dari dua unit terbukti rumit untuk terus bereksperimen secara fisik. Perhitungan dengan

bantuan komputer secara efektif memberikan langkah awal untuk memulai penyelidikan lapangan.

B. Keyamanan Termal

Kenyamanan termal yang tepat tidak hanya bergantung pada suhu target tetapi juga kelembaban relatif. Pengujian sistem untuk mengontrol sensitivitas diperlukan agar suhu zona tercapai secara stabil, berlawanan dengan pendinginan langsung yang menyebabkan ketidaknyamanan konsumen atau masalah kebisingan karena kecepatan aliran udara yang terlalu cepat. Yan dan Deng [35] mengembangkan metode pengendalian untuk sistem tiga evaporator berdasarkan penelitian sebelumnya mengenai sistem evaporator tunggal dan ganda. Informasi utama yang mendorong penelitian ini mengadakan kontrol berbasis suhu untuk satu sistem dan kontrol berbasis kelembaban untuk sistem lain. Yan dan Deng [35] mengintegrasikan sistem ini untuk mensimulasikan respon keseluruhan baik dalam suhu dan kelembaban relatif. Eksperimen awal terdiri dari masing-masing dari tiga suhu target unit dalam ruangan yang disetel ke 26°C (79°F) dengan suhu sekitar di luar ruangan 35°C (95°F). Beban sensibel bervariasi antara unit dalam ruangan dari 1150 W hingga 1350 W dan beban laten bervariasi dari 450 W hingga 650 W. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi beban sensibel dan laten hanya mempengaruhi pola respons suhu dan kelembaban relatif dengan tetap mempertahankan kontrol yang baik dari sistem dalam kisaran suhu target. Unit dalam-ruangan pertama memiliki beban sensibel dan beban laten terendah masing-masing pada 1150 W dan 450 W. Ini menunjukkan di mana ambang batas kontrol suhu yang lebih rendah terpenuhi sebelum dua unit dalam ruangan lainnya. Kontrol ini mengurangi aliran refrigeran dan udara melintasi melalui kumparan evaporator. Beginilah cara pengontrol diprogram untuk merespons. Kelembaban relatif terendah yaitu 51%, dicapai antara tiga zona dengan proses dehumidifikasi tidak langsung. Dua zona lainnya mempertahankan kelembaban relatif hingga 58%. Yan dan Deng [35] melakukan pengujian kedua yang menempatkan suhu target masing-masing unit dalam 1°C (sekitar 1,9°F) satu sama lain dengan unit dalam-ruang 1 pada 27°C (80,7°F), unit dalam-ruang 2 pada 26°C (78,8°F), dan unit dalam ruangan 3 pada 25°C (77°F). Beban sensibel dan beban laten dipertahankan konstan di seluruh komponen pada 1300 W dan 500 W. Variasi pengujian tiap

40 menit di mana unit dalam-ruang 1 diubah dari beban sensibel 1300 W ke 1400 W dan beban laten 500 W ke 700 W. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan beban akan meningkatkan kelembaban relatif sebesar 3% dengan tetap mempertahankan suhu target pada 27°C(80,7°F) dalam pola modulasi yang lebih longgar. Waktu respon untuk zona 1 adalah sekitar 30 menit untuk zona suhu dan zona kelembaban relatif mencapai tingkat yang stabil. Dua zona lainnya hampir tidak terpengaruh dan tidak menunjukkan respons yang nyata.

Park dkk. [36] bereksperimen dengan simulasi EnergyPlus untuk membandingkan konfigurasi sistem VRF dengan dan tanpa ventilasi luar ruangan. Studi ini menyelidiki kontribusi ventilasi namun perlu ditangani pentingnya kontrol kelembaban untuk penggunaan di masa depan. Menggunakan standar kenyamanan termal ASHRAE, Park dkk. menemukan bahwa untuk bangunan non-hunian dengan sistem VRF tanpa ventilasi apa pun memberikan kondisi nyaman yang dapat diterima kurang dari 20% untuk musim dingin dan musim panas. Penambahan ventilasi apa pun, apakah itu ventilasi pemulihan energi (ERV) atau sistem udara luar ruangan khusus (DOAS), merujuk ASHRAE dalam kondisi nyaman yang dapat diterima di musim dingin dan musim panas dalam kisaran 65% hingga 94%. Ini membenarkan respons sistem dari Yan dan Deng [35] konfigurasi tiga evaporator dengan suhu target yang disesuaikan dan respons kelembaban relatif yang berkurang dari perubahan beban untuk mempertahankan tingkat kenyamanan termal yang dapat diterima. Alahmer dan Alsaqoor [37] mensimulasikan bangunan multi-level dengan beberapa sistem split di setiap tingkat tetapi menyelidiki kenyamanan termal untuk sebuah ruangan selama musim panas yang selanjutnya menanggapi Yan dan Deng [35] bahwa upaya harus dilakukan bahwa ketika suhu di zona naik, kelembaban relatif harus dikurangi agar tetap dalam kisaran kenyamanan yang dapat diterima.

C. Koefisien Kinerja dan Rasio Efisiensi Energi

Koefisien kinerja (COP) dan rasio efisiensi energi (EER) adalah cara umum untuk mengevaluasi sistem HVAC. Penggerak untuk sistem VRF termasuk dalam peningkatan COP dan EER dibandingkan dengan sistem kecepatan tunggal. Kondisi beban sebagian adalah tempat sebagian besar peningkatan VRF pada sistem kecepatan tunggal berada. Pada

jalur operasi yang lebih rendah dan lebih tinggi, COP dan EER sering kali lebih dekat satu sama lain tetapi sementara sistem kecepatan tunggal hanya dapat hidup atau mati, persyaratan beban parsial mendukung kecepatan variabel VRF sehingga rata-rata nilai kinerja yang lebih tinggi. Juga, rasio efisiensi energi musiman (SEER) dipertimbangkan dari beberapa penelitian. Meskipun studi oleh Tu dkk. [38] meneliti penambahan sub-pendingin ke dalam sistem untuk pengisian dan variasi kinerja dengan kompresor kecepatan variabel, hasilnya menunjukkan pentingnya kontrol pendinginan melalui kecepatan kompresor dan pembukaan EEV. Peningkatan EER sebesar 25% terjadi saat ada penambahan kompensasi tekanan pada variabel input kontrol yang menentukan kecepatan kompresor. Kompensasi dan kecepatan kompresor adalah perubahan sementara selama kedua pengujian posisi EEV masing-masing sub-pendingin dipertahankan pada posisi yang sama di seluruh keadaan. Peningkatan 25% ini lebih mengutamakan operasi kompresor daripada kontrol posisi EEV. Atas dkk. [39], disebutkan sebelumnya bereksperimen pengaturan tiga-evaporator yang dengan kecepatan variabel dan pengaturan kompresor kecepatan 50 Hz. Dengan hasil, sistem kecepatan variabel berkinerja lebih baik dengan COP 2,2 di atas 1,9 dari sistem kecepatan tunggal 50 Hz. Korelasi langsung antara COP dan kecepatan kompresor adalah bahwa pada kecepatan kompresor yang disetel tertinggi, COP paling rendah tetapi kisaran kecepatan variabel harus dirata-ratakan selama pengujian sehingga menghasilkan COP yang lebih tinggi secara keseluruhan.

Xia dkk. [40] melakukan eksperimen beberapa evaporator dengan dua kompresor; satu kecepatan tunggal dan satu kecepatan variabel. Sistem ini menunjukkan kisaran nilai COP yang stabil di seluruh jalur kecepatan kompresor khusus dalam hubungannya dengan suhu sekitar yang berbeda. Dari suhu luar ruangan 15°C(59°F) hingga 35°C(95°F) kisaran COP adalah antara 2 dan 2,4 untuk mode pendinginan dalam kisaran 30% hingga 60% operasi kompresor. Berkorelasi langsung dengan kompresor dan konsistensi COP mengikuti tren tekanan yang mengikuti hal yang sama. Sementara kontrol suhu *superheat* dan *subcooling* adalah topik utama dari Choi dan Kim [41] COP kecepatan kompresor dipertahankan konstan sementara dan EEV tetap konstan untuk mengamati respons ketika hanya menyesuaikan suhu udara masuk dari satu unit dalam ruangan. Dari 20°C(68°F)

hingga 32°(90°F) dalam kondisi tertentu, COP naik dari 2,6 hingga 2,66 karena kapasitas pendinginan melebihi konsumsi daya total.

Saab dkk. [42,43] menguji lima jenis refrigeran dan memantau COP sebagai respons terhadap tekanan yang dihasilkan dari kompresor mulai dari 2500 kPa (362 psi) hingga 3600 kPa (522 psi) yang diuji, bersamaan di bawah opsi yang lebih berbahaya dengan refrigerant (R717). Masing-masing refrigeran merespons dengan cara yang sama di seluruh rentang tekanan kompresor, sehingga tren dapat digeneralisasi untuk sistem VRF dengan beberapa evaporator yang terlibat. Dalam pembahasan sifat refrigeran, panjang pipa memiliki beberapa efek pada kinerja. Yan dkk. [35] menemukan bahwa ada penurunan COP dengan peningkatan panjang saluran refrigeran. Panjang maksimum yang diubah dalam simulasi adalah sekitar 20 meter (65 kaki). Penurunan 8% dalam COP dapat berubah tentu saja dengan panjang yang lebih panjang. Dengan variasi COP 0,05, nilai unjuk kerja tertinggi adalah pada saat evaporator berada pada jarak yang sama dari unit outdoor. COP terpengaruh ketika unit luar ruangan sangat dekat dengan unit dalam ruang. Ini berjalan seiring dengan memiliki jarak yang sama antar unit.

Cheung dan Braun [44] membandingkan sistem VRF tanpa saluran dengan sistem kecepatan tunggal dengan berbagai jenis katup ekspansi. Dalam studi ini, beban bangunan tempat tinggal maksimal mendekati 8000 W dan menghasilkan COP untuk pompa kalor tanpa saluran dan sistem kecepatan tunggal keduanya sekitar 3,1. Namun, sebelum beban bangunan maksimum selama beban sedang, sistem VRF tanpa saluran rata-rata COP 3,8 di mana sistem kecepatan tunggal turun menjadi 2,8 dan di bawahnya. Sebagai perbandingan lebih lanjut saat bereksperimen dengan kisaran suhu sekitar, -15°C(5°F) hingga 15°C (59°F), terdapat kisaran persentase peningkatan COP dari 5% hingga 50% saat suhu dalam ruangan mendekati target mereka. Saat suhu target mendekati, kondisi beban sebagian kompresor kecepatan variabel mulai aktif dan selanjutnya mendorong sistem kecepatan variabel di atas kecepatan tunggal karena sistem kecepatan tunggal masih pada kecepatan 100% ketika kapasitas tersebut tidak benar-benar diperlukan.

Zhang dkk. [45] menemukan rasio efisiensi energi per jam (HEER) lebih cocok daripada EER atau bahkan EER musiman karena PWM dapat diperiksa dalam periode waktu evaluasi yang lebih kecil. Ditemukan bahwa HEER

merespon rasio kapasitas aktual terhadap kapasitas maksimum seperti yang dilakukan sebagian besar konfigurasi kompresor lainnya di mana kondisi beban sebagian memiliki nilai HEER yang lebih tinggi di mana kedua kompresor beroperasi menyediakan kapasitas pendinginan secara efisien. Respons konsumsi daya total per jam tercermin di seluruh kondisi nilai beban bagian. Ini mencerminkan korelasi respons dari suhu sekitar untuk kinerja yang lebih baik pada suhu sekitar yang lebih rendah.

D. Kontrol terintegrasi sistem VRF dan sistem ventilasi

Seperti yang diperkenalkan di atas, sistem VRF fleksibel dan biasanya dioperasikan dengan perangkat lain, seperti sistem ventilasi, secara bersamaan. Beberapa peneliti mengembangkan logika kontrol untuk sistem seperti itu yang dapat membuat sistem yang terintegrasi bekerja secara efisien dan harmonis. Zhu dkk. [46] mengendalikan sistem VRF dan unit Pemrosesan Udara Luar Ruangan (OAP) secara individu. Satu tahun kemudian, mereka mengembangkan pengendalian bersama berdasarkan kedua sistem [47]. Mereka mengembangkan fungsi biaya dalam hal kenyamanan termal dan konsumsi energi. Algoritma genetika digunakan untuk mencari set kontrol yang optimal. Kim dan Moon [48] datang dengan algoritma kontrol baru yang terintegrasi dengan AC, ventilasi, dan sistem humidifikasi dengan mempertimbangkan status hunian. Status hunian terdeteksi oleh konsentrasi CO₂ dan konsumsi listrik untuk pencahayaan. Akurasinya bisa 94,9%. Lee dkk. [49] membuat algoritma kontrol yang meningkatkan efisiensi sistem dengan meningkatkan suhu udara pasok sistem sebanyak mungkin dalam kisaran di mana kelembaban relatif dalam ruangan tidak mempengaruhi kenyamanan penghuni. Algoritma ini didasarkan pada hasil eksperimen mereka bahwa kinerja sistem akan meningkat seiring dengan peningkatan suhu udara suplai. Zakula dkk. [50] memanfaatkan MPC berdasarkan prediksi cuaca dan beban untuk sistem pendingin daya angkat rendah, yang terdiri dari termal aktif bangunan diaktifkan secara paralel. Chuang dkk. memanfaatkan teknologi Refrigeran keluar Variabel *Stepless* sebagai perangkat *plug-in* yang terpasang pada pengontrol sistem mereka, yang dikombinasikan dengan konvensional. Sistem VRF dan Unit Pendingin Air terbungkus Berpendingin Udara [51]. Mereka menggunakan suhu udara dalam ruangan dan

perubahan tekanan refrigeran sebagai sinyal umpan balik. Menurut validasi eksperimental mereka, COP dapat ditingkatkan dari 3,16 menjadi 4,35.

3. Simpulan

Kemajuan sistem VRF bergantung pada integrasi setiap variabel input dan output komponen. Tinjauan ini merangkum beragam kategori individu dan kelompok teknologi VRF yang terdiri dari pengujian eksperimental untuk operasi dalam konfigurasi pompa panas. Peningkatan jumlah evaporator memperbanyak rentang variabel kontrol yang merupakan cara kontrol zona oleh sistem VRF HVAC. Pemilihan antara scroll kompresor digital inverter yang merupakan satu-satunya kontributor untuk meningkatkan kinerja dalam kondisi beban parsial. Literatur yang ada menampilkan berbagai jalur penyelidikan seperti yang telah terjadi dalam fase perkembangan. Kajian yang menarik adalah di mana sistem split tradisional dihibridisasi dengan sejumlah unit untuk kontrol zona yang lebih besar dan individual. Metode ini paling baik dengan pengujian berbagai diameter dan panjang pipa, dan kontrol EEV untuk pengendali aliran udara berkapasitas lebih besar dan unit dalam berukuran lebih kecil untuk kontrol total yang efisien dengan pengoperasian yang lebih baik dan peningkatan keandalan.

Meskipun sistem VRF diterima dengan baik sebagai teknologi untuk menghemat energi, dari tinjauan literatur menunjukkan bahwa lebih banyak pengembangan diperlukan untuk membuat teknologi lebih kuat dan layak secara ekonomi. Kontrol EEV adalah faktor kunci untuk memastikan sistem beroperasi seperti yang diinginkan dan teknologi kompresor harus dipelajari lebih lanjut untuk memutuskan jenis kompresor apa yang paling sesuai untuk sistem VRF.

Penelitian di masa akan datang mencakup dalam berbagai topik yang mengarah kepada operasi sinergi optimal dari teknologi VRF yang digunakan bahkan dalam aplikasi yang paling unik. Pengoperasian kompresor dengan kecepatan variabel dan variasi dalam kecepatan tetap merupakan dasar dalam mengendalikan sistem VRF secara efisien, sehingga menghasilkan efektivitas pengendalian dengan tata letak pipa dan operasi EEV. Aplikasi untuk menyempurnakan sebagian besar akan berkaitan dengan kenyamanan termal. Kenyamanan termal memiliki potensi untuk tetap menjadi keluaran yang paling tidak stabil karena hampir semua aplikasi akan berbeda.

Keunikannya hadir dalam beragam konfigurasi berdasarkan tempat tinggal yang bersangkutan. Sistem yang terdiri dari dua atau lebih koil kipas bermasalah dengan campuran udara dan dominasi zona di seluruh orientasi beban panas harian. Simulasi menggeneralisasi tata letak desain di mana sebagai eksperimental fisik akan memberikan beban panas yang lebih dinamis di rumah tempat tinggal untuk generalisasi orientasi potensial untuk diterapkan dalam instalasi tertentu. Oleh karena itu, penelitian tentang kenyamanan termal sistem VRF potensi baik di perumahan yang telah terbukti dari teknologi ini terkait dalam hal penghematan energi.

Referensi

- [1] N. Enteria and K. Mizutanit. The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:2095–122.
- [2] R. Qi, L. Lu and H. Yang. Investigation on air-conditioning load profile and energy consumption of desiccant cooling system for commercial buildings in Hong Kong. *Energy Build* 2012; 49:5018.
- [3] L. Perez-lombard, J. Ortiz and C.A. Pout. review on buildings energy consumption information. *Energy Build* 2008; 40:394–8.
- [4] Y. Yao and J. Chen. Global optimization of a central air-conditioning system using decomposition–coordination method. *Energy Build* 2010; 42:570–83.
- [5] C.A. Balaras, G. Grossman, H. Henning, C.A.I. Ferreira, E. Podesser, L. Wang, et al. Solar air conditioning in Europe – an overview. *Renew Sustain Energy Rev* 2007; 11:299–314.
- [6] Australian Greenhouse Office. Australian Commercial Building Sector Greenhouse Gas Emission. AGO, Canberra, Australia; 1990–2010.
- [7] Energy Conservation Building Code (ECBC). Bureau of Energy Efficiency, Ministry of Power, Government of India; 2007.
- [8] K.F. Fong, T.T. Chow, C.K. Lee, Z. Lin and L.S. Chan. Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Sol Energy* 2010; 84:227–44.

- [9] H. El-Dessouky, H. Ettouney, A. Al-Zeefari. Performance analysis of two-stage evaporative coolers. *Chem Eng. J* 2004; 102:255–66.
- [10] IEO, International Energy Outlook (IEO), Energy Information Administration <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo>>.
- [11] U. Desideri, S. Proietti and P. Sdringola. Solar powered cooling system: technical and economic analysis on industrial refrigeration and air conditioning applications. *Appl Energy* 2009; 86:1376–86.
- [12] Q. Ma, R.Z. Wang, Y.J. Dai and X.Q. Zhai. Performance analysis on a hybrid air conditioning system of a green building. *Energy Build* 2006; 38:447–53.
- [13] ANSI/ASHRAE Standard 55–2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating Ventilating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA; 2004.
- [14] A. Yildiz, M. Ali Ersöz, Determination of the economical optimum insulation thickness for VRF (variable refrigerant flow) systems, *Energy* 89 (2015) 835–844.
- [15] N. Enteria, H. Yamaguchi, M. Miyata, T. Sawachi, Y. Kuwasawa, Performance evaluation of the variable refrigerant flow (VRF) air-conditioning system subjected to partial loadings at different outdoor air temperatures, *J. Therm. Sci. Tech.* 11 (2) (2016).
- [16] G. Zhang, W. Liu, H. Xiao, W. Shi, B. Wang, X. Li, Y. Cao, New method for measuring field performance of variable refrigerant flow systems based on compressor set energy conservation, *Appl. Therm. Eng.* 154 (2019) 530–539.
- [17] D. Zhao, M. Zhong, X. Zhang, X. Su, Energy consumption predicting model of VRV (Variable refrigerant volume) system in office buildings based on data mining, *Energy* 102 (2016) 660–668.
- [18] Z. Li, B. Wang, X. Li, W. Shi, S. Zhang, Y. Liu, Simulation of recombined household multi-split variable refrigerant flow system with split-type air conditioners, *Appl. Therm. Eng.* 117 (2017) 343–354.
- [19] M.S. Elliott, B.P. Rasmussen, Decentralized model predictive control of a multi-evaporator air conditioning system, *Control Eng. Pract.* 21 (12) (2013) 1665–1677.
- [20] H. Cheung, J.E. Braun, Component-based, Gray box modelling of ductless multi-split heat pump systems, *Int. J. Refrig.* 38 (2014) 30–45.
- [21] H. Liu, G. Ma, S. Shao, B. Fan, Performance investigation on refrigeration and air conditioning systems with multi-evaporator, *Sustain. Cities Soc.* 39 (2018) 605–612.
- [22] Q. Tu, Z. Feng, S. Mao, K. Dong, R. Xiao, W. Song, Heating control strategy for variable refrigerant flow air conditioning system with multi-module outdoor units, *Energy Build.* 42 (11) (2010) 2021–2027.
- [23] X. Lin, H. Lee, Y. Hwang, R. Radermacher, A review of recent development in variable refrigerant flow systems, *Sci. Tech. Built Environ.* 21 (7) (2015) 917–933.
- [24] X. Lin, J. Ling, Y. Hwang, R. Radermacher, B. Kim, Improvement of variable refrigerant flow system performance using energy saving control strategy and chilled water storage, *Sci. Tech. Built Environ.* 24 (5) (2018) 483–491.
- [25] D.Y. Park, G. Yun, K.S. Kim, Experimental evaluation and simulation of a variable refrigerant flow (VRF) air-conditioning system with outdoor air processing unit, *Energy Build.* 146 (2017) 122–140.
- [26] R. Zhang, K. Sun, T. Hong, Y. Yura, R. Hinokuma, A novel variable refrigerant flow (VRF) heat recovery system model: development and validation, *Energy Build.* 168 (2018) 399–412.
- [27] T. Hong, K. Sun, R. Zhang, R. Hinokuma, S. Kasahara, Y. Yura, Development and validation of a new variable refrigerant flow system model in EnergyPlus, *Energy Build.* 117 (2016) 399–411.
- [28] M.H. Chung, Y.K. Yang, K.H. Lee, J.H. Lee, J.W. Moon, Application of artificial neural networks for determining energy efficient operating set-points of the VRF

- cooling system, *Build. Environ.* 125 (2017) 77–87.
- [29] L. Kwon, Y. Hwang, R. Radermacher, and B. Kim, 2012. Field performance measurement of a VRF system with sub-cooler in educational building for the cooling season. *Energy Build.* 49, 300–305.
- [30] C. Kwon, M.S. Kim, Y. Choi and M.S. Kim, 2017. Performance evaluation of a vapor injection heat pump system for electric vehicles. *Int. J. Refrig.* 74, 138–150.
- [31] Z. Li, B. Wang, X. Li and W. Shi. 2016. Simulation on effects of sub cooler on cooling performance of multi-split variable refrigerant flow systems with different lengths of refrigerant pipeline. *Energy Build.* 126, 301–309.
- [32] Q. Tu, L. Zhang, W. Cai, X. Guo, C. Deng, J. Zhang and B. Wang, 2017. Effects of sub-cooler on cooling performance of variable refrigerant flow air conditioning system. *Appl. Therm. Eng.* 127, 1152–1163.
- [33] X. Wang, Y. Hwang R. Redermacher, 2009. Two-stage heat pump system with vapor-injection scroll compressor using R410A as a refrigerant. *Int. J. Refrig.* 32 (6), 1442–1451.
- [34] I. Cho, H. Seo, D. Kim, D and Y. Kim, 2016. 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.
- [35] H. Yan and S. Deng, "Simulation Study on a Three-evaporator Air Conditioning System for Improved Humidity Control," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2139-2144, 2017.
- [36] D. Park, G. Yun and K. Kim, "Experimental evaluation and simulation of a variable refrigerant- flow (VRF) air-conditioning system with outdoor air processing unit," *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 122-140, 2017.
- [37] A. Alahmer and S. Alsaqoor, "Simulation and optimization of multi-split refrigerant flow systems," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, pp. 1705-1715, 2018.
- [38] Q. Tu, L. Zhang, W. Cai, X. Guo, X. Yaun, C. Deng and J. Zhang, "Control strategy of compressor and sub-cooler in variable refrigerant flow air conditioning system for high EER and comfortable indoor environment," *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. 215-225, 2018.
- [39] S. Atas, M. Aktas, I. Ceylan and H. Dogan, "Development and Analysis of a Multievaporator Cooling System with Electronic Expansion Valves," *Arabian Journal for Science & Engineering*, vol. 42, pp. 4513-4521, 2017.
- [40] J. Xia, E. Winandy, B. Georges and J. Lebrun, "Testing Methodology for VRF Systems," in *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2002.
- [41] J. Choi and Y. Kim, "Capacity modulation of an inverter-driven multi-air conditioner using electronic expansion valves," *Energy*, vol. 28, pp. 141-155, 2003.
- [42] R. Saab, H. A. Quabeh and M. I. Hassan Ali, "Variable refrigerant flow cooling assessment in humid environment using different refrigerants," *Journal of Environmental Management*, vol. 224, pp. 243-251, 2018.
- [43] R. Saab and M. I. Hassan Ali, "Variable refrigerant flow cooling systems performance at different operation pressures and types of refrigerants," *Energy Procedia*, vol. 119, pp. 426432, 2017.
- [44] H. Cheung and J. E. Braun, "Performance comparisons for variable-speed ductless and single speed ducted residential heat pumps," *International Journal of Refrigeration*, vol. 47, pp. 15-25, 2014.
- [45] D. Zhang, X. Zhang and J. Liu, "Experimental study of performance of digital variable multiple air conditioning system under part load conditions," *Energy & Buildings*, vol. 43, pp. 1175-1178, 2011.
- [46] Y. Zhu, X. Jin, Z. Du, X. Fang, B. Fan, Control and energy simulation of variable refrigerant flow air conditioning system combined with outdoor air processing unit, *Appl. Therm. Eng.* 64 (2014) 385–395, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.076>.
- [47] Y. Zhu, X. Jin, Z. Du, X. Fang, Online optimal control of variable refrigerant

flow and variable air volume combined air conditioning system for energy saving, *Appl. Therm. Eng.* 80 (2015) 87–96, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015>.

- [48] S.H. Kim, H.J. Moon, Case study of an advanced integrated comfort control algorithm with cooling, ventilation, and humidification systems based on occupancy status, *Build. Environ.* 133 (2018) 246–264, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.010>.
- [49] J. Lee, H. Yoon, P. Im, Y. Song, Verification of energy reduction effect through control optimization of supply air temperature in VRF-OAP system, *Energies* 11 (2017) 49, <https://doi.org/10.3390/en11010049>.
- [50] T. Zakula, P.R. Armstrong, L. Norford, Advanced cooling technology with thermally activated building surfaces and model predictive control, *Energy Build.* 86 (2015) 640–650, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.054>.
- [51] H.-C. Chuang, Y.-X. Zeng, C.-T. Lee, Study on a chiller of air conditioning system by sensing refrigerant pressure feedback control with stepless variable speed driving technology, *Build. Environ.* 149 (2019) 157–168, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.024>.