

MAKALE

YÜKSEK SICAKLIK (ENDÜSTRİYEL) ISI POMPALARININ TASARIM ESASLARI

Design Principles of High Temperature (Industrial) Heat Pumps

Hüseyin BULGURCU

*Bu makale, 11-14 Aralık 2024 tarihinde Antalya'da gerçekleştirilen
5. Ulusal İklimlendirme Kongresi (İKLİM 2024)'nde sunulmuş ve bildiri kitabında yayınlanmıştır.*

HAKEMLER*

A. İbrahim ATILGAN, Dr.
Abdülvahap YİĞİT, Prof. Dr.
Ahmet CAN, Prof. Dr.
Ali GÜNGÖR, Prof. Dr.
Arif HEPBAŞLI, Prof. Dr.
Aytunç EREK, Prof. Dr.
Bedri YÜKSEL, Prof. Dr.
Dilek KUMLUTAŞ, Prof. Dr.
Fikret PAZIR, Prof. Dr.
Hüsamettin BULUT, Prof. Dr.
Hüseyin BULGURCU, Doç. Dr.
İlhan Tekin ÖZTÜRK, Prof. Dr.
İsmail KARAÇALI, Prof. Dr.

Kadir İSA, Dr.
M. Barış ÖZERDEM, Prof. Dr.
M. Turhan ÇOBAN, Prof. Dr.
Macit TOKSOY, Prof. Dr.
Mehmet KANOĞLU, Prof. Dr.
Moghtada MOBEDİ, Doç. Dr.
Muhsin KILIÇ, Prof. Dr.
Mustafa ACAR, Prof. Dr.
Olca KINCAY, Prof. Dr.
Orhan BÜYÜKALACA, Prof. Dr.
Özay AKDEMİR, Dr. Öğr. Üyesi.
Özgür SOLMAZ, Dr. Öğr. Üyesi
Ramazan KÖSE, Prof. Dr.

Rasim KARABACAK, Prof. Dr.
Recep YAMANKARADENİZ, Prof. Dr.
Selami KESLER, Prof. Dr.
Serhan KÜÇÜKA, Prof. Dr.
Tuncay YILMAZ, Prof. Dr.
Turan ERKAN
Utku ŞENTÜRK, Doç. Dr.
Y. Onur DEVRES, Prof. Dr.
Yunus ÇERÇİ, Prof. Dr.

**Alfabetik olarak sıralanmıştır.
Makale/Makaleler, kurulda yer alan ve
değerlendirme yapmak üzere seçilen
hakemler tarafından incelenmiştir.*



HAKEMLİ MAKALE ARŞİVİMİZE
ULAŞMAK İÇİN OKUTUNUZ.

BİLİMSEL MAKALE ARŞİVİMİZE
ULAŞMAK İÇİN OKUTUNUZ.



ÖZET

Bilindiği gibi yüksek sıcaklık ısı pompası (YSIP), standart ısı pompalarından daha yüksek akış sıcaklığında çalışan hava/su kaynaklı bir ısı pompasıdır. Isıtma devresindeki suyu daha yüksek bir sıcaklığa ısıtabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu, ısı pompalarının tipik olarak 80°C ile 120°C arasındaki sıcaklıklarda çalıştığı ve ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak 5'e kadar COP değerine (ısıtma tesir katsayısı) ulaşabileceği anlamına gelir. Karbon ayak izinin azaltılması arayışında, yüksek sıcaklık ısı pompaları, verimliliği artıran ve fosil yakıt tüketimini en aza indiren uygulanabilir bir alternatif teknolojiyi temsil ederek endüstriyel sektör için temel bileşenlerden biri haline gelmiştir. Yüksek sıcaklık ısı pompaları, tümü yüksek basınç farkları elde etmek için yüksek kritik sıcaklıklara dayanabilen yağsız, manyetik yataklı santrifüj kompresör veya yağ hazneli yüksek basınçlı vidalı kompresörler, ısı eşanjörleri ve soğutucu akışkanlar gibi diğer gelişmiş teknolojileri kullanır. Bu çalışmada yüksek sıcaklık ısı pompalarının tasarım esasları, devre şemaları ve kontrol senaryoları incelenmiş olup bu konuda çalışacak firmalara yol haritası oluşturulması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı pompası tasarımı, endüstriyel ısı pompası, yüksek sıcaklık ısı pompası

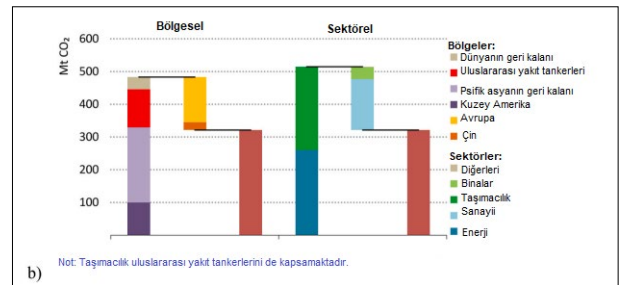
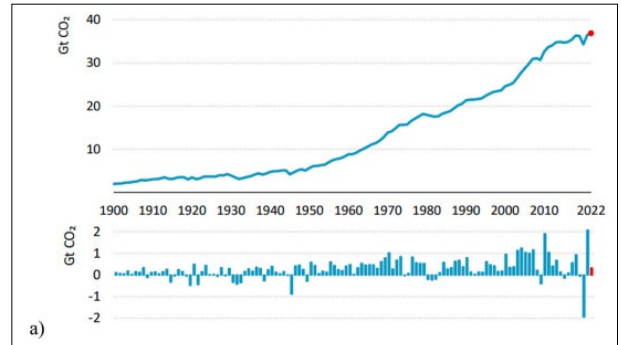
ABSTRACT

As is known, a high temperature heat pump (HTHP) is an air/water source heat pump that operates at a higher flow temperature than standard heat pumps. It is designed to heat the water in the heating circuit to a higher temperature. This means that heat pumps typically operate at temperatures between 80°C and 120°C and can reach a COP (heating coefficient of performance) of up to 5, depending on the heat source temperature. In the quest to reduce the carbon footprint, high temperature heat pumps have become one of the essential components for the industrial sector, representing a viable alternative technology that increases efficiency and minimizes fossil fuel consumption. High temperature heat pumps use other advanced technologies such as oil-free, magnetic bearing centrifugal compressors or oil-flooded high-pressure screw compressors, heat exchangers and refrigerants, all of which can withstand high critical temperatures to achieve high pressure differences. This study examines the design principles, circuit diagrams and control scenarios of high temperature heat pumps and aims to create a roadmap for companies that will work on this subject.

Keywords: Heat pump design, industrial heat pump, high temperature heat pump

1. GİRİŞ

Avrupa Birliği'nin Paris Anlaşması, Enerji Birliği stratejisi (COM/2015/080) ve daha geniş iklim politikasıyla uyumlu politika hedeflerinden biri, düşük karbonlu bir ekonomiye geçiştir. Enerjiyle ilgili küresel CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik kapsamlı çabalara rağmen, bu rakamlar her yıl artmaya devam ederek 2022'de 36,8 Gt'ye ulaştı (Şekil 1a) [1]. Bu toplamın 9,0 Gt'si tek başına sanayi sektöründen kaynaklanmıştır [2]. Sadece enerjiyle ilgili sera gazı emisyonları incelendiğinde, endüstriyel süreçlerden ve yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının toplamın %89'unu oluşturduğu görülmektedir. 2022'de, 2021'e kıyasla, endüstriyel süreçlerden kaynaklanan CO₂ emisyonları, Çin'de çelik üretiminde %2'lik ve çimento üretiminde %10'luk bir azalmanın etkisiyle 102 Mt (%1,7) azaldı (Şekil 1b) [1]. Bu azalma yalnızca ekonomik gerilemeye değil, aynı zamanda diğer faktörlerin yanı sıra ısı pompaları da dahil olmak üzere temiz enerji teknolojilerinin benimsenmesine de bağlıdır. Ancak raporda bireysel sistemlerin veya teknolojilerin payı belirtilmemiştir.

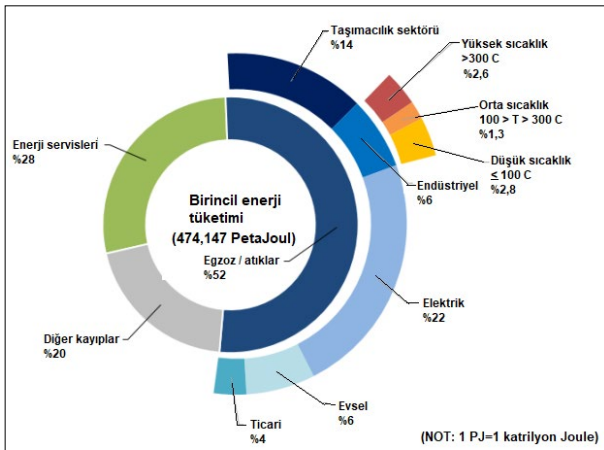


Şekil 1. CO₂ emisyonları: a) 1900'den 2022'ye kadar endüstriyel süreçlerden ve yakıtların yanmasından kaynaklanan küresel, b) Bölgeye ve sektöre göre CO₂ emisyonlarındaki değişim, 2021–2022 [1].

Endüstriyel süreçler şu anda Avrupa'daki toplam sera gazı emisyonlarının %20'sinden sorumludur. Paris İklim Anlaşması'nın 1,5°C senaryosu içinde kalmak için, endüstriden kaynaklanan bu sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik önlemlere acilen ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma, ısı pompası teknolojilerinin endüstriyel proses ısıtmasından kaynaklanan CO₂ emisyonlarında önemli azalmaları tam olarak gerçekleştirebilme rolünü vurgulamak amacıyla hazırlanmıştır.

Endüstriyel ısı pompaları, proses ısıyı sağlamak için son derece enerji verimli, iki taraflı bir teknolojidir. Elektrik gücüyle çalışan ısı pompaları, fosil yakıtlı endüstriyel proses ısıtmasının büyük bir kısmını değiştirebilen önemli bir elektrifikasyon teknolojisidir [3].

Endüstriyel enerji talebinin analizinden, tüketimin çoğunun 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda termal proseslerden geldiği görülebilir. Bu, çoğunlukla belirsiz satın alma fiyatları ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel etkilere sahip fosil yakıtların yanması yoluyla sağlanır. Dahası, endüstriyel enerji tüketiminin önemli bir kısmı (%2,8 civarında) 100°C'nin altındaki düşük sıcaklık ısı olarak israf edilmektedir (Şekil 2) [4]. Düşük sıcaklıklı atık ısının (100°C'nin altında) geri kazanılması ve enerji açısından verimli teknolojiler vasıtasıyla gerekli sıcaklıkta (100°C'nin üzerinde) yararlı ısıya dönüştürülmesi, enerji verimliliğini artıracak ve endüstriyel sektörün karbonsuzlaşmasını sağlayacaktır.



Şekil 2. Enerji tüketiminin dağılımı ve potansiyel endüstriyel düşük kaliteli atık ısı

Yüksek sıcaklık ısı pompaları 60°C ila 80°C arasına ulaşabilen evleri geleneksel kazan ve kombilerle karşılaştırılabilir seviyelere kadar ısıtabilen, düşük karbon ayak izine sahip bir ısıtma sistemidir. Yüksek sıcaklık ısı pompaları, elektrikle çalıştıkları ve kullanmış oldukları her kilovat elektrığe karşılık

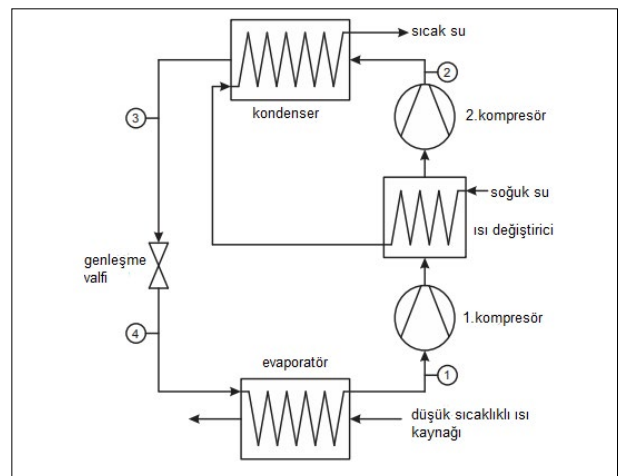
3-4 kat daha fazla ısı enerjisi ürettikleri için normal ısı pompalarına benzer prensiple çalışırlar. Bu sistemler ayrıca yenilenebilir bir kaynaktan, genellikle dış havadan, toprak altından veya bir su kaynağından ısıyı emer. Isı daha sonra bir soğutucu akışkan çevrimi aracılığı ile ısıtılacak ortamlara aktarılır.

Bununla birlikte, yüksek sıcaklık ısı pompaları daha yüksek sıcaklıklarda çalışır ve 60°C veya daha fazla sıcaklık seviyelerine ulaşabilir. Yüksek sıcaklık ısı pompaları çevrimden elde edilen sıcaklıkları arttırmak için kompresörler ve ısı eşanjörleri gibi bileşenler kullanır. Yüksek enerji verimliliğine sahip ve yenilenebilir enerjiyle bütünleşen eko-sürdürülebilir ürünlere doğru çalışmanın olası çözümü, ısıtma ve sıcak sıhhi su üretimi için kazanların ısı pompalarıyla değiştirilmesidir [5].

2. YÜKSEK SICAKLIK ISI POMPALARI (YSIP)

2.1. Çift Kademe YSIP Çevrimi

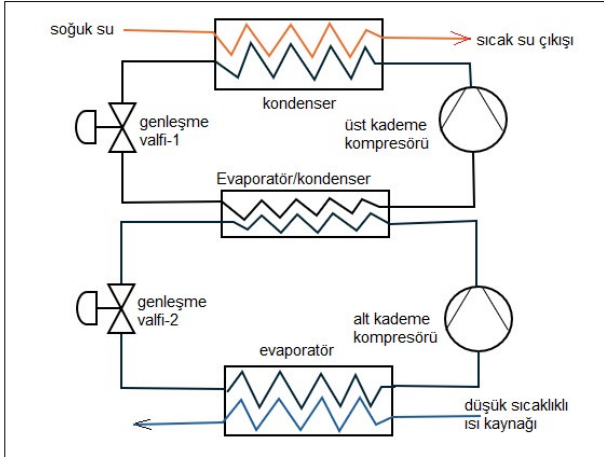
Çift kademeli YSIP, Şekil 3'te gösterildiği gibi her iki kompresör arasına yerleştirilmiş ek bir kompresör ve ara soğutucuya sahiptir. Soğuk su ara soğutucuya ve ardından ısı pompasının kondansatörüne iletilir. Çift kademeli YSIP, 10°C'nin altındaki buharlaşma sıcaklıkları için kullanılmıştır. İkinci kompresöre ihtiyaç vardır çünkü bir kompresörün çıkış basıncı ile giriş basıncı arasındaki bölüm olarak tanımlanan kompresörün basınç oranı 5'i geçemez. Ancak, çift kademeli YSIP, 10°C'nin üzerindeki buharlaşma sıcaklıkları için de kullanılabilir ve bu, soğuk buharların sıkıştırılması için daha az iş gerektirdiğinden tek kademeli YSIP'ye kıyasla daha yüksek COP'ye yol açar.



Şekil 3. Çift kademeli YSIP'nin proses akış şeması [6]

2.2. Kaskad Buhar Sıkıştırma Isı Pompası Sistemleri

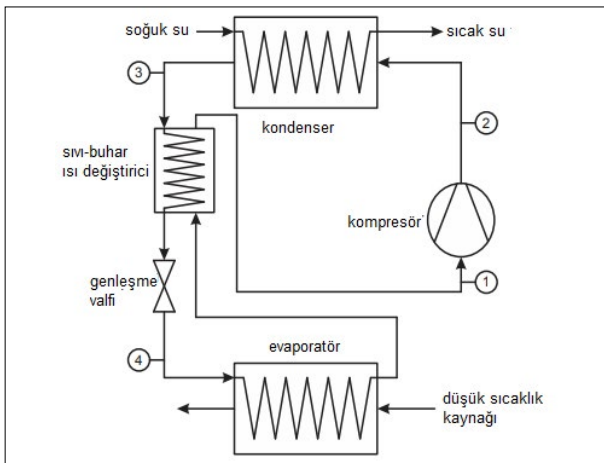
Kaskad buhar sıkıştırma ısı pompaları, daha yüksek bir sıcaklık artışı yaratmak için basamaklı hale gelen iki kademeli ısı pompalarıdır. Bir ısı eşanjörü, kademeler arasında kondenser/evaporatörü görevi görür. Her kademe, verimliliğini ve elde edilebilir sıcaklığını en üst düzeye çıkarmak için farklı soğutkanlar ve kompresörler kullanılabilir (Şekil 4).



Şekil 4. Kaskad (kademeli) buhar sıkıştırma ısı pompası

2.2.3. Transkritik Isı Pompası

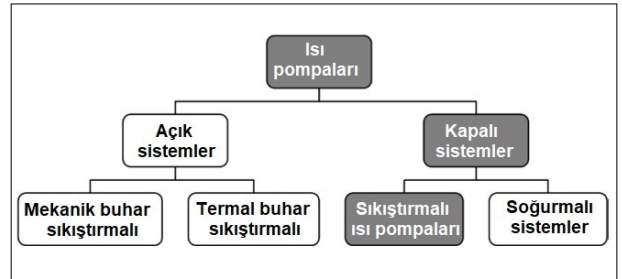
Transkritik ısı pompası, ek bir dahili ısı değiştirici [7] haricinde, tek kademeli YSIP ile hemen hemen aynı yapılandırmaya sahiptir ve bir kondenser yerine bir gaz soğutucusuna sahiptir. CO₂, 71 bar'lık kritik basıncın üzerinde sıkıştırılır ve ısının bir sıcaklık aralığı boyunca serbest bırakıldığı bir gaz soğutucusunda soğutulur (Şekil 5).



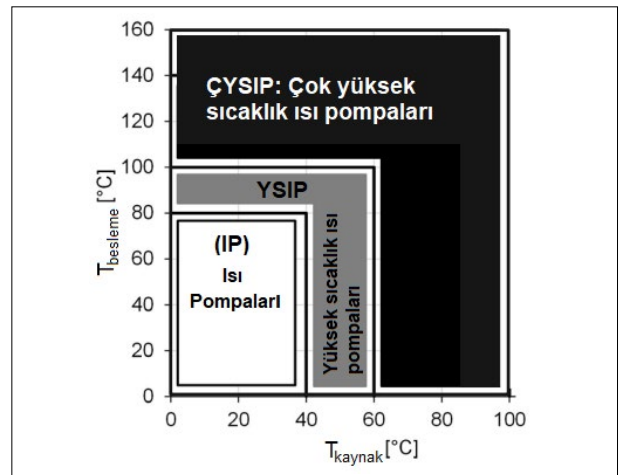
Şekil 5. Transkritik ısı pompasının proses akış şeması [6]

2.3. Isı Pompası Türleri

YSIP teknolojilerinin iki ana kategorisi buhar sıkıştırma ve soğurmadır [8]. YSIP'lerde çeşitli kompresör türleri bulunabilir (Tablo 1) ve çoğu ticari model buhar sıkıştırma teknolojisini kullanır ve dolayısıyla buna bağlı olarak bu çalışmada öncelikle bu tür teknolojilere odaklanıyoruz (Şekil 6 ve Şekil 7). Soğurmalı ısı pompaları genellikle ısıtma kapasitesi birimi başına daha yüksek sermaye yatırımı gerektirir, büyük aktif termal kütleleri nedeniyle ısı çıkışını sıkıştırma pompaları kadar esnek bir şekilde modüle edemez, 90°C'nin üzerinde ısı sağlamak için yüksek sıcaklıkta atık ısı akımları gerektirir ve değişken enerji kaynaklarını etkili bir şekilde entegre etme kapasitesinden yoksundur [9]. Diğer yenilikçi modeller ısı veya kimyasal olarak tahrik edilen ısı pompası çevrimlerine odaklanır ve gelecekteki benimsenmeyi tahmin etmek için piyasada daha az referans noktasına sahiptir [10]. Tablo 1'de birincil ısı pompası tipleri açıklanmaktadır [11,12,13].



Şekil 6. Isı pompalarının sınıflandırılması (sıkıştırma ısı pompalarına odaklanma) [14]



Şekil 7. Isı pompalarının sıcaklık seviyelerine göre sınıflandırılması [14]

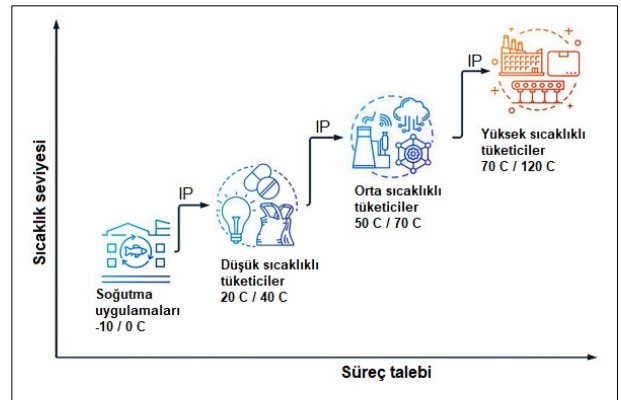
Tablo 1. Isı pompalarının temel türleri [14]

Isı pompası tipi	Tanımlama	Avantajları	Dezavantajları
Mekanik, kapalı çevrim	Şekil 6'deki temsili şemada açıklandığı gibi, kapalı çevrimli mekanik ısı pompaları, yoğunlaşması yükseltilmiş ısının geri kazanılmasına olanak tanıyan izole edilmiş bir çalışma sıvısına önce ısı verir, ardından basınç uygular.	Kompresör tasarımı, soğutucu seçimi ve daha büyük sıcaklık artışlarına izin vermek için bağlantılı aşamalarla kombinasyon açısından esneklik.	Soğutkan ve kompresör özelliklerinin yüksek sıcaklık koşullarıyla eşleştirilmesi teknik ve ekonomik olarak zor olabilir.
Mekanik, açık çevrim	Mekanik buhar sıkıştırma olarak da bilinen açık çevrimli mekanik ısı pompaları, çalışma akışkanı olarak suyu kullanır ve buharı daha yüksek bir basınca sıkıştırarak doğrudan kullanabilir ve bu yoğunlaşmadan elde edilen enerjiyi bir işleme ısı sağlamak için kullanabilir.	Buhar kullanan ve suyun soğutucu olarak kapasitesi dahilinde sıcaklık artışları gerektiren işlemler için doğal bir uyum sağlar.	Çalışma sıvısı olarak su kullanılmalıdır; yüksek sıcaklık yükseltilerinde daha düşük verimliliğe tabidir.
Soğurmalı, kapalı çevrim	Emilim sistemleri, biri düşük dereceli atık ısı ve diğeri yüksek dereceli ısı olmak üzere iki giriş ısı akımını birleştirerek, iki giriş akımının arasında bir yerde kullanışlı bir sıcaklığa sahip bir ısı akımı üretir. Bu, dört bileşenli bir ısı eşanjörü sistemini gerektirir.	Yüksek sıcaklık seviyeleri mümkün olup, yüksek sıcaklık yükseltilerinde yüksek performans elde edilebilmekte, eş zamanlı ısıtma ve soğutma uygulamalarına imkân verebilmektedir.	Daha yüksek sermaye maliyetleri, daha az esnek çıktı modülasyonu, yüksek sıcaklık atık ısı akımlarının varlığını gerektirir, çalışma akışkanı çifti seçimlerini optimize etmek zordur.
Termal sıkıştırma, açık çevrim	Buhar jet ejektörleri olarak da bilinen termo-kompresörler, düşük basınçlı emme buharını alır ve onu daha kullanışlı bir yüksek basınç seviyesine sıkıştırır. Sıkıştırma maddesi, iki buhar akımını birleştirmek, ilerletmek ve basınçlandırmak için konik bir nozul, karıştırma odası ve difüzör kullanan ejektördür.	Yüksek basınçlı buhar, düşük kaliteli atık buharını kullanışlı bir sıcaklığa yükseltir.	Çalışma sıvısı olarak su kullanılmalıdır; yüksek sıcaklık yükseltilerindeki işlemlerde daha düşük verimliliğe tabidir.

3. YSIP TASARIM ESASLARI

3.1. Sistem Yapılandırması

Süreci iyileştirmek için yüksek sıcaklık ısı pompalarını bütünleştirerek, atık ısı gereksinimi karşılamak üzere çıkış sıcaklıkları yükseltilebilir. Çeşitli sıcaklık seviyelerinde ısı pompalarının hem soğutma hem de ısıtma gereksinimlerini karşıladığı böyle bir bütünleşik sistemin bir örneği Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Farklı tüketiciler ve farklı talep seviyeleri için YSIP'nın süreç entegrasyonu [15]

Yeni ısı pompalarının (IP) entegrasyonu üzerine çeşitli yapılandırmalar uygulanabilir [16]. Performansta iyileştirme elde edilse de ısı pompası ünitesinde daha ciddi operasyonel sınırlamalar meydana gelebilir. Ancak, ısı pompalarının farklı endüstriyel uygulamalarda optimum ve temel entegrasyonunu ele almak için çok az çaba tartışılmıştır. Örneğin, yüksek sıcaklık ısı pompası entegrasyon teknikleri, çeşitli çalışma sınırlarına tabi olan ısı sıcaklığı ve bunların uygulamaları ile ilgili ayrıntılı bir özet Tablo 2'de listelenmiştir. Birkaç yazar, ısı pompalarını maksimum çikış sıcaklığı seviyesine göre sınıflandırmıştır.

Buna göre ısı pompaları şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Bölgesel ısıtma uygulamasıyla entegre olmak için uygulanabilir olan sıcaklık geri kazanımlı ısı kaynak sıcaklığı T_k [$0^\circ\text{C} \leq \text{IP} < 40^\circ\text{C}$] ve besleme sıcaklığı T_b [$0^\circ\text{C} \leq \text{IP} < 80^\circ\text{C}$] olan geleneksel ısı pompası (HP).
- Isı geri kazanım sıcaklığı T_k [$40^\circ\text{C} \leq \text{IP} < 60^\circ\text{C}$] ve ısı besleme sıcaklığı T_b [$80^\circ\text{C} \leq \text{IP} < 100^\circ\text{C}$] olan yüksek sıcaklık ısı pompası (YSIP) çoğunlukla farklı endüstriyel uygulamalar için uygundur.
- Son olarak, çoğunlukla buhar üretiminde kullanılan ısı geri kazanım sıcaklığı T_k [$60^\circ\text{C} \leq \text{IP} < 120^\circ\text{C}$] ve ısı besleme sıcaklığı T_b [$100^\circ\text{C} \leq \text{IP} < 160^\circ\text{C}$] olan çok yüksek sıcaklık ısı pompası (ÇYSIP) [17].

Tablo 2. Farklı bütünsel yüksek sıcaklık pompaları makalelerinin özeti (2010 ve 2021 yılları arasında) [17]

Ref.	YSIP tipi	Çalışma tipi	Soğutkan	Besleme Sıcaklığı	Uygulama
[18]	Buhar sıkıştırma	Deneyisel	R134a	80 °C	Su ısıtma
[19]	Hibrit	Benzeşim	NH ₃ /H ₂ O	~90 °C	Su ısıtma
[20]	Buhar sıkıştırma	Deneyisel	--	--	Klima alanları için rejeneratif
[21]	Hibrit	Deneyisel	NH ₃ &H ₂ O	90 °C	Sıcak su ısıtma
[22]	Hibrit	Benzeşim-deneyisel	H ₂ O-LiBr	90-120 °C	Güneşle su ısıtma
[23]	Hibrit	Benzeşim	NH ₃ &H ₂ O	170-240 °C	Yüksek sıcaklık YSIP'ler için ar-ge
[24]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	R152a	92-102 °C	Kojenerasyon (ısıtma-soğutma)
[25]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	R718	--	Ortam ısıtma
[26]	Buhar sıkıştırma	Deneyisel	R410A	80 °C	Enerji depolama/ortam ısıtma
[27]	Hibrit	Benzeşim	NH ₃ & H ₂ O	150 °C	Büyük ölçekli buhar üretimi
[28]	Hibrit	Benzeşim	NH ₃ /H ₂ O	80 °C	Sıcak su üretimi
[29]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	BY-5	120-130 °C	Endüstriyel süreçler için su buharı üretimi
[30]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	NH ₃	90 °C	Trijenerasyon
[31]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	R245fa	120 °C	Su ısıtma
[32]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	Bütan, Pentan, HFO-1336mzz(Z)-R514A, HCFO-1233zd(E), HCFO-1224yd(Z)-HFC-245fa,	140 °C	Endüstriyel atık geri kazanımı
[33]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	--	125 °C	Atık ısı geri kazanımı
[34]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	HFC-245fa	140 °C	Sıcak su üretimi
[35]	Buhar sıkıştırma	Deneyisel	R245fa R410A	150 °C.	Sıcak su üretimi
[36]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	R-1233zd(E)R-1234ze (Z)	133 °C	Endüstriyel kullanım için su ısıtma
[37]	Buhar sıkıştırma	Benzeşim	--	~100 °C	Suyu tuzdan arındırma işlemi
[38]	Hibrit	Benzeşim	NH ₃ NH ₃ -H ₂ O	95 °C	Kojenerasyon ısıtma/soğutma
[39]	Hibrit	Benzeşim	NH ₃ /LiNO ₃	120-200 °C	Evsel kullanım için ısıtma-soğutma

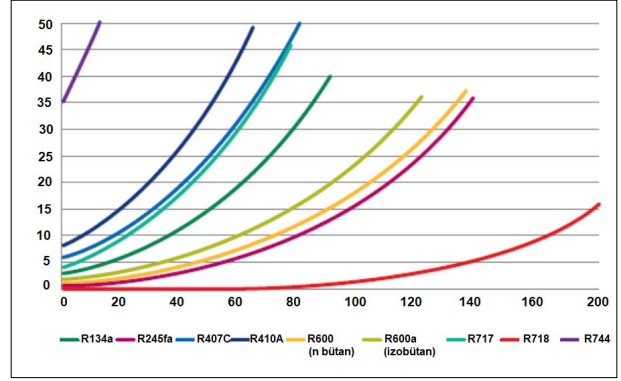
Tablo 2, hem matematiksel hem de deneysel çalışmaları göstermektedir. Simülasyon çalışmaları araştırma için hem buhar sıkıştırma hem de hibrit sistemleri dikkate almıştır. Su-amonyak absorpsiyon sistemi hibrit sistemlerde buhar sıkıştırma sistemleriyle çok yaygın olarak entegre edilmiştir. Buhar sıkıştırma sisteminde hem doğal hem de sentetik soğutkanlar araştırılmıştır. Kullanılan soğutkanlar R718, R1234ze (Z), HFC-134a, R600, R600a, R601, R-514A ve HCFO-1224yd(Z), HFC-245fa ve R152'dir. Çoğu deneysel çalışma potansiyeli keşfetmek için buhar sıkıştırma HP sistemini ele alır ve çok azı yalnızca hibrit sistemi kullanarak bulunmuştur. Deneysel çalışma sayısı simülasyon tabanlı araştırmalara kıyasla asgari düzeydedir. Sistem potansiyel verimliliği R134a, R245fa ve R410A kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, kaskad sistemlerinin etkili olduğunu göstermektedir [15].

Günümüzde, YSIP üreticileri en az 90°C'lik sıcaklıklarda besleme (T_c) sağlayabilir. Bu çalışma, >80°C besleme veya dağıtım sıcaklığı sağlayan bir YSIP'nin gerçek çalışma koşullarına dayalı olarak farklı yenilikçi bütünleşik sistemleri keşfetmeyi ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Tablo 2, yüksek sıcaklık ısı pompalarının entegrasyon yöntemleri yoluyla endüstriyel uygulama için ısı veya buhar buharı sağlayabileceğini göstermektedir.

3.2. YSIP Soğutkanları

Bir ısı pompasındaki soğutkan seçimi performansını, ekipmanın mekanik tasarımını ve maliyetini etkiler. COP'yi doğrudan etkileyen soğutucu akışkan özellikleri arasında viskozite, ısıl iletkenlik, özgül ısı kapasiteleri (ve bunların oranı), buharlaşma ısıları, yoğunluk, kritik sıcaklıklar, basınçlar ve hacimsel ısıtma kapasitesi bulunur (Şekil 9). Sistem içindeki soğutucu akışkanın mutlak basıncı, hava ve su buharının bir sızıntı yoluyla sisteme giremeyeceği şekilde her aşamada atmosfer basıncının üzerinde olmalı ve kompresör yağlayıcısı soğutkanla karışabilir olmalıdır. Soğutucu akışkan performansı genellikle çevrimin kritik sıcaklığa ve soğutucu akışkanın basıncına yakınlığıyla ilgilidir. Kritik altı bir çevrim için, yoğunlaşma sıcaklığı, COP'yi en üst düzeye çıkarmak için soğutucu akışkanın kritik sıcaklığının oldukça altında olmalıdır. Buna karşılık, kritik üstü (transkritik) çevrimler, COP'yi en üst düzeye çıkarmak için düşük gaz soğutucu çıkış sıcaklıklarına ulaşmak için kritik sıcaklığın oldukça üzerinde basınçlar içerir. Daha yüksek besleme

sıcaklıkları daha yüksek basınçlar gerektirir ve bu nedenle maksimum basınç oranı gibi pratik faktörler elde edilebilir sıcaklıkları sınırlayabilir [40].



Şekil 9. Yaygın soğutucu gazlar için sıcaklık ve basınç arasındaki ilişki [41]

Termodinamik performansa ek olarak, soğutucu güvenliği ve çevresel etki soğutucu seçiminde kritik faktörlerdir [42]. Soğutucular tercihen toksik olmayan ve yanıcı olmayan olmalıdır. Hem kloroflorokarbonlar (CFC'ler) hem de hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler) önemli ozon tüketme potansiyeline (OTP) sahiptir ve bu da Montreal Protokolü uyarınca klor içeren soğutkanların aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmasına yol açmıştır. Sıfır OTP'ye sahip hidroflorokarbonlar (HFC'ler) başlangıçta CFC ve HCFC soğutucularının yerini aldı; ancak bunun bedeli yüksek küresel ısınma potansiyeli (KIP) değerleri [43] oldu. Birçok ülke, HFC'lerin aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması için Montreal Protokolü'nün Kigali Değişikliği [44] ve Kyoto Protokolü [45] ile uyum sağladı. Şekil 10'da ısı pompalarında kullanılan soğutkanlar için emniyet sınıflandırmaları görülmektedir.

YANICILIK	Yüksek	A3	R290, R1270, R601, R600, R600a, E170	B3	
	Düşük	A2	R152a, R365mfc, SES36, R1234ze(Z), R1234ze(E), R1234yf	B2	R717
	Alev yayılımı yok	A1	R113, R114, R134a, R236fa, R227ea, R410A, R1336mzz-Z, R1233zd(E), DR-14, DR-12, R718, R744	B1	R245ca, R245fa
		Düşük		Yüksek	
ZEHIRLİLİK					

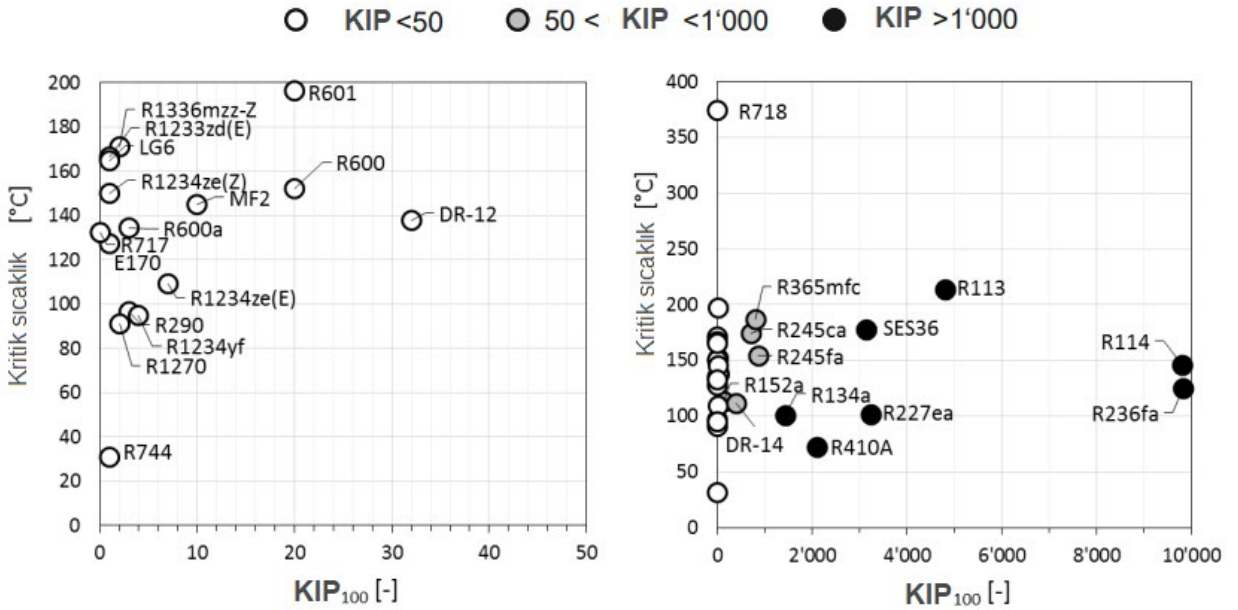
Şekil 10. Isı pompalarında kullanılan soğutkanların emniyet sınıflandırması (DIN EN 378-1 (2008) ve ASHRAE 34'e göre) [46]

Hidrofloroolefinler (HFO'lar), hidroklorofloroolefinler (HCFO'lar) ve doğal soğutkanlar üzerine önemli araştırmalar ve geliştirmeler, HFC'leri değiştirmek için seçenekler olarak devam etmektedir.

Tablo 3, bu yaygın soğutkanların (YSIP'lerle ilgili olanlar dahil) bir listesini, termodinamik özelliklerini, KIP'ni, OTP'yi ve güvenlik endeksini özetleyerek göstermektedir. Soğutucu güvenlik endeksinde, daha yüksek sayılar artan yanıcılığa karşılık gelir (1 = yanıcı olmayan, 3 = son derece yanıcı), sayıdan sonraki 'L' harfi ise daha düşük yanıcılığın bir alt

sınıfını temsil eder. 'A' harfi düşük zehirliliği, 'B' harfi ise yüksek zehirliliği ifade eder. Sonuç olarak, A1 sınıfı en güvenli soğutkanı temsil eder (Şekil 10).

Şekil 11'de YSIP'larda kullanılan soğutkanların küresel ısınma potansiyelleri (KIP) grafiklerde gösterilmektedir. Buna göre koyu siyah daire ile gösterilenler 1000 değerinden büyük KIP değerinde olanları, gri daire ile gösterilenler 1000 ile 50 arasında olanları, beyaz daire ile gösterilenler ise KIP değeri 50'nin altında olan soğutkanları ifade edilmektedir.



Şekil 11. YSIP'larda kullanılan soğutkanların kritik sıcaklıkları küresel ısınma potansiyelleri (KIP) [47]

Tablo 3, HFC soğutucularının KIP'inin HFO'lar, HCFO'lar ve doğal soğutucularla karşılaştırıldığında ne kadar daha yüksek olduğunu göstermektedir. Karbondioksit, izopentan ve R1336mzz(Z), A1 güvenlik derecelendirmelerine sahipken çok düşük çevresel etkilere sahiptir. Soğutucu karışımları soğutucu seçimi için daha fazla seçenek oluşturur. İki soğutucunun farklı kaynama noktaları olduğunda, sıcaklık kayması doyma bölgesinde meydana gelir.

Sıcaklık kaymasının şekli ve derecesi, göreceli akışkan özelliklerine ve karışım bileşimine bağlıdır. Zühlsdorf ve diğerleri [48], ekserji tahribatını en aza indiren ve COP'yi en üst düzeye çıkaran, proses ısı kaynağı ve emici gereksinimlerine yakın bir sıcaklık kayması elde etmek için dimetil-eter ve CO₂ karışımı kullanarak bu konsepti göstermiştir.

Tablo 3. Potansiyel yüksek sıcaklık soğutucu akışkanların özellikleri [46]

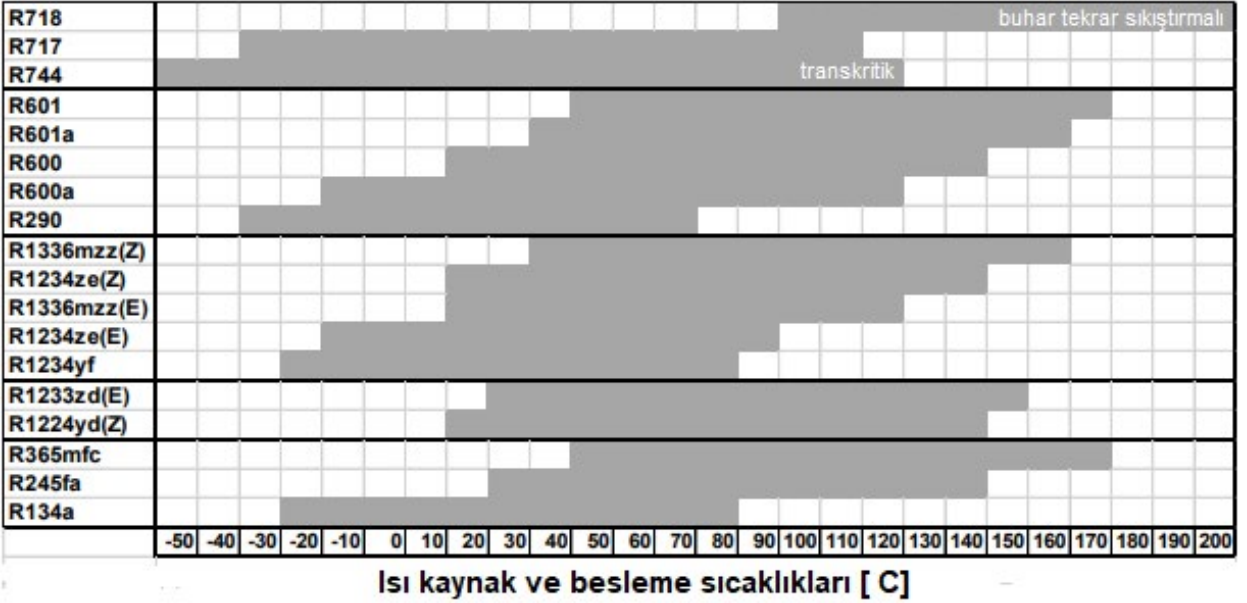
Soğutkan	Tanımlama	Kimyasal formülü	T _{kritik}	P _{kritik}	OTP	KIP	Emniyet Sınıfı	Kaynama noktası	Molekül ağırlığı
Etan hattı									
R113	1,1,2-Triklor-1,2,2-trifloreten	CCl ₂ -FCClF ₂	214,0	33,9	0,8	4800	A1	47,6	187,4
R114	1,2-Diklor-1,1,2,2-tetraforeten	CCl ₂ -FCClF ₂	145,7	32,6	1	9800	A1	3,8	170,9
R134a	1,1,1,2-Tetraforeten	CH ₂ FCF ₃	101,1	40,6	0	1430	A1	-26,1	102,0
R152a	1,1-Difloreten	CH ₃ FCF ₂	113,3	45,2	0	124	A2	-24,0	66,1
Propan hattı									
R245ca	1,1,2,2,3-Pentaflorpropan	CHF ₂ CF ₂ CH ₂ F	174,4	39,3	0	693	--	25,1	134,0
R245fa	1,1,2,2,3-Pentaflorpropan	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	154,0	36,5	0	858	B1	14,9	134,0
R236fa	1,1,1,3,3,3-Hekzaflorpropan	CF ₃ CH ₂ CF ₃	124,9	32,0	0	9810	A1	-1,4	152,0
R117ea	1,1,1,2,2,3,3-Heptaflorpropan	CF ₃ CHFCF ₃	101,8	29,3	0	3220	A1	-15,6	170,0
R290	Propan	CH ₃ CH ₂ CH ₃	96,7	42,5	0	3	A3	-42,1	44,1
R1270	Propen	CH ₃ CH=CH ₂	91,1	45,6	0	2	A3	-47,6	42,1
Bütan hattı									
R365mfc	1,1,1,3,3-Pentaflorbütan	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	186,9	32,7	0	804	A2	40,2	148,1
SES36	Pentaflorbütan	R365mfc/PFPE65/35	177,6	28,5	0	3126	A2	35,6	184,5
Hidrokarbonlar									
R601	Pentan	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	196,6	33,7	0	20	A3	36,1	72,2
R600	Bütan	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	152,0	38,0	0	20	A3	-11,8	58,1
R600a	İzobütan	CH(CH ₃) ₂ CH ₃	134,7	36,3	0	3	A3	-11,8	58,1
Soğutkan karışımları									
R410A	R32/R125(50/50)	CH ₂ F ₂ /CHF ₂ CF ₃	72,6	49,0	0	2088	A1	-51,5	72,6
Hidrofloroolefinler (HFO'lar)									
R1336mzz-Z	1,1,1,4,4,4-Hegzaflor-2-büten	CF ₃ CH=CHCF ₃ (Z)	171,3	29,0	0	2	A1	33,4	164,1
R1233zd(E)	Tetraflorpropen	CF ₃ CH=CHCl(trans)	166,5	36,2	0,0003	1	A1	18,0	130,5
R1234ze(Z)	cis-1,3,3,3-Tetraflor-1-propen	CF ₃ CH=CHF(cis)	150,1	35,3	0	1	A2	9,8	114,0
R1234ze(E)	trans-1,3,3,3-Tetraflor-1-propen	CF ₃ CH=CHF(trans)	109,4	36,4	0	7	A2L	-19,0	114,0
R1234yf	2,3,3,3-Tetraflor-1-propen	CF ₃ CF=CH ₂	94,7	33,6	0	4	A2L	-29,5	114,0
DR-14	--	--	111,6	39,6	0	380	A1	-20,5	--
DR-12	--	--	137,7	30,0	0	32	1	7,5	--
LG6	--	--	165,0	--	0	1	--	--	--
MF2	--	--	145,0	--	0	10	--	--	--
Diğerleri									
E170			127,2	53,4	0	1	A3	-24,8	46,1
R718	Su	H ₂ O	373,9	220,6	0	0	A1	100,0	18,0
R717	Amonyak	NH ₃	132,3	113,3	0	0	B2L	-33,3	17,0
R744	Karbondioksit	CO ₂	31,0	73,8	0	1	A1	-78,5	44,0

Bazı soğutucu akışkanlar yüksek sıcaklıklarda sıkıştırılıp buharlaşabildikleri için bu tür ısı pompalarında iyi sonuç verir. Bu tür ısı pompalarında R32 (HFC) ve R290 (propan) yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevrim olarak 80°C'ye kadar klasik ve daha yüksek sıcaklıklar için kaskad çevrimler kullanılabilir [49].

Soğutucu akışkan türü (çalışma sıvısı olarak da bilinir) ve termodinamik çevrim yapılandırması, endüstriyel YSIP'lerin tasarımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Diğerlerinin yanı sıra, soğutucu akışkanın çalışma koşullarına uygun olması (örneğin, yeterli sıcaklıklar ve basınçlar), enerji açısından verimli, ticari olarak temin edilebilir olması ve her şeyden önce geleceğe yönelik ve çevre dostu olması (F-gaz yönetmeliklerine göre) gerekir. Sonuç olarak, düşük bir Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) ve sıfır veya ihmal edilebilir bir Ozon Tüketme Potansiyeli (OTP) olmalıdır. Ayrıca, kritik sıcaklığın, endüstrilerde sıklıkla ihtiyaç duyulan alt kritik çevrim yoğunlaşmasına izin verecek kadar yüksek olması gerekir [50].

Uygulamada, hidroflorokarbon HFC-245fa, endüstriyel YSIP'lerde kullanılan baskın soğutucudur [51]. Ancak, KIP değeri 858'dir ve önümüzdeki yıllarda aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması (veya düşürülmesi) muhtemeldir. Doğal soğutucular ve sentetik hidrofloroolefinler (HFO'lar) ve hidroklorofloroolefinler (HCFO'lar), HFC'lerin yerini alması beklenen 4. nesil düşük KIP'li soğutucular olarak kabul edilmektedir [52]. YSIP ve Organik Rankine Çevrimi (ORC) uygulamalarında HFC-245fa'ya ana alternatifler HFO-1366mzz(Z), HFO-1234ze(Z), HCFO-1233zd(E), HCFO-1224yd(Z) ve hidrokarbonlar HC-601 (n-Pentan) ve HC-600'dür (n-Bütan). HCFO'lar klorlu olmasına rağmen, atmosferdeki kısa ömürlü nedeniyle OTP'leri neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir [55,56]. Ayrıca, İsviçre ChemRVV [53] gibi, OTP'si 0,0005'in altında olan soğutucuların kullanımına izin veren ulusal düzenlemeler vardır.

Şekil 12'de YSIP'lerde kullanılan soğutkanların farklı ısı kaynak ve besleme sıcaklıkları için kullanım aralıklarını göstermektedir.



Isı kaynak ve besleme sıcaklıkları [C]

Şekil 12. YSIP uygulamalarında farklı çalışma sıvıları için sıcaklık uygulama aralıkları

HFO soğutkanları arasında, HFO-1336mmz(Z), nispeten düşük bir basınçta (29 bar) en yüksek kritik sıcaklık olan 171,3°C'yi sunar. Bu soğutkan yanıcı değildir (güvenlik grubu A1), sıfır OTP'ye, 2 KIP'ye ve 22 günlük bir atmosferik ömre sahiptir. Kontomaris'e [54] göre, 250°C'ye kadar kararlıdır ve bu nedenle atık ısı geri kazanımı, organik Rankine çevrimi (ORC) ve buhar üretimi gibi uygulamalar için uygundur (Şekil 12). İzomer HFO-1336mzz(E), yaklaşık 18'lik bir KIP'ye, 137,7°C'lik bir kritik sıcaklığa ve daha yüksek hacimsel ısıtma kapasitesine (VHC) sahiptir [54]. Hafif yanıcı olarak kabul edilen ancak tutuşması zor olan (güvenlik grubu A2L, yanma hızı 10 cm s⁻¹'den düşük) HFO-1234ze(Z) [55–59] hakkında nispeten az bilgi mevcuttur.

3.3. YSIP Kompresör Tipleri

Kompresör, sıkıştırımlı ısı pompasının ana bileşenidir. Gaz halindeki soğutucuyu düşük basınç seviyesinden yüksek basınç seviyesine sıkıştırır. Bu nedenle kompresör, IP sisteminin verimliliğini büyük ölçüde etkiler. Farklı kompresör tipleri mevcuttur. YSIP'lerde şu anda kullanılan ana kompresör tipleri pistonlu (pistonlu), rotorlu, vidalı ve turbo kompresörlerdir (santrifüjli kompresörler dahil). Tipik olarak, bu kompresör tipleri bir elektrik motoruyla çalıştırılır (Tablo 4).

Pistonlu Kompresör: Bu tipte, piston aşağı doğru hareket ettiğinde, düşük basınçtaki gaz halindeki soğutucu bir valf aracılığıyla emilir. Piston yukarı doğru hareket ettiğinde, gaz daha yüksek bir basınca sıkıştırılır. Bu tip kompresörün dezavantajları, titreşimli

hacim akışları ve olası bir sıvı çekicinin meydana gelmesidir. Ayrıca kompresörün kendisi de titreşimlidir.

Vidalı Kompresör: Bu tip kompresörde, sıkıştırma iki ters yönde dönen vidalı rotor tarafından gerçekleştirilir. Vidalı kompresörlerin avantajları, örneğin, kompakt tasarım ve gerçekleştirilebilen yüksek hızlardır. Bir dezavantajı, sızdırmazlık için gerekli olan yağ enjeksiyonudur. Ayrıca, yağ yönetim sistemleri gerektirir ve yüksek sıcaklıklarda yağ bozulması uygulamayı sınırlayan bir sorun olabilir.

Spiral (Scroll) Kompresör: Spiral kompresörlerde, gaz halindeki soğutucu, birbirine doğru hareket eden iki spiral vasıtasıyla sıkıştırılır. Bu türün avantajları arasında düşük titreşim, düşük gürültü seviyesi ve sıvı çekicine karşı hassas olmaması bulunur. Ancak, kompresör türünün kapasite aralığı çok sınırlı olup 400 kW'a kadar ısıtma kapasitesinde bulunabilmektedir.

Turbo Kompresör: Yukarıda açıklanan diğer kompresörlerin aksine, turbo kompresör bir akım makinesidir ve yer değiştirme prensibiyle çalışmaz. Bu kompresör türünde, enerji dönen pervaneler vasıtasıyla ortama aktarılır. Basınç artışı bir difüzör vasıtasıyla sağlanır. Bu türün avantajı, küçük alan gereksinimi, büyük akış hızları, iyi hız kontrolü ve düşük aşınmadır. Ancak, kademe başına uygulanabilir basınç oranları düşüktür. Tipik olarak, su buharı yeniden sıkıştırma sistemleri, su buharının düşük yoğunluğunu telafi etmek için yüksek akış hızına ve düşük basınç oranına sahip büyük kompresörler veya yüksek hızlı yağsız turbo kompresörler kullanılarak çalıştırılır [60].

Tablo 4. YSIP kompresör tiplerinin temel özellikleri [60]

Kompresör tipi	Pistonlu	Spiral (Scroll)	Vidalı	Turbo (Santrifüj)
Tahrik gücü	Ötelemeli	Ötelemeli	Ötelemeli	Kinetik akış
Sıkıştırma	Statik	Statik	Statik	Dinamik
Süpürme hacmi	Geometrik	Geometrik	Geometrik	Basınç oranına bağlı
Üretim	Kesintili	Sürekli	Sürekli	Sürekli
Hacimsel akış	1000 m ³ /h'te kadar	500 m ³ /h'te kadar	100 m ³ /h ile 10.000 m ³ /h	100 m ³ /h ile 50.000 m ³ /h
Isıtma kapasitesi	800 kW'a kadar	400 kW'a kadar	80 kW ile 8 MW	80 kW ile 40 MW
Basınç oranı (tek kademe)	10'a kadar	10'a kadar	20'ye kadar	5'e kadar
Sabit hızda kontrolü	Kademeli	Zor	Sürekli	Sürekli
Hız kontrolü	Mümkün	Mümkün	Mümkün	Mümkün
Sıvı dönüşü hassasiyeti	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Titreşimli çalışma	Var	Yok	Yok	Yok

3.4. YSIP Tasarım Adımları

Proses ısıtma sistemlerinde verimlilik, uygun şekilde tasarlanmış ve seçilmiş bileşenler, bu bileşenlerin sisteme uygun şekilde entegre edilmesi ve her bileşen ve tüm sistem için etkili kontrol stratejileri gerektirir.

Adım 1

Isı için son kullanıcı talebinin doğru bir resmini oluşturun (sadece kazan yakıt girişi veya buhar çıkışı değil). Isı taleplerinin gerekli sıcaklığını ve süresini değerlendirin.

Adım 2

Isı pompasına sunulacak yük profilini belirleyin ve bundan elektrik talebi kapasitesini ve enerji maliyetlerini belirleyin (beklenen elektrik tarifelerini kullanarak). Elektrik tarifeleriyle aynı çözünürlük derecesi kullanılmalıdır, yani gerekirse ½ saatte bir.

Adım 3

Isı sistemi verimsizliklerini ve kayıplarını en aza indirmek için tüm fırsatları belirleyin ve değerlendirin ve ısı üretimine alternatiflerin ekonomisini belirleyin.

- Ürün ve proses için en iyi ısıtma ortamını belirleyin. Yüksek sıcaklık ısı pompalarının veya diğer verimli yöntemlerin (ör. RF veya IR ısıtma) proses gereksinimlerine daha uygun olup olmadığını değerlendirin,

- Örneğin termal depolama proses tepe yüklerini karşılamaya yardımcı olabilir mi gibi ısıtma yüklerini yayma seçeneklerini değerlendirin,

- Daha küçük dağıtılmış sistemlerin merkezi bir ısıtma sisteminden daha iyi çalışıp çalışmayacağını değerlendirin,

- Soğutma sistemlerinden, soğutuculardan, fırınlardan, kurutuculardan vb. ısı kaynağı seçeneklerini değerlendirin. Kaynağın kalitesini (sıcaklık, ısı oranı ve değişkenlik) ve kullanılabilirliğin ısı talebiyle ilişkisini ve bunları hizalamak için depolama gerekip gerekmediğini anlamak önemlidir.

Özellikle ısıtma ve soğutmanın gerçekleştiği daha karmaşık prosesler için, bir proses bütünleştirme yaklaşımı gereklidir. Bu, harici ısı ve soğutma girdilerini en aza indirir ve ısı pompalaması için etkili fırsatları belirler.

Adım 4

Yüksek sıcaklık bir ısı pompasının ticari olarak uygulanabilir olup olmadığını belirlemek için deneyimli bir tedarikçiyle uygun ısı pompası seçeneklerini belirleyin. İşletme ve bakım maliyetlerinin belirlendiğinden emin olarak sermaye, kurulum ve işlem maliyetlerini belirleyin. Yüksek sıcaklık ısı pompaları yüksek basınçlarla çalışır ve düşük sıcaklık ısı pompalarına göre daha yüksek bakım gereksinimlerine sahip olma eğilimindedir. Planlı bakımın, küçük paketli, yüksek sıcaklık ısı pompaları için tipik olarak 30.000 saatlik 25.000 \$'lık revizyon döngüleri olmak üzere iki yılda bir kontrolleri içermesi muhtemeldir. Uzaktan gerçek zamanlı izleme ve planlı bakım programları normaldir ve uzun vadeli işletme ve bakım maliyetlerini en aza indirir.

Adım 5

Isı pompalarının mevcut ısı kaynaklarıyla paralel çalışacak şekilde kurulup kurulamayacağını belirleyin. Bu, genel maliyetleri en aza indirebilir, sistem dayanıklılığını iyileştirebilir ve mevcut kazanları çalıştırarak elektrik pik yük maliyetlerinde düşümlere olanak tanıyabilir. Ancak bu yaklaşım, mevcut sistemin işletme ve bakım maliyetlerinin bir kısmını koruyabilir [60].

3.5. Verimlilik Ölçütleri

3.5.1. Mevsimsel Performans Faktörü

Mevsimsel performans faktörü (MPF), bir yıl boyunca verilen ısı birimlerinin (kWh cinsinden) tüketilen elektrik birimlerine oranıdır. Mevsimsel performans faktörü, bir yıllık tam çalışmadan sonra, ısı ve elektrik sayaçlarından alınan okumalar kullanılarak hesaplanır ve ısı pompası sisteminin gerçek dünyadaki performansının bir ölçüsüdür.

Isı pompası sistemi performansını tahmin etmenin çeşitli yolları vardır; ancak mevsimsel performans faktörünü hesaplayarak performansı pratikte ölçmek önemlidir.

3.5.2. Performans Katsayısı

Isı pompası verimliliğinin bir diğer ölçütü de performans katsayısıdır (COP). Performans katsayısı, ısı kaynağı sistemindeki akış ve dönüş ile ısıtma sistemindeki akış ve dönüş için belirli bir çalışma sıcaklığı kümesinde ısı çıkışının elektrik girişine oranıdır. Standart EN 14511'de bir dizi standart sıcaklık ve performans katsayısını değerlendirme metodolojisi tanımlanmıştır. Bu, farklı ısı pompalarının birbirleriyle karşılaştırılabileceği anlamına gelir.

Gerçekte, bu dört sıcaklık (ısı kaynağı sistemindeki akış ve dönüş ile ısıtma sistemindeki akış ve dönüş) yıl boyunca sürekli olarak değişir, bu nedenle bir ısı pompası sisteminin performans katsayısı

çalışması sırasında sürekli olarak değişecektir.

Performans katsayısı şu şekilde tanımlanır:

$$\text{Performans Katsayısı} = \frac{\text{Verilen Isıl Güç (kWh)}}{\text{Güç Girişi (kWh)}}$$

Verilen ısıl güç: Isıtılan ortamın giriş ve çıkışındaki sıcaklık farkının akış debisiyle çarpımı,

Güç girişi: Cihazın tüm bileşenlerine gelen toplam elektrik giriş gücü.

3.5.3. Mevsimsel Performans Katsayısı

Standart EN 14825, EN14511'de belirtilen farklı koşullardaki performans katsayısını hesaba katarak bir ısı pompasının tüm bir yıl boyunca ortalama performansının projeksiyonu için bir metodolojiyi açıklar. Bu teorik ortalama performans, mevsimsel performans katsayısı (SCOP), mevsimsel performans faktörünün bir tahminidir.

3.6. Ticari YSIP Örnekleri


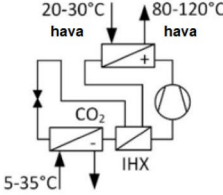

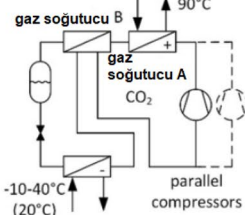

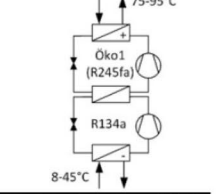

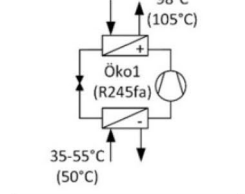

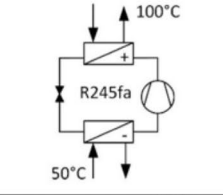

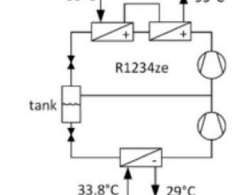

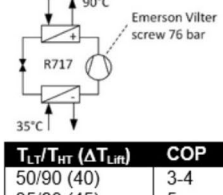

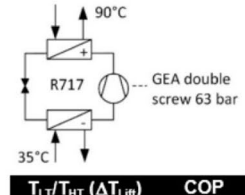

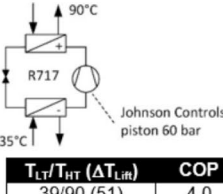

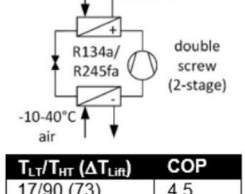

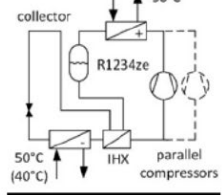

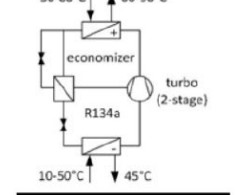
Dünya genelinde birçok firma ticari ölçekte YSIP'lar üretmektedir. Şekil 13'te gösterilen resim ve şemalarda farklı firmalar tarafından üretilmiş olan yüksek sıcaklık ısı pompalarına örnekler verilmiştir.

Tablo 4'te ise 90°C'nin üzerinde su sıcaklığı üreten ısı pompalarına örnekler verilmiştir. Bu tabloda üretici firma, kullanılan soğutkan, COP değerleri, su besleme sıcaklık seviyesi, ısı kapasite ve kullanılan kompresörler listelenmiştir.

Şekil 14'te bir İspanyol firması tarafından üretilen ticari iklimlendirme sistemlerine örnekler verilmiştir.

Şekil 15'te endüstriyel YSIP'ler ve üretici firmaları, ısıtma kapasiteleri ve elde edilebilir besleme sıcaklıkları gösterilmiştir.

Model	Şema	Fotoğraf	Şema										
Kobelco SGH 120 / 165													
(IEA, 2014a; Kaida et al., 2015; Kuromaki, 2012; Watanabe, 2013)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lit})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>65/120 (55)</td> <td>3.5</td> </tr> </tbody> </table>	T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lit})	COP	65/120 (55)	3.5	HİBRİT ISI POMPASI (Jensen et al., 2015a, 2015b)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lit})</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20/95 (75)</td> <td>2.4</td> </tr> <tr> <td>40/100 (60)</td> <td>4.5</td> </tr> </tbody> </table>	T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lit})	COP	20/95 (75)	2.4	40/100 (60)	4.5
T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lit})	COP												
65/120 (55)	3.5												
T_{LT}/T_{HT} (ΔT_{Lit})	COP												
20/95 (75)	2.4												
40/100 (60)	4.5												

<p>Mayekawa transcritical CO₂ heat pump Eco Sirocco</p>  <p>(IEA, 2014a; Mayekawa, 2010; Watanabe, 2013)</p>	 <p>20-30°C hava → 80-120°C hava 5-35°C IHX</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20/100 Luft (80)</td> <td>3.4</td> </tr> <tr> <td>25/120 H₂O (95)</td> <td>2.9</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	20/100 Luft (80)	3.4	25/120 H ₂ O (95)	2.9	<p>Thermeco₂ HHR1000 with 6 piston compressors, up to 1100 kW</p>  <p>(Dürr thermea GmbH, 2016; IEA, 2014a; Thermea, 2012)</p>	 <p>gaz soğutucu B → 90°C gaz soğutucu A CO₂ -10-40°C (20°C) → parallel compressors</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20/80 (60)</td> <td>3.9-4.3</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	20/80 (60)	3.9-4.3		
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
20/100 Luft (80)	3.4														
25/120 H ₂ O (95)	2.9														
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
20/80 (60)	3.9-4.3														
<p>Ochsner IWHS 400 ER3 screw compressor, 380 kW</p>  <p>(Ochsner, 2015)</p>	 <p>75-95°C Okol (R245fa) R134a 8-45°C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>45/90 (45)</td> <td>4.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	45/90 (45)	4.0	<p>Ochsner IWDS 330 ER3 screw compressor, 312 kW</p>  <p>(Zauner, 2016)</p>	 <p>98°C (105°C) Okol (R245fa) 35-55°C (50°C)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/105 (55)</td> <td>2.68</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	50/105 (55)	2.68				
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
45/90 (45)	4.0														
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
50/105 (55)	2.68														
<p>Combitherm</p>  <p>(Blesl et al., 2014; Wolf et al., 2014)</p>	 <p>100°C R245fa 50°C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/100 (50)</td> <td>3.1-3.4</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	50/100 (50)	3.1-3.4	<p>Friotherm Unitop 22/22 3'300 kW, 2-stage turbo</p>  <p>(Friotherm AG, 2005; Wojtan, 2016)</p>	 <p>55°C → 95°C R1234ze tank 33.8°C → 29°C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34/95 (61)</td> <td>3.51</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	34/95 (61)	3.51				
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
50/100 (50)	3.1-3.4														
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
34/95 (61)	3.51														
<p>Star Refrigeration Neatpump NP601 380 kW to 2.6 MW, Vilter VSSH screw 76 bar</p>  <p>(EMERSON, 2012)</p>	 <p>90°C Emerson Vilter screw 76 bar R717 35°C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/90 (40)</td> <td>3-4</td> </tr> <tr> <td>35/80 (45)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>39/90 (51)</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	50/90 (40)	3-4	35/80 (45)	5	39/90 (51)	4	<p>GEA Grasso FX P Heat Pump Double screw 63 bar</p>  <p>(Dietrich and Fredrich, 2012)</p>	 <p>90°C R717 35°C GEA double screw 63 bar</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35/80 (45)</td> <td>5.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	35/80 (45)	5.0
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
50/90 (40)	3-4														
35/80 (45)	5														
39/90 (51)	4														
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
35/80 (45)	5.0														
<p>Johnson Controls SABROE HeatPACT™-HPX piston compressor 60 bar</p>  <p>(Johnson Controls, 2017)</p>	 <p>90°C R717 Johnson Controls piston 60 bar 35°C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>39/90 (51)</td> <td>4.0</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	39/90 (51)	4.0	<p>Kobelco HEM-HR90 double screw (2-stage)</p>  <p>(Kuromaki, 2012; Oue and Okada, 2013)</p>	 <p>65-90°C R134a/R245fa double screw (2-stage) -10-40°C air</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>17/90 (73)</td> <td>4.5</td> </tr> <tr> <td>35/90 (55)</td> <td>5.8</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	17/90 (73)	4.5	35/90 (55)	5.8		
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
39/90 (51)	4.0														
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
17/90 (73)	4.5														
35/90 (55)	5.8														
<p>Viessmann Vitocal 350-HT Pro</p>  <p>(Viessmann, 2016)</p>	 <p>90°C collector R1234ze 50°C (40°C) → IHX → parallel compressors</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/90 (40)</td> <td>3.4</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	50/90 (40)	3.4	<p>Mitsubishi ETW-L</p>  <p>(IEA, 2014a; Watanabe, 2013).</p>	 <p>50-80°C → 60-90°C economizer R134a turbo (2-stage) 10-50°C → 45°C</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$</th> <th>COP</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50/90 (40)</td> <td>4.1</td> </tr> </tbody> </table>	$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP	50/90 (40)	4.1				
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
50/90 (40)	3.4														
$T_{LT}/T_{HT} (\Delta T_{L,HT})$	COP														
50/90 (40)	4.1														

Şekil 13. Ticari YSİP'ler, çevrimler, COP'ler ve resimler [46]

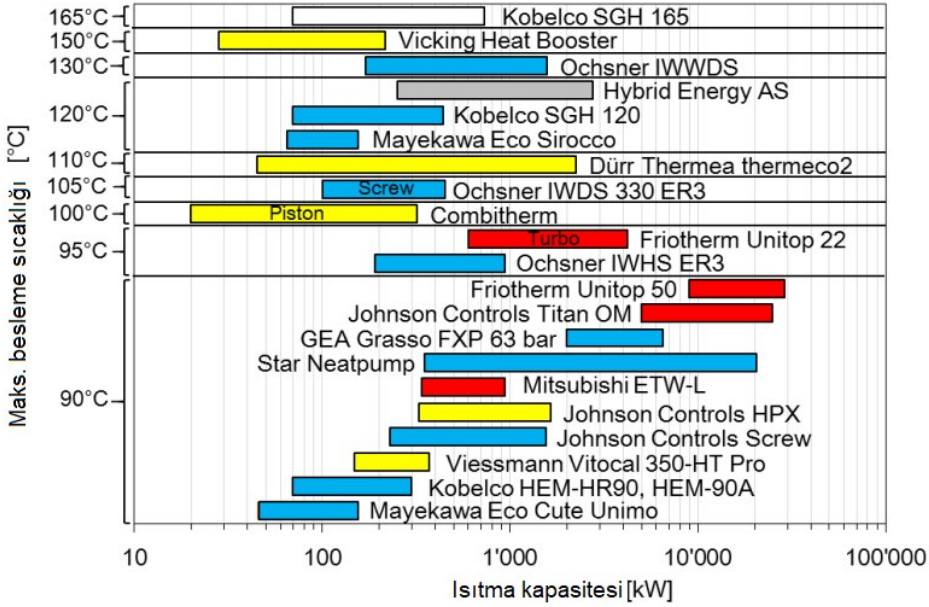




Şekil 14. Bir İspanyol firmasının ürettiği 500 kW kapasitesindeki endüstriyel ve ticari ısı pompaları (Ecoforest)

Tablo 4. $T > 90^{\circ}\text{C}$ besleme sıcaklıklarına sahip endüstriyel YSIP'lerin seçimi [46]

ÜRETİCİ	ÜRÜN	SOĞUTKAN	Maks. sıcaklık	Isıtma Kapasitesi	Kompresör Tipi
Kobelco (Steam Grow Heat Pump)	SGH 165 SGH 120 HEM-HR90, HEM-90A	R134a/R245fa R245fa R1r34a/R245fa	165°C 120°C 90°C	70 – 660 kW 70 – 370 kW 70 – 230 kW	Double screw
Vicking Heating Engines AS	HeatBooster	R1336mzz(Z) R245fa	150°C	28 – 188 kW	Piston
Ochsner	IWWDS IWDS 330 ER3 IWHS ER3	R134a/ÖKO1 (R245fa)	130°C 105°C 95°C	170 – 750 kW (twin unit 1.5 MW) 100 – 350 kW 190 – 750 kW	Screw
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717 (NH ₃)	120°C	0.25 – 2.5 MW	Piston
Mayekawa	Eco Sirocco Eco Cute Unimo	R744 (CO ₂) R744 (CO ₂)	120°C 90°C	65 – 90 kW 45 – 110 kW	Screw
Dürr Thermea	thermeco2	R744 (CO ₂)	110°C	45 – 2'200 kW	Piston
Combitherm	Sonderanfertigung	R245fa	100°C	20 – 300 kW	Piston
Friotherm	Unitop 22 Unitop 50	R1234ze(E) R134a	95°C 90°C	0.6 – 3.6 MW 9 – 20 MW	Turbo (2-stage)
Star Refrigeration	Neatpump	R717 (NH ₃)	90°C	0.35 – 15 MW	Screw
GEA Refrigeration	GEA Grasso FX P 63 bar	R717 (NH ₃)	90°C	2 – 4.5 MW	Double screw
Johnson Controls	HeatPAC HPX HeatPAC Screw Titan OM	R717 (NH ₃) R717 (NH ₃) R134a	90°C 90°C 90°C	326 – 1'324 kW 230 – 1'315 kW 5 – 20 MW	Piston Screw Turbo
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90°C	340 – 600 kW	Turbo (2-stage)
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze(E)	90°C	148 – 223 kW	Piston (2-3 stages)



Şekil 15. Endüstriyel YSIP'ler, ısıtma kapasiteleri ve elde edilebilir besleme sıcaklıkları [46]

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Son yıllarda alternatif çevreci ısı kaynağı olarak ısı pompaları yaygınlaşmaktadır. Rusya'nın Ukrayna savaşı nedeniyle Batı Avrupa'ya olan gaz akışını kesmesi, kömür ve gaz yakıtların fiyatlarının aşırı artması bu dönüşüm sürecini hızlandırmıştır. Eysel ve ticari ölçekteki ısı pompası ürünleri çok yaygınlaşmıştır. Dünya'nın önemli üniversitelerinde bu konuda yüzlerce proje, araştırma ve tezler yapılmaktadır. Bu arada endüstriyel YSIP ürünleri bazı üretici firmalar tarafından piyasaya sürülmüştür. Yakın bir gelecekte endüstriyel uygulamalarda sıcak su ve buhar kazanları yerine ısı pompaları kullanımı yaygınlaşacaktır.

Konuyu ülkemiz ölçeğinde ele alacak olursak enerji ithal eden bir ülke olarak karbonsuzlaştırma ve yeşil enerji çabalarımızı arttırmak zorundayız. Bu konuda başta üniversitemize ve ARGE merkezlerine sahip firmalarımıza önemli görevler düşmektedir. Şu anda eysel ölçekte ısı pompası üretim yapan firmalarımız mevcuttur. Fakat YSIP üreten tek bir firmamız mevcuttur. Bu firmaların sayılarının artması gerekmektedir. Ancak ülkemizde elektrik enerjisi maliyetlerinin yüksekliği ısı pompasının yaygınlaşmasını önemli ölçüde engellemektedir. Bu maliyetleri azaltmak için evlerin çatılarına şebekeye bağlı PV paneller kurularak ay sonunda mahsuplaşma yapılarak enerji maliyetleri düşürülebilir. ■

KAYNAKLAR

- [1]International Energy Agency (IEA). "CO₂ emissions in 2022", 2022. p. 2023.
- [2]International Energy Agency (IEA). Tracking industry [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/industry>; 2023.
- [3]De Boer, R., ve ark., Strengthening Industrial Heat Pump Innovation, Decarbonizing Industrial Heat, <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-energi/industrial-heat-pump-whitepaper/2020-07-10-whitepaper-ihp-a4.pdf> (08.09.2024 tarihinde erişildi)
- [4]Forman, C., Muritala, I.K., Pardemann, R., Meyer, B., Estimating the global waste heat potential, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57 (2016) 1568-1579.
- [5]Amoto, F., High temperature multifunctional heat pump system for better overall energy efficiency, *Rehva Journal*, October 2012, Pages 23-27
- [6]Ivanovski, I., et al, The Comparison between Two High-Temperature Heat-Pumps for the Production of Sanitary Water, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 64(2018)7-8, 437-442.
- [7]Zha, S., Hafner, A., Nekså, P. (2008). Investigation of R-744 Voorhees transcritical heat pump system. *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 1, p. 16-22,
- [8]Frate, F.F., Ferrari, L., Desideri, U., Analysis of suitability ranges of high temperature heat pump working fluids, *Applied Thermal Engineering* Volume 150, 5 March 2019, Pages 628-640.
- [9]Wolf, S., Blesl, M., (2016). Model-based



quantification of the contribution of industrial heat pumps to the European climate change mitigation strategy, in: ECEEE Industrial Summer Study Proceedings. pp. 477-487.

[10]Verdeyen, E. Introducing the Qpinch Chemical Heat Transformer. A breakthrough innovation to boost plant efficiency and your company's EBITDA. European Refining Technology Conference (2017).

[11]Laue, H.-J., K. Lassman. Annex 35: Application of Industrial Heat Pumps-Final Report. IEA Heat Pump Centre HPP-AN35-1 (2014).

[12]Liew, P. Y., Walmsley, T. G., Heat Pump Integration for Total Site Waste Heat Recovery. Chemical Engineering Transactions 52 (2016): 817-822.

[13]Jianyong, C., H. Havtun, B. Palm. Parametric analysis of ejector working characteristics in the refrigeration system, Applied Thermal Engineering 69 (2014): 130-142.

[14]Cox, J., Belding, S., High-Temperature Heat Pump Model Documentation and Case Studies, NREL Technical Report · August 2023.

[15]Hamid, H. et al., Potential evaluation of integrated high temperature heat pumps: A review of recent advances, Applied Thermal Engineering, 230 (2023) 120720.

[16]Sayegh, M.A., et al., Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating, Energ. Buildings 166 (2018) 122-144.

[17]Arpagaus, C., et al., High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials, Energy 152 (2018) 985-1010.

[18]Wang, K., et al., Investigation of the performance of a high-temperature heat pump using parallel cycles with serial heating on the water side, Int. J. Refrig 33 (6) (2010) 1142-1151.

[19]Kim, M., et al., Design of a high temperature production heat pump system using geothermal water at moderate temperature, Curr. Appl Phys. 10 (2) (2010) S117-S122.

[20]Sheng, Y., et al., Experimental analysis on performance of high temperature heat pump and desiccant wheel system, Energ. Buildings 66 (2013) 505-513.

[21]Kim, J., et al., Experimental study of operating characteristics of compression/ absorption high-temperature hybrid heat pump using waste heat, Renew. Energy 54 (2013) 13-19.

[22]Chaiyat, N., Kiatsiriroat, T., Simulation and experimental study of solar-absorption heat transformer integrating with two-stage high temperature vapor compression heat pump, Case Studies in Thermal Engineering 4 (2014) 166-174.

[23]Jensen, J.K., et al., On the development

of high temperature ammonia-water hybrid absorption-compression heat pumps, Int. J. Refrig 58 (2015) 79-89.

[24]Yang, W.-W., et al., Theoretical study of a high-temperature heat pump system composed of a CO₂ transcritical heat pump cycle and a R152a subcritical heat pump cycle, Appl. Therm. Eng. 120 (2017) 228-238.

[25]Sarevski, M.N., Sarevski, V.N., Thermal characteristics of high-temperature R718 heat pumps with turbo compressor thermal vapor recompression, Appl. Therm. Eng. 117 (2017) 355-365.

[26]Shah, N.N., et al., Analysis on field trial of high temperature heat pump integrated with thermal energy storage in domestic retrofit installation, Appl. Therm. Eng. 143 (2018) 650-659.

[27]Liu, C., et al., A high-temperature hybrid absorption-compression heat pump for waste heat recovery, Energy Conversion Management 172 (2018) 391-401.

[28]Jung, C.W., Song, J.Y., Kang, Y.T., Study on ammonia/water hybrid absorption/ compression heat pump cycle to produce high temperature process water, Energy 145 (2018) 458-467.

[29]Li, X., et al., Energy, exergy, economic, and environmental analysis of an integrated system of high-temperature heat pump and gas separation unit, Energ. Conver. Manage. 198 (2019), 111911.

[30]Urbanucci, L., Bruno, J.C., Testi, D., Thermodynamic and economic analysis of the integration of high-temperature heat pumps in trigeneration systems, Appl. Energy 238 (2019) 516-533.

[31]Luo, B., Zou, P., Performance analysis of different single stage advanced vapor compression cycles and refrigerants for high temperature heat pumps, Int. J. Refrigeration 104 (2019) 246-258.

[32]Mateu-Royo, C., et al., Multi-objective optimization of a novel reversible High Temperature Heat Pump-Organic Rankine Cycle (HTHP-ORC) for industrial lowgrade waste heat recovery, Energ. Conver. Management 197 (2019), 111908.

[33] [49]Zauner, C., et al., Development of an Energy Efficient Extrusion Factory employing a latent heat storage and a high temperature heat pump, Appl. Energy 259 (2020), 114114.

[34]Mateu-Royo, C., et al., Theoretical performance evaluation of ejector and economizer with parallel compression configurations in high temperature heat pumps, Int. J. Refrig 119 (2020) 356-365.

[35]Zou, H., et al., Temperature stage matching and experimental investigation of high-temperature cascade heat pump with vapor injection, Energy 212 (2020), 118734.

[36]Hassan, A.H., et al., Thermodynamic analysis of



high-temperature pumped thermal energy storage systems: Refrigerant selection, performance and limitations, Energy Rep. 6 (2020) 147-159.

[37]Sharan, P., et al., Energy efficient supercritical water desalination using a high temperature heat pump: A zero liquid discharge desalination, Desalination 506 (2021), 115020.

[38]Ahrens, M.U., et al., Integrated high temperature heat pumps and thermal storage tanks for combined heating and cooling in the industry, Appl. Therm. Eng. 189 (2021), 116731.

[39]Wu, W., et al., A novel distributed energy system using high-temperature proton exchange membrane fuel cell integrated with hybrid-energy heat pump, Energy. Conver. Manage. 235 (2021).

[40]Adamson, K.-M., ve ark. High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 167(2022) 112798.

[41]Heat Pumps-Technology Guide, Sustainable Energy Authority of Ireland, 2020.

[42]Longo GA, Zilio C, Righetti G, Brown JS. Experimental assessment of the low GWP refrigerant HFO-1234ze(Z) for high temperature heat pumps. Exp Therm Fluid Sci 2014; 57: 293-300.

[43]Brodribb P., Hydrofluorocarbon consumption in New Zealand. Expert group; 2017.

[44]Pottker G, Hrnjak P., Experimental investigation of the effect of condenser subcooling in R134a and R1234yf air-conditioning systems with and without internal heat exchanger. Int J Refrig 2015; 50: 104-13.

[45]United Nations. Kyoto Protocol. Kyoto, Japan: United Nations; 1997.

[46]Elmegaard, B., Zühlsdorf, B., Reinholdt, L., & Bantle, M. (Eds.) (2017). Book of presentations of the International Workshop on High Temperature Heat Pumps. Technical University of Denmark

[47]Zühlsdorf, B., Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (HPT TCP), Danish Technological Institute, August 2023.

[48]Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, Schiffmann J, Bertsch SS. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. Energy 2018; 152:985-1010.

[49]Calm JM. The next generation of refrigerants - Historical review, considerations, and outlook. Int J Refrig 2008; 31:1123-33.

[50]Patten KO, Wuebbles DJ. Atmospheric lifetimes and Ozone Depletion Potentials of trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropylene and trans-1,2-dichloroethylene in a three-dimensional model. Atmos Chem Phys 2010; 10:10867-74.

[51]AGC Chemicals. AMOLEA® 1224yd, Technical Information, ASAHI Glass Co., Ltd. 2017:1-18.

[52]BAFU. Verordnung zur Reduktion von

Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung) (ChemRRV), Stand 9. Juli 2019. vol. 814.81.

[53]Kontomaris K. Zero-ODP, Low-GWP, Nonflammable Working Fluids for High Temperature Heat Pumps. ASHRAE Annu Conf Seattle, Washington, July 1, 2014.

[54]Juhasz JR. Novel Working Fluid, HFO-1336mzz (E), for Use in Waste Heat Recovery Application. 12th IEA Heat Pump Conf 2017, Rotterdam 2017.

[55]Fukuda S, Kondou C, Takata N, Koyama S. Thermodynamic Analysis on High Temperature Heat Pump cycles using Low-GWP refrigerants for Heat recovery. 12th IEA Heat Pump Conf 2017, Rotterdam 2017:1-7.

[56]Fukuda S, Kondou C, Takata N, Koyama S. Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps. Int J Refrig. 2014; 40:161-73.

[57]Kondou C, Koyama S. Thermodynamic Assessment of High-Temperature Heat Pumps for Heat Recovery. 15th Int. Refrig. Air Cond. Conf. Purdue, July 14-17, 2014, 2014, p. 1-10. 19

[58]Hu B, Wu D, Wang LW, Wang RZ. Exergy analysis of R1234ze(Z) as high temperature heat pump working fluid with multi-stage compression. Front Energy 2017:1-10.

[59]Wolf, S., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A. and Jakobs, R. Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland, Forschungsbericht, 2014.

[60]High-temperature Heat Pumps for low carbon process heating EECA (Energy Efficiency and Conservation Authority, Technical Information Document 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin BULGURCU

1962 yılı İzmir-Kınık doğumludur. 1984 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 1989 yılında Marmara Üniversitesi'nden Yüksek Lisans, aynı üniversiteden 1994 yılında doktora dereceleri almıştır. 1986-1990 Yılları arasında Kartal Teknik Lisesin'de Atölye Öğretmeni, 1990-1995 yılları arasında Çankırı MYO'da Öğretim Görevlisi olarak görev yapmıştır. 1995-2012 yılları arasında Balıkesir MYO'da Yardımcı Doçent, 2012-2016 yılları arasında Balıkesir Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Doçent olarak görev yapmıştır. 2016 yılında emekli olmuştur ve iklimlendirme/soğutma sektöründeki çeşitli firmalarda danışmanlık yapmaktadır.