



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Sistem refrigerasi CO₂: solusi alternatif sistem refrigerasi ramah lingkungan untuk aplikasi supermarket

I Nyoman Suamir^{1*}, Achmad Wibolo¹, I Wayan Adi Subagia², I Putu Eka Idrayana³ dan A.A.Ngurah Dwi Indra Putra³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

³Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Badung, Bali 80364, Indonesia

*Email: nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstrak

Sistem refrigerasi berbasis refrigeran CO₂ sejak lingkungan tiga dekade menjadi solusi alternatif untuk sistem refrigerasi ramah lingkungan untuk aplikasi di supermarket. Paper ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penerapan berbagai sistem refrigerasi CO₂ yang pada tingkat awal implementasinya dalam sistem refrigerasi supermarket masih menghadapi beberapa hambatan. Keselamatan dan teknologi dianggap sebagai salah satu penghalang terpenting yang diikuti oleh regulasi, pelatihan, dan ketersediaan komponen. Beberapa negara mungkin masih menghadapi berbagai tantangan seperti kebijakan dan situasi mengenai fase keluar dari ODP dan refrigerans dengan emisi yang tinggi. Sehubungan dengan keamanan lokal, CO₂ adalah alternatif yang sangat baik di antara sistem refrigerasi alami, terutama dalam aplikasi refrigerasi supermarket. CO₂ berada di grup A1 dari klasifikasi keselamatan yang tidak mudah terbakar atau beracun. Salah satu sistem refrigerasi CO₂ yang banyak diminati adalah sistem transkritikal. Sistem refrigerasi CO₂ transkritikal telah mendapatkan tingkat kematangan teknologi, sehingga teknologi bebas HFC saat ini dapat memberikan solusi ramah lingkungan untuk sektor refrigerasi komersial khususnya supermarket.

Kata kunci: sistem refrigerasi CO₂, kematangan teknologi, ramah lingkungan, supermarket

Abstract: CO₂ refrigerant based refrigeration system since about three decades has become an alternative solution for environmentally friendly refrigeration systems for applications in supermarkets. This paper aims to evaluate the potential application of various CO₂ refrigeration systems which in the early stages of their implementation in supermarket refrigeration systems still face several obstacles. Safety and technology are considered as one of the most important barriers followed by regulation, training and component availability. Some countries may still face various challenges such as the policy and situation regarding the phase out of ODP and high emission refrigerants. Due to local safety, CO₂ is an excellent alternative among natural refrigeration systems, especially in supermarket refrigeration applications. CO₂ is in group A1 of the non-flammable or toxic safety classification. One of the most popular CO₂ refrigeration systems is the transcritical system. The transcritical CO₂ refrigeration system has reached a level of technological maturity, so that the current HFC-free technology can provide an environmentally friendly solution for the commercial refrigeration sector, especially supermarkets.

Keywords: CO₂ refrigeration system, technology maturity, environmentally friendly, supermarket

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Pilihan sistem refrigerasi untuk aplikasi sistem refrigerasi komersial telah mengalami perubahan yang cepat. Salah satu pendekatan yang mendapatkan popularitas adalah penggunaan sistem refrigerasi alami. Refrigeran alami seperti amonia, hidrokarbon (HC) dan CO₂ yang diketahui sebelumnya kini mengalami kebangkitan setelah permasalahan terhadap lingkungan telah meningkat karena penggunaan refrigeran non-alami. Sistem refrigerasi alami

ramah lingkungan telah terbukti menjadi solusi pengganti untuk sistem refrigerasi berbasis refrigeran sintetis seperti CFC, HCFC dan HFC [1,2]. Minat untuk menggunakan sistem refrigerasi alami di sektor komersial bervariasi di berbagai negara. Sistem dengan refrigeran CO₂ dan HC lebih menarik terutama di Eropa dan Jepang. Aplikasi sistem refrigerasi alami pada aplikasi komersial sudah juga meluas sampai di Asia, AS, Australia, Kanada, dan negara-negara lain dapat diharapkan untuk menerapkannya [3].

Penggunaan refrigerasi alami telah muncul kembali sejak lingkungan tiga dekade terakhir, tetapi untuk mengimplementasikannya dalam sistem refrigerasi supermarket masih menghadapi beberapa hambatan. Terutama berhubungan dengan keselamatan dan teknologi. Hambatan lain juga termasuk regulasi, pelatihan, dan ketersediaan komponen. Beberapa negara mungkin masih menghadapi berbagai tantangan seperti kebijakan dan kondisi tentang penghentian penggunaan (phase out) dari refrigeran jenis ODP (Ozone Depleting Potential) dan GWP (Global Warming Potential) [4].

Sehubungan dengan faktor keamanan, CO₂ adalah alternatif yang sangat baik di antara berbagai refrigeran alami, terutama dalam aplikasi sistem refrigerasi supermarket. CO₂ berada di grup A1 dari klasifikasi keselamatan yang tidak mudah terbakar atau beracun [5,6]. Di sisi lain, amonia dengan klasifikasi keselamatan B2 yang menunjukkan bahwa refrigeran ini memiliki toksisitas tinggi dan juga membawa risiko mudah terbakar tingkat sedang. Amonia dapat digunakan dalam sistem refrigerasi supermarket dengan beberapa tantangan untuk mencapai receiveran yang signifikan [7]. Menggabungkan amonia dengan CO₂ bertingkat atau sistem sekunder adalah salah satu peluang untuk menerapkannya di supermarket [8]. Sistem refrigerasi tersebut telah diterapkan di Prancis [9] dan di Australia [10]. HC, yang berada di grup A3 (mudah terbakar level tinggi), mungkin juga memiliki beberapa batasan penggunaan. Kemungkinan kebocoran sistem refrigerasi HC ke area yang dihuni atau ditempati manusia harus dibatasi di bawah titik batas mudah terbakar yang lebih rendah. Namun, dengan perangkat keselamatan yang tersedia saat ini, tingkat ketidkebocoran sistem yang lebih baik, dan strategi desain canggih dalam meminimalkan biaya sistem refrigerasi beberapa supermarket di Inggris dan Jerman juga telah menerapkan HC dalam sistem refrigerasi supermarket [11,12].

Tetapi, banyak efek positif yang tak terbantahkan dari pelarangan penggunaan HFC karena GWP tinggi yang mudah diamati, seperti kenaikan harga R404A, R134a dan R410A dan optimalisasi biaya dan efisiensi unit CO₂ [13]. Sebagai konsekuensinya, saat ini solusi untuk memperkenalkan berbagai aplikasi sistem refrigerasi CO₂ komersial terus didorong lebih jauh karena konstruksi sistem dapat disesuaikan dengan sifat-sifat CO₂ [14-20].

Di AS, analisis berbagai sistem refrigerasi transkritisal dan kaskade/sekunder menjadi populer di aplikasi supermarket dengan tujuan mengoptimalkan parameter pengoperasian sistem ini. Selain itu, kinerja sistem refrigerasi berbasis CO₂ yang dipilih dibandingkan dengan sistem ekspansi langsung (DX system) berbasis R404A. Untuk sistem refrigerasi yang diselidiki, ditempatkan bahwa Sistem booster transkritisal dengan Kompresor Bypass memiliki konsumsi energi terendah untuk temperatur lingkungan kurang dari 8°C, dan untuk temperatur lingkungan yang lebih tinggi sistem ekspansi langsung (DX) R404A ditempatkan memiliki konsumsi energi terendah. Sistem booster ini juga berkinerja setara atau lebih baik daripada sistem ekspansi langsung R404A di utara AS. Untuk bagian selatan AS, sistem DX R404A berkinerja lebih baik daripada sistem CO₂ [21].

Penerapan sistem refrigerasi supermarket CO₂ di India telah dilaporkan oleh Lata dan Gupta [22]. Kinerja sistem refrigerasi booster CO₂ dengan delapan konfigurasi berbeda

untuk aplikasi supermarket dianalisis dan dibandingkan dengan sistem R404A konvensional. Konfigurasi yang diselidiki termasuk sistem booster dasar dengan over-feed evaporator, serta adopsi refrigerasi transkritisal berdingin evaporatif yang dimodifikasi. Analisis ini terutama berfokus pada konsumsi daya, efisiensi energi, dan dampak pemanasan global saat menggunakan sistem ini sepanjang tahun dalam kondisi iklim India. Model termodinamika steady-state dikembangkan dan divalidasi untuk sistem booster yang tersedia dalam literatur. Selanjutnya, analisis diekspansi untuk semua konfigurasi pada operasi sepanjang tahun (2017-18) untuk lima kota besar di India dari berbagai wilayah iklim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem booster dengan flooded-evaporator temperatur rendah dan menengah yang terintegrasi dengan sistem refrigerasi evaporatif yang dimodifikasi adalah konfigurasi terbaik di semua kota. Peringkat kinerja lebih tinggi untuk Delhi, diikuti oleh Ahmedabad, Bangalore, Chennai, dan Kolkata. Sistem tersebut dapat meningkatkan SEER maksimum hingga 49%, sedangkan penghematan energi tahunan hingga 35%, dibandingkan dengan sistem booster. Selanjutnya, penurunan maksimum emisi tidak langsung (TEWI) ditempatkan 18% dibandingkan dengan sistem R404A konvensional.

Di Cina, investigasi kinerja sistem refrigerasi CO₂ telah dilakukan oleh Sun dkk [23]. Sistem Refrigerasi Kompresi Bertingkat Parsial diusulkan dan dievaluasi dalam hal koefisien kinerja (COP) dan rasio efisiensi energi musiman (SEER) ketika beroperasi di lima kota perwakilan iklim khas di Cina. R134a dan CO₂ digunakan sebagai refrigeran dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SEER sistem refrigerasi supermarket di zona dingin dan zona ringan lebih tinggi daripada zona iklim lainnya. Kinerja R134a Two-stage Compression Refrigeration System (R134a) berkinerja lebih baik daripada CO₂ Two-stage Compression Refrigeration System (R744-TCS). Namun, COP dan SEER dari sistem CO₂ dapat ditingkatkan secara signifikan dengan menambahkan kompresor paralel, serta menggunakan siklus kaskade parsial kompresi uap tunggal untuk subcooling di bawah kondisi kerja praktis. Peningkatan terbesar sistem ini dapat dicapai di daerah dengan kondisi iklim ekstrim, di mana COP meningkat sebesar 48,9% pada temperatur lingkungan 39 °C, dan SEER meningkat maksimum 21,5% di musim panas dan zona musim dingin yang hangat, dibandingkan dengan CO₂ transkritisal. Dibandingkan dengan sistem R134a, sistem yang diamati pada dasarnya mencapai efisiensi energi yang sebanding atau bahkan lebih tinggi. Dapat disimpulkan bahwa sistem yang diusulkan memiliki potensi besar untuk menggantikan sistem refrigerasi R134a yang ada untuk aplikasi refrigerasi supermarket.

Oleh karena itu, sistem refrigerasi CO₂ transkritisal telah mendapatkan tingkat kematangan teknologi seperti itu sehingga teknologi bebas HFC saat ini dapat menjadi solusi ramah lingkungan untuk sektor refrigerasi komersial di Eropa. Menurut [13], pada kenyataannya, jumlah instalasi sistem CO₂ di Uni Eropa, Norwegia dan Swiss pada tahun 2016 adalah tiga kali lebih tinggi dari pada tahun 2013. Sedangkan di wilayah Mediterania perkembangan penerapan sistem CO₂ lingkungan 8 kali dari 2013 hingga 2016. Akibatnya, Eropa adalah pemimpin dunia saat ini dalam unit supermarket CO₂ transkritisal dengan jumlah

8732 unit dari lingkungan 11000 instalasi di seluruh dunia [13].

Meskipun pabrik refrigeran CO₂ (R744) murni komersial telah menarik minat yang cukup besar di seluruh dunia, sepengetahuan peneliti, manfaat energi yang dapat dicapai dengan mengadopsi teknologi "khusus CO₂" canggih di industri ritel makanan Eropa belum pernah diperkirakan. Untuk menjembatani kesenjangan ilmiah ini, penghematan energi yang terkait dengan penggunaan evaporator overfed dan konsep multi-ejektor telah diuji sebagai solusi yang paling baik untuk pengganti sistem yang digunakan saat ini (yaitu sistem terpusat R404A). Selain itu, evaluasi ini telah diekspansi ke sistem sebelumnya (yaitu konfigurasi booster) dan sistem saat ini (yaitu teknologi kompresi paralel) untuk sistem supermarket CO₂ transkritikal. Investigasi telah dilaksanakan dengan mempertimbangkan ritel makanan ukuran rata-rata yang berlokasi di berbagai kota Eropa. Hasil dari pekerjaan penelitian saat ini bertujuan untuk meningkatkan kepercayaan pada solusi bebas HFC tersebut dan lebih mempromosikan penggunaannya di seluruh dunia. Paper ini menyajikan berbagai alternatif solusi sistem refrigerasi CO₂ yang efisien diaplikasikan pada supermarket.

2. Metode

Metode studi literatur diterapkan di dalam melakukan kajian sistem refrigerasi CO₂ untuk supermarket. Berbagai sumber terkini dari sistem refrigerasi CO₂ (R744) untuk aplikasi supermarket diinvestigasi dari berbagai kajian dan evaluasi yang telah dipublikasi di berbagai jurnal maupun konferensi. Berbagai hasil kajian dibandingkan untuk memperoleh hasil analisis yang bersifat komperatif dari berbagai teknologi sistem refrigerasi CO₂ dan sistem kombinasi antara sistem CO₂ dan sistem refrigerasi dengan refrigeran alami lainnya. Kajian dilengkapi dengan ilustrasi teknologi yang diterapkan dalam bentuk gambar skematik sehingga dapat lebih mudah dalam membandingkan teknologi dan keunggulan yang diaplikasikan khususnya sistem konvensional berbasis R404a untuk aplikasi supermarket.

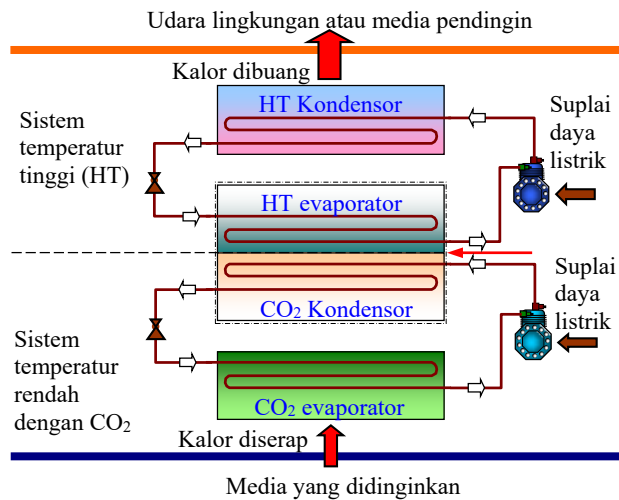
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil kajian menunjukkan berbagai jenis sistem refrigerasi CO₂ sudah diterapkan untuk aplikasi supermarket. Berbagai konsep penerapan sistem refrigerasi CO₂ untuk supermarket juga sudah banyak dikembangkan. Untuk aplikasi supermarket, tiga jenis sistem refrigerasi CO₂ terutama digunakan yang meliputi unit mandiri (integral), kondensasi, dan sistem supermarket terpusat (*centralized supermarket system*) [24]. Dalam sistem refrigerasi supermarket terpusat, sejumlah pendekatan desain yang berbeda dapat diadopsi yang termasuk dalam dua kategori utama yaitu: sistem kaskade subkritikal dan sistem transkritikal. Sistem kaskade subkritikal beroperasi pada tekanan sedang dan menerapkan dua sistem refrigerasi satu sistem untuk refrigerasi (*refrigeration*) dan satu sistem lagi untuk pembuangan panas (*heat rejection*). Sedangkan sistem transkritikal beroperasi pada tekanan tinggi tetapi hanya menggunakan CO₂ sebagai refrigeran.

3.1. Sistem refrigerasi CO₂ subkritikal

Seperti yang dibahas sebelumnya, refrigeran CO₂ memiliki titik kritis rendah yang membatasi temperatur kondensasi

maksimum hingga lingkungan 25 °C [25]. Untuk menjaga siklus di kondisi subkritikal sepanjang tahun, perlu menggunakan sistem bertingkat untuk menyerap panas yang dibuang di kondensor sistem tekanan rendah. Diagram skematik dari sistem kaskade sederhana menggunakan CO₂ saat siklus tingkat rendah ditampilkan pada Gambar 1. Sistem kaskade dibentuk oleh dua sistem tunggal yang terhubung oleh penukar kalor (heat exchanger). Sistem tekanan tinggi yang membuang panas ke media lingkungan dapat menggunakan berbagai refrigeran.



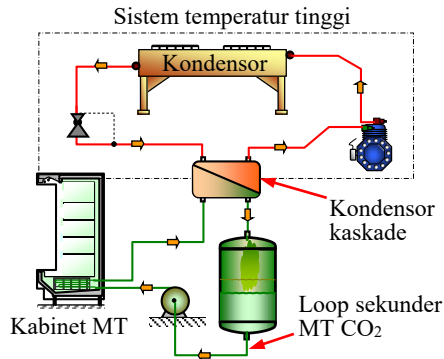
Gambar 1. Diagram skematik dari sistem kaskade dengan refrigeran CO₂ pada sistem temperatur rendah

Kinerja sistem kaskade subkritikal dalam aplikasi supermarket telah dilaporkan oleh sejumlah peneliti [26,27]. Penelitian lain juga telah dilakukan pada penggunaan semua sistem refrigerasi alami dalam susunan bertingkat. Fernandez-Seara et al. [28] mempelajari sistem refrigerasi bertingkat menggunakan CO₂ dan amonia sebagai refrigerasi di tingkat rendah. Sawalha et al. [29] mengevaluasi secara teoritis dan eksperimental kinerja sistem refrigerasi kaskade amonia / CO₂ untuk aplikasi supermarket. Para peneliti telah melaporkan bahwa sistem kaskade dapat memberikan COP yang lebih baik dibandingkan dengan sistem R404a konvensional. Sistem amonia/CO₂ kaskade serupa juga telah diselidiki oleh Lee et al. [30]; Getu dan Bansal [31]; Bingming et al. [32] dan Dopazo et al. [34]. Bansal dan Jain [35] meneliti sistem refrigerasi bertingkat dan menganalisis sistem menggunakan CO₂ dalam siklus tingkat rendah, sementara tingkat tinggi menggunakan berbagai refrigeran termasuk propena, propilen, amonia dan R404a.

3.2. Sistem refrigerasi CO₂ sebagai refrigeran sekunder

Gambar 2 dan 3 menunjukkan susunan sistem CO₂ subkritikal yang disederhanakan. Dengan susunan ini CO₂ bekerja sebagai sistem sekunder untuk sistem makanan dingin dan beku yang diatur sebagai unit paralel. Sirkuit CO₂ terhubung ke sistem refrigerasi utama yang bertindak sebagai tingkat tekanan tinggi. Temperatur evaporasi sistem tingkat tinggi harus lebih rendah dari temperatur saturasi sistem loop sekunder. Perbedaan temperatur tergantung pada efektivitas kondensor kaskade. Pada saat yang sama, temperatur saturasi loop sekunder harus cukup rendah untuk

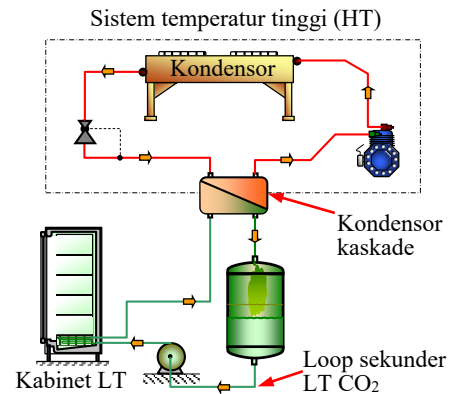
menjaga makanan dingin dalam kisaran antara $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan makanan beku dari antara $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Supermarket biasanya menggunakan temperatur saturasi dalam kisaran antara $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk loop LT (Low Temperature) dan dari $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ke $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk loop MT (Medium Temperature). Dengan tekanan yang sesuai dengan temperatur ini, dimungkinkan untuk menggunakan pipa refrigerasi dan komponen untuk sistem CO₂.



Gambar 2. Sistem medium temperatur (MT) tak langsung dengan CO₂ sebagai refrigeran sekunder

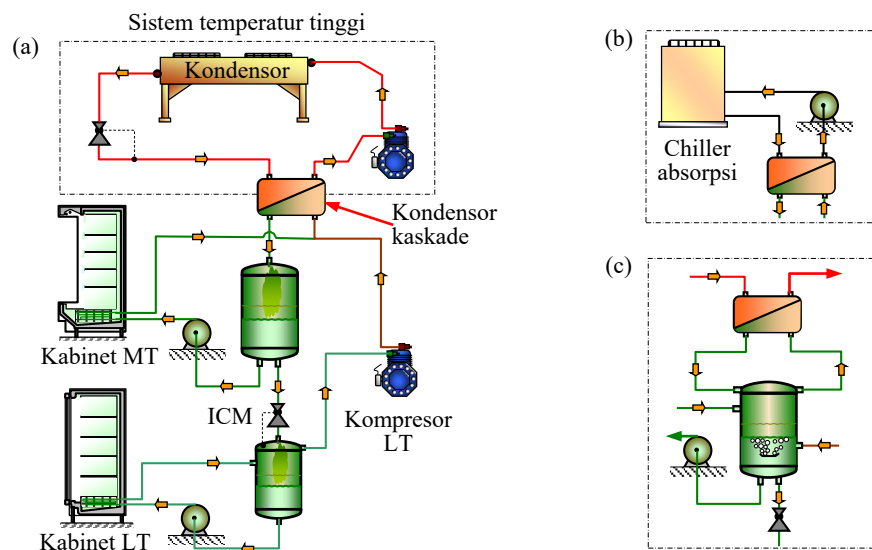
Sirkuit CO₂ berisi receiver bahwa CO₂ kembali dari kondensator bertingkat. Receiver juga berfungsi sebagai reservoir cair untuk pompa CO₂. Tingkat fluida dalam receiver dapat dihubungkan ke pengontrol pompa untuk memastikan pompa bekerja pada head hisap positif (NPSH)

yang dapat diterima. Oleh karena itu, ukuran receiver harus dirancang dengan hati-hati untuk dapat mengakomodasi fluktuasi CO₂ cair yang disebabkan oleh variasi.



Gambar 3. Sistem temperatur rendah (LT) tak langsung dengan CO₂ sebagai refrigeran sekunder

Pompa menyirkulasikan CO₂ cair di loop sekunder dari receiver ke evaporator dan menjaga evaporator tetap basah (flooded) untuk semua kondisi beban. Di evaporator, CO₂ cair menyerap panas dan beberapa di antaranya evaporasi. Campuran jenuh kemudian mengalir ke kondensator bertingkat di mana membuang panas ke sistem tingkat tinggi dan menjadi cair lagi. Dari kondensator CO₂ kembali ke receiver untuk pengulangan siklus.



Gambar 4. Sistem CO₂ subkritikal dengan LT DX; (a) kaskade dengan siklus kompresi uap pada sistem temperatur tinggi; (b) rangkaian alternatif untuk sistem tekanan tinggi dengan sistem absorpsi; (c) Model rangkaian lain pada sistem kaskade

Susunan lain untuk sistem CO₂ subkritikal yang mudah evaporasi ditunjukkan pada Gambar 4. Sistem ini menggunakan sirkuit LT DX dan loop sekunder LT untuk sistem temperatur rendah. Susunan ini hanya menggunakan satu sistem tingkat tinggi yang dapat meminimalkan biaya refrigeran dan risiko keselamatan jika refrigerasi alami lainnya seperti HC dan amonia digunakan. CO₂ cair dari receiver MT didistribusikan ke loop sekunder MT dan sistem LT. Untuk sistem LT, CO₂ cair mengalir melalui katup (ICM) di mana ia diekspansi ke tekanan evaporasi

tingkat rendah. Katup ICM dimodulasi untuk mempertahankan temperatur dan tingkat fluida loop sekunder LT relatif konstan. Dari katup ICM, campuran dua fase memasuki receiver LT di mana dipisahkan menjadi dua fase. Fase cair mengalir melalui loop sekunder LT dan gas jenuh memasuki kompresor LT dan dikompresi ke tingkat tekanan MT. Gas panas dari kompresor LT kemudian bercampur dengan campuran dua fase. Campuran kemudian memasuki kondensator bertingkat dan kembali ke receiver MT untuk menyelesaikan siklus. Penukar kalor internal

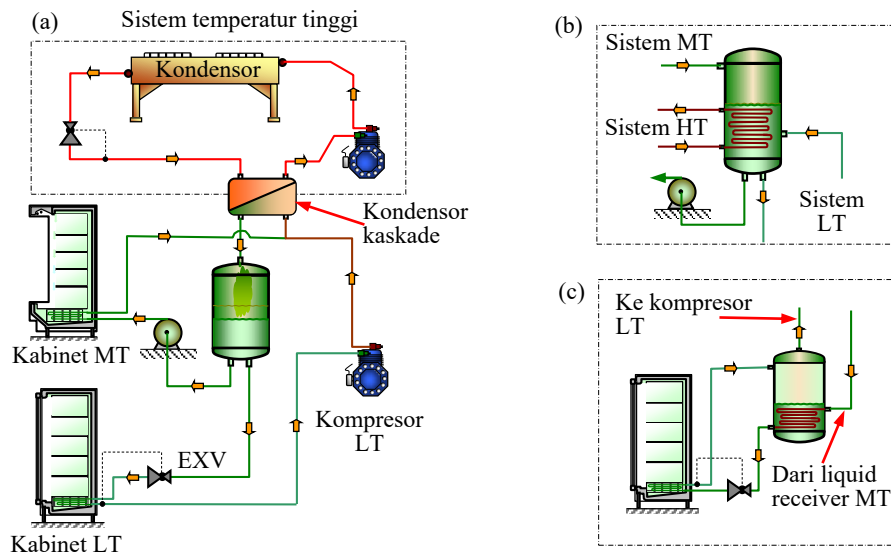
(IHX) mungkin diperlukan antara pipa hisap kompresor LT dan pipa cair di hulu katup ICM untuk memastikan tidak ada fluida pada pipa hisap kompresor.

Susunan di atas juga dapat menggunakan refrigerasi sorpsi di tingkat tinggi sebagai solusi alternatif untuk sistem kompresi uap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b), terutama di mana ada panas limbah yang tersedia, seperti halnya pada pembangkit listrik lokal. Susunan yang berbeda untuk konektor kaskade CO₂ juga dapat diterapkan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4(c).

Solusi CO₂ subkritis yang mudah evaporasi adalah sistem yang relatif sederhana untuk diimplementasikan dan menawarkan keunggulan dibandingkan sistem yang konvensional. Sistem CO₂ membutuhkan pipa dan komponen yang jauh lebih kecil, dan penghematan biaya instalasi dapat mencapai 12% [36]. Sehubungan dengan konsumsi energi, peneliti menyatakan bahwa solusi CO₂

sekunder dapat lebih hemat energi lingkungan 30% untuk sistem LT dan 20% untuk sistem MT. Rogstam [37] melaporkan bahwa CO₂ sekunder dapat memberikan pengurangan energi untuk pemompaan pada level 90% dibandingkan dengan pompa air garam kecepatan tetap dan pengurangan 50% dibandingkan dengan pompa air garam kecepatan variabel. Kemungkinan lain adalah mengoperasikan sistem CO₂ pada sirkulasi gravitasi

3.3. *Sistem refrigerasi sistem DX dan refrigeran sekunder*
 Sistem volatile-DX adalah sistem CO₂ subkritis dengan MT secondary loop bertingkat dengan sirkuit LT DX seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Keuntungan dari sistem ini adalah bahwa sistemnya sederhana tanpa pompa LT atau receiver LT untuk sirkuit LT.



Gambar 5. Sistem refrigerasi CO₂ kaskade dengan loop sekunder MT dan sistem LT DX; (b) Sistem kaskade alternatif untuk sistem HT; (c) Alternatif untuk evaporator LT (diadopsi dari Sawalha et al. [29])

Solusi sistem CO₂ subkritis dalam aplikasi supermarket memberikan beberapa keunggulan dibandingkan sistem konvensional. Biaya refrigerasi HFC pada sistem tingkat tinggi dapat dikurangi secara signifikan yang mengurangi dampak pada lingkungan. Sistem tingkat tinggi dapat ditempatkan di ruang mesin yang aman tanpa akses publik. Ini memberikan kemungkinan untuk menerapkan refrigeran alami lainnya seperti amonia dan hidrokarbon dengan risiko keamanan minimum. Juga telah dilaporkan bahwa konsumsi energi solusi supermarket CO₂ subkritis dapat sebanding dengan sistem R404a DX [25,27,29].

Hingga saat ini banyak sistem CO₂ subkritis telah diterapkan di negara-negara Uni Eropa seperti Denmark, Jerman, Norwegia, Swedia, Italia dan Inggris [25]. Sistem tersebut juga telah dilaporkan dalam aplikasi supermarket di Australia, Kanada dan Amerika Latin seperti yang dilaporkan [10,38,39].

3.4. *Sistem hanya dengan refrigeran CO₂*

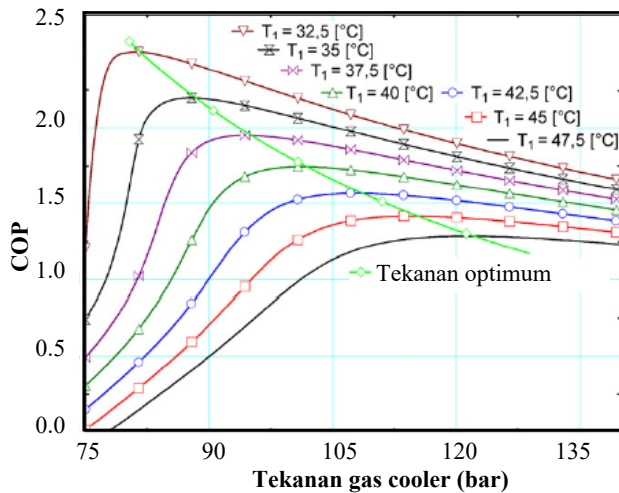
Sistem All-CO₂ menggunakan CO₂ sebagai satu-satunya refrigeran tanpa perlu refrigeran kedua di sisi tekanan tinggi dari susunan bertingkat untuk pembuangan panas. Ini meminimalkan dampak lingkungan dari kebocoran

refrigeran tetapi mengharuskan sistem untuk beroperasi di atas temperatur kritis CO₂ (secara transkritisal) pada temperatur tinggi. Pada temperatur di atas titik kritis, pembuangan panas terjadi sementara CO₂ dalam keadaan gas dan terjadi dalam gas refrigeran. Ini membutuhkan tekanan tinggi yang dapat menyebabkan konsumsi daya tinggi. Oleh karena itu, tekanan gas refrigeran menjadi parameter operasi yang sangat penting yang perlu dikontrol untuk mendapatkan kinerja terbaik.

Pada tingkat transkritisal tekanan pengoperasian refrigerasi transkritisal menjadi independen dari temperatur gas refrigeran keluar refrigerasi transkritisal. Gambar 6 menunjukkan bahwa tekanan operasi yang berbeda dapat dipilih pada temperatur keluar gas refrigeran. Angka ini juga menggambarkan tekanan pengoperasian yang optimal pada temperatur keluar yang berbeda dari refrigerasi transkritisal.

Temperatur CO₂ keluar dari refrigerasi transkritisal tergantung pada temperatur lingkungan dan panas dibuang dari refrigerasi transkritisal. Temperatur keluar dapat dipertahankan dekat dengan temperatur lingkungan dengan memodulasi kecepatan kipas. Tekanan refrigerasi transkritisal diatur oleh perangkat ekspansi tekanan tinggi (ICMT valve) dan tekanan operasi optimal dapat dicapai

dengan memodulasi katup ICMT yang menggabungkan pengontrol diferensial integral proporsional (PID). Parameter kontrol pengontrol sistem ini termasuk temperatur keluar dan tekanan aktual gas refrigeran.

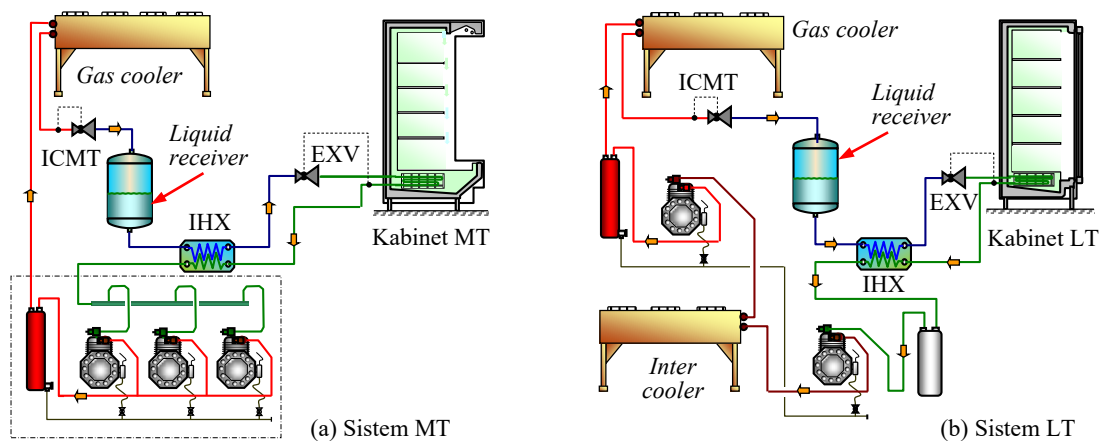


Gambar 6. COP siklus transkritisal CO₂ dengan tekanan gas cooler pada berbagai temperatur gas (T₁) [40]

3.4.1. Sistem CO₂ paralel

Gambar 7 menggambarkan sistem CO₂ paralel yang merupakan dua sirkuit DX terpisah. Satu rangkaian adalah untuk show case makanan dingin (MT) dan satu lagi untuk display cabinet makanan beku (LT). Sistem MT menggunakan kompresi tingkat tunggal sedangkan kompresi dua tingkat dengan intercooler biasanya digunakan untuk sistem LT. Dalam praktiknya, kedua sistem biasanya menggunakan paket multi-kompresor. Penukar kalor internal (IHX) juga umum digunakan untuk memastikan sistem memiliki uap CO₂ superpanas di pipa hisap kompresor.

Penggunaan kompresi dua tingkat dengan intercooler dapat mengurangi rasio tekanan dan temperatur keluar kompresor LT. Intercooler menghilangkan superheat uap CO₂ sebelum masuk kompresi tingkat kedua. Ini dapat menjaga temperatur sistem LT CO₂ di bawah 140 °C yang dianggap sebagai nilai yang dapat diterima untuk kompresor CO₂ [41]. Kompresi dua tingkat juga dapat meningkatkan efisiensi volumetrik dan isentropik kompresor LT.



Gambar 7. Sistem refrigerasi CO₂ paralel sederhana

3.4.2. Sistem booster CO₂ transkritisal

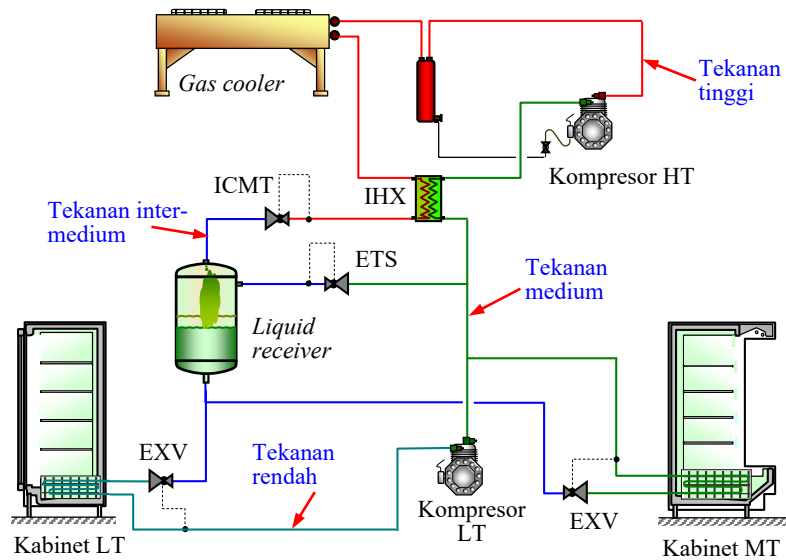
Dalam solusi sistem terintegrasi, sirkuit MT dan LT terhubung ke sirkuit pembuangan panas yang sama. Susunan ketiga sirkuit tergantung pada solusi sistem yang dipilih. Ini dijelaskan di bagian berikut.

Diagram yang disederhanakan dari sistem booster CO₂ transkritisal ditampilkan pada Gambar 8. Sistem ini dibagi menjadi 4 tingkat tekanan. Tekanan tinggi berada di kisaran antara 60 dan 90 bar_a. Ini menggabungkan keluar kompresor HT, refrigerasi transkritisal dan perangkat ekspansi tekanan tinggi (ICMT-motor operated valve driven by actuator). Tekanan menengah adalah dari 30 hingga 40 bar_a. Bagian ini dimulai dari hilir katup ICMT menggabungkan receiver dan katup bypass (ETS – Electric Expansion Valve) dan berakhir pada katup ekspansi sirkuit MT dan LT. Tingkat tekanan sedang berkisar antara 26 hingga 29 bar_a dan termasuk keluar kompresor LT, evaporator MT dan hisap kompresor HT. Bagian tekanan rendah berkisar antara 12

hingga 14 bar_a menggabungkan evaporator LT dan pipa hisap ke kompresor LT.

Fungsi utama katup bypass (ETS) adalah untuk menjaga tekanan di bagian tekanan menengah relatif konstan dengan melewati gas jenuh dari receiver ke bagian tekanan sedang. Katup bypass juga memastikan tekanan diferensial ada di antara pipa cair setelah liquid receiver dan koil evaporator MT untuk pengoperasian katup ekspansi MT yang tepat.

Dalam sistem booster CO₂, semakin rendah tekanan menengah semakin baik untuk efisiensi sistem yang dapat dijelaskan sebagai berikut: Tekanan menengah tidak mempengaruhi rasio tekanan kompresor LT dan HT yang berarti konsumsi daya kompresor tetap konstan. Efek refrigerasi dari evaporator MT dan LT, bagaimanapun, akan meningkat ketika tekanan menengah berkurang. Ini akan meningkatkan kapasitas refrigerasi sistem untuk mendapatkan efisiensi sistem yang lebih tinggi.



Gambar 8. Sistem booster CO₂ booster dengan *gas bypass* (diadopsi dari Danfoss [42])

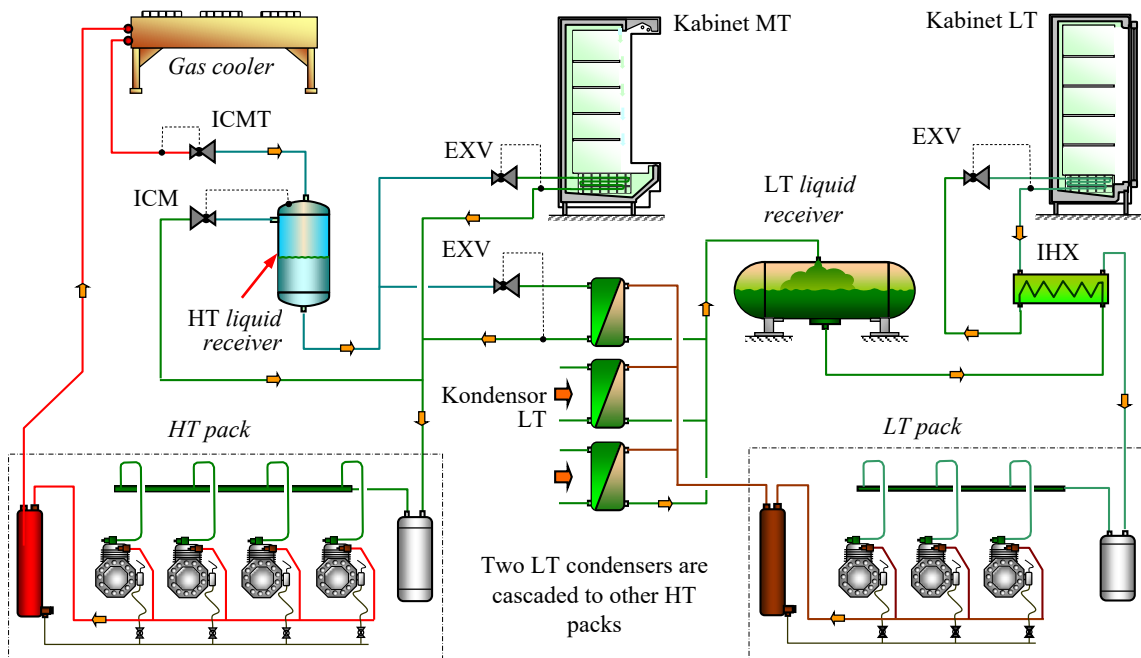
Untuk pengoperasian katup ekspansi MT, setidaknya perbedaan tekanan 4 bar dipertahankan di atas tekanan evaporator MT [42]. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi pengoperasian katup bypass dan kontrol tekanan menengah termasuk tekanan dan temperatur keluar refrigerasi transkritikal dan persyaratan untuk memiliki uap CO₂ superpanas saat masuk ke kompresor HT.

Gambar 9 juga menunjukkan sistem CO₂ ukuran kecil dengan sistem booster all-CO₂ terintegrasi. Sistem CO₂ menggunakan refrigerasi transkritikal berpendingin udara, dua kompresor paralel untuk sistem tekanan tinggi dan

kompresor tunggal untuk siklus tekanan rendah. Katup ICMT dan ICM digunakan untuk perangkat ekspansi tekanan tinggi dan katup bypass gas masing-masing. Pabrik CO₂ menggabungkan pengontrol Danfoss untuk kontrol dan pemantauan sistem.

3.4.3. Sistem CO₂ kaskade dengan flash gas bypass

Sistem CO₂ bertingkat dengan bypass gas flash ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Sistem CO₂ kaskade dengan *flash gas bypass*

Bagian pembuangan panas atau tingkat tinggi mirip dengan sistem booster. Bedanya, sistem LT bertingkat sebagai sirkuit individu dengan sistem HT untuk pembuangan panas. Evaporator MT dibagi menjadi dua

kelompok: satu menyediakan refrigerasi ke cabinet MT dan yang lainnya mengembun gas CO₂ untuk sistem LT.

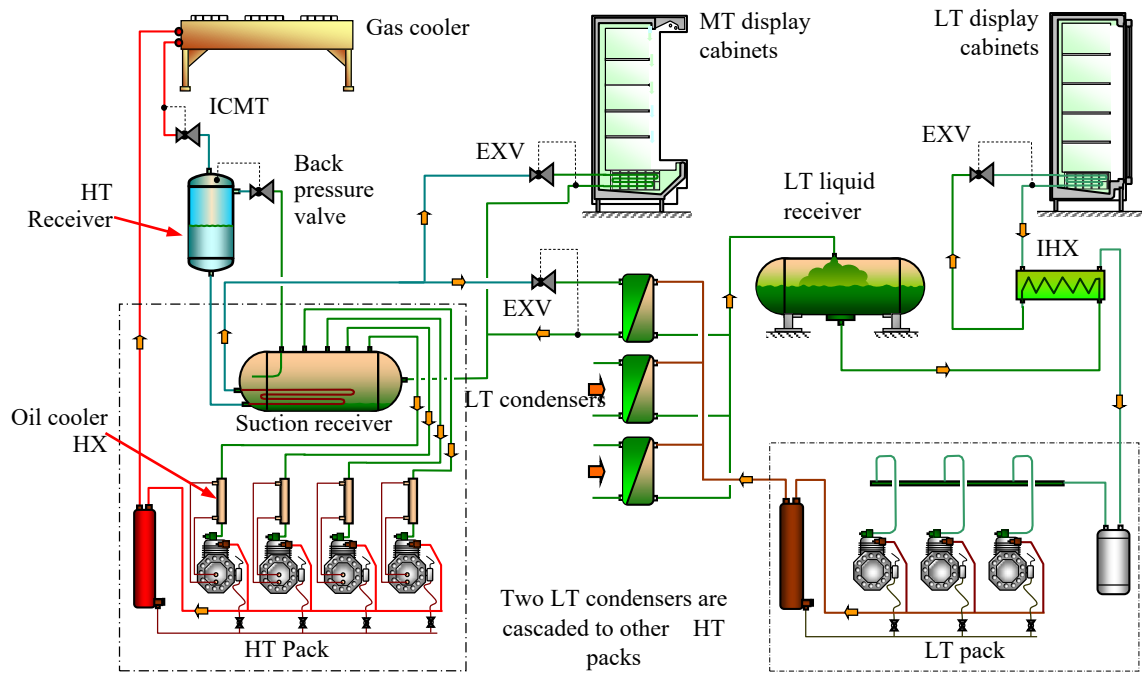
Solusi ini telah diterapkan di sejumlah supermarket Inggris [43]. Investigasi kinerja telah menunjukkan kinerja

energi musimannya hampir sama dengan sistem R404A konvensional [44-46]. Untuk mendapatkan keuntungan penuh dari operasi subkritikal ketika temperatur lingkungan rendah katup bypass diperlukan secara paralel dengan katup ICMT (katup bypass tidak ditunjukkan dalam diagram). Katup bypass ditutup ketika temperatur lingkungan berada di atas nilai tertentu (titik peralihan antara operasi subkritikal dan transkritikal) untuk memungkinkan katup ICMT untuk mengatur aliran gas CO₂ keluar dari refrigerasi transkritikal dan terbuka di bawah titik peralihan untuk

memungkinkan CO₂ cair mengalir bebas dari kondensor (refrigerasi transkritikal) ke receiver fluida.

3.4.4. Sistem CO₂ dengan sebuah suction receiver

Sistem CO₂ bertingkat dengan receiver tekanan rendah adalah peningkatan pada sistem kaskade dengan bypass gas flash. Seperti dapat dilihat pada Gambar 10, receiver hisap ditambahkan pada sisi sistem temperatur tinggi. Katup back pressure digunakan sebagai katup bypass untuk meminimalkan fluktuasi tekanan menengah karena tekanan dan variasi temperatur di outlet refrigerasi transkritikal.



Gambar 10. Sistem CO₂ kaskade dengan *suction receiver*

Dengan susunan ini evaporator MT dapat ditetapkan pada nol superheat yang dapat meningkatkan kapasitas refrigerasi dan COP sistem. Untuk memastikan tidak ada fluida yang masuk ke kompresor, sistem ini dilengkapi dengan HX oli refrigerant di pipa hisap setiap kompresor HT. Menurut Campbell [43] sistem ini dapat beradaptasi dengan beban yang variabel.

Gambar 10 menyajikan sistem cascade all-CO₂ terintegrasi dengan receiver hisap yang diterapkan di supermarket Inggris. Supermarket jenis ini memiliki area penjualan 2.300 m². Sistem refrigerasi CO₂ dari supermarket ini merupakan 4 pack sistem HT dan 2 pack LT. Setiap pack HT terdiri dari 3 kompresor, refrigerasi transkritikal berpendingin udara, dan receiver hisap (volume 0,26 m³). Pack LT menggabungkan 3 kompresor LT, liquid receiver (volume 0,13 m³) dan 3 kondensor. Untuk keandalan sistem refrigerasi LT, setiap paket LT dikaskade dengan tiga pack HT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.

3.5. Sistem booster CO₂ dengan subcooling mekanik

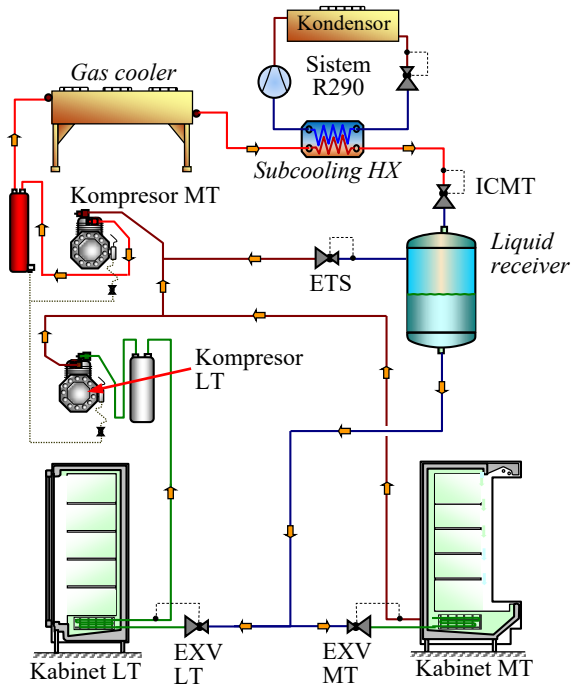
Metode umum yang digunakan dalam sistem berbasis CO₂ dengan tujuan untuk mengurangi konsumsi energi adalah penambahan konfigurasi subcooling mekanik khusus setelah kondensor / gas transkritikal. Konfigurasi ini terdiri

dari sistem sederhana yang menggabungkan kompresor, kondensor, katup throttling, dan evaporator. Evaporator sistem ini adalah penukar kalor yang menyerap panas dari CO₂, sehingga mengurangi temperaturnya. Dengan cara ini, kualitas CO₂ yang memasuki receiver fluida berkurang dan sebagai hasilnya, lebih sedikit refrigeran yang dikompresi dalam kompresor MT. Konfigurasi yang diadopsi dalam penelitian ini menggunakan R290 sebagai refrigeran, dan temperatur lingkungan di mana sistem ini beroperasi.

Fluida kerja ini adalah fluida kerja alami (propana) dengan GWP rendah sekitar 3,3, nol ODP dan tidak beracun. Jadi, ini adalah refrigeran ramah lingkungan yang cocok untuk sistem CO₂ yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari sistem. Satu-satunya kerugian dari R290 adalah flammability tinggi yang memerlukan sistem yang tepat dengan standar keamanan yang tinggi. Namun, R290 digunakan dalam aplikasi nyata dan ada personel berpengalaman yang harus bekerja dalam sistem ini. Gambar 11 menggambarkan sistem booster konvensional yang tidak menggabungkan konfigurasi sub-cooling mekanik khusus sedangkan Gambar 12 dilengkapi dengan sub-cooling mekanik [47].

Untuk mengurangi ketidakefisienan yang disebutkan di atas, Fazelpour dan Morosuk [48] merekomendasikan yang bertujuan mengurangi temperatur CO₂ yang keluar dari

refrigerasi transkritisal. Seperti yang dilaporkan pada [49-51], target ini dapat dicapai dengan bantuan sub-cooling mekanik khusus, yang memungkinkan refrigeran untuk masuk ke evaporator dengan kualitas uap yang lebih rendah dan, dengan demikian, menyebabkan kenaikan efek refrigerasi. Juga, seperti yang dijelaskan oleh peneliti [52-54]. Tekanan tinggi yang optimal, yang memaksimalkan koefisien kinerja (COP), harus dievaluasi sebagai fungsi temperatur keluar refrigerasi transkritisal saat mode berjalan transkritisal terjadi. Seperti yang dilaporkan di dalam [49], integrasi sub-cooling mekanik khusus juga memungkinkan penurunan tekanan pembuangan panas yang optimal serta menimbulkan peningkatan kinerja tambahan.

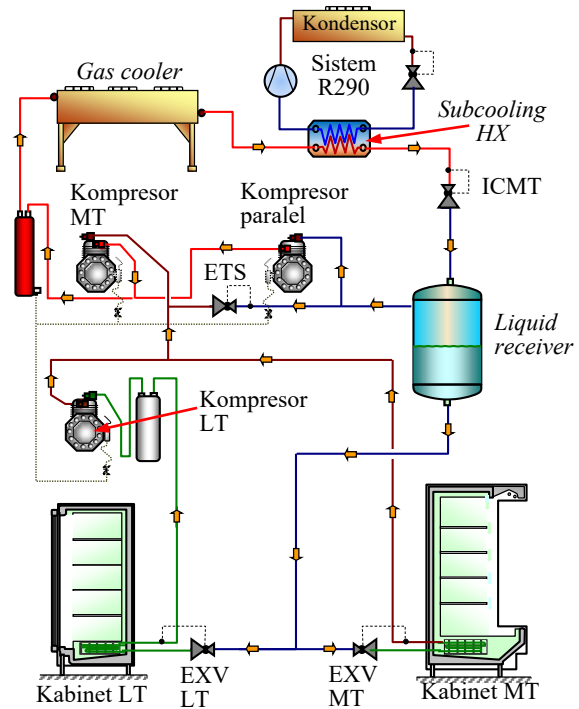


Gambar 11. Sistem booster CO₂ dengan sub-cooling mekanik

3.6. Sistem booster CO₂ dengan kompresor paralel

Sistem lain yang dipelajari dalam paper ini adalah sistem booster CO₂ dengan penambahan kompresor paralel. Pada kondisi temperatur lingkungan yang tinggi, seperti yang terjadi di Athena, kualitas refrigeran yang masuk ke receiver menjadi lebih tinggi, yang menyebabkan peningkatan massa uap yang perlu dikompresi oleh kompresor MT. Untuk mengurangi konsumsi energi yang besar, solusi kompresor tambahan diterapkan. Tujuan kompresor ini adalah untuk mengompresi uap dari receiver ke sistem tekanan tinggi dari sistem tekanan menengah.

Manfaat dari sistem ini adalah fakta bahwa dalam sistem booster, gas flash dikompresi dari sistem temperatur sedang, sehingga mengkonsumsi lebih banyak energi daripada dalam kasus ketika kompresi dimulai dari tekanan menengah. Konfigurasi ini juga diselidiki dengan penambahan sub-cooling mekanik khusus yang bekerja dengan R290. Gambar 12 merupakan sistem CO₂ yang menggunakan kompresi paralel, dengan menerapkan sub-cooling mekanik.



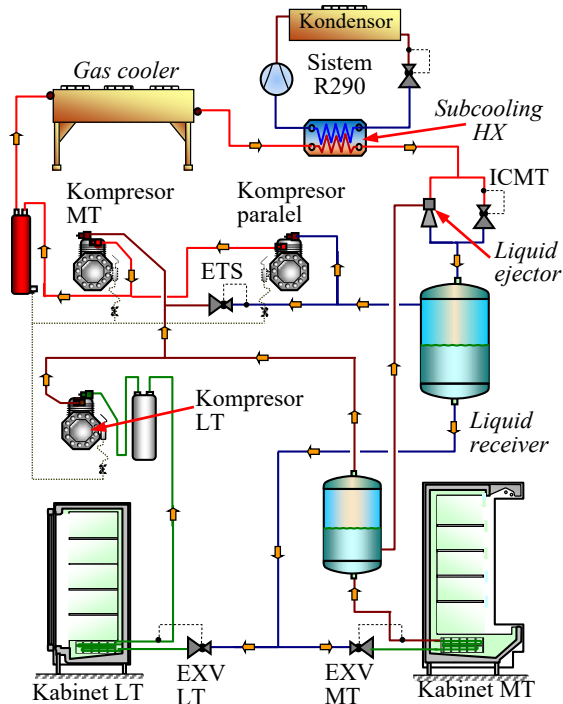
Gambar 12. Sistem CO₂ booster dengan paralel kompresor dan sub-cooling mekanik

3.7. Sistem booster CO₂ dengan kompresor paralel, evaporator MT overfed dan internal HX LT

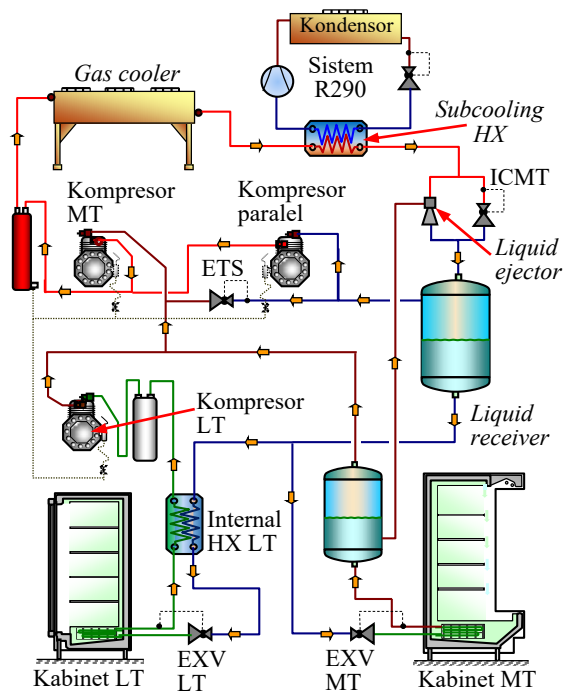
Konfigurasi yang disajikan berikutnya adalah konfigurasi yang memiliki evaporator overfed. Fluida overfeed memberikan refrigeran cair yang lebih besar ke evaporator daripada yang evaporasi total. Biasanya, bagian dari evaporator ditentukan untuk superheating refrigeran. Namun, koefisien perpindahan panas di wilayah aliran dua fase lebih tinggi daripada refrigeran superpanas fase tunggal. Teknik over-fed ini, memanfaatkan CO₂ cair di semua area evaporator. Koefisien transfer panas yang lebih tinggi dan tidak perlu superheating menghasilkan temperatur evaporasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional [47, 55-58]. Konsumsi daya berkurang 2-3% ketika temperatur evaporasi meningkat 1 K. Metode untuk over-fed MT evaporator dapat dilakukan melalui pemanfaatan ejektor cair dan tangki ekstra yang disebut akumulator. Ketika over-fed dari evaporasi terjadi, refrigeran cair masih ada di bagian keluar evaporator, karena belum dipanaskan.

Refrigeran tentunya tidak boleh memasuki kompresor dalam kondisi fase campuran ini, karena refrigeran cair dalam aliran hisap kompresor dapat menyebabkan kerusakan mekanik pada kompresor. Oleh karena itu, akumulator ditempatkan setelah evaporator MT, di mana refrigeran keluar dari evaporator MT dipisahkan menjadi bagian uap dan cainya. Uap yang keluar dari akumulator bercampur dengan refrigeran yang telah dikompresi di kompresor LT, sedangkan komponen cainya dialirkan ke ejektor cair. Ejektor cair ditempatkan sejajar dengan katup high-pressure, dan ketika refrigeran cair masuk ke dalam ejektor, sejumlah refrigeran bertekanan tinggi masuk ke ejektor. Jumlah total refrigeran yang keluar dari ejektor cair bercampur dengan refrigeran yang keluar dari katup

bertekanan tinggi, dan kemudian masuk ke liquid receiver dalam tekanan menengah. Sistem dengan evaporator MT overfed dan kompresi paralel diilustrasikan dalam Gambar 13. Seperti pada sistem sebelumnya, konfigurasi sub-cooling mekanik dapat diintegrasikan juga ke dalam sistem.



Gambar 13. Sistem CO₂ booster dengan kompresor paralel dan evaporator MT overfed



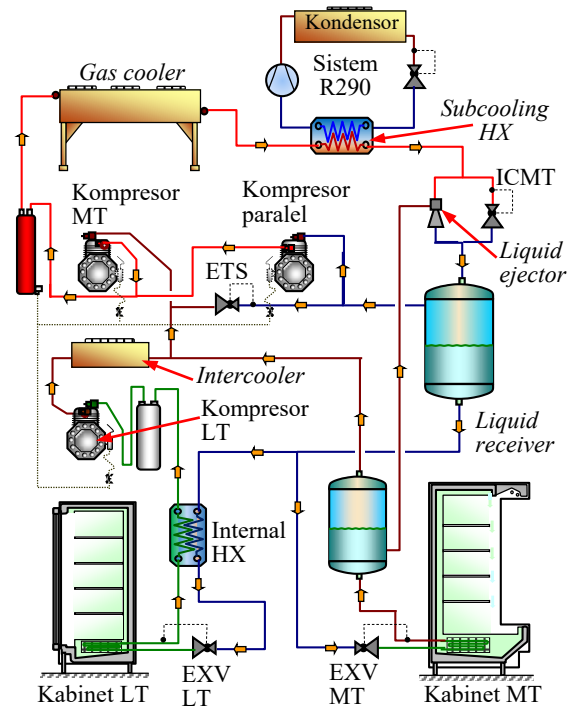
Gambar 14. Sistem CO₂ booster dengan kompresor paralel, MT overfed dan internal-HX LT

Metode over-fed pada evaporator LT dengan penggunaan penukar kalor internal antara refrigerasi sebelum katup ekspansi LT dan refrigerasi setelah evaporator LT. Dalam hal ini, refrigeran yang tidak superpanas keluar dari evaporator LT dipanaskan di dalam

penukar kalor, menyerap panas dari refrigeran yang memasuki katup ekspansi yang disub-cooled [49]. Teknik ini menawarkan peluang peningkatan temperatur evaporasi evaporator LT, sehingga mengurangi konsumsi daya di kompresor LT. Pemakaian penukar kalor seperti itu ditampilkan dalam Gambar 14. Penambahan sub-cooling mekanik khusus juga diaplikasikan [49,58].

3.8. Sistem booster CO₂ dengan kompresor paralel evaporator MT overfed dan intercooler

Penggunaan intercooler setelah kompresor LT adalah pilihan lain untuk mengurangi konsumsi listrik dalam sistem. Intercooler ditempatkan di luar ruangan, di mana refrigeran membuang panas ke lingkungan. Penggunaan perangkat ini secara signifikan mengurangi temperatur refrigerasi yang memasuki kompresor MT, yang mengarah pada penghematan energi. Penambahan teknologi ini diilustrasikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Sistem CO₂ booster dengan kompresor paralel, MT overfed, internal-HX LT dan intercooler

4. Kesimpulan

Kelebihan dan kekurangan berbagai teknologi sistem CO₂ telah disajikan. Sistem dengan refrigeran CO₂, dengan ODP nol dan GWP satu, memiliki dampak yang jauh lebih rendah terhadap lingkungan dibandingkan dengan refrigerasi HCFC dan HFC. Memiliki sifat termo-fisik yang menarik, sistem refrigerasi CO₂ dapat memberikan perpindahan panas yang baik dalam penukar panas dari sistem refrigerasi yang memungkinkan pemilihan peralatan yang lebih kecil daripada refrigerasi HCFC dan HFC.

Berbagai solusi dan susunan sistem refrigerasi CO₂ untuk aplikasi supermarket yang termasuk dalam dua kategori utama: sistem kaskade subkritikal dan sistem transkritikal. Sistem kaskade subkritikal beroperasi pada tekanan sedang dan menerapkan dua refrigeran satu untuk refrigerasi dan satu lagi untuk pembuangan panas. Sedangkan sistem transkritikal beroperasi pada tekanan tinggi pada temperatur lingkungan tinggi tetapi hanya

menggunakan CO₂ sebagai refrigeran. Perkembangan terbaru dari sistem refrigerasi CO₂ dan aplikasi di supermarket juga disajikan.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan banyak terima kasih atas bantuan atau dukungan dari peneliti, unit publikasi P3M Politeknik Negeri Bali yang telah membantu penyelesaian dan publikasi paper ini.

Daftar Pustaka

- [1] G. Lorentzen, "The use of natural refrigeran: a complete solution to the CFC/HCFC predicament", *Int. J. Refrigeration*, 18, 1995, pp. 190-197.
- [2] S.B. Riffat, C.F. Afonso, A.C. Oliveira, D.A. Reay, "Natural refrigerans for refrigeration and air-conditioning system", *Appl. Therm. Eng.*, 17, 1997, pp. 33-42.
- [3] TOC, "Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps", UNEP, Nairobi, 2006, 223 pgs.
- [4] ATMOSphere, "How to bring natural refrigerans faster to market: A summary report. International workshop on Natural Refrigerans", Brussels, Belgium, 2010, 42 pgs.
- [5] BS EN 378-1, "Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements: Part 1 - Basic requirements, definitions, classification and selection criteria", BSI, UK, 2008, 68 pgs.
- [6] ASHRAE Standard 34, "Designation and safety classification of refrigerans", ASHRAE, Inc., Atlanta, 2007, 53 pgs.
- [7] A. Pearson, "Refrigeration with Ammonia", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 545-551
- [8] D. Hinde, "Applying natural refrigerans in supermarket refrigeration", ASHRAE winter conference, Las Vegas, USA, 2011.
- [9] P. Rivet, "A green and up to date retail store. Proc. International Conference New Technologies in Commercial Refrigeration", Urbana, IL, USA, 2002, pp. 31-34.
- [10] M. Bellstedt, "Carbon dioxide systems for supermarkets review", Green Cooling Council (GCC), 2008, 5 pgs.
- [11] J. Gartshore, and S. Benton, "Cool concerns and Waitrose to support the use of hydrocarbons", 2010.
- [12] Lidl, "Two hundred Lidl stores to feature R290 technology by 2012", 2011.
- [13] Shecco. F-Gas Regulation shaking up the HVAC&R industry. October 2016; Brussels, Belgium
- [14] Gullo P, Hafner A, Cortella G. Multi-ejector R744 booster refrigerating plant and air conditioning system integration – A theoretical evaluation of energy benefits for supermarket applications. *Int J Refrig* 2017;75:164-76.
- [15] Hafner A, Försterling S, Banasiak K. Multi-ejector concept for R-744 supermarket refrigeration. *Int J Refrig* 2014;43:1-13.
- [16] Gullo P, Cortella G, Minetto S, Polzot A. Overfed evaporators and parallel compression in commercial R744 booster refrigeration systems –An Assessment of energy benefits. In: *Proceedings of the 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference*; 21-24 August 2016; Edinburgh, UK. ID: 1039.
- [17] Minetto S, Brignoli R, Zilio C, Marinetti S. Experimental analysis of a new method of overfeeding multiple evaporators in refrigeration systems. *Int J Refrig* 2014;38:1-9.
- [18] Gullo P, Elmegaard B, Cortella G. Energy and environmental performance assessment of R744 booster supermarket refrigeration systems operating in warm climates. *Int J Refrig* 2016;64:61-79.
- [19] Polzot A, D'Agaro P, Gullo P, Cortella G. Modelling commercial refrigeration systems coupled with water storage to improve energy efficiency and perform heat recovery. *Int J Refrig* 2016;69:313-23.
- [20] Javerschek O, Reichle M, Karbinger J. Optimization of parallel compression systems. In: *Proceedings of the 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference*; 21-24 August 2016; Edinburgh, UK. ID: 1184.
- [21] V. Sharma, B. Fricke, P. Bansal, "Comparative analysis of various CO₂ configurations in supermarket refrigeration systems", *Int. J. Refrig.*, 46, 2014, pp. 86-89.
- [22] M. Lata and D.K. Gupta, "Performance evaluation and comparative analysis of transcritical CO₂ booster refrigerations systems with modified evaporative cooled gas cooler for supermarket application in Indian Context", *Int. J. Refrig.*, 120, 2020, pp. 248-259.
- [23] Z. Sun, J. Li, Y. Liang, H. Sun, S. Liu, L. Yang, C. Wang, B. Dai, "Performance assessment of CO₂ supermarket refrigeration system in different climate zones of China", *Energy Convers. Manage.*, 208, 2020, 112572
- [24] IPCC, "Safeguarding the ozone layer and the global climate system. UN-Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005, 478 pgs.
- [25] J.M. Rhiemeier, J. Harnisch, C. Ters, M. Kauffeld, A. Leisewitz, "Comparative assessment of the climate relevance of supermarket refrigeration systems and equipment", Federal Environment Agency, 2009, 270 pgs.
- [26] A. Campbell, G.G. Maidment, J.F. Missenden, "A natural refrigeration system for supermarkets using CO₂ as a refrigeran", *Proc. CIBSE National Conference*, London, UK, 2006.
- [27] D. Hinde, S. Shitong Zha, L. Lan, "Carbon dioxide in North American supermarkets", *ASHRAE Journal* 51, 2009, pp. 18-26.
- [28] J. Fernandez-Seara, J. Sieres, and M. Va'zquez, "Compression-absorption cascade refrigeration system", *Appl. Therm. Eng.*, 26, 2006, pp. 502-512.
- [29] S. Sawalha, K.A. Soleimani, J. Rogstam, "Experimental and theoretical evaluation of NH₃/CO₂ cascade system for supermarket refrigeration in laboratory environment", *Proc. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*, Trondheim, Norway, 2006.

- [30] T.S. Lee, C.H. Liu, T.W. Chen, "Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems", *Int. J. Refrigeration*, 29, 2006, pp. 1100-1108.
- [31] H.M. Getu, and P.K. Bansal, "Thermodynamic analysis of an R744–R717 cascade refrigeration system", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 45-54.
- [32] W. Bingming, W. Huagen, L. Jianfeng, and X. Ziwen, "Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with twin-screw compressor", *Int. J. Refrigeration*, 32, 2009, pp. 1358-1365.
- [34] J.A. Dopazo, J. Fernández-Seara, J. Sieres, and F.J. Uhía, "Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures", *Appl. Therm. Eng.*, 29, 2009, pp. 1577–1583.
- [35] P.K. Bansal, and S. Jain, "Cascade systems: past, present, and future", *ASHRAE Transactions*, 113, 2007, pp. 245-252.
- [36] Danfoss, "Experience significant savings with the Danfoss pumped CO₂ solution", 2010.
- [37] J. Rogstam, "Ice rinks using carbon dioxide as secondary refrigerant", *Proc. Sustainable Refrigeration and Heat Pump Conference*, Stockholm, Sweden, 2010, 9 pgs.
- [38] CanmetENERGY, "CO₂ as a refrigerant in a Sobeys Supermarket, a case study", *Natural Resources Canada*, 2009, 8 pgs.
- [39] Verdemar, "The first supermarket in Latin America that uses CO₂ as a refrigerant", 2010, 9 pgs.
- [40] S. Sawalha, "Theoretical evaluation of transcritical CO₂ systems in supermarket refrigeration, Part I: Modelling, simulation and optimization of two system solutions", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 516-524.
- [41] S. Giroto, S. Minetto, P. Neksa, "Commercial refrigeration system using CO₂ as the refrigerant", *Int. J. Refrigeration*, 27, 2004, pp. 717-723.
- [42] Danfoss, "Transcritical CO₂ systems in a small supermarket", 2008.
- [43] A. Campbell, "Working with CO₂ supermarkets", 2009.
- [44] I.N. Suamir, "Integration of trigeneration and CO₂ based refrigeration systems for energy conservation", PhD Thesis, in Department of Mechanical Engineering, Brunel University, 2012, 272 pgs.
- [45] I.N. Suamir, S.A. Tassou, "Performance evaluation of integrated trigeneration and CO₂ refrigeration systems", *Appl. Therm. Eng.*, 50, 2013, pp. 1487-1495.
- [46] I.N. Suamir, S.A. Tassou, D. Marriott, "Integration of CO₂ refrigeration and trigeneration systems for energy and GHG emission savings in supermarkets", *Int. J. Refrig.*, 35, 2012, pp. 407-417.
- [47] G. Mitsopoulos, E. Syngounas, D. Tsimpoukis, E. Bellos, C. Tzivanidis, S. Anagnostatos, "Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO₂ refrigerant", *Energy Conversion and Management: X*, 1, 2019, 100006.
- [48] F. Fazelpour, T. Morosuk, "Exergoeconomic analysis of carbon dioxide transcritical refrigeration machines. *Int. J. Refrig.*, 38, 2014, pp., 128–139.
- [49] R. Llopis, R. Cabello, D. Sánchez, E. Torrella, "Energy improvement of CO₂ transcritical refrigeration cycles using dedicated mechanical subcooling", *Int. J. Refrig.*, 55, 2015, pp. 129–141.
- [50] P. Gullo, "Advanced thermodynamic analysis of transcritical R744 booster refrigerating unit with dedicated mechanical subcooling", *Energies*, 11, 2018, 3058.
- [51] P. Gullo, A. Hafner, K. Banasiak, "Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives", *Int. J. Refrig.*, 93, 2018, pp. 269-310.
- [52] Lorentzen, G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant. *Int. J. Refrig.* 1994, 17, 292–301.
- [53] Liao, S.M.; Zhao, T.S.; Jakobsen, A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. *Appl. Therm. Eng.* 2000, 20, 831–841.
- [54] Kim, M.-H.; Pettersen, J.; Bullard, C.W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2004, 30, 119–174.
- [55] M. Karampour, S. Sawalha, "State-of-the-art integrated CO₂ refrigeration system for supermarkets: a comparative analysis", *Int J Refrig.*, 86, 2018, pp. 239–57.
- [56] S. Minetto, R. Brignoli, C. Zilio, S. Marinetti, "Experimental analysis of a new method for overfeeding multiple evaporators in refrigeration systems", *Int J Refrig.*, 38, 2014; pp. 1–9.
- [57] S. Bortolin, M. Rossato, S. Bernardinello, D. Del Col, "Investigation of evaporator performance with and without liquid overfeeding", In: 16th International refrigeration and air conditioning conference at Purdue, July 11–14; 2016, p. 2305.
- [58] P. Gullo, K. Tsamos, A. Hafner, Y. Ge, S.A. Tassou, "State of the art technologies for transcritical R744 refrigeration systems – a theoretical assessment of energy advantages for European food retail industry", *The 1st ICSEF 19-20 April 2017, Berkshire, UK, Energy Procedia*, 123, 2017, pp 46-53.