

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Various Methods to Improve Energy Efficiency in Industrial Refrigerators

Buğra Şensoy^a, Mustafa Aktaş^b

Submitted: 13.10.2023 Revised: 01.11.2023 Accepted: 09.02.2024 doi:10.30855/gmbd.0705N04

ABSTRACT

Keywords: Industrial refrigerator, Energy consumption, Opportunities for energy efficiency, Thermal insulation, Eco design

^{a,*} Gazi University,
Institute For Graduate Studies In
Pure and Applied Sciences,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-7350-9540
e mail: bugra.sensoy@gazi.edu.tr

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560- Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1187-5120

*Corresponding author:
bugra.sensoy@gazi.edu.tr

Effective and efficient energy consumption, environmental sensitivities, climate change, and global warming are significant issues that the world is currently focusing on. Industrial refrigerators are the devices that have significant effects under the mentioned headings. Environmental sensitivities should be valued when improving innovative designs for effective and efficient energy consumption in industrial refrigerators. Moreover, with both international and national regulations recently, designs to be made at this point have become an obligation rather than a necessity. This study aims to use energy effectively and efficiently, creating an energy efficiency factor in industrial refrigerators; various aspects, such as components, insulation, refrigerant, control technique, ambient conditions, cooling cycle, and airflow were studied from different perspectives and grouped, and the outputs obtained as a result of the studies were compiled. The grouped and compiled outputs were presented title-based and optimum solutions in terms of energy efficiency were discussed. The presented outputs will be used as effective design inputs in the studies carried out by researchers and product manufacturers, thus, as a result of innovative studies that create energy efficiency, designs with substantial environmental sensitivity, especially carbon emissions, will emerge. In addition, it thought that innovative and efficient designs would make direct and indirect contributions to the economy.

Endüstriyel Soğutucularda Enerji Verimliliğini Arttırmaya Yönelik Çeşitli Yöntemler

ÖZ

Enerjinin etkin ve verimli kullanılması, çevresel hassasiyetler, iklim değişimi ve küresel ısınma güncel olarak tüm dünyanın üzerinde durduğu önemli başlıklardır. Endüstriyel soğutucular da bahsedilen başlıklar içinde önemli etkilere sahip cihazlardır. Endüstriyel soğutucularda enerjinin etkin ve verimli kullanımına ilişkin yenilikçi tasarımlar geliştirirken çevresel hassasiyetler de göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, son zamanlarda gerek uluslararası gerekse de ulusal düzenlemelerle bu noktada yapılacak tasarımlar gereklilikten ziyade bir zorunluluk haline gelmiştir. Enerjinin etkin ve verimli kullanılmasını amaç edinen bu çalışmada, endüstriyel soğutucularda enerji verimliliği unsuru yaratan; komponentler, yalıtım, soğutucu akışkan, kontrol tekniği, ortam şartları, soğutma çevrimi ve hava akışı bazlı farklı perspektifteki çalışmalar incelenerek gruplandırılmış ve çalışmalar sonucunda ortaya konulan çıktılar derlenmiştir. Gruplandırılan ve derlenen çıktılar başlık temelli sunularak enerji verimliliği açısından optimum çözümler tartışılmıştır. Sunulan çıktılar, araştırmacı ve ürün üreticilerinin gerçekleştirecekleri çalışmalarda etkin tasarım girdileri olarak kullanılacak böylelikle enerji verimliliği yaratan yenilikçi çalışmaların sonucunda da karbon salınımı başta olmak üzere çevresel hassasiyeti güçlü tasarımlar ortaya çıkacaktır. Ayrıca yenilikçi ve verimli olarak geliştirilen tasarımların ekonomiye de doğrudan ve dolaylı katkılar vereceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel soğutucu, Enerji tüketimi, Enerji verimliliği için fırsatlar, Isı yalıtımı, Eko dizayn

1. Giriş (Introduction)

Dünya’da enerji talebi; nüfus artışı, teknoloji gelişimi ve tüketim alışkanlıklarında yaşanan değişime bağlı olarak günden güne artış göstermektedir. Enerji talebinin karşılanabilmesi için de başta fosil yakıtların kullanılması olmak üzere çevreye ciddi boyutta zarar verilmektedir. Bu süreçte, oluşan zararları minimize etmek için; enerjinin etkin ve tasarruflu olarak kullanılabilmesini amaçlayan enerji verimliliği kavramı öne çıkmaktadır.

Enerji tüketimi özellikle endüstride oldukça fazla olduğundan verimlilik çalışmalarında endüstriyel cihazlara ayrıca önem verilmesi gerekir. Soğutma sektöründe kullanılan endüstriyel soğutucular da dünya enerji tüketiminde ciddi paya sahip cihazlardır. Salehy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (2020), soğutma sistemlerinin dünyadaki enerji talebinin yaklaşık %17’sini tükettiği ve yine bu sistemlerin dünya sera gazı emisyonunun yaklaşık %8’inden sorumlu olduğu belirtilmiştir [1].

Soğutma sistemleri içerisinde yer alan endüstriyel soğutucular, ürünlerin muhteviyatlarına göre, özelliklerini koruyarak belirli bir sıcaklık ve nem altında muhafaza edilmesini sağlayan sistemlerdir. Endüstriyel soğutucular, depolama veya teşhir amaçlı tasarlanırken konuya ilişkin detaylı sınıflandırma *TS EN ISO 23953* numaralı standart uyarınca yapılmaktadır. İlgili standart dahilinde endüstriyel soğutucular içerisinde; chiller grupları, soğutmalı vitrin ve teşhir dolapları, profesyonel kullanım için şok soğutucular, dondurma tezgâhları, soğutmalı otomatlar, buz yapıcılar gibi birçok farklı ürün gamı bulunmaktadır. Endüstriyel soğutucular; soğutma amacı, ortama bağlı gereklilikler, düşük ya da orta sıcaklık uygulamaları gibi kriterlere göre seçilirken, soğutma yükü ihtiyacı doğrultusunda çok geniş ürün yelpazesine sahip ürünlerdir.

Endüstriyel soğutucuların oldukça geniş yer bulduğu konulardan birisi de süpermarketlerdir. Süpermarketler içerisinde özellikle teşhir tipi endüstriyel soğutucular sıklıkla tercih edilmekte olup bu soğutucu çeşidi, muhafaza sıcaklığına göre sınıflara ayrılmaktadır. Tablo 1.’de teşhir tipi endüstriyel soğutucuların sıcaklık sınıflandırılmasına yer verilmiştir [2].

Tablo 1. Teşhir tipi endüstriyel soğutucuların sınıflandırma parametreleri [2] (Classification parameters of industrial display refrigerator)

Soğutucu Sınıfı	En sıcak ürün paketinin en yüksek değeri, (°C)	En soğuk ürün paketinin en düşük değeri, (°C)	En sıcak ürün paketinin en düşük sıcaklık değeri, (°C)
L1	-15	-	-18
L2	-12	-	-18
L3	-12	-	-15
M1	+5	-1	-
M2	+7	-1	-
H1	+10	+1	-
H2	+10	-1	-
S		Özel sınıflandırma	

Endüstriyel soğutucu kullanımına doğrudan etkisi olan süpermarketler ile alakalı, sektörel araştırmalar yapan bir firmanın verilerine göre; 2010-2017 yılların arasında discount marketlerin mağaza sayısı %285, şube sayısı en az 5 ve üzeri olan market zincirlerinin toplam mağaza sayısı %178 ve yerel market zincirlerine ait mağaza sayısı %77 oranında artış göstermiştir. Ayrıca Türkiye’de organize zincir market sayısının 2024 yılı sonunda, 44 bin adete ulaşması beklenmektedir [3]. Günümüzde süpermarket sayısında yaşanan artış birlikte ulusal enerji tüketiminde de ciddi talep artışları meydana gelmektedir. Dünya genelinde sayıları git gide artan süpermarketler de ulusal enerji tüketiminde önemli bir tüketim noktası olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu konuda; Kauko ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada (2017), dünya genelinde üretilen toplam enerjinin yaklaşık %3-4’ünün süpermarketlerde kullanıldığını ortaya koymuşlardır [4].

Süpermarket sayısında yaşanan artış beraberinde teşhir tipi endüstriyel soğutucuların sayısının da artmasını sağlamaktadır. Süpermarketlerde yer alan teşhir tipi endüstriyel soğutucuların, süpermarketlerin toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmından sorumlu olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir. Bu konuda; M.R. Braun ve arkadaşları (2014), İngiltere’nin kuzeyinde orta ölçekli bir süpermarketi referans alarak yapmış

oldukları çalışmada, süpermarketin elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %66'sının soğutma sistemlerinden kaynaklandığı sonucuna ulaşmıştır [5]. Tassou ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada (2011), Birleşik Krallık'ta bulunan süpermarketlerin enerji tüketimlerinden kaynaklı olarak, ülkedeki sera gazı emisyonlarının yaklaşık %1'inden sorumlu oldukları ortaya konulmuştur. Bununla birlikte; bu bölgede toplam elektrik tüketiminin, %3-5 arası süpermarketlerden kaynaklandığı, endüstriyel soğutucuların ise süpermarketlerin toplam elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %35-50'sini oluşturduğunu belirtmişlerdir [6]. Yapılan çalışmalar, özellikle süpermarketlerde bulunan teşhir tip endüstriyel soğutucuların ulusal elektrik enerjisi tüketimi ve sera gazı emisyonuna olan etkisini açıkça göstermektedir.

Yapılan bu çalışma ile;

- Teşhir tip endüstriyel soğutucularda etkinlik katsayısının yükseltilmesini sağlayan, enerji verimliliği arttıran ve karbon salınımını azaltan bazı önemli çalışmalar incelenip derlenmesi,
- Yeni yapılacak tasarımlar için enerji verimliliği açısından girdi oluşturacak parametrelerin sunulması,
- Araştırmacı ve endüstriyel soğutucu üreticilerinin faydalanabileceği farklı perspektiflerden beslenen bir kaynak ortaya çıkartılması amaçlanmıştır.

2. Endüstriyel Soğutucularda Yapılan Çeşitli İyileştirme Çalışmaları (Various Improvement Studies on Industrial Refrigerators)

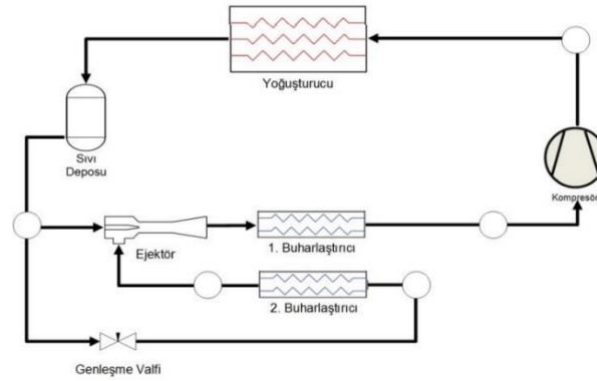
Endüstriyel soğutucularda; tasarım, sistem komponenti, soğutucu akışkan ve dış ortam şartları baz alınarak bilimsel çalışmalarda yapılan çeşitli iyileştirmeler sonucunda ortaya konan çıktılar başlık bazında sunulmuştur.

2.1. Endüstriyel soğutucularda komponent bazlı çalışmalar (Component based studies on industrial refrigerators)

Endüstriyel soğutucular, buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi dahilinde çalışmaktadır. Bu çevrimin en temel bileşenleri; kompresör, kondenser, genleşme valfi ve evaporatördür. Bu kısımda komponentlerde gerçekleştirilen çeşitli iyileştirme ve çevrimde yapılan eklemelere ait çalışmalara yer verilmiştir.

Shaban ve arkadaşları (2020), teşhir tipi endüstriyel soğutucularda enerji ve ekserji verimliliğine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada iki ayrı sistem kıyas edilmiş olup; birinci sistemde sabit hızlı klasik aç/kapa kompresör ve mekanik genleşme valfi kullanılırken ikinci sistemde değişken hızlı kompresör ve elektronik genleşme valfi kullanılmıştır. Yapılan yeni tasarım sonucunda konvansiyonel sisteme göre, %32 oranında enerji verimliliği sağlanırken ekserji yıkımı %76 oranında azalmıştır [7].

Ünal ve arkadaşları (2016), Şekil 1.'de tasarım şeması sunulan, çift buharlaştırıcıya sahip bir soğutma sistemine ejektör entegre ederek yeni nesil bir tasarım ortaya koymuşlardır. Yapılan tasarımda, R134a akışkanı ve bu akışkana muadil olarak geliştirilen R1234yf akışkanı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analiz çalışması sonucu ejektör entegreli sistemin klasik sisteme göre R134a akışkanı için %15, R1234yf için ise %17 daha fazla etkinlik katsayısına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmada sistemde genleşme vanası yerine ejektör kullanıldığı durumda ekserji kaybında da azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu kaybın azalma miktarının, R134a soğutkanı için %17, R1234yf akışkanı için ise %19 olduğu hesaplanmıştır [8].



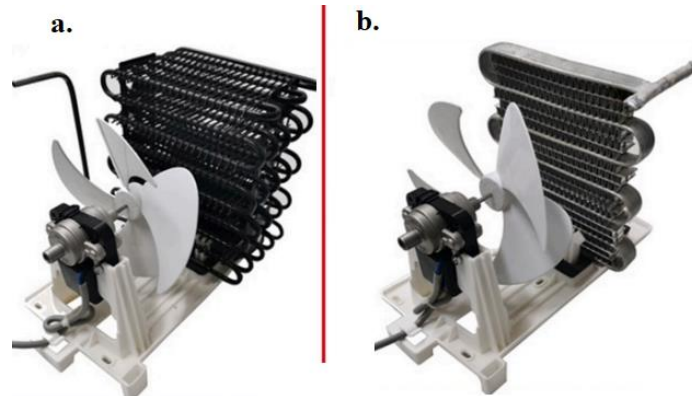
Şekil 1. İki buharlaştırıcılı ejektörlü soğutma sistemi [8]
(Cooling system with ejector and two evaporators)

Ocak ve arkadaşları (2023), yapmış oldukları çalışmada teşhir tipi endüstriyel soğutucularda kompresör seçiminin enerji tüketimine olan etkisini araştırmışlardır. Bunun için, R290 soğutucu akışkanına sahip iki özdeş soğutma sisteminin birinde sabit devirli kompresör kullanılırken diğerinde değişken hızlı kompresör seçimi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda; 1.sistemin elektrik enerjisi tüketimi 11,2 kWh/gün olurken 2. sistem 8,3 kWh/gün elektrik enerjisi tüketmiştir. Kompresör seçiminin etkisiyle, enerji tüketiminin %25,9 azalmasıyla birlikte soğutma sisteminin enerji etiketi değeri "C" seviyesinden "B" seviyesine yükselmiştir [9].

Bilir Sag ve arkadaşları (2015), yapmış oldukları çalışmada soğutma çevriminde aynı ortam şartlarında, genleşme valfi yerine ejektör kullanmanın COP ve ekserji yıkımı üzerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde sisteme ejektör entegre edilmesiyle birlikte COP değeri %7,34-12,87 oranında, ekserji verimi ise %6,6-11,24 oranında artmıştır [10].

Knabben ve arkadaşları (2020), soğutma sistemlerinde elektronik genleşme valfi kullanımının enerji tüketimine etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, soğutma sistemlerinde kapiler boru yerine elektronik genleşme valfi kullanımının toplam enerji tüketimini %4-9 oranında azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [11].

Doğan ve arkadaşları (2021) yapmış oldukları çalışmada, soğutucularda enerji tüketimi ve soğutucu akışkan şarjını azaltmak amacıyla yeni bir kondenser tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Soğutucu tasarımında, Şekil 2.'de görselleri sunulan, geleneksel telli borulu tip kondenser yerine mini kanallı kondenser kullanmışlardır. Çalışmada yapılan kıyaslama esnasında 2800, 3300 ve 3800 mm uzunluklarında üç farklı uzunlukta kapiler boru kullanılmıştır. Çalışmada en iyi sonuç, yeni nesil kondenser tasarımı kullanımıyla birlikte 3300 mm uzunluğundaki kapiler boru kullanımıyla; %5,7 oranında enerji tasarrufu sağlanarak ve soğutkan şarjında %10,7 oranında azalma yaşanarak gerçekleştirilmiştir [12].



Şekil 2. a-Telli borulu tip kondenser, b- Mikro kanallı kondenser [12]
(a-wire tube condenser, b- micro channel condenser)

Patil (2012), bir soğutma sisteminde performans katsayısını arttırmak amacıyla kondenser tasarımına ilişkin çalışmalarda bulunmuştur. Yapılan çalışmada; soğutma sisteminde U tip bir kondenser yerine mikro telli kondenser kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, soğutma kapasitesi %10 artarken COP değerinde ise %17'lik bir artış gerçekleşmiştir [13].

Zhang ve arkadaşları (2017), evaporatör ünitesine kurutucu entegre karlanma yaşanmayan bir soğutma kabini tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu yenilikçi ısı değiştirici sadece karlanmayı önlemekle kalmamakla birlikte aynı zamanda yüksek verimliliğe de sahip yapıdadır. Yüksek verimli olmasının temel sebebi de ortam havasına atılan yoğuşma ısıyı yoluyla kurutucunun verimli bir şekilde çalışmasından kaynaklanmaktadır. Sistemde evaporatör dönüş hava sıcaklığı ve bağıl nem sırasıyla 12 °C ve 0,6 iken günlük elektrik enerjisi tüketimi 3,1 kWh ve sistem COP değeri 3,2 olarak hesaplanmaktadır. Çalışmada ayrıca evaporatör dönüş havası ve bağıl nem değişiminin COP değeri üzerinde önemli bir etkisi olduğu da vurgulanmıştır. Bu noktada evaporatör dönüş havası sıcaklığı 8°C'den 14 °C'ye çıktığında COP değeri %115; bağıl nem 0,5 ten 0,8 e çıktığında ise COP değeri %35 artmıştır [14].

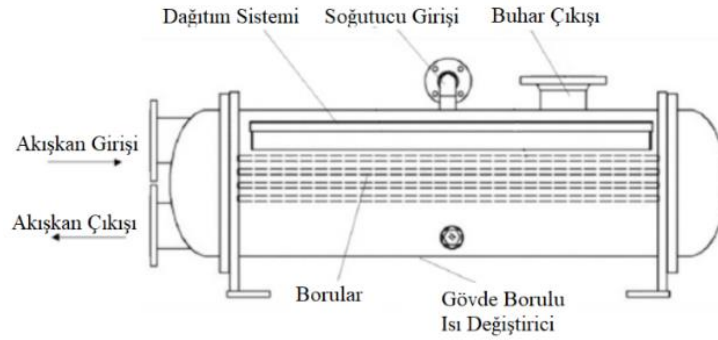
Vidrih (2014), alışveriş merkezlerinde kullanılan teşhir tipi endüstriyel soğutucuların elektrik tüketiminin düşürülmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yapılan bütünsel stratejilerle elektrik tüketiminde %30,2 düşüş gerçekleşmiştir. Bu stratejiler incelendiğinde; elektrik tüketimini düşüren en büyük etkenin %10,7 ile endüstriyel soğutucuya kapı takılması olmuştur. Bunu, %7,7 düşüş ile kapılara ısıtıcı entegresi, %4 ile sıcak gaz ile defrost yöntemine geçilmesi, %3,6 ile LED aydınlatma kullanımı, %2,23 ile çevredeki hareketlere göre aydınlatma sisteminin optimize edilmesi ve %2,0 ile kabin içerisinde oluşan ısıyı yansıtan üst yüzey kaplaması takip etmiştir [15].

Heidinger ve arkadaşları (2016), kapalı teşhir tip soğutucularda kapılar arası boşluk olan ve olmayan durumlarda, elektromanyetik ve elektronik fanlarla deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kapılar arasında hava boşluğu kaldığı durumda ısı yükü yaklaşık %10 oranında artmıştır. Ayrıca çalışmada, elektromanyetik fan kullanıldığında ısı yükü elektronik fan kullanılmadığına göre %4 artmıştır. Çalışma sonucunda, kapılar arası boşluklar bırakılmaması ve elektronik fan kullanımı ısı yükünün azaltılmasını sağladığı görülmektedir [16].

IIR tarafından 42. Soğutma Teknolojileri konferansında oluşturulan bilgilendirme notunda (2021), endüstriyel soğutma sistemlerinde yağ gerektirmeyen kompresör kullanımının öneminden bahsedilmiştir. Yağlama yağlarının, ısı transferini zayıflatabileceği, sistem performansını düşürebileceği ve sistem konfigürasyonunu karmaşık hale getirebileceği vurgulanmıştır. Yağlama yağı gerektirmeyen kompresörler ise; manyetik yatak, gaz yatağı ve seramik yatak kompresörler olarak üçe ayrılmakta her birinin kapasitesi ve uyumlu olduğu akışkanlar çalışmada ifade edilmiştir [17].

Rauss ve arkadaşları (2008), teşhir tipi endüstriyel soğutucularda aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, soğuk katotlu floresan, LED ve fiber optik aydınlatma sistemlerinin enerji tüketim tahminleri kıyas edilmiştir. Hesaplama teşhir tipi soğutucunun 24 saat tam yükte çalışacağı baz alınmıştır. Bu doğrultuda, soğuk katotlu floresan, LED ve fiber optik aydınlatma sistemleri için sırasıyla soğutucu başına yıllık enerji tüketimleri; 444 kWh, 314 kWh ve 556 kWh olarak tahmin edilmiştir [18].

IIR tarafından 42. Soğutma Teknolojileri konferansında oluşturulan bilgilendirme notunda (2021), iklim değişikliği süreçlerinde soğutucu akışkan miktarının azaltılmasını belirten eylem planlarına uyum sağlamak için soğutma sistemlerinde Şekil 3'te gösterilen düşey film evaporatör tipinin kullanılması önerilmektedir. Bu evaporatör çeşidi, diğer evaporatörlere göre daha yüksek ısı transfer katsayısına sahipken çevreye olan zararının da düşük olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, Midea Grup tarafından tanıtılan bir sistemde, düşen film evaporatör kullanılmasıyla soğutucu şarj miktarında %40 azalma meydana geldiği vurgulanmıştır [17].

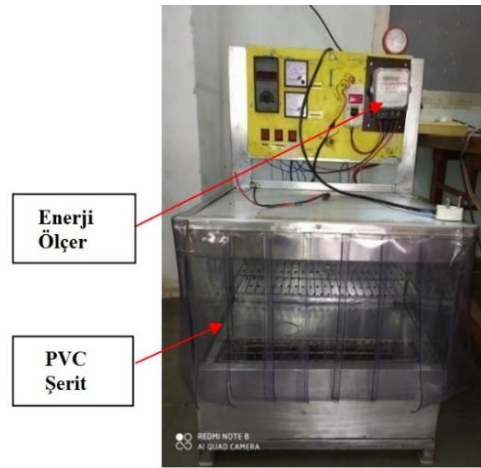


Şekil 3. Düşey film evaporatör yapısı [17]
(Falling film evaporatör structure)

2.2. Endüstriyel soğutucularda yalıtım bazlı çalışmalar (Insulation based studies on industrial refrigerators)

Sıcak ya da soğuk havanın ısı köprüleri vasıtasıyla sistemin içine girmesini ya da dışına çıkmasını engellemek amacıyla yapılan işler bütününe yalıtım denir. Enerji verimliliği sürecinin en kritik noktalarından birisi olan yalıtım, endüstriyel soğutma sistemleri verimi için de oldukça önemlidir. Bu kısımda endüstriyel soğutma sistemlerinde gerçekleştirilen yalıtım çalışmalarına ait çıktılara yer verilmiştir.

Jadhav ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada, açık teşhir tip bir endüstriyel soğutucuda PVC şerit perde kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, Şekil 4.'te gösterilen PVC şerit perde kullanımı, kabin sıcaklığını -2°C ila $+6^{\circ}\text{C}$ arasında, gıda ürün sıcaklığını ise 0°C ila 6°C arasında tutmuştur. PVC perde kullanılmadığı durumda ise, kabin sıcaklığı $+6^{\circ}\text{C}$ ila $+9^{\circ}\text{C}$ arasında, gıda ürünü sıcaklığı $+12^{\circ}\text{C}$ ila $+22^{\circ}\text{C}$ arasında kalmıştır. Kabin ile hava arasında yapay bir kapı görevi üstlenen PVC şerit sayesinde enerji tüketimi $1,63 \text{ kWh/gün}$ değerinden $1,12 \text{ kWh/gün}$ değerine düşmüştür [19].



Şekil 4. PVC şerit ile donatılan endüstriyel soğutucu [19]
(Industrial refrigerator equipped with PVC strip)

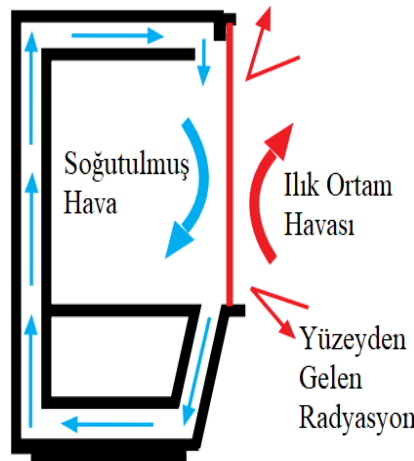
Orlandi ve arkadaşları (2015), kapalı teşhir tip endüstriyel soğutucularda yapmış olduğu simülasyon analizi ile, soğutucuda enerji tüketimi dağılımlarını ortaya koymuştur. Yapılan çalışmada, kapı arası boşluğun termal yüke, soğutucunun fazla kullanılmadığı gece anlarında %23, yoğun kullanımda ise %15 gibi büyük bir oranda etki ettiğini ortaya koymuştur. Bu anlamda yapılacak tasarımlarda, termal yükün ve dolayısıyla enerji tüketiminin azaltılması amacıyla boşluk miktarı olabildiğince azaltılması gerekmektedir [20].

Liu ve arkadaşları (2021), kapalı tip endüstriyel soğutucularda contanın ısı yalıtımı için oldukça önemli olduğuna dikkat çeken bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bazı tasarımlarda, conta kaynaklı ısı sızıntısının, toplam ısı yükünün %15-20'sini oluşturduğu vurgulanan çalışmada, 2019 senesi baz alınarak conta tasarımlarında yapılacak iyileştirmeler sayesinde; 2025 yılında %3, 2030 yılında ise %5'e kadar enerji tasarrufu

sağlanacağı hedeflendiği belirtilmiştir. Belirlenen hedefin gerçekleştirilmesi için çeşitli kriterler belirlenmiştir. Bunlar incelendiğinde; soğutucu özelinde conta tasarımı yapılması, düşük sıcaklığa dayanıklı PVC conta üretimi, yüksek esnekliğe sahip termoplastik elastomer kullanımı, contaların doğru termal-mekanik bağlantı simülasyonu modellemesinin yapılması gibi kriterler sıralanmıştır [21].

Agaro ve arkadaşları (2021), dikey teşhir tip endüstriyel soğutucu kapaklarında kullanılan anti-fog kaplamaların açığa bağlı olarak buğulanmayı önleme durumlarını araştırmışlardır. Kullanılan anti-fog filmin camla temas açısını 90°'den 30°'ye düşüren film sayesinde cam kapaklarda oluşan yoğuşmanın %50'ye kadar azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, 30 saniyelik kapı açılma süresinden sonra buğu giderme işleminin tamamlanması için gereken süre, anti-fog filmlili camda çıplak camın ihtiyaç duyduğu süreden yaklaşık %30 daha az olduğu çalışmada vurgulanmıştır [22].

Ander tarafından yapılan bir araştırmada (2014), özellikle çalışma saatleri dışında endüstriyel soğutucuların üzerinin alüminyum perde ile kaplanması önerilmiştir. Şekil 5.'te açıklandığı üzere; alüminyum kaplamanın yüksek yansıtıcılığı ve iyi ısı yalıtımına sahip olması, radyasyon ve iletim yoluyla oluşan ısı transferinin azalmasını sağlamaktadır. Yapılan çalışmada 3 farklı senaryo üzerinde durulmuş, ilk senaryoda marketin açık ve kapalı olduğu hiçbir saatte alüminyum perde kullanılmamış, ikinci senaryoda marketin kapalı olduğu 6 saatlik periyotta alüminyum perde kullanılmış ve üçüncü senaryoda ise marketin tatil olduğu bir günde sürekli alüminyum perde kapalı tutulmuştur. Çalışma neticesinde; soğutma yükleri ilk senaryoya göre, ikinci senaryoda %8,5, üçüncü senaryoda ise %41 oranında azalmıştır. Enerji tüketimleri ilk senaryoya göre; ikinci senaryoda %9, üçüncü senaryoda ise %36 oranında düşüş göstermiştir [23].



Şekil 5. Soğutulmuş alanda ışınım ve iletkenle ısı transferinin azaltılması [23]
(Reducing radiation and conductive heat transfer to the cooled area)

Chaomuanga ve arkadaşları (2019), yapmış oldukları çalışmada kapalı teşhir tip soğutucuların çalışma koşulları hakkında bir araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, kapalı tip kabinler sayesinde, soğutuculardan dış ortama daha az soğuk hava yayıldığı ve bu durumun mağaza termal konfor şartları açısından da olumlu olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanında çalışma içerisinde, kapalı tip kabinlerin %20-70 arasında enerji verimliliği sağladığı ve hava sızma sorununu önlediği belirtilmiştir ve kapalı kabinlerin tüm bu olumlu özellikleriyle birlikte sayılarının arttığı bahsedilmiştir [24]. Fransa'da, devlet otoriteleri ile büyük süpermarket üreticileri arasında yapılan anlaşma doğrultusunda, açık tip kabinlerin %75'inin kapalı tip kabinlere dönüştürülmesi amaçlanmıştır [25].

Pedersen ve arkadaşları (2018), kabin yalıtımıyla ilgili bir çalışma gerçekleştirmişler ve kabin yalıtım kalınlığının artırılmasının ısı köprüsü oluşumunu azalttığını vurgulamışlardır. Çalışmada, bir endüstriyel soğutucuya 2 cm daha poliüretan köpük yalıtım malzemesi eklemenin ısı köprüsü oluşumunu %95 oranında azalttığı sonucuna ulaşmışlardır [26].

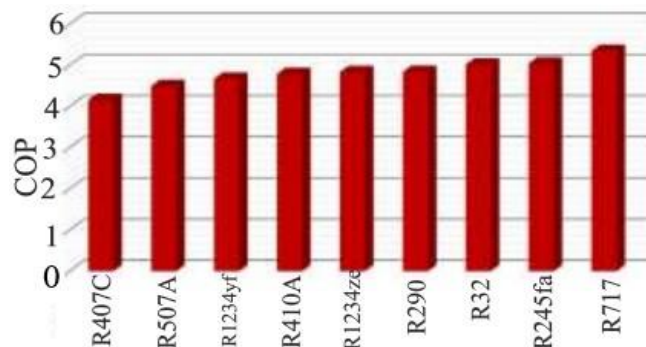
Humar ve arkadaşları (2022), kapalı teşhir tip soğutucu dolap kapaklarında oluşan buğulanmayı önlemek amacıyla kullanılan ısıtıcılarla ilgili araştırmalarda bulunmuşlardır. Çalışmada, dolap kapağı ve çerçevesine ısıtıcı entegresi sayesinde çiğ noktası sıcaklığının değişmesi, enerji tüketiminde %84,6 azalma sağlanacağı bu ısıtıcının doğrudan cama takılması durumunda ise, enerji tüketiminin ısıtıcı olmayan duruma göre %90,1 oranında azalacağı ifade edilmiştir [27].

2.3. Endüstriyel soğutucularda soğutkan bazlı çalışmalar (Refrigerant based studies on industrial refrigerators)

Soğutkanlar, endüstriyel soğutucularda hem sistemin termodinamik özelliklerine uyum ve soğutucu verimliliği açısından hem de çevresel hassasiyetler açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu kısımda endüstriyel soğutma sistemlerinde soğutkanlar hususunda yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Gil ve Kasperski (2018), R134a kullanılan ejektörlü bir soğutma sistemine yeni nesil alternatif soğutkan entegre etmek amacıyla çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışmada, 3 farklı buharlaşma-yoğuşma sıcaklığı ikilisi üzerinden çalışılmış olup (0°C-25 °C, 6°C-30°C ve 9°C-40°C) bu sıcaklıklarda maksimum COP değerleri sırasıyla e 0.35, 0.365, ve 0.22 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada en büyük verim HFO-1243zf ve HFO 1234ze(E) akışkanlarından alınmasına karşın bu akışkanların geniş enjektör sıcaklıklarında çalışmaya uygun olmadığı vurgulanmış, HFO-1233zd(E) ve HFO-1224yd(Z) akışkanların optimum çalışabilmeleri için 130 °C'nin üzerinde buharlaşma sıcaklıklarına ihtiyaç bulunduğu, HFO-1243zf nin kullanıldığında ise, düşük buharlaşma sıcaklıklarının (yaklaşık 60 °C'den 88 °C'ye) soğutma kapasitesini arttıracığı vurgulanmıştır [28].

Yıldırım ve Şahin (2020), yapmış olduğu çalışmada iki kademeli soğutma sistemi için farklı akışkanlar kullanarak sistemin analizlerini gerçekleştirmiştir. R32, R290, R410A, R245fa, R717, R407C, R507A, R1234yf ve R1234ze soğutucu akışkanlarının kullanıldığı çalışmada, Şekil 6.'da sunulduğu üzere COP değerleri hesaplanmıştır. Hesaplama, en yüksek COP değeri R717 akışkanı ile 5,358 olarak hesaplanırken en düşük COP değeri ise R407C soğutkanı ile 4,165 olarak hesaplanmıştır. Ekserji analizlerinin de yapıldığı çalışmada en yüksek ekserji verimi 0,7069 değeri ile R717 soğutkanı ile sağlanırken en düşük ekserji verimi ise 0,5496 değeri ile yine R407C akışkanı kullanıldığında hesaplanmıştır. Sistem komponentlerinin ekserji analizine bakıldığında ise, en yüksek ekserji yıkımının %80 ile evaporatörde en düşük ekserji yıkımının ise ara soğutucu ünitesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir [29].



Şekil 6. Çalışmada kullanılan soğutucu akışkanların COP değerleri karşılaştırılması [29]
(COP values comparison of refrigerants used in the study)

Katırcıoğlu ve arkadaşları (2020), soğutma sistemlerinde performans katsayısının belirlenmesi esnasında kızılotesi görüntü işleme teknikleri kullanmış ve soğutma sisteminde, R22 soğutkanına alternatif olarak R438A ve R417A soğutucu akışkanlarını incelemiş, ticari soğutma sistemleri için her iki akışkanın analizini gerçekleştirmişlerdir. Soğutma sisteminde kızılotesi kamera ile gerçekleştirilen performans katsayısı analizleri sonucunda; R22, R438A ve R417A akışkanlarının COP değerleri sırasıyla, 3,623, 3,565 ve 2,961 olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda kullanımı önce sınırlandırılıp daha sonra yasaklanan HCFC grubu soğutkanlar içerisinde en çok kullanılan akışkanlardan birisi olan R22 soğutkanına, ticari soğutma sistemlerinde, termodinamik özellikler bakımından R438A akışkanının iyi bir alternatif olacağı ortaya konulmuştur [30].

Banjo ve arkadaşları (2020), soğutma sistemlerinde KIP ve ODP değeri düşük olan soğutkanların kullanımına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu bağlamda R134a kullanılan bir sisteme alternatif olarak R606a akışkanı kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Soğutma sisteminde 46 gram R606a ve 70 gram R134a soğutkanı ile yapılan kıyaslama sonucunda; COP değerinin %32,2 arttığı ve enerji tüketiminin %4,5 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca -21°C'lik buharlaşma sıcaklığına R606a akışkanı 1 saatte ulaştırırken, R134a akışkanında bu süre 2 saat 15 dakikayı bulmuştur [31].

Sethi ve arkadaşları (2016), endüstriyel soğutucularda düşük KIP değerine sahip, 3943 KIP değerine sahip R404A soğutkanına alternatif bir soğutucu akışkan kullanımını geliştirmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, KIP değeri 1273 olan ve yanıcı olmayan R448A soğutkanı ile KIP değeri 146 olan ve hafif yanıcı soğutucu R455A soğutkanı üzerinde durulmuştur. Deneysel süreç, piyasada R404A akışkanına uygun olarak satılan bir soğutucu kullanarak yapılmış olup alternatif olarak görülen her iki akışkan da termodinamik olarak R404A ya benzer özellikler göstermiştir. Kompresörün çalışma süreleri incelendiğinde; R448A soğutkanına sahip sistemin kompresörü %9, R455A soğutkanına sahip sistemin kompresörü ise %6 daha az çalışmıştır. Bu durum hem doğrudan hem de dolaylı emisyonları azaltan bir faktör olarak görülmüştür. Testler ayrıca, bir gömme soğutucu için de R448A ve R404A soğutkanları kullanılarak kıyaslandı. Kıyaslama sonucunda, R448A soğutkanını, dış ortam sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık %9'dan %20'ye kadar daha fazla enerji tasarrufuyla sonuçlandığı vurgulanmıştır [32].

Besagni ve arkadaşları (2018), soğutma sistemlerinde düşük küresel ısınma potansiyeline sahip alternatif akışkanlar belirlemek amacıyla çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışmalar sonucunda; düşük sıcaklık uygulamalarında, R32 soğutkanının yüksek COP değerlerine ulaştığı, R290, R152a ve R1234yf geniş çalışma koşulları aralığına sahip olduğu ve bu aralıkta R152a soğutkanının R290 ve R1234yf ile karşılaştırıldığında daha yüksek performans gösterdiği, R1234yf'ni iyi bir performans gösteren bir soğutkan olduğu, R152a ve R290 ile karşılaştırıldığında daha az yanıcı olduğu ve R152a ile karşılaştırıldığında daha düşük KIP' a sahip olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmada, soğutkandan bağımsız olarak jeneratör ve evaporatör sıcaklıklarının yükselmesinin COP değerini arttırdığı, kondenser sıcaklığı artışının ise enjektörlü soğutma sistemlerinde enjektör performansını düşürdüğü belirtilmiştir [33].

Hmood ve arkadaşları (2021), F-Gaz yönetmeliği doğrultusunda KIP değeri 150'den büyük olan soğutkanların kullanımdan aşamalı olarak kaldırılmasına yönelik, soğutma sistemlerinde R134a'nın yerine geçme olanakları olan çevre dostu soğutucu akışkanlar konusunda çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yeni sistem tasarımı anında kullanılacak alternatifler, mevcut kullanılan sistemlerde soğutucu akışkanın değiştirilmesi gibi parametreler düşünülmüştür. Çalışmalar sonucunda; R134a soğutkanına en uygun muadil olabilecek çevre dostu akışkanların R1234yf, R152a, R450A ve R513A olduğunu görülmüştür. R290, R600 ve R600a, soğutkanlarının ise yanıcılık sorununun üstesinden gelinerek yani mevcut soğutma sistemi tasarımında bazı değişiklikler yapılarak R134a'nın yerini alabileceği vurgulanmıştır [34].

Oh ve arkadaşları (2016), endüstriyel soğutucularda saf bir soğutkan yerine birden fazla soğutkan kullanımına olanak sağlayan bir tasarım üzerinden enerji verimliliği miktarını simülasyon çalışması üzerinden incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, mevcut sistemde önemli yapısal değişiklikler yapılmasına gerek olmadan soğutucu akışkan karışımı ile enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüş olup farklı tasarımlar üzerinden, %16,3-27,2 arasında enerji verimliliği sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır [35].

Yılmaz ve Erdinç (2019), farklı soğutucu akışkanlar kullanarak ejektör entegre edilen bir sistemde aşırı soğutma prosesini de içeren bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. Yedi farklı soğutucu akışkanın kullanıldığı (R32, R1234yf, R290, R134a, R717, R600a ve R245fa) sistemde her bir soğutkan için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen yenilikçi tasarımın, klasik soğutma tasarımına göre en iyi performans arttırdığı akışkan R1234yf olmuştur. R1234yf soğutkanı ile çalışan yenilikçi tasarımda konvansiyonel tasarıma göre COP değeri %21, ekserji değeri ise %18 artmıştır. Meydana gelen artışın önemli sebeplerinden birisinin sistemde genişleme valfi yerine ejektör kullanılması olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yeni tasarımda en yüksek COP ve ekserji değeri R245fa soğutucu akışkanı ile sağlanmıştır. Konvansiyonel sistemde en yüksek COP ve

ekserji değeri ise R717 soğutkanı ile sağlanmıştır [36].

2.4. Endüstriyel soğutucularda ortam şartları ve kontrol tekniği bazlı çalışmalar (Environmental conditions and control techniques based studies on industrial refrigerators)

Endüstriyel soğutucular ortam şartlarından kolayca etkilenebilmekte ve bu durum verimliliklerine yansımaktadır. Ayrıca, endüstriyel soğutucular için yapılan optimizasyonların doğru ve etkin yapılması da verimliliklerini etkileyen bir başka unsurdur. Bu kısımda hem ortam şartları hem de kontrol parametrelerinin endüstriyel soğutuculara olan etkilerini belirten çalışmalar sunulmuştur.

Belman-Flores ve arkadaşları (2019), teşhir tipi soğutucuya ait dolap kapağı ve kompresör hızı arasındaki ilişkiyi bulanık mantık yöntemiyle analiz eden bir kontrol yöntemi tasarlamışlardır. Araştırmacılar, bu tasarımı yaparken soğutucu içerisindeki gıda maddelerinin sıcaklığını olabildiğince referans değerlerde sabit tutmak isterken aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda toplam elektrik enerjisi tüketiminde %3'lük bir tasarruf sağlanırken besin maddelerinin sıcaklıkları daha stabil kalmıştır [37].

Kasera ve arkadaşları (2020), R290 akışkanı kullanan bir endüstriyel soğutucuda, fotovoltaik paneller ile beslenen değişken hızda uyum sağlayabilen DC kompresörü deneysel olarak test etmişlerdir. Güneş enerjisi desteğine tam uyum gösteren bu kompresör maksimum güçte ve değişken devirde kıyaslanmıştır. Sistem maksimum güçte iken 210,9 W enerji harcarken değişken hızda bu değer 162,5 W seviyelerine kadar düşmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda, değişken hızda kontrol edilen kompresörün yaklaşık %30 oranında daha az enerji tükettiği ortaya konulmuştur [38].

Yu ve Chan (2008), soğutma sistemlerinde COP artışı için optimum kondenser fanı kontrolüne ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen kontrol mekanizması sayesinde; sistem kompresörleri ve kondenser fanlarının optimize edilmiş güç ilişkileri ile yoğunlaşma sıcaklığının optimum ayar noktasının belirlenmesini ve kondenserlerin hava akışının ve ısı transfer alanının artırılması amaçlanmıştır. Ortam ve yük koşullarına bağlı olarak kontrol mekanizması istenildiği gibi çalıştığında COP artışının %11,4-237,2 arasında gerçekleşebileceği modellenmiştir [39].

Jensen ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada, endüstriyel soğutucularda kompresör kontrol stratejilerinin enerji verimliliğine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, yedi farklı tasarım çeşidiyle aç-kapa, değişken hızlı kompresör ve adaptif enerji optimizasyonu modelleri ile araştırmalar yapılmıştır. Kompresör boyutunda yaşanan küçülme güç tüketimini azaltırken, ortalama ürün sıcaklık değerini de düşürmüştür. Adaptif enerji optimizasyonu yöntemi de çalışmalarda boyutu küçük bir kompresör davranışları göstermiştir. Hem değişken hızlı kompresör yöntemi de adaptif enerji optimizasyonu modeli aç-kapa kompresörlere göre enerji tüketiminde önemli azalmalar yaşatmış fakat bu yöntemler ürün sıcaklığında bazı dalgalanmaların oluşmasına da neden olmuştur [40].

Bahman ve arkadaşları (2012), teşhir tipi endüstriyel soğutucuların operasyonel koşullarda iklimlendirme verilerinin soğutucu davranışlarına olan etkilerini incelemişlerdir. Normal koşullarda açık teşhir tip soğutucular 24 °C ve %55 bağıl nemde derecelendirilmektedir. Yapılan çalışmada, bağıl nem oranı yaklaşık %5 azaltılarak %51 seviyelerinde tutulmuş ve diğer koşullar sabit bırakılmıştır. Bunun sonucunda, kabin soğutma yükünün %9,25 oranında azaldığı ve bunun toplam mağaza enerji yükünde %4,84'lük bir azalmayı beraberinde getirdiği ortaya konulmuştur [41].

Koşan ve arkadaşları (2022), R290A soğutucu akışkanı kullanan bir endüstriyel soğutma sisteminde fan kontrol tekniği ile enerji verimlilik indeksi değerini artırıcı, çevre dostu bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. Yapılan yeni kontrol tasarımında hem evaporatör hem de kondenser fanları kontrol edilmiş bu sayede enerji tüketiminde %25,2'lik bir azalma yaşanırken, enerji verimlilik etiketi "E" sınıfından "D" sınıfına düşmüştür [42].

Cirera ve arkadaşları (2020), endüstriyel soğutma sistemlerinde stokastik yük davranışını optimize eden veriye dayalı tahminlerde bulunan bir yük yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışma sonucunda geliştirilen bu yöntem ile birbirine paralel olarak bağlı çalışan kompresörlerin çalışma süresi %77 oranında azalmış, bu azalma da %17 oranında elektrik enerjisi tasarrufunu beraberinde getirmiş ve bunun yanında kompresörlerin çalışma saatinin azaltılması da sistem kullanım ömrünü uzatan bir gelişme yaratmıştır [43].

Ben-Abdallah ve arkadaşları (2020), endüstriyel soğutma sistemlerine faz değiştirici madde entegrasyonu ve PV paneller kullanarak soğutma sisteminin enerji tüketim durumunu incelemiştir. Ayrıca çalışma içerisinde ortam sıcaklığı ve fan gücü tasarım parametreleri de incelenmiştir. Tasarımda fan gücü 25 W'tan 70 W seviyesine yükselince kabinlere dışarıdan hava girişi azalarak infiltrasyon olayı azalmış; ortam sıcaklığının 16 °C'den 26 °C'ye artması ise faz değiştirici madde için, %20 daha fazla şarj süresi gerektirmiş ve %50 daha az deşarj süresi oluşturmuştur. Faz değiştirici madde entegrasyonu, tasarımda PV panel kullanılmadığı durumlarda enerji talebini %8 azaltırken PV panellerin kullanıldığı durumlarda bu azalmanın oranı %13 olarak belirtilmiştir [44].

2.5. Endüstriyel soğutucularda soğutma çevrimi bazlı çalışmalar (Cooling cycle based studies on industrial refrigerators)

Endüstriyel soğutucularda sistem büyüklüğüne, buhar sıkıştırma soğutma çevriminde yapılacak çeşitli ekleme ve değişiklikler ile tasarım yapıları değişebilmektedir. Bu kısımda, endüstriyel soğutucu tasarımında gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar sunulmuştur.

Zubair (1990), soğutma sistemlerinde enerji verimliliği kapsamında gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, aşırı soğutma uygulaması yapmış ve sistem performansının yoğunlaşma ve buharlaşma sıcaklıkları arasında alt doyma noktasında zirve yaptığını belirtmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda, yüksek yoğunlaşma sıcaklıklarının olduğu dönemlerde sistem performansının aşırı soğutma sistemi kullanılarak %20'ye kadar artabileceğini ve klasik çevrime göre, yüksek sıcaklıklı ve düşük sıcaklıklı soğutma sistemlerinde sırasıyla %20-40 arasında enerji tasarrufunun sağlanabileceği belirtilmiştir [45].

Sánchez ve arkadaşları (2018), R134A akışkanı kullanılan direk soğutmalı bir sistemin iki döngülü ve ikincil sistemde R134a, R152a ve R1234ze(E) akışkanlarının kullanıldığı bir sisteme dönüştürülmesinin enerji tüketimine etkisini araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak gerçekleşen çalışmada kapalı tip endüstriyel soğutucu kabinin sıcaklığı 25 °C ve bağıl nemi %55'te sabit tutulmuştur. Tasarımda gerçekleştirilen bu değişim sayesinde; enerji tüketimi değerleri ikincil sistemde kullanılan soğutkana göre; R134a akışkanı için %21,8, R152a akışkanı için %18,7 ve son olarak R1234ze(E) akışkanı için ise, %27,2 azalmıştır. Ayrıca tasarım değişikliği sayesinde; soğutucu akışkana şarj miktarı, ikincil sistem akışkanına göre; R134a için %42,5, R152a için %62,0 ve son olarak R1234ze(E) için %52,3 oranında azalmıştır [46].

Llopis ve arkadaşları (2016), transkritik çevrimin mekanik aşırı soğutma çevrimi ile kombinasyonunu yaparak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ana soğutma çevriminde CO₂, aşırı soğutma çevriminde ise R1234yf soğutkanı kullanılarak 0 °C ve 10 °C evaporatör sıcaklıkları ile 24,0 °C, 30,2°C ve 40,0 °C kondenzasyon sıcaklıklarında sistem optimize edilmeye çalışılmış ve veriler deneysel olarak kıyaslanmıştır. Sistemde aşırı soğutma çevrimi kullanılmasıyla birlikte; ölçülen maksimum COP koşullarında kapasitedeki artışlar, 0,0 °C buharlaşma seviyesinde %23,1 ile %39,4 arasında ve -10,0 °C'de %24,2 ile %55,7 arasında artış göstermiştir [47].

Roy ve Mandal (2018), aşırı soğutma çevrimiyle entegre edilmiş buhar sıkıştırma soğutma çevrimi tasarımı gerçekleştirmişler, bu sistemin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlar sonrasında ise bu sistemi geleneksel buhar sıkıştırma soğutma çevrimi ile kıyaslamışlardır. Aşırı soğutma kullanılan ve kullanılmayan her iki sistemde de soğutkan olarak R134a akışkanı kullanılmıştır. Aşırı soğutma çevrimi kullanıldığında, sistemin soğutma yükü yaklaşık %11 artmıştır. Sistemin COP artışı, aşırı soğutma ile evaporatör sıcaklıkları 0 °C ve -10 °C olduğunda sırasıyla %11,4 ve %16 olarak hesaplanmıştır. Aşırı soğutma entegrasyonu ile, ekserji yıkımı ise belirtilen evaporatör sıcaklıkları için sırasıyla %17,8 ve %8,8 oranında azalmıştır [48].

Yu ve arkadaşları (2009), merkezi soğutma sistemleri ile plug-in soğutma sistemleri kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmada, merkezi sistem tasarımıyla hava perdesi hızı kontrolünün daha kolay sağlandığı, kabin iç yapısının daha rahat tasarlanabildiği, kabin içerisinde karlanmanın azaldığı, buna bağlı olarak defrost süre aralıklarının arttırılarak, 6 saatten 9 saate çıkarılabileceği, maksimum ürün sıcaklık farkının 3 °C'den 2 °C'ye düşürülebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır [49].

Gullo (2019), Dünya'da çevresel hassasiyetler sonucu çıkan regülasyonların etkisiyle endüstriyel soğutma sistemlerinde yenilikçi tam entegre R744 soğutkanını kullanan bir tasarım gerçekleştirmiştir. Yapılan tasarımda, doğrudan alan ısıtma ve soğutma, kabinlerde ürün soğutması yapılarak çok enjektörlü CO₂ soğutkanına tam entegre bir yapı oluşturulmuş ve bu sayede süpermarketlerde yaygınlaşması düşünülen bir yapı kurgulanmıştır. Çalışmada, bu yöntemin özellikle hava sıcaklığı yüksek olan şehirlerde, HFC temelli sistemlere göre enerji tüketiminde ve karbon ayak izinde meydana getireceği düşüşün; sırasıyla %33,3 ve %89,5 olacağı tahmin edilmiştir [50].

Sun ve Wang (2022), endüstriyel soğutucularda kaskad tip soğutma tasarımıyla enerji verimliliğini arttırmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, R1150/R717 soğutucu akışkanlarını kullanan iki döngülü bir endüstriyel soğutucu ile R1150/R41/R717 soğutucu akışkanlarını kullanan üç döngülü bir endüstriyel soğutucu sistem tasarımı kıyaslanmıştır. Çin'e ait 5 farklı iklim bölgesinde yapılan kıyaslama çalışması sonrasında; iki döngülü sistemin kompresörünün giriş gücünün üç döngülü sisteme göre 1,45-1,61 kW daha düşük olduğu, iki döngülü sistemin COP değerlerinin üç döngülü sisteme göre her bölgede daha yüksek olduğu ve iki döngülü sistemin enerji tüketiminin üç döngülü sisteme göre bölgesel bazda yıllık %8,6-10,2 oranında yüksek olduğu hesaplanmış ve iki döngülü sistemi üç döngülü sistem yerine kullanılmasının daha fizibil olduğu tespit edilmiştir [51].

Karampour ve Sawalha tarafından (2017), İsveç'te yer alan bir süpermarketteki entegre CO₂ transkritik sisteminin enerji verimliliği değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ortam ve sıcak su ısıtma, ortam soğutma (klima) ve teşhir tipi dolaplarda ürün soğutma uygulaması gerçekleştirildiği komplike bir sistem tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımın enerji verimliliği açısından gerçekleştirilen simülasyon temelli değerlendirmesinde; sistemin, Kuzey Avrupa'da ürün soğutma, ısıtma ve klima için bağımsız geleneksel HFC çözümlerine kıyasla yaklaşık %11 daha düşük miktarda elektrik enerjisi tüketeceği tahmin edilmiştir [52].

2.6. Endüstriyel soğutucularda hava akışı bazlı çalışmalar (Airflow based studies on industrial refrigerators)

Endüstriyel soğutucularda özellikle gıda maddelerinin istenilen sıcaklıkta, homojen sıcaklık gradyanıyla muhafaza edilmesi hem ürün sağlığı hem de ürün dayanımı için oldukça önemlidir. Sıcaklık dağılımının soğutma kabini içerisinde dengeli dağılımı, istenilen ürün muhafaza sıcaklıklarının en verimli şekilde korunabilmesi amacıyla hava perdesi ve kabin geometrisi temelli yapılan çalışmalar bu kısımda sunulmuştur.

Yuan ve arkadaşları (2022), açık teşhir tip bir endüstriyel soğutucuya kanatçık entegresinin sistem performansı ve enerji tüketimine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, kabinin kanatçıklı şekilde tasarlanmasıyla, kabin içerisindeki maksimum sıcaklık farkı 0.6°C azalmış, ısı sürüklenme faktörü %38,7-50 oranında düşmüş ve toplam enerji tüketiminde ise %21,7 oranında azalma sağlanarak faydalı bir tasarım ortaya konulmuştur [53].

Lin ve arkadaşları (2023), açık teşhir tipi bir soğutucunun kabin geometrisinin, soğutma performansı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, soğutma kabini arka panelinde yer alan hava deliklerinin soğutucu kabin içerisindeki hava akışına etkisi araştırılmıştır. Hava deliklerinin soğutma kabini alt kısmına doğru yerleştirilmesinin paketlenmiş gıdaların sıcaklık kontrolü için daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmada gıda ambalajlarının kullanıldığı malzemelerin hava akışı için önemli bir etken olduğundan da bahsedilmektedir [54].

Tsamos ve arkadaşları (2019), açık teşhir tipi endüstriyel soğutucu raflarının ön yüzeyinde hava yönlendirici

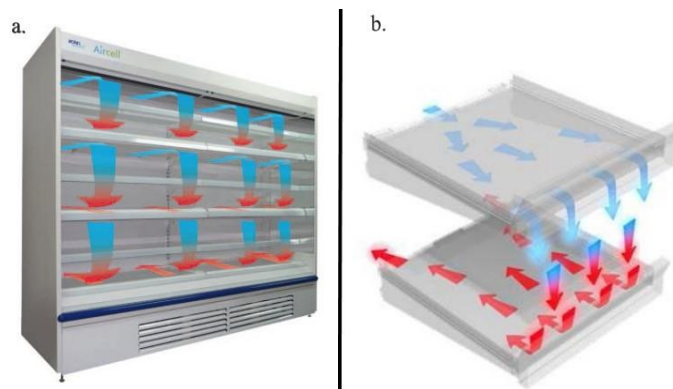
kanatçıklar kullandıkları yeni nesil bir tasarım ile geleneksel tasarımı simülasyon ortamında kıyasladıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel tasarım 42 kWh/gün enerji harcarken gerçekleştirilen kanatçıklı tasarımın enerji tüketimi 25,3 kWh/gün olmuştur. Bu bağlamda kabine yapılan bu entegre sayesinde yaklaşık %60 oranında enerji tasarrufu gerçekleştirilmiştir [55].

Li ve arkadaşları (2022), açık teşhir tip endüstriyel soğutucularda bir hava perdesi yerine iki hava perdesi kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, hava perdesi hızının kontrolsüz artışının operasyon için olumsuz olduğu, kabinin hava tahliye ızgarası açısının tasarım için önemli olduğu açıklanmış ve buna göre farklı operasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların sonucunda, çift hava perdeli soğutucu tek hava perdeli soğutucuya göre her zaman daha iyi performans sergilemiş ve yapılan çalışmalarda, %29-41,6 arasında enerji tasarrufu sağlandığı hesaplanmıştır [56].

Wu ve arkadaşları (2014), dikey açık teşhir tipi endüstriyel soğutucularda kabinin arka panel yapısının akış ve ısı transferi üzerine etkisini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, arka panelde yer alan deliklerin sayısı ve farklı konumlara yerleştirilmesi sonucunda arka panel ve hava perdesi akışı arasındaki karakteristik incelenmiştir. Çalışmada, %3'ten daha az gözenekli yapının akış için olumlu olduğu, delik konumlarının ise ürünlerin sıcaklık dağılımı üzerine küçük bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Raflardaki gözenekli yapının optimizasyonu sayesinde ürünler arasındaki maksimum sıcaklık farkı sapması %49'a kadar iyileştirilmiştir [57].

Nikitin (2020), açık teşhir tip bir endüstriyel soğutucuda tek hava perdesi yerine iki hava perdesi kullandığı çalışma verilerini kıyaslamıştır. Eklenen hava perdesinin çok büyük bir tasarımsal değişiklik gerektirmediği ve tasarım maliyetini fazla arttırmadığı belirtilen çalışmada, yapılan simülasyon sonucunda, iki hava perdeli tasarımın, kullanılabilir etkin hacmi %13 oranında arttırabileceği belirtilmiştir [58].

Hammond ve arkadaşları (2016), teşhir tipi endüstriyel soğutucularda kullanılan hava perdesi yaklaşımlarına ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, geleneksel teşhir tipi dolaplarında bulunan tek sütun şeklinde dağılan hava perdesi yerine Şekil 7.'de görsel tasarımı sunulan raflar arasına kısa mesafeli hava perdesi tasarımı yaklaşımı ortaya konulmuştur. Kısa hava perdesinin sıcaklık dağılımının daha homojen olmasını sağlama ve daha verimli bir soğutma ortaya koyacağı düşünüldükçe gerçekleştirilen çalışmada, enerji tüketimi 47,63 kWh/gün'den 30,54 kWh/gün değerine düşmüş ve sıcaklık stabilitesinin %67 oranında daha fazla geliştirildiği sonuçlarına ulaşılmıştır [59].



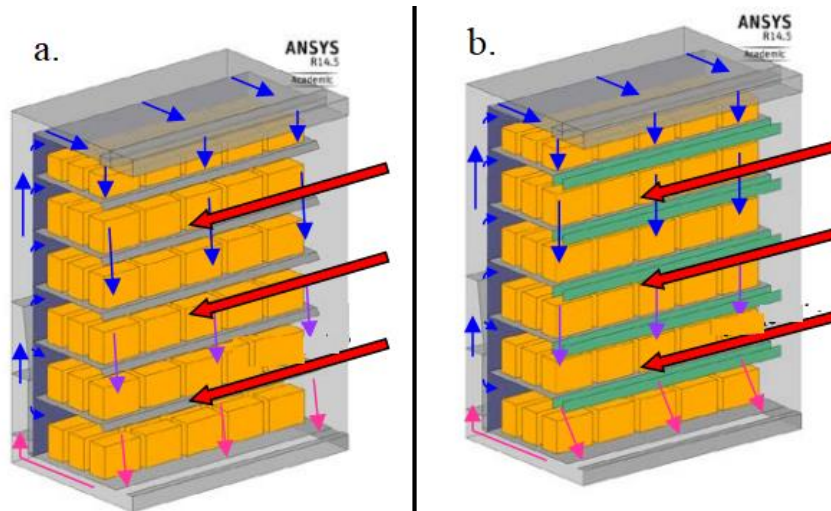
Şekil 7. a- Kısa mesafeli hava perdesi tasarımı, b- Raflar arasındaki hava akışı detayı [59] (a- Short distance air curtain design, b- Air flow detail between shelves)

XueHong ve arkadaşları (2017), açık teşhir tip bir soğutucu içerisinde faz değiştirici madde geçen yeni nesil kompozit bir raf tasarlamışlar ve bunu geleneksel raflarla kıyaslamışlardır. Kompozit raflarda geleneksel raflara göre ürünlerin daha homojen sıcaklık eğilimi gösterdiği ve maksimum sıcaklık farklarının %13,7-32 oranında düştüğü, defrost süreci boyunca ise raflarda bulunan besinlerin sıcaklık dalgalanmalarının %53,3-83,3 oranında azaldığı ortaya konulmuştur [60].

Jouhara ve arkadaşları (2017) açık teşhir tip soğutucu raflarına, düz ısı borusu teknolojisiyle yeni bir tasarım gerçekleştirmişler ve tasarımın enerji tüketimi, gıda muhafaza koşullarına olan etkisini araştırmışlar, konvansiyonel ticari raflarla bu raf tipini belirtilen değişkenler üzerinden kıyaslamışlardır. Deneysel çalışmalarda, ısı borulu yenilikçi raflarının kullanımının, ürünlerin sıcaklık profilini homojenleştirdiği ve raflar ile ürünler arasındaki ısı transferini iyileştirebildiği göstermiştir. Bunun yanında bu yenilikçi tasarım sayesinde endüstriyel soğutucunun enerji tüketimi yaklaşık %12 oranında azalmıştır [61].

Chaomuanga ve arkadaşları (2019), kapalı tip endüstriyel soğutucuları açık tip soğutucularla kıyasladıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Endüstriyel soğutucularda kabinlerin ön kısmı daha yüksek sıcaklığa sahipken arka taraflarda sıcaklık daha düşük olmaktadır. Bu durum sıcaklık heterojenliğine yol açarken, soğutucularda kapı kullanmanın bu duruma etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, kapı kullanılan durumlarda kabinin muhtelif yerleri arasındaki maksimum sıcaklık farkları 2,1 °C iken kapı kullanılmadığı durumlarda ise bu fark 4,9 °C'e kadar çıkmıştır. Bu yönden ürün sıcaklıklarının homojenliği kapı kullanılarak daha iyi bir noktaya çıkarılmıştır. Ayrıca çalışmada, kabinin yüklenme durumunun hava akışına etkisi de incelenmiş ve yükleme yüzdesinin, delikli plakadan geçen hava akış hızını önemli ölçüde etkilemediği vurgulanmıştır [62].

Sun ve arkadaşları (2017), açık teşhir tip soğutucularda hava akışının sağlıklı olabilmesi amacıyla yaptıkları yeni tasarıma simülasyon analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, Şekil 8.'de gösterildiği üzere endüstriyel soğutucuda hava kılavuz şeritleri kullanmanın, hava perdesi etkisini dikey olarak kuvvetlendirdiği ve ortam havasının kabin içerisine sızmasını önlediği, şerit kullanımının kabindeki hava sıcaklığını 4,9 °C düşürdüğü ve bu düşüşün gerekli soğutma kapasitesini %34 oranında azalttığı sonuçlarına ulaşılmıştır [63].



Şekil 8. a- Geleneksel soğutma kabini yapısı, b- Yenilikçi kabin yapısı [63] (Traditional cooling cabinet structure, b- Innovative cabinet structure)

Wang ve arkadaşları (2021), çift sıcaklıklı açık teşhir tip endüstriyel soğutucular üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada ortaya konulan tasarımla, teşhir tip soğutucu depolanan ürünlerin hem soğutulmasını hem de ısıtılmasını sağlayabilmektedir. Çalışma esnasında, çift sıcaklıklı açık tip endüstriyel soğutucunun arka panel deliklerinin yüksekliği ve fan boyutlandırılması temel alınarak tasarım optimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada, açık teşhir tip endüstriyel soğutucularda büyük bir fan kullanmanın yalnızca hava perdesi akış hızını arttıracaktır bunun dışında hava perdesi yapısına bir etkide bulunmayacağı belirtilmiştir. Bunun yanında soğutma havasının yaklaşık %25'i arka panellerdeki deliklerden sağlandığından, deliklerin konumu ve yüksekliği hava perdesine ciddi oranda etki ettiği ve bunların her bir dolap özelinde optimize edilmesinin oldukça önemli olduğu belirtilmiştir [64].

3. Tartışma (Discussion)

Endüstriyel soğutucuların dünya genelindeki enerji tüketimine bakıldığında, dünyada tüketilen elektrik enerjisinin %6'sı gibi ciddi bir orana sahip oldukları görülmektedir [65]. Bu oranın ekonomik yansımaları hem son tüketici bazında işletmelere hem de ulusal bazda devletlere azımsanmayacak bir maliyet çıkarmaktadır. Bunun yanında gerek küresel boyutta yapılan uluslararası sözleşmeler gerekse de lokal düzenlemeler endüstriyel soğutucuların hem elektrik enerjisi tüketimi hem de soğutkan salınımı yönlerinden çevreye olan etkilerinin azaltılmasını gerekli hale getirmiştir.

Günden güne sayıları artan süpermarketlerin içerisinde yer alan endüstriyel soğutucuların verimliliklerinin artmasının ve çevreye olan tahribatlarının azaltılmasının kümülatif faydalarının olacağı çok açıktır. Bu sebeple, endüstriyel soğutucu tasarımlarında ve soğutucuların operasyon koşullarında gerçekleştirilecek her iyileştirme sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada, endüstriyel soğutma sistemlerinde yapılabilecek iyileştirmeler gruplandırılarak sürece olabildiğince farklı perspektiflerden bakılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda; endüstriyel soğutucu komponentleri, yalıtım çalışmaları, endüstriyel soğutucuların dış ortam şartları ve soğutucularda kontrol yöntemleri, kullanılan soğutkan çeşitleri, soğutma çevriminde yapılan iyileştirmeler ve hava akışı konularında gerçekleştirilen önemli çalışmalar incelenerek, çıktıları sunulmuştur.

Endüstriyel soğutucular içerisinde yer alan komponentlerin her birinin son teknolojik gelişmelere uyum sağlayabilmeleri, verimliliklerinin yüksek olması ve uzun süre kullanılma imkanına sahip olmaları oldukça önemlidir. Bu başlık altında dikkat çeken en önemli sistem bileşenlerinden birisi şüphesiz kompresörlerdir. Kompresörler, soğutma sistem ekipmanları içerisinde en fazla enerji tüketimine sahip olduklarından, yapılacak iyileştirmeler sistemin bütününe olumlu katkılar vermektedir. Kompresörler özelinde, aç/kapa tip kompresörler yerine değişken devirli kompresör kullanımının, kompresörlerde doğru yağlama yağları seçimi yapılmasının, soğutma kapasitesine uygun tipte bir kompresör seçimi gerçekleştirilmesinin, kompresör gücü ve kompresör sayısının soğutma yüküne uygun olmasının, kompresörlerin olabildiğince sabit basınç ve sıcaklık değerleri üzerinden çalışmasının ve sistemde kullanılan soğutkanın termodinamik olarak kompresöre uygun olmasının enerji tüketimi açısından oldukça fazla önemi olduğu görülmektedir.

Endüstriyel soğutma sistemlerinde kullanılan önemli diğer ekipman kondenserdir. Tasarımlarda kullanılan kondenserlerin mikro kanal yapıda tercih edilmesi genellikle ısı transferi sürecini olumlu hale getirmektedir. Bunun yanında bu tip kondenserlerin kirli ortamlarda kullanımı mikro kanallar içerisine biriken çeşitli partiküller sebebiyle çevreye zarar da verebilmektedir. Kondenser seçimi yapılırken soğutucu akışkan şarjı miktarını minimum değere indirebilecek tasarımlar yapılmalı, tasarımlarda ısı iletim katsayısı yüksek malzemeler kullanılmalı, ekipman temizliği düzenli olarak sağlanmalı, gerektiğinde ve özellikle mevsim geçişi zamanlarında sisteme olumlu katkılar verecek dinamik kondenzasyon uygulaması tercih edilmelidir.

Soğutma çevriminde kullanılan bir diğer ekipman da genleşme valfleridir. Endüstriyel soğutma sistemlerinde verim artırıcı çalışmalar esnasında; kontrol sistemlerine daha iyi adapte olması nedeniyle mekanik genleşme valfi ve kapiler borular yerine elektronik genleşme valfi kullanımı, genleşme valfi yerine ise kompresör yükünün küçültmesini sağlamanın yanında daha küçük evaporatör ve kondenser boyutları kullanımına imkân sağlaması sebepleriyle ejektör kullanımı sıkça görülmektedir. Bunun yanında soğutucu şarjı ve elektrik enerjisi tüketimi açısından genleşme işleminde kullanılan kapiler boru uzunluğu dikkat edilmesi gereken bir başka nokta olarak karşımıza çıkmaktadır.

Soğumanın fiziksel olarak hissedildiği sistem bileşeni olan evaporatör ünitesi tasarımında da önemli noktalar bulunmaktadır. Evaporatörlerde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta karlanmanın kısa sürede defrost işlemiyle çözülmesi işlemidir. Karlanmanın yanında kirlenmenin önlenmesi için evaporatörlerin temizliği planlı şekilde yapılmalıdır. Sistem tasarımında ısıl iletkenlik katsayısı yüksek, kanatçıklı yapıda evaporatör tasarımı ısı transferini kolaylaştıracaktır.

Bunun yanında endüstriyel soğutucularda aydınlatma sistemleri hem estetik açıdan hem de işlevsel açıdan oldukça kritiktir. Aydınlatma sistemleri olarak enerji tasarruf özelliği yüksek ve estetik açıdan güçlü LED ışık kaynağı tasarımları enerji tüketimini azaltmanın yanında dikkat çekici görüntüler sunması nedeniyle satışlar açısından ticari olarak da tercih sebebi olmaktadır.

Değerlendirme yapılan bir diğer konu başlığı da endüstriyel soğutucuların yalıtımıdır. Endüstriyel soğutucularda en önemli yalıtım yöntemi açık tip soğutuculara kapak takılmasıdır. Enerji tüketimini ciddi oranda azalmasını sağlayan kapalı tip endüstriyel soğutucular süpermarket içerisindeki havalandırma sisteminin kontrolü açısından da daha avantajlıdır.

Endüstriyel soğutucularda bir diğer yalıtım yöntemi açık tip soğutucularda kullanılan gece perdesidir. Süpermarketin açık olmadığı zamanlarda ve satışın olmadığı saatlerde kullanılan gece perdeleri sayesinde, endüstriyel soğutucuya dışarıdan hava girişi miktarı azalmakta ve soğutucu daha uzun süre stabil sıcaklığa sahip olabilmektedir.

Yalıtım sürecinde dikkat edilmesi gereken bir başka nokta da kapalı tip soğutucu kapaklarında kullanılan contaların büyüklüğünün kapakla uyum göstermesi ve hava kaçaklarının minimum düzeye inmesidir. Bunun yanında kapak conta bakımlarının düzenli olarak yapılması da enerji verimliliği için oldukça önemli bir parametredir.

Enerji verimliliği yüksek tasarımlarda kullanılan bir diğer yöntem ise dolap kapaklarının anti-fog malzeme ile kaplanarak çiylenme noktası sıcaklığını arttırmak veya kapak çerçeve kenarları ve camları üzerine rezistans ekleyerek kapaklarda oluşan buğulanmayı önlemektir. Oluşan buğulanmayı önlemek sadece enerji verimliliği açısından değil aynı zamanda ticari olarak, ürün görülebilirliği ve satışlar açısından da önemlidir.

Endüstriyel soğutucuların karbon salımı konusunda soğutkanlar büyük sorumluluğa sahiptir. Soğutkan seçimi yalnızca soğutkanın doğrudan çevreye karbon salımı noktasında değil, tüm sistemin verimliliği noktasında da önemli bir etken olduğundan, endüstriyel soğutma sistemi ile termodinamik ve fiziksel olarak tam uyum gösteren bir soğutucu akışkan seçimi yapmak tasarım esnasında oldukça kritiktir. Tasarım ile uyum içerisinde çalışan bir soğutkan enerji verimliliği yaratabileceğinden kullanılan elektrik enerjisi miktarı düşecek ve dolaylı olarak da çevreye pozitif anlamda katma değer yaratan bir süreç gerçekleşmiş olacaktır. Özellikle son 20 senede kullanılan soğutkanlara ilişkin küresel ölçekte ve yerel düzeyde birçok düzenleme gerçekleştirilmiştir. Bu düzenlemeler ile; CFC gazların tüketimi yasaklanmış daha sonrasında ise, HCFC gazlarının kullanımı önce sınırlandırılmış ardından tamamen yasaklanmıştır. Mevcut durumda, bazı HFC grubu gazların da kullanımı sınırlandırılmıştır. Bu yasaklama ve sınırlandırmanın en büyük sebebi, ilgili gazların KIP ve ODP potansiyellerinin oldukça yüksek olması olmuştur. Endüstriyel soğutma sistemlerinin tasarım aşamasında, çevresel tahribat açısından KIP ve ODP değerleri düşük akışkan seçimi gerçekleştirilmelidir. Bunun yanında seçilecek olan akışkan, yapılacak olan tasarıma uyumlu termodinamik muhteviyatta olmalı ve fiziksel açıdan da kullanım ortamına uygun özellikler barındırmalıdır.

Endüstriyel soğutucularda sıklıkla tercih edilen R134a akışkanının kullanımının son zamanlarda sınırlandırılmaya başlamasıyla birlikte bu akışkana muadil olarak benzer termodinamik özellikler göstermenin yanında daha çevreci özelliklere sahip olan R1234ze ve R1234yf akışkanları tasarımlarda tercih edilmektedir. Yine geçmiş dönemde sıkça kullanılan R22 akışkanına alternatif olarak ise, R438A ile R417A akışkanlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bunun yanında tasarımlarda; R410A, R290A ve R404A akışkanlarının da sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Ayrıca çalışmalarda, akışkan seçiminin tasarım bazlı ve çalışma koşullarına göre yapılması gerektiği açıkça vurgulanmaktadır.

Endüstriyel soğutma sistemlerinde verimlilik arttırıcı unsurlarda incelenen bir diğer başlık da sistemin kontrol edilebilir tasarıma sahip olması ve ortam şartlarıdır. Endüstriyel soğutucularda kullanılan sistem bileşenleri belirli sınırlar dahilinde çalışan cihazlardır. Bu cihazların şartlara ve zamana bağlı olarak, zaman zaman sınır noktalarının daraltılabilmesi sistemin daha az enerji tüketmesini sağlamaya imkân tanır. Özellikle

sistem kompresörü ve fanların belirli bir algoritma doğrultusunda çalışmalarının optimize edilmesi enerji verimliliği açısından son derece olumlu sonuçlar vermektedir. Ayrıca endüstriyel soğutucular ve özellikle soğutma kabinleri ortam şartlarından son derece kolay şekilde etkilenebilmektedir. Bu nedenle, ortam sıcaklığı ve bağıl nem başta olmak üzere soğutma sistemlerinin konumlandırıldığı ortamın fiziksel özelliklerinin yapılan tasarım kriterlerine uygun ve olabildiğince stabil olması sistem verimliliği açısından olumlu olacaktır.

Buhar sıkıştırılmalı çevrimi kullanılan endüstriyel soğutma sistemlerinde verimliliğinin artırılması amacıyla çevrime eklemeler yapılabilmekte ve tasarım tipleri değişebilmektedir. Buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimine en yaygın entegre edilen yöntemler, aşırı soğutma ve aşırı kızdırma uygulamalarıdır. Aşırı soğutma uygulamasıyla, soğutkanın kondenser çıkışında aşırı soğutulmuş evaporatörde daha fazla ısı çekmesi sağlanır ve böylelikle sistemin COP değeri artar. Ayrıca aşırı soğutma uygulaması, kondenserden çıkan soğutucu akışkanın buhar kabarcıkları şeklini alarak genleşme valfine girmesi, genleşme valfi kapasitesinin düşmesi ve buharlaştırıcıya giren soğutucu akışkan miktarının azalması gibi etkileri de engellenmektedir. Evaporatör çıkışında gerçekleşen aşırı kızdırma uygulaması ise, soğutulmuş ortamdaki daha çok ısı enerjisi çekilmesini ve böylelikle COP değerinin artırılmasını amaçlar. Bunun yanında bu uygulama sayesinde, kompresöre sıvı fazda soğutkan girmesi de önlenir. Her iki yöntem de sistem performansını doğrudan etkilemekte, soğutma kapasitesi ve enerji verimliliğinde önemli oranda artış sağlanabilmektedir.

Bunun yanında soğutma yüküne, soğutulacak malzeme çeşidi, büyüklüğü ve soğutma amacına göre farklı tasarım çeşitleri bulunmaktadır. Özellikle süpermarketlerde, bakım maliyetleri düşük olan ve hareket özgürlüğü sağlayan plug-in endüstriyel soğutma sistemleri fazlaca kullanılırken, evaporatör ünitesinde soğutulmuş havanın çekilen tesisatla, borulama yardımıyla, dağıtıldığı merkezi soğutma sistemleri de yüksek soğutma talebine ihtiyaç duyulan noktalarda sıklıkla kullanılabilir. Ayrıca, soğutma yükünün daha az olduğu durumlarda merkezi endüstriyel soğutma sistemlerine alternatif olarak geliştirilen, evaporatörlerin soğutucu kabinlere nispeten daha yakın konumlandırıldığı, bölünmüş tip endüstriyel soğutma sistemleri de son zamanlarda yaygın şekilde perakendecilik sektöründe yerini almaktadır.

Endüstriyel soğutucu tasarımlarında üzerinde durulan son başlık hava akışı olmuştur. Soğutma dolaplarında saklanan ürünlerin maksimum sıcaklık farklarının olabildiğince az ve homojen olması, enerji tüketimi ve ürün sağlığı açısından oldukça değerlidir. Hava akışının sağlıklı olabilmesi için ve ürün sıcaklık dağılımlarında homojenliğin sağlanabilmesi açısından; endüstriyel soğutma kabinlerinde kompozit malzemeler ve kanatçık kullanımı son dönemde oldukça yaygınlaşmıştır. Bunun yanında soğutucu kabinlerin arkasında yer alan hava deliklerinin konumu ve sayısının doğru belirlenmesi, arka panelde kullanılan malzemenin yapısının gözenekli olması, raflar arasında kısa mesafeli hava perdesi tasarımları, kompozit malzeme içerikli raf tasarımları, çift hava perdesi kullanılan tasarımlar gibi birçok yöntem tasarım bazlı kullanılmış ve hava akışına farklı oranlarda önemli katkılar sağlanmıştır.

Küresel ve yerel bazda alınan karbon salınımı önlemleri, son kullanıcılar ve ülkelerin enerji tüketimlerinde verimlilik arayışı, buna bağlı olarak son kullanıcıların girdi maliyetlerini azaltma çabaları, ülkelerin bahsedilen regülasyonlara uyma zorunluluğu, yoğunlukla enerji ithalatçısı ülkelerin enerji tüketimlerinde yer alan verimsiz yönleri bir an önce azaltarak cari açıklarını azaltmak istemeleri, özellikle Avrupa ülkelerinde enerji verimliliği süreçlerine yönelik ürün satışı kısıtlayıcı standartların oluşması gibi birçok sebep endüstriyel soğutma sistemlerinde enerji verimliliği çalışmalarını hız kazandırmıştır. Bu konuda özellikle, AB üyesi ülkelerde 2019 senesinde yürürlüğe girmiş olan “Eko Tasarım” gereklilikleri soğutucu cihazlar için de çeşitli zorunluluklar getirmiştir. Saklanan ürünün muhteviyatı ve tasarlanan dolabın özelliklerine göre tasarım gereklilikleri ayrıntılı şekilde açıklanan düzenlemede, A ve G arasında yapılan sınıflandırma ile enerji verimlilik endeksi değeri belirlenmektedir. Piyasaya yeni sürülecek olan endüstriyel soğutucular için ilgili düzenlemeyle, 1 Mart 2021’den itibaren enerji verimliliği endeksi değerinin 100 değerinden küçük olma zorunluluğu, 1 Eylül 2023’ten itibaren ise 80 değerinden küçük olma zorunluluğu getirilmiştir. Gerek AB üyesi ülkelerde bulunan gerekse de bu ülkelere ihracatçı konumunda olan ve piyasaya ürün satmak isteyen üreticilerin belirtilen enerji etiketi değerine ve eko tasarım gerekliliklerine uygun hareket etmesi ticari olarak

zorunluluk oluşturmuştur.

Çevresel olarak bahsedilen gereklilikler yanında daha uzun vadeli ve geniş kapsamlı olarak çevreci yaklaşımların da geliştirilmesi değerlidir. Bu noktada, piyasaya sunulan endüstriyel soğutucuların LCCP analizlerinin gerçekleştirilerek termodinamik ve eko tasarım gereklilikleri göz ardı edilmeden; malzeme seçimi, soğutkan seçimi, enerji tüketimi, operasyonel koşullar ve ürünün kullanım ömrü tamamlandığında yapılacak bertaraf çalışmaları da dahil birçok parametre dikkate alınarak mümkün olan en çevreci tasarım ortaya konulmalıdır. Bu yönüyle LCCP analizlerinin de uygulandığı bir tasarım, yalnızca sera gazı emisyonunu azaltmayacak aynı zamanda dünyanın daha sürdürülebilir ve yaşanabilir bir alan olması amacına da hizmet edecektir.

Çalışmada başlıklar halinde sunulan ve bu kısımda tartışılan yöntemlerin bir kısmının uygulanması dahi, bu cihazların enerji verimliliğini yükselterek enerji etiket değerlerinin düşmesini sağlayacaktır. Dünya genelinde milyonlarca bulunan bu cihazlarda sağlanacak en küçük verimlilik dahi küresel enerji tüketiminin azaltılmasını sağlayarak çevresel süreçlere olumlu katkılar verecektir. Ülkelerin karbon vergisi çalışmalarını hızlandırdığı bu dönemde, daha verimli endüstriyel soğutucu kullanımı perakende sektöründe yer alan zincir marketler başta olmak üzere, birçok son kullanıcıyı doğrudan ve olumlu yönde etkileyecektir. Bunun yanında, ülke enerji tüketiminde yaşanacak tasarruf ile aynı miktar kurulu güç ve elektrik enerjisi üretimiyle daha fazla sistem çalışacağından ülkelerin gelişmişlik düzeyinin göstergesi olan enerji verimliliği konusunda ülke genelinde önemli bir gelişim yaşanabilecek ve bunun doğrudan ve dolaylı yansımaları da katma değer oluşturacaktır.

4. Sonuç (Result)

Gerçekleştirilen bu çalışma ile, endüstriyel soğutucularda enerji verimliliğini arttıran, performans katsayısının yükselmesini sağlayan ve çevreci yaklaşımlar içeren çeşitli çalışmalar incelenerek derlenmiş, farklı bakış açılarıyla endüstriyel soğutucularda enerji verimliliği yaratan yöntemler, araştırmacı ve ürün üreticilerine tasarım girdisi olması amacıyla sunulmuştur. Çalışmada sunulan bu girdiler dikkate alınarak gerçekleştirilecek yeni nesil tasarımlar ile daha az enerji kullanımı sağlayan ve buna bağlı daha fazla performans gösteren verimli endüstriyel soğutucular üretilebilecek ve bu sayede daha çevreci, doğaya karbon salınımı azalmış, ürün grupları oluşturulabilecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] Y. Salehy, H. M. Hoang, F. Cluzel, Y. Leroy, A. Delahaye, L. Fournaison, and B. Yannou, "Energy performances assessment for sustainable design recommendations: Case study of a supermarket's refrigeration system," *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 328-333, January 2020. doi:10.1016/j.procir.2020.01.102
- [2] M. Aktaş, S. Erten, E. Demirci, E. Kılıç ve F. N. Erdoğan, *Teknoloji ve Mühendislik Bilimlerine Güncel Bakış: Doğrudan Satış İşlevli Endüstriyel Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliğinin Arttırılması ve Çevresel Etkilerin Azaltılmasına Yönelik Yapılan Çalışmalar*, Ankara, Türkiye: İksad Yayınevi, 2021, 49-99.
- [3] N. Kuduz ve S. Bürhan, "Süpermarketler tarafından yapılan satış geliştirme faaliyetlerinin cinsiyet açısından değerlendirilmesi," *Güncel Pazarlama Yaklaşımları ve Araştırmaları Dergisi*, vol. 1, no. 2, pp. 68-86, December 2020.
- [4] H. Kauko, K. H. Kvalsvik, N. Masson, C. Noel, S. Minetto, A. Rossetti, S. Marinetti, D. Thalheim, K. Martens, M. Karampour, S. Piscopiello, N. Fidorra, B. G. Frontera, A. Saez de Guinoa, L. M. Toledo, S. Ciconkov, V. Ciconkov, "Proposal for the Development of the EU Ecolabel Criteria for Food Retail Stores," [ec.europa.eu](https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c2381d34&appId=PPGMS), January 18, 2019. Available: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c2381d34&appId=PPGMS>. [Accessed: 13 Oct. 2023].

- [5] M. R. Braun, H. Altan H., and S. B. M. Beck, "Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK", *Applied Energy*, vol. 130, pp. 305-313, October 2014. doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.062
- [6] S. A. Tassou, Y. Ge, A. Hadaway, and D. Marriott, "Energy consumption and conservation in food retailing," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 2-3, pp. 147-156, February 2011. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.08.023
- [7] N. A. Shaban, I. Nasser, J. Al Asfar, S. Al-Qawabah, and A. N. Olimat, "Thermodynamic and economic analysis of a refrigerator display cabinet equipped with a DC compressor and electronic expansion valve," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 432-438, June 2020. doi:10.18280/ijht.380219
- [8] Ş. Ünal, M. T. Erdiñç ve Ç. Kutlu, "Çift buharlaştırıcılı ve ejektörlü bir soğutma sisteminin termodinamik analizi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 31, no.4, pp. 1039-1047, Aralık 2016. doi:10.17341/gazimmfd.278459
- [9] C. Ocak, M. Koşan, S. Erten, F. N. Erdoğmuş, and M. Öder, "Comparison of different compressor technologies for refrigerated display cabinet: Experimental study," *Materials Today: Proceedings*, vol. 81, no. 1, pp. 74-80, 2023. doi:10.1016/j.matpr.2023.01.213
- [10] N. Bilir Sag, H. K. Ersoy, A. Hepbasli, and A. S. Halkaci, "Energetic and exergetic comparison of basic and ejector expander refrigeration systems operating under the same external conditions and cooling capacities," *Energy Conversion and Management*, vol. 90, pp. 184-194, January 2015. doi:10.1016/j.enconman.2014.11.023
- [11] F. T. Knabben, A. F. Ronzoni, and C. J. L. Hermes, "Application of electronic expansion valves in domestic refrigerators," *International Journal of Refrigeration*, vol. 119, pp. 227-237, November 2020. doi:10.1016/j.ijrefrig.2020.07.029
- [12] B. Doğan, M. M. Ozturk, T. Tosun, M. Tosun, and L. B. Erbay, "A novel condenser with offset strip fins on a mini channel flat tube for reducing the energy consumption of a household refrigerator," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, pp. 102932, December 2021. doi:10.1016/j.jobbe.2021.102932
- [13] P. A. Patil, "Performance analysis of HFC-404A vapor compression refrigeration system using shell and u-tube smooth and micro-fin tube condensers," *A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 77-91, March 2012. doi:10.1080/08916152.2011.562343
- [14] L. Zhang, T. Fujinawa, and M. Saikawa, "Theoretical study on a frost-free refrigerated display cabinet," *International Journal of Refrigeration*, vol. 74, pp. 95-104, February 2017. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.09.027
- [15] Š. Vidrih, "Strategije za optimizacijo stroškov porabe električne energije hladilne tehnike v nakupovalnih središčih," Magistrsko Delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko, Ljubljani, Slovenija, 2014.
- [16] G. G. Heidinger, S. M. Nascimento, P. D. Gaspar, and P. D. Silva, "Relevant parameters on the energy efficiency of closed refrigerated multideck display cases," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 205, pp. 71-81, January 2016. doi:10.2495/EQ160071
- [17] B. Wang, and X. Li, "State of the art of new technologies applied to chillers," in *42nd Informatory Note on Refrigeration Technologies, 30 March 2021, Paris, France*, [Online]. Available: IIR/IIF, <https://www.iifir.org>. [Accessed: 13 Oct. 2023].
- [18] D. Rauss, S. Mitchell, and R. Faramarzi, "Cool retrofit solutions in refrigerated display cases," *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, vol. 9, pp. 233-244, 2008.
- [19] S. Jadhav, S. Panchal, P. Kulkarni, T. Firake, R. Melwanki, and U. Asolekar, "Design of an innovative refrigerated display cabinet," *International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 9, no. 3, pp. 638-643, February 2021. doi:10.17577/IJERTCONV9IS03133
- [20] M. Orlandi, F. M. Visconi, and S. Zampini, "CFD assisted design of closed display cabinets," in *2nd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, 2-4 April 2013, Paris, France* [Online]. Available: IIR/IIF, <https://www.iifir.org>. [Accessed: 13 Oct. 2023].
- [21] G. Liu, G. Yan G., and J. Yu, "A review of refrigerator gasket: Development trend, heat and mass transfer characteristics, structure and material optimization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, pp. 110975, July 2021. doi:10.1016/j.rser.2021.110975
- [22] P. D'Agaro, G. Croce, and N. Suzzi, "CFD simulation of anti-fogging coatings performance in refrigerated display cabinets," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1868, pp. 012002, September 2021. doi:10.1088/1742-6596/1868/1/012002
- [23] G. D. Ander, "Display case shields reduce supermarket energy use," *econofrost.com*, March 24, 2005. Available: <https://econofrost.com/acrobat/SouthernCaliforniaEdison.pdf>. [Accessed: 13 Oct. 2023].
- [24] N. Chaouang, D. Flick, A. Denis, and O. Laguerre, "Influence of operating conditions on the temperature performance of a closed

refrigerated display cabinet,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 103, pp. 32-41, July 2019. doi:10.1016/j.ijrefrig.2019.03.031

[25] N. Chaouang, O. Laguerre, and D. Flick, “A simplified heat transfer model of a closed refrigerated display cabinet,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 17, pp. 100494, June 2020. doi:10.1016/j.tsep.2020.100494

[26] P. H. Pedersen, J. K. Jensen, N. P. Reinholdt, W. B. Markussen, and M. L. Hansen, “Energy efficient professional counter cabinet,” in *13th Gustav Lorentzen Conference, 18-20 June 2018, Valencia, Spain*, [Online]. Available: IIR/IIF, <https://www.iifir.org>. [Accessed: 13 Oct. 2023].

[27] I. Humar, U. Hudomalj, A. Marinšek, and M. Umberger, “Optimizing the power usage of anti-sweat heaters in glass-door refrigerators according to the dew point,” *Energies*, vol. 15, no. 13, pp. 4601, June 2022. doi:10.3390/en15134601.

[28] B. Gil, and J. Kasperski, “Efficiency evaluation of the ejector cooling cycle using a new generation of HFO/HCFO refrigerant as a R134a replacement,” *Energies*, vol. 11, no. 8, pp. 2136, August 2018. doi: 10.3390/en11082136

[29] B. Şahin Yıldırım ve A. Şencan Şahin, “Farklı akışkanların kullanıldığı iki kademeli soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizi,” *Teknik Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 2, pp. 37-41, Temmuz 2020. doi:10.35354/tbed.722878

[30] F. Kattırcıoğlu, Z. Cingiz, Y. Çay, A. T. Gürel, S. Sarıdemir ve A. Kolip, “R22 ve Alternatifleri R438A ile R417A Soğutucu Akışkanları için Kızılötesi Görüntü İşleme Teknikleri Kullanarak, Soğutma Sistem Performansının İncelenmesi,” *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, vol. 8, no. 3, pp. 500-513, Eylül 2020. doi:10.21541/apjes.726624

[31] O. Banjo, B. Bolaji, O. Ibhade, O. Fayomi, I. Sunday, O. B. Fakehinde, P. A. Olayiwola, S. Oyedepo, and N. Udoe, “Experimental analysis of the performance characteristic of an eco-friendly HC600a as a retrofitting refrigerant in a thermal system,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1378, pp. 042033, December 2019. doi:10.1088/1742-6596/1378/4/042033

[32] A. Sethi, G. Pottker, and S. Y. Motta, “Experimental evaluation and field trial of low global warming potential R404A replacements for commercial refrigeration,” *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 22, no. 8, pp. 1175-1184, July 2016. doi:10.1080/23744731.2016.1209032

[33] G. Besagni, L. Croci, and R. Nesa, “A screening of low-GWP refrigerant for ejector refrigeration,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 70, pp. 1291-1296, July 2018. doi:10.3303/CET1870216

[34] K. S. Hmood, V. Apostol, H. Pop, V. Badescu, and E. Pop, “Drop-in and retrofit refrigerants as replacement possibilities of R134a in domestic/commercial refrigeration and automobile air conditioner applications,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 7, pp. 1815-1835, November 2021. doi:10.18186/thermal.1027435

[35] J. S. Oh, M. Binns, S. Park, and J. K. Kim, “Improving the energy efficiency of industrial refrigeration systems,” *Energy*, vol. 112, pp. 826-835, October 2016. doi:10.1016/j.energy.2016.06.119

[36] T. Yılmaz, and M. T. Erdiñ, “Energetic and exergetic investigation of a novel refrigeration system utilizing ejector integrated subcooling using different refrigerants,” *Energy*, vol. 168, pp. 712-727, February 2019. doi:10.1016/j.energy.2018.11.081

[37] J. M. Belman-Flores, S. Ledesma, D. A. Rodríguez-Valderrama, and D. Hernández-Fusilier, “Energy optimization of a domestic refrigerator controlled by a fuzzy logic system using the status of the door,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 104, pp. 1-8, May 2019. doi:10.1016/j.ijrefrig.2019.04.025

[38] S. Kasera, R. Nayak, and S. C. Bhaduri, “Energy efficiency analysis of variable speed DC compressor using R290,” in *5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 1-3 December 2020, Jaipur, India*, [Online]. Available: IEEE Xplore, <http://www.ieee.org> [Accessed: 13 Oct. 2023].

[39] F. W. Yu, and K. T. Chan, “Optimizing condenser fan control for air-cooled centrifugal chillers,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 47, pp. 942-953, July 2008. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2007.07.018

[40] J. K. Jensen, M. R. Kærn, P. H. Pedersen, and W. B. Markussen, “Comparison of compressor control strategies for energy efficient refrigerated counters,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 126, pp. 1-11, February 2021. doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.02.008

[41] A. Bahman, L. Rosario, and M. M. Rahman, “Analysis of energy savings in a supermarket refrigeration/HVAC system,” *Applied Energy*, vol. 98, pp. 11-21, October 2012. doi:10.1016/j.apenergy.2012.02.043

[42] M. Koşan, Y. Dilber, S. Erten, E. M. Bahar, F. N. Erdoğan, M. Aktaş, and M. Öder, “Investigation of the effects of fan control technique on energy consumption in industrial refrigerated display cabinet: An experimental study,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, November 2022. doi:10.1177/09544089221141360

[43] J. Cirera, J. A. Carino, D. Zurita, J. A. Ortega, “Improving the energy efficiency of industrial refrigeration systems by means of data-

driven load management,” *Processes*, vol. 8, no. 9, pp. 1106, September 2020. doi:10.3390/pr8091106

[44] R. Ben-Abdallah, D. Leducq, A. Delahaye, L. Fournaison, O. Pateau, B. Ballot-Miguet, H. M. Hoang, “Analysis of phase change material integration in retail display cabinets for energy management,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 187, pp. 116459, December 2021. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116459

[45] S. M. Zubair, “Improvement of refrigeration/air-conditioning performance with mechanical sub-cooling,” *Energy*, vol. 15, no. 5, pp. 427-433, May 1990. doi:10.1016/0360-5442(90)90039-5

[46] D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, J. Catalán-Gil, and L. Nebot-Andrés, “Energy assessment of an R134a refrigeration plant upgraded to an indirect system using R152a and R1234ze(E) as refrigerants,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 139, pp. 121-134, July 2018. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.114

[47] R. Llopis, L. Nebot-Andrés, R. Cabello, D. Sánchez, and J. Catalán-Gil, “Experimental evaluation of a CO₂ transcritical refrigeration plant with dedicated mechanical subcooling,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 69, pp. 361-368, June 2016. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.06.009

[48] R. Roy, and B. K. Mandal, “Thermodynamic analysis of a vapour compression refrigeration system integrated with a subcooler cycle,” *International Journal of Renewable Energy Technology*, vol. 8, no. 3-4, pp. 334-345, January 2017. doi:10.1504/IJRET.2017.088982

[49] K. Yu, G. Ding, and T. Chen, “Experimental investigation on a vertical display cabinet with central air supply,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 9, pp. 2257-2265, September 2009. doi:10.1016/j.enconman.2009.05.012

[50] P. Gullo, “Innovative fully integrated transcritical R744 refrigeration systems for a HFC-free future of supermarkets in warm and hot climates,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 108, pp. 283-310, December 2019. doi:10.1016/j.ijrefrig.2019.09.001

[51] Z. Sun, and Y. Wang, “Comprehensive performance analysis of cascade refrigeration system with two-stage compression for industrial refrigeration,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 39, pp. 102400, September 2022. doi:10.1016/j.csite.2022.102400

[52] M. Karampour, and S. Sawalha, “Energy efficiency evaluation of integrated CO₂ trans-critical system in supermarkets: A field measurements and modelling analysis,” *International Journal Of Refrigeration*, vol. 82, pp. 470-486, August 2017. doi:10.1016/j.ijrefrig.2017.06.002

[53] P. Yuan, Q. H. Zeng, Y. X. Wu, Y. L. Lu, C. L. Hu, H. C. Sun, and W. Q. Tao, “Experimental study of using aerofoils in a refrigerated display cabinet,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 14, pp. 100140, May 2022. doi:10.1016/j.ijft.2022.100140

[54] C. H. Lin, P. S. Cheng, C. H. Hsieh, Y. M. Li, and P. Y. Yu, “Investigations on predictions of cooling capacity for open refrigerated display cabinet using CFD approach with different positions of perforated back panels,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 43, pp. 102018, August 2023. doi:10.1016/j.tsep.2023.102018

[55] K. M. Tsamos, H. Mroue, J. Sun, S. A Tassou, N. Nicholls, and G. Smith, “Energy Savings Potential in Using Cold-shelves Innovation for Multi-deck Open Front Refrigerated Cabinets,” *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 292-299, March 2019. doi:10.1016/j.egypro.2019.02.094

[56] X. Li, Z. Zhang, H. Liu, X. Hu, S. Liu, Z. Xu, and Q. Wang, “Performance of an open refrigerated display cabinet with two air curtains,” *Applied Thermal Engineering* vol. 212, pp. 118549, July 2022. doi:10.1016/j.applthermaleng.2022.118549

[57] X. Wu, Z. Chang, P. Yuan, Y. Lu, Q. Ma, and X. Yin, “The optimization and effect of back panel structure on the performance of refrigerated display cabinet,” *Food Control*, vol. 40, pp. 278-285, June 2014. doi:10.1016/j.foodcont.2013.12.009

[58] M. N. Nikitin, “Numerical analysis of refrigerated display designs in terms of cooling efficiency,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 148, pp. 106157, February 2020. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2019.106157

[59] E. Hammond, C. Marques, and L. P. Ketteringham, “Application of short air curtains in retail display refrigerators,” in *4th IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, 7-9 April 2016, Auckland, New Zealand*, [Online]. Available: IIR/IIF, <https://www.iifir.org>. [Accessed: 13 Oct. 2023].

[60] W. XueHong, L. WeiPing, W. Yanling, C. ZhiJuan, W. ChunXu, and D. Chang, “Experimental investigation of the performance of cool storage shelf for vertical open refrigerated display cabinet,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 789-795, July 2017. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.071

[61] H. Jouhara, T. Nannou, H. Ghazal, R. Kayyali, S. A Tassou, and S. Lester, “Temperature and energy performance of open refrigerated display cabinets using heat pipe shelves,” *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 273-280, September 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.240

[62] N. Chaomuang, D. Flick, A. Denis, and O. Laguerre, “Experimental analysis of heat transfer and airflow in a closed refrigerated display cabinet,” *Journal of Food Engineering*, vol. 244, pp. 101-114, March 2019. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.09.009

[63] J. Sun, K. M. Tsamos, and S. A Tassou, "CFD comparisons of open-type refrigerated display cabinets with/without air guiding strips," *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 54-61, September 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.284

[64] Y. Wang, S. Qian, J. Xu, L. Li, X. Dou, X. Li, G. Yan, and J. Yu, "Numerical study on the air curtain characteristics of a dual-temperature open display cabinet," *International Journal of Refrigeration*, vol. 126, pp. 23-34, June 2021. doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.02.007

[65] C. Melo, and L. W. Silva, "A perspective on energy savings in household refrigerators," in *Sustainable Refrigeration and Heat Pump Technology Conference, Stockholm, Sweden, 13-16 June 2010*.

This is an open access article under the CC-BY license

