

BUHAR SIKIŞTIRMALI SOĞUTMA ÇEVİRİMLERİ

HAZIRLAYAN

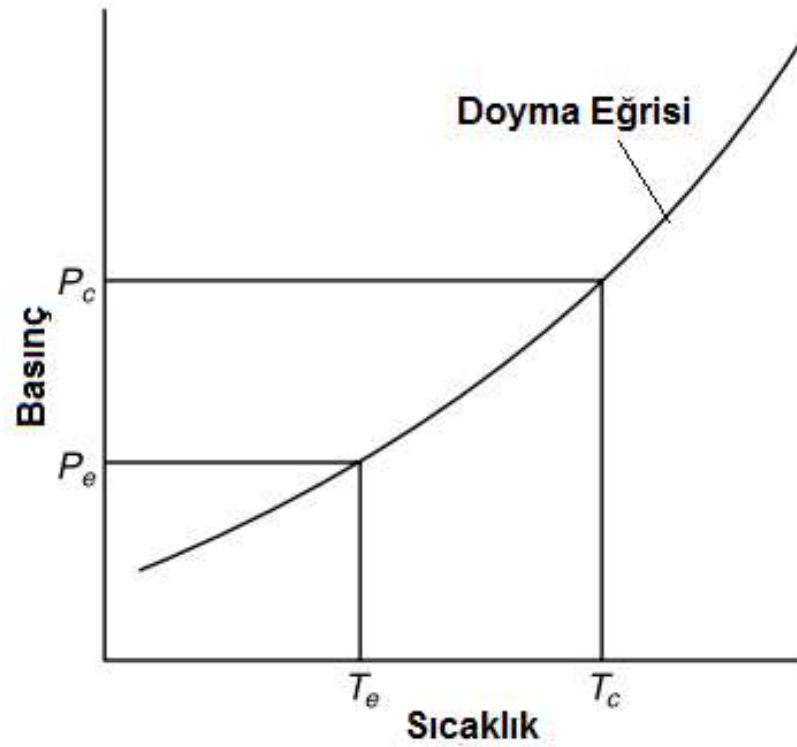
Doç. Dr. Hüseyin BULGURCU

7 Kasım 2015

2.1 GİRİŞ

- Bir sıvı; donma noktasıyla kritik sıcaklık sınırları içinde, üzerindeki basınç ve sıcaklığa bağlı olarak sıvı ve gaz fazları arasında kaynar ve yoğunlaşır.
- Kaynama durumunda gizli ısı çeker, yoğunlaşma durumunda çevreye gizli ısı verir.
- Temel soğutma çevrimi (Şekil-2.1) çalışma akışkanınının kaynama ve yoğunlaşmasını farklı sıcaklıklarda ve dolayısıyla farklı basınçlarda gerçekleştirir.

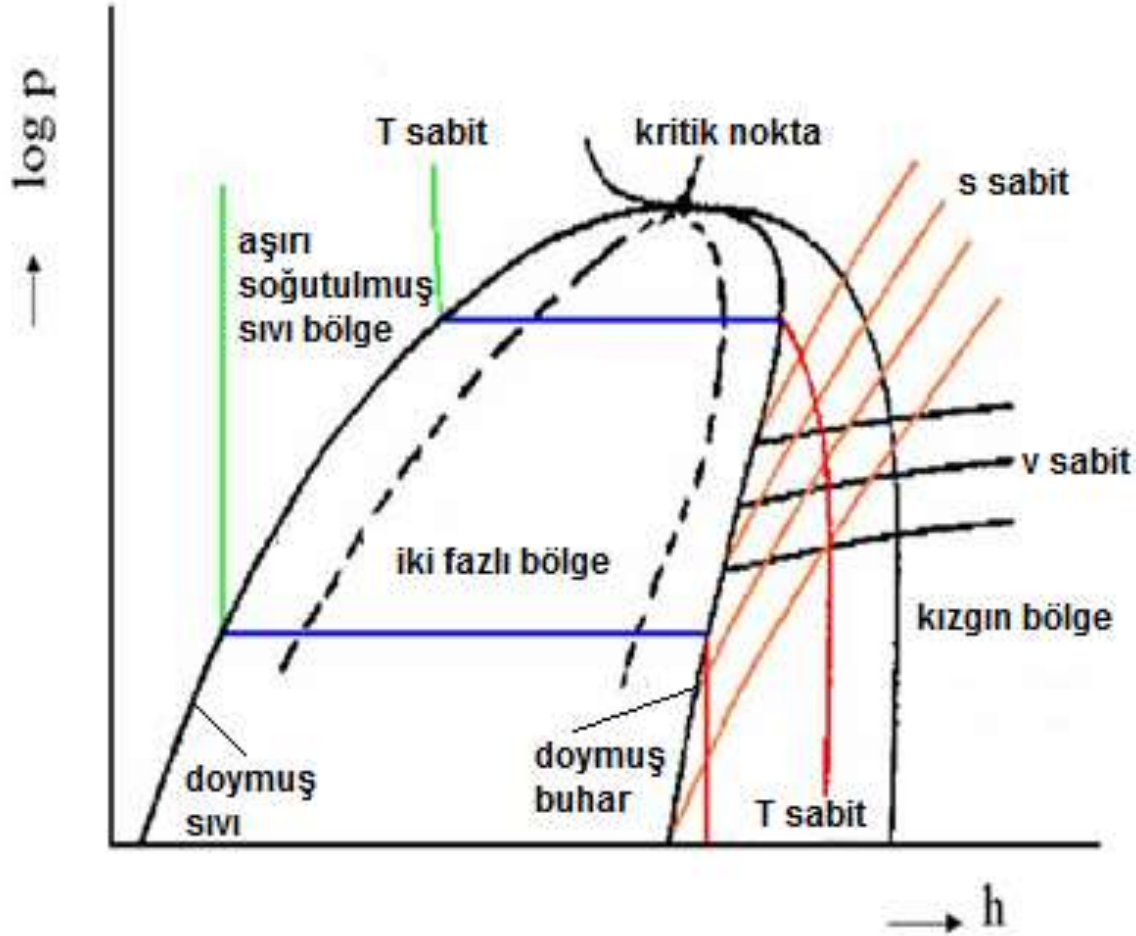
Şekil 2.1 Bir akışkana ait buharlaşma ve yoğunlaşması



- Buhar sıkıştırılmalı bir soğutma çevriminin süreçleri, basınç ve özgül entalpi koordinatlarına sahip diyagramda uygun görüntülenebilir.
- Şekil-2.2 bir soğutucu akışkanın iskelet şemasını göstermektedir.
- Kritik noktanın altında doymuş sıvı hattı ve doymuş buhar hattının arasında iki fazlı 'yaş' bölge vardır.
- Doymuş sıvı hattının solunda belli bir basınçta, doyma sıcaklığından daha düşük sıcaklığa sahip bir durumdadır.
- Bunlar aşırı soğutulmuş sıvı durumlarıdır.
- Doymuş buhar hattının sağında belli bir basınçta, doyma sıcaklığından daha yüksek sıcaklığa sahip bir durum vardır.
- Bunlar kızgın buhar durumlarıdır.

- Sıvı hattının sol tarafındaki alan aşırı soğutulmuş sıvı bölgesi, buhar hattının sağ tarafındaki alan kızgın buhar bölgesidir.
- İki fazlı bölgenin içinde sabit basınç yatay çizgileri ve sabit sıcaklık çizgileri vardır.
- Kızgın bölgede sabit sıcaklık hatları, doyma hatlarından ayrıldığı görülmektedir.
- Kızgın bölgedeki basınç azaldıkça sabit sıcaklık hatları sabit entalpi hattı olma eğilimi gösterir. Başka bir deyişle diyagramdaki düşey doğru, gösterildiği gibi buhar, basınçtan bağımsız kendi entalpisi ile ideal gaz gibi davranmaya başlamıştır.
- Sabit özgül entalpi hatları ve sabit özgül hacim hatları kızgın bölgede gösterilmiştir.

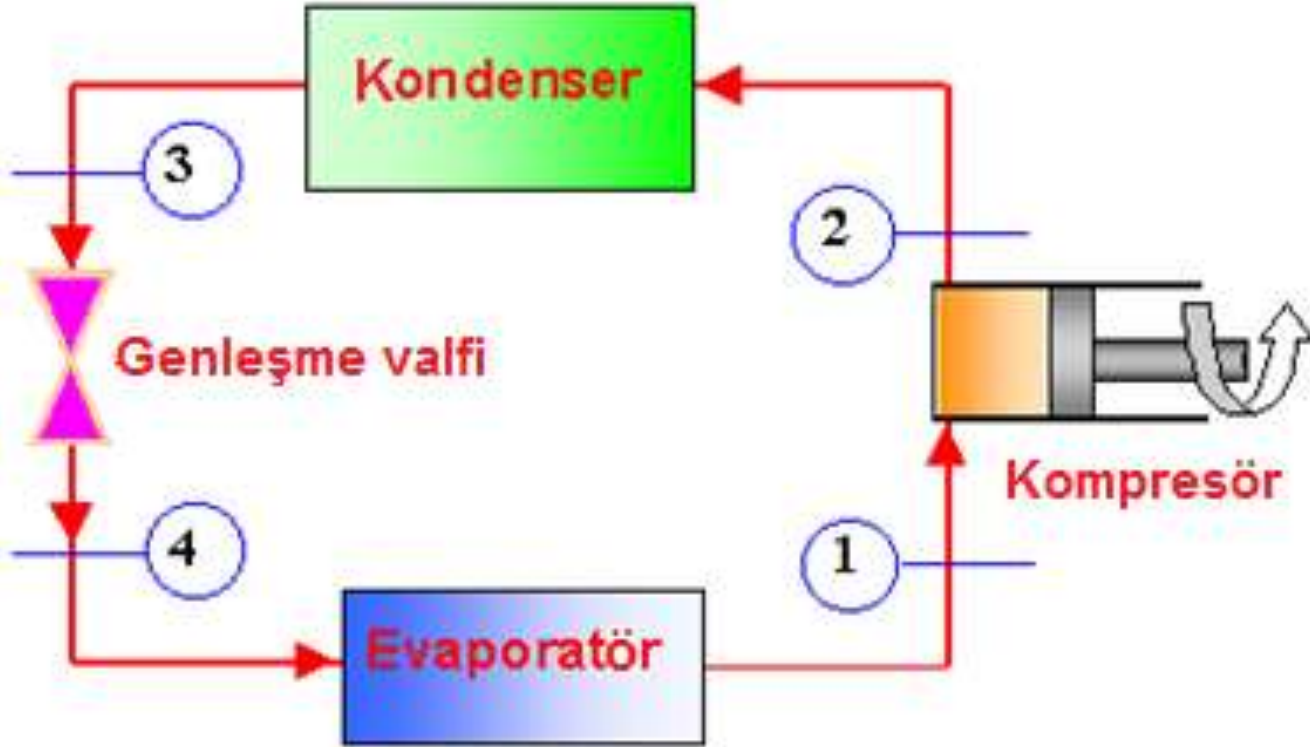
Şekil-2.2 Basınç – Özgül Entalpi diyagramının logaritmik olarak şematik gösterimi



2.2 TEMEL BUHAR SIKIŞTIRMALI SOĞUTMA ÇEVİRİMİ

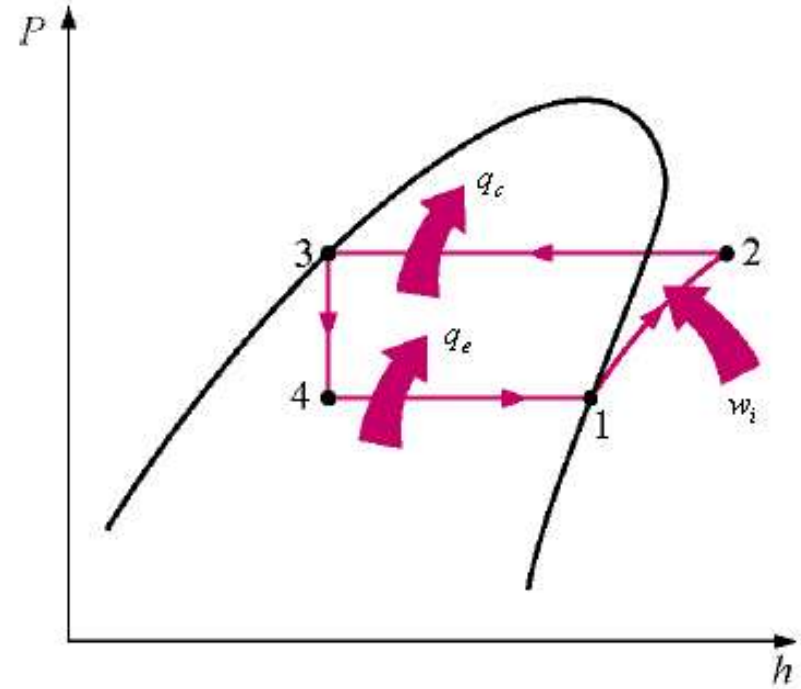
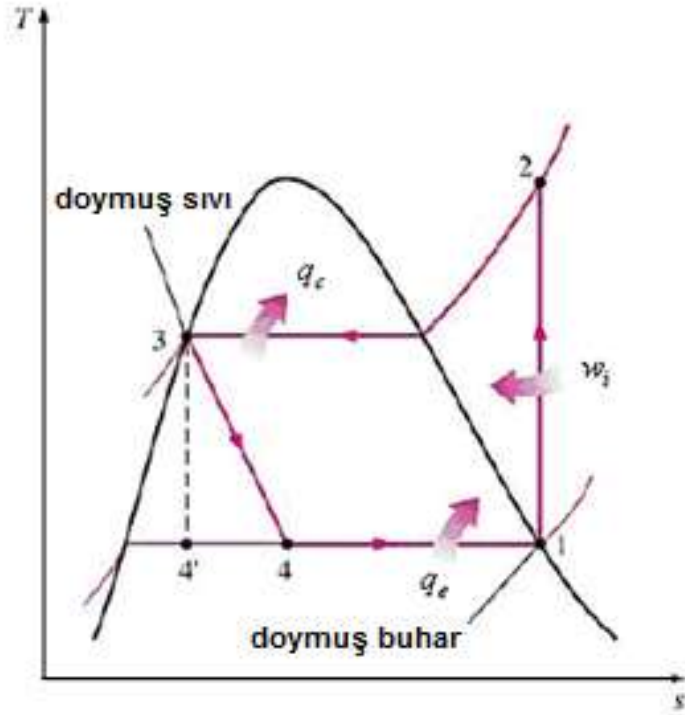
- *Yukarıda daha önce belirtildiği gibi, buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimleri günümüzde en yaygın kullanılan soğutucu tipidir.*
- *Buhar sıkıştırımlı soğuma çevriminin dört elemanı vardır: evaporatör, kompresör, kondenser ve genişleme (veya kısma) valfi (Şekil-2.3te gösterilmiştir).*
- *Temel buhar sıkıştırımlı çevriminde, soğutucu akışkan kompresöre doymuş buhar olarak girer ve kondenser içinde doymuş sıvı hale gelene kadar soğutulur.*
- *Sonra soğutucu akışkan evaporatör basıncına kısılarak girer ve ısıyı soğutulan ortamdan absorbe ederek buharlaşır.*

Şekil-2.3 Temel Buhar Sıkıştırımlı Soğutma Çevrimi Şeması



- *Sistemin sürekli olarak çalıştığı, kinetik ve potansiyel enerjilerinin de ihmal edildiği varsayılırsa çevrimin bilinen yöntemlerle analizi mümkündür.*
- *Sistemde oluşan esas iş ve ısı transferi, miktarlarına göre okların yönü pozitif olacak şekilde Şekil-2.4te gösterilmiştir.*
- *Bu analizlerde her eleman öncelikle ayrıık olarak dikkate alınır.*
- *İstlenen soğutma etkisinin elde edildiği evaporatör ilk eleman olarak kabul edilir.*

Şekil-2.4 Temel buharlaştırmalı soğutma çevrimi için T-s ve p-h diyagramları



- *Evaporatörün soğutucu tarafını içine alan bir kontrol hacmi dikkate alınır, kütle ve enerjinin korunumu ile birlikte evaporatör soğutucu akışkanının birim kütle başına ısı transfer miktarı olarak verir:*

$$q_e = \frac{Q_e}{m} = h_1 - h_4$$

- *Daha sonra kompresör dikkate alınır.*
- *Kompresörde ısı transferi olmadığını varsaymak genellikle yeterlidir.*
- *Kompresördeki kontrol hacmine kütle ve enerji korunumu uygulanırsa:*

$$w_i = \frac{W_i}{m} = h_2 - h_1$$

- *Kondenserin soğutucu tarafı içine alan kontrol hacmi için, soğutucu akışkan birim kütle başına soğutucu ısı transfer seviyesi:*

$$q_c = \frac{Q_c}{m} = h_2 - h_3$$

- *Son olarak durum 3'teki soğutucu akışkan genleşme valfine girer ve evaporatör basıncına kadar genişir.*
- *Bu işlem genellikle hiçbir ısı transferinin olmadığı kısma işlemleri için modellenir.*
-
- *$h_4 = h_3$*
- *Buhar sıkıştırmalı sistemde, giren net güç kompresör gücüne eşittir. Genleşme valfi güç giriş ya da çıkışı içermez.*

- Miktarları ve ifadeleri yukarda kullanmış olarak, buhar sıkıştırımalı bir soğutma sisteminde performans katsayısı, STK (COP_r) ile ifade edilir:

$$COP = \frac{q_e}{w_i} = \frac{Q_e / m}{W_i / m} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

- Eğer sistemde ısı amaçlanırsa, sistem ısı pompası olarak adlandırılır.
- Isı pompası ısıyı iletmek için belli bir miktar işi kullandığından, sıcak tarafta biriken enerji miktarı, eşit miktarda gerekli iş için soğuk taraftan alınan enerjiden daha büyüktür.
- Performans katsayısı STK (COP), aynı zamanda yararlı ısı hareketinin giren işe oranını verir.
- Isı pompalarında sıcaklık farkı eşit tutulduğu takdirde ısıtma, soğutmadan daha etkilidir.

2.3 BASİT BUHAR SIKIŞTIRMALI SOĞUTMA ÇEVİRİMİ VE CARNOT SOĞUTMA ÇEVİRİMİNİN KIYASLANMASI

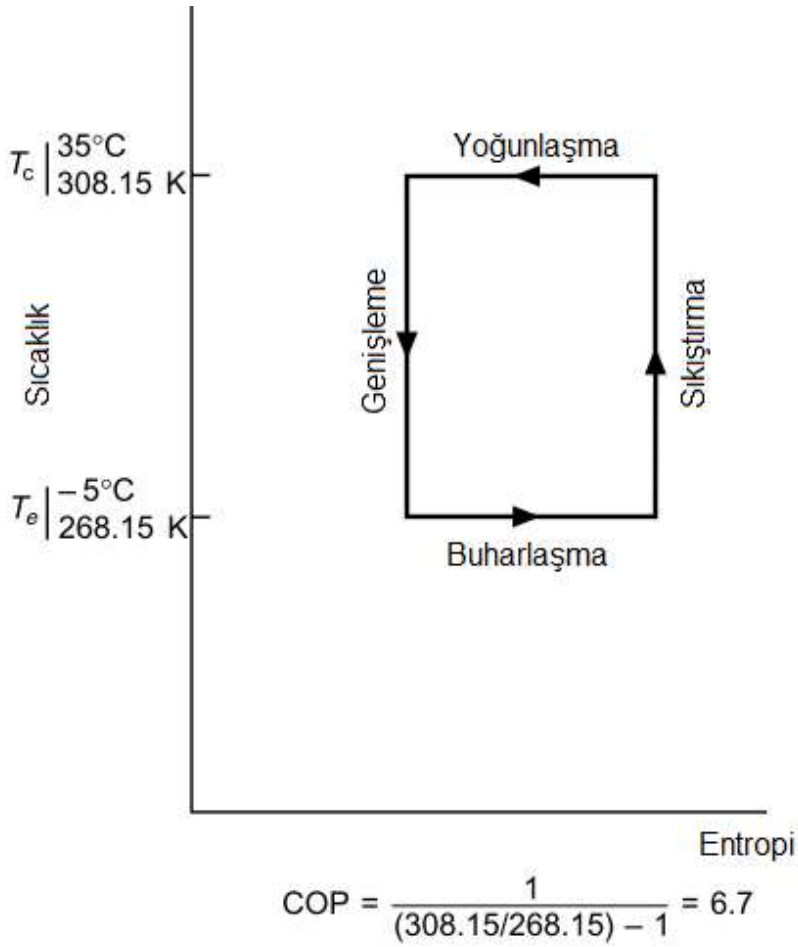
- *Buhar sıkıştırırmalı çevrimde enerji taşımak için enerji kullanıldığından bu iki miktarın oranı sistem performansı olarak doğrudan ölçülebilir.*
- *Bu performans katsayısı oranı ilk defa 1824 yılında ısı geçişlerinin sabit sıcaklıklarda olduğu kabulüyle iki sıcaklıklı tersinir bir çevrim için Sadi Carnot tarafından ifade edilmiştir (Şekil-2.5).*
- *Gerçek çevrimde her zaman mekanik ve termal kayıplar olacağından performans katsayısı (COP) Carnot şeklinden daima daha az olacaktır.*
- *Çalışan sistemlerde pratik amaçlar için bu oran; soğutma etkisinin kompresör giriş gücüne oranıdır.*
- *Carnot çevrimi ısı enerjisini işe çeviren veya tersine soğutma amaçları için bir miktar iş verilmesi gerektiğinde, en verimli çevrimdir.*

- *Mükemmel bir ısı makinesini tanımlayan ideal bir termodinamik çevrimdir.*
- *Soğutma sistemlerinde soğutma etkisine ihtiyaç duyarız.*
- *Yani soğutma etkisi yaratmak için zıt sistemleri çalıştırması gerekir.*
- *Carnot çevrimini tersten de soğutma sistemi olarak kullanırız.*
- *Tersinir Carnot soğutma çevrimi katsayısı:*

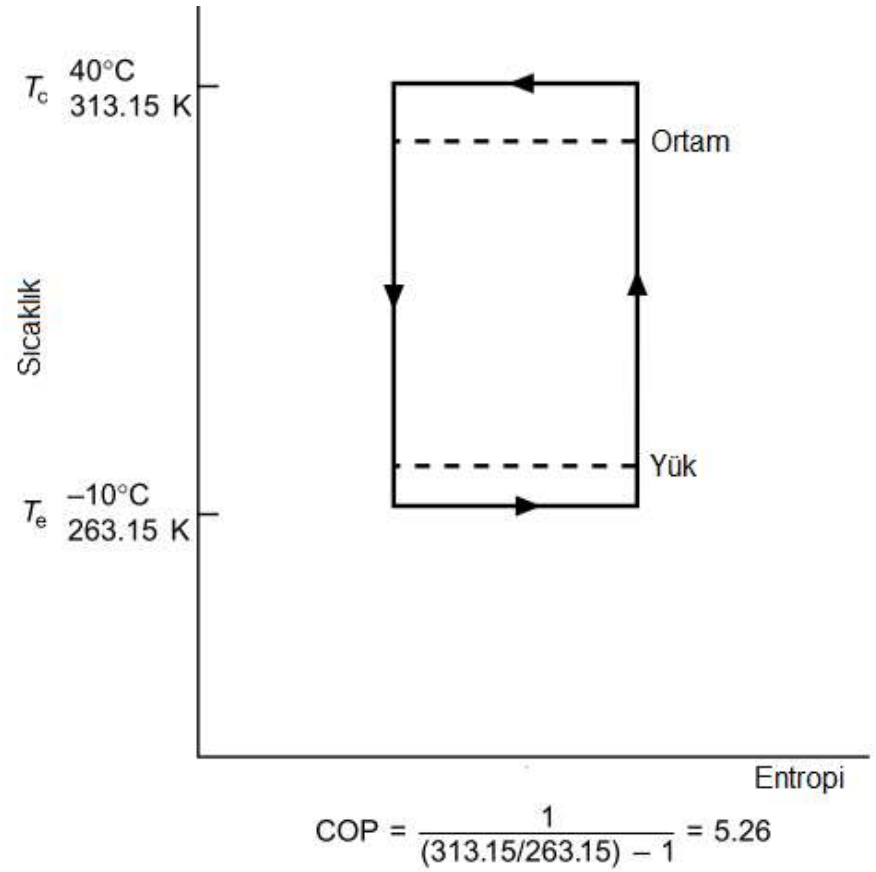
$$\text{COP} = \varepsilon_c = \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

- *Şekil 2.5'de gösterilen şartlarda, -5°C buharlaşma ve 35°C yoğunlaşma (268,15 K ve 308,15 K) Carnot performans değeri 6,7 olmaktadır.*

- *Isı transferi evaporatör ve kondenser duvarları yoluyla olduğundan bir ısı farkı gerektirir.*
- *Bu değiştirilmiş ters Carnot çevrimi (Şekil-2.6) gösterilmiştir.*
- *Evaporatör ve kondenserde 5K sıcaklık farkı için, akışkan çalışma sıcaklıkları 263,15 K ve 313,15 K, performans katsayısı 5,26'ya düşecektir.*
- *Bilgilendirici bir şema, sıvı ve sıvı-buhar durumlarını (Şekil 2.7) gösteren basınç-entalpi grafiğidir.*
- *Bu diyagramda, ısıtılan bir sıvı doymamış durumdan (a) geçer, kaynama noktasına (b) ulaşır ve sonunda tamamen buharlaşır (c) ve daha sonra (d) kızgın buhar olur.*
- *(b-c) arasındaki mesafe herhangi bir entalpi değerinde buharlaşan akışkanın oranını gösterir.*

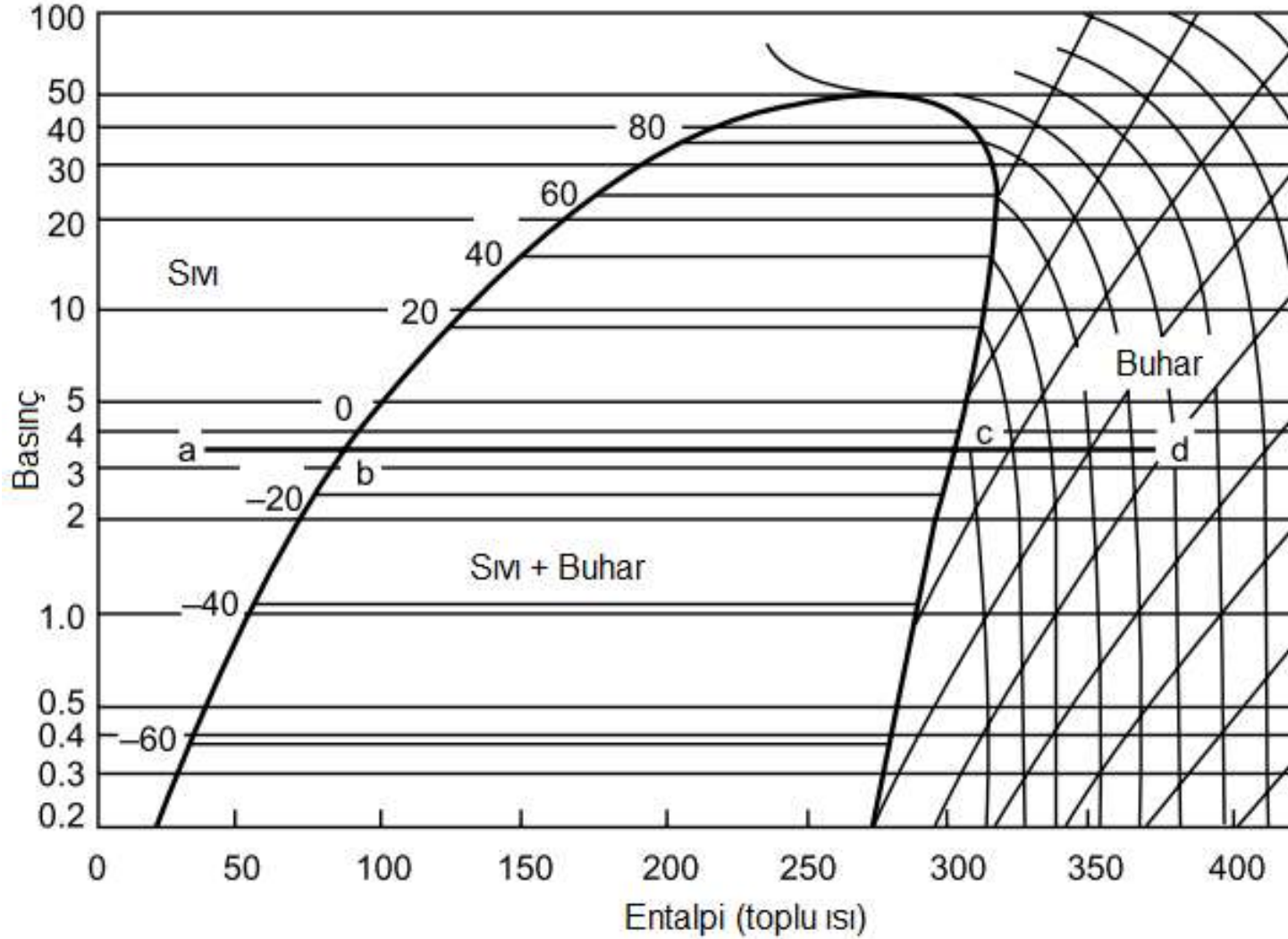


Şekil-2.5 İdeal tersinir Carnot çevrimi



Şekil-2.6 Değiştirilmiş tersinir Carnot çevrimi

Şekil-2.7 Basınç-entalpi diyagramı (R-134a)

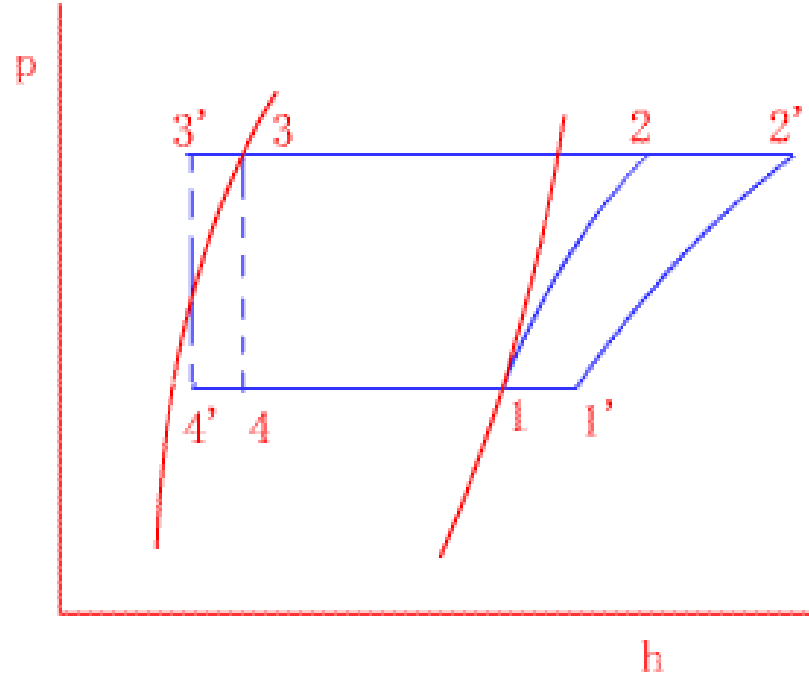


2.4 AŞIRI SIVI SOĞUTMA

- *Sıvı soğutucu kondenseri terk eder ve doyma noktasından uzak bir halde genişleme valfine girer.*
- *Pratikte aşırı soğutma birkaç derece olarak saptanır ve basınç entalpi diyagramındaki 3 noktası Şekil-2.8'de gösterildiği gibi, doymuş sıvı bölgesinin soluna taşınmıştır.*
- *Aşırı soğutma yoğunlaşma işlemi için gerekli olandan daha fazla soğutulmuş gazdır.*
- *Aşırı soğutma duyulur ısıdır ve derece olarak ölçülebilir.*
- *Şekil-2.8'deki basit buhar sıkıştırma çevriminde, 2-3 arasındaki yoğunlaşma işlemi 3 noktasında doymuş sıvı olarak sonuçlanmıştır.*

- *Eğer bu sıvıyı daha düşük bir seviyeye (3'ne kadar) soğutmak mümkündür, sonra net soğutma etkisi artışı aşağıdaki formül ile hesaplanır:*
-
- *$(h_1 - h_{4'}) - (h_1 - h_4) = h_4 - h_{4'} = h_3 - h_{3'}$*
- *Soğutma etkisi, elbette özgül soğutma etkisinde olduğu gibi, aşırı soğutma ile arttırılabilir.*
- *Sıkıştırma özgül işi aynı kaldığından performans katsayısı iyileştirilir.*

Şekil-2.8 Aşırı soğutulmuş sıvı ve kızgın buhar bölgesi



- *Aşırı soğutma aşağıdaki yöntemlerle gerçekleştirilebilir:*
- *Sıvı soğutucu akışkan emme hattı ile sıvı hattı arasına bağlanan bir ısı değiştiriciye karşı akışlı olarak gönderilir.*
- *Sıvı soğutucu akışkanı doyma sıcaklığından daha fazla soğutmak için bir miktar soğutma suyu kullanılır.*
- *Kondenser kapasitesi biraz büyük tutulur.*

2.5 BUHAR KIZDIRMA

- *Kızgınlık, tüm sıvıyı buharlaştırmak için buhara gerekenden fazla verilen ısıdır.*
- *Kızdırma böylelikle gizli ısı olmayıp, hissedilir ısıdır ve derece olarak ölçülür.*
- *Şekil-2.8'den de görüldüğü gibi buharlaşma fazındaki kızgınlık artışı, kondenserdeki ısı atımının toplamına eşittir ve kompresörün yüksek sıcaklıkta çalışmasıyla sonuçlanır.*
- *Kızgınlığın bir kısmı soğutma sistemini korumak ve kompresöre sıvı girişini engellemek için gereklidir. Çok fazla kızdırma yağın bozulmasına ve sistemdeki bozulmanın artmasına neden olur.*
- *Şayet kompresör girişindeki buhar, kızgın durumda (1') ise evaporatörden daha fazla ısı çekilir, sonra soğutma etkisi aşağıdaki gibi artar:*
- $$(h_{1'} - h_4) - (h_1 - h_4) = h_{1'} - h_1$$

- *Tersinir adyabatik sıkıştırmanın özgül işi kızdırmayla artar. Sabit entropi hattının kızgınlık bölgesindeki nokta 1' den geçen azalan eğimi Şekil-2.8'de gösterilmiş olup nokta 1 den geçen hattın eğimi ile kıyaslanmıştır.*
- *Tersinir adyabatik sıkıştırmanın özgül işinin kızdırmayla artsa bile, buna rağmen özgül soğutma etkisi, onların oranları, -COP- artabilir, azalabilir ve ya basınç kapasitesine bağlı olarak değişmeden kalabilir.*
- *Burada, evaporatörden kompresöre giden emme borusunda, soğutucu buharın ısı transferinin dikkate alınması gerekmektedir.*
- *Emme hattı genellikle sıcak çevreden geçer. Daha sonra buhara ısı geçişi olur, sıcaklık artmasına neden olur.*

- *Bu soğutma makine odası için soğutucu kapasitesinde bir miktar kayba neden olacaktır böylelikle buna ‘kullanışsız soğutucu akışkan kapasitesi’ adı verilir.*
- *Ve soğutmada ihtiyaç duyulan şeyleri soğutmak için kullanılan kapasiteye “yararlı soğutucu akışkan kapasitesi” adı verilir.*
- *Uygulamada kullanışsız soğutma kapasitesi kaybı azaltılmalı ve mümkün olduğunca yararlı soğutucu kapasitesi arttırılmalıdır.*

2.6 ISI DEĞİŞTİRİCİ BOYUTU

- *Isı transferi evaporatör ve kondenserin duvarları boyunca olduğundan belli bir sıcaklık farkı gereklidir ve daha büyük ısı değiştirici kullanıldığında sıcaklık farkı daha düşük olacaktır ve böylece yük ve ortam sıcaklığı, sıvı sıcaklıklarına daha yakın olacaktır.*
- *Bu yakın sıcaklık yaklaşımı ideal ters Carnot çevrimine daha yakın olacaktır (Tablo-2.1).*
- *Bu etkiler aşağıda özetlenmiştir.*

TABLO-2.1 Isı değiştirici boyutunun etkisi

| | Evaporatör | | Kondenser | | Sıkıştırma oranı | Tersinir Carnot(COP) |
|--|------------|----------|-----------|-----------|------------------|----------------------|
| | Sıcaklık | Basınç | Sıcaklık | Basınç | | |
| İdeal tersinir Carnot | -5°C | 2,43 bar | 35°C | 8,87 bar | 3,65 | 6,70 |
| Düzeltilmiş Carnot $\Delta T = 5K$ | -10°C | 2,01 bar | 40°C | 10,17 bar | 5,05 | 5,26 |
| Düzeltilmiş Carnot $\Delta T = 10K$ | -15°C | 1,64 bar | 45°C | 11,60 bar | 7,07 | 4,30 |

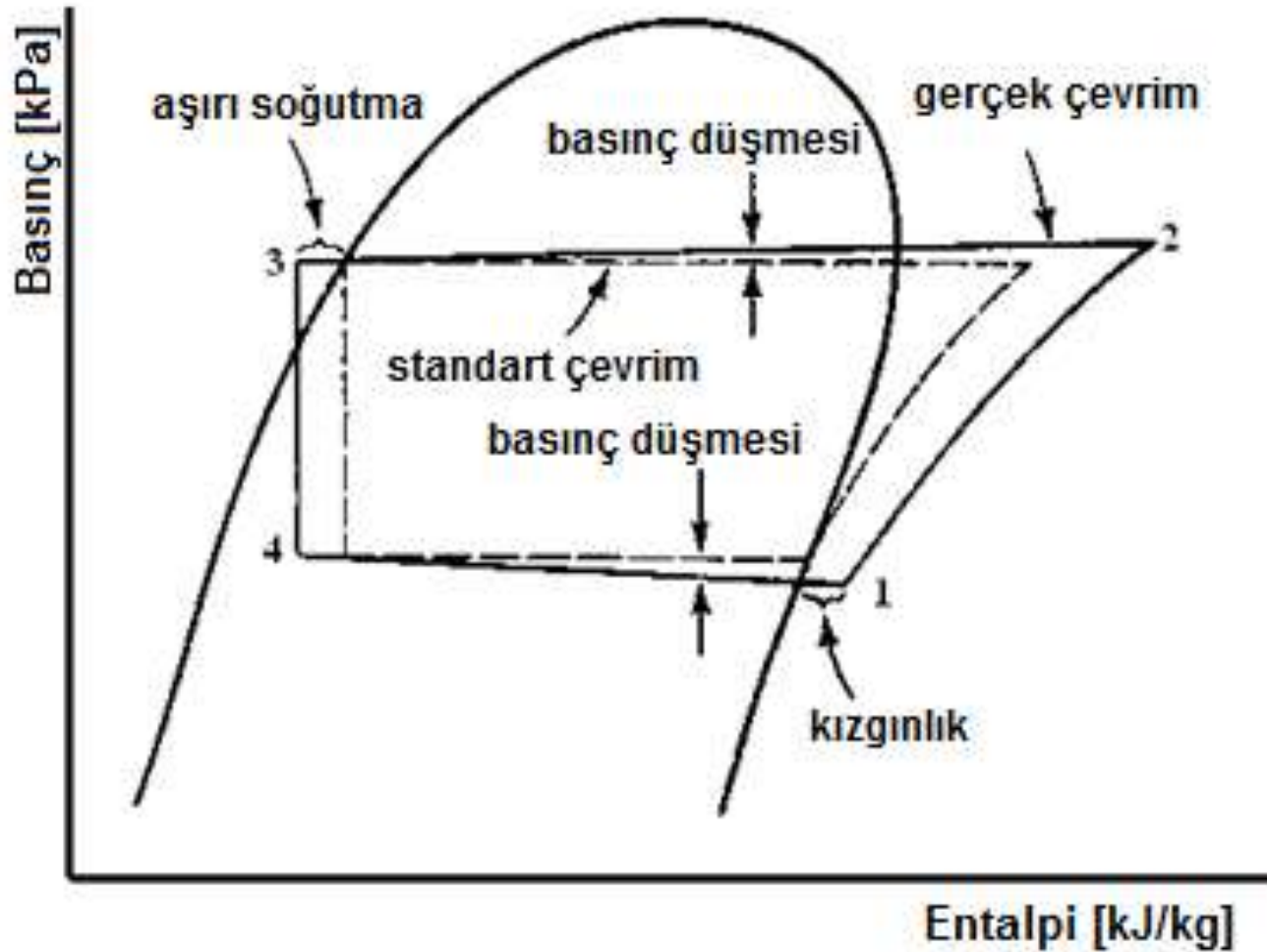
Not: Basınçlar R-134a için mutlak değerlerdir.

- **Daha büyük evaporatör**
- *Daha yüksek emme basıncı kompresöre giren gazın daha yoğun olmasına böylelikle verilen süpürme hacmi için daha fazla gaz kütesine ve dolayısıyla soğutma yükünün artmasına neden olur.*
- *Yüksek emme basıncı sıkıştırma oranını düşürür ve verilen bir yük için daha az güç tüketilmesine neden olur.*
-
- **Daha büyük kondenser**
- *Düşük yoğunlaşma sıcaklığı ve genleşme valfine daha soğuk sıvı girmesine, soğutma etkisinin artmasına,*
- *Düşük basma hattı basıncına, böylece düşük sıkıştırma oranına ve düşük güç tüketimine neden olur.*

2.7 GERÇEK BUHAR SIKIŞTIRMA ÇEVİRİMİ

- Şekil-2.9'da gerçek buhar sıkıştırma çevrimi ile temel çevrimin karşılaştırılması verilmiştir. İkisi arasında çeşitli noktalarda farklar vardır.
- Şekil-2.9'de gösterildiği gibi gerçek çevrimde soğutucu akışkan, kondenser, evaporator ve bağlantı borularından geçerken sürtünme etkisi nedeniyle basınç düşmeleri oluşur.
- Gerçek sıkıştırma süreci (1-2 işlemi) kızgın buhar bölgesinde başlar. Doymuş buhar hattında başlamaz.
- Gerçek sıkıştırma süreci tersinmezdir (izentropik değildir) ve entropi artış yönünde ilerler. ($S_2 > S_1$)
- Kompresörün izentropik verimi kompresörün performansını değerlendirmek için ve gerçek kompresör çıkışındaki (2 noktası) entalpiyi tanımlamak için kullanılır.
- Kondenserdeki ısı atma işleminin sonunda (2-3 işlemi) sıvı aşırı soğutulmuştur, doymuş değildir.

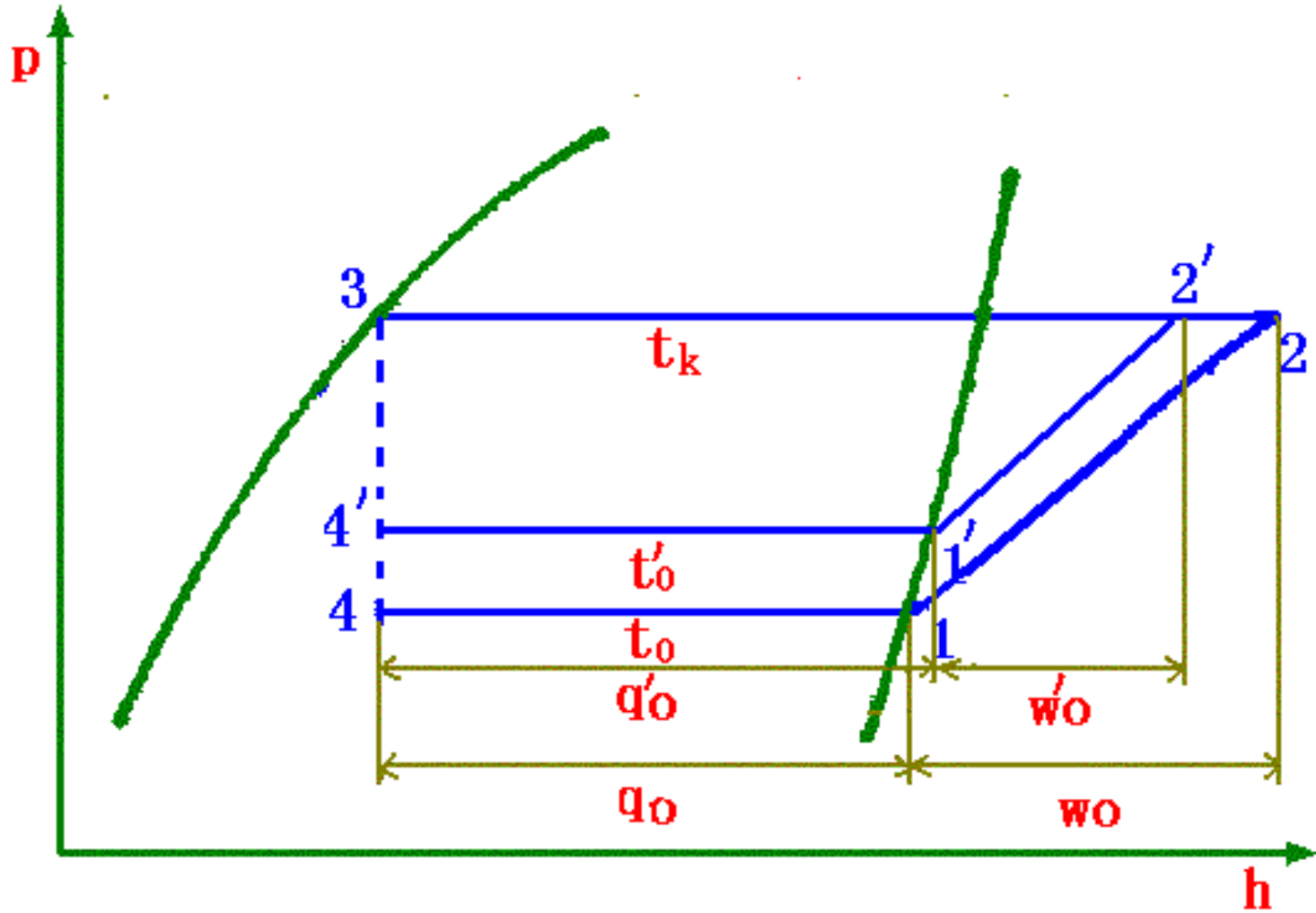
Şekil-2.9 Gerçek buhar sıkıştırma p-h diyagramı



2.8 BUHARLAŞMANIN, YOĞUNLAŞMANIN VE SICAKLIKLARIN ÇEVİRİM KAPASİTESİNE ETKİSİ

- **2.8.1 Buharlaşma Sıcaklığının Değişimi**
- *Kapasiteler buharlaşma ve yoğunlaşma sıcaklıklarıyla ile çok değişir ve bu farklılıkların önemli pratik sonuçları vardır.*
- *Aşağıdaki analizler soğutucu akışkan R-134a ya dayalıdır fakat genel eğilimler diğer soğutucu akışkanlar için aynıdır.*
- *Şekil-2.10'da görülmektedir ki sabit bir yoğuşma sıcaklığında buharlaşma sıcaklığı artarken p-h diyagramındaki temel çevrim de değişir.*
- *Taslakta açıkça görüldüğü gibi soğutma etkisi artar (4'-1' yerine 4-1) ve sıkıştırma ısısı azalır. (1'-2' yerine 1-2)*

Şekil-2.10 Buharlaştırma sıcaklığının artış etkisi



- **Şekil-2.10 ile aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:**
- *Özgül soğutucu etkisi:*
- $$q_e = h_1 - h_3$$
- *Belirli bir yoğuşma sıcaklığında, buharlaşma sıcaklığındaki değişim, sıcaklık ile doymuş buharın özgül entalpisindeki değişime bağlıdır.*
- *Buharlaşma sıcaklığının artışı, özgül entalpi doymuş buharın özgül entalpisinin artışına bağlı olarak artar ($h_{1'} > h_1$).*
- *Soğutma etkisi artar.*
-
-
- *İzentropik sıkıştırma özgül işi,*
- $$w_i = h_2 - h_1$$
- *Değişim Şekil-2.10'da gösterilmiştir.*
- *Özgül iş artan buharlaşma sıcaklığı ile düşer.*

- *Hacim soğutma etkisi,*

- $$q_v = (h_1 - h_3) / v_1$$

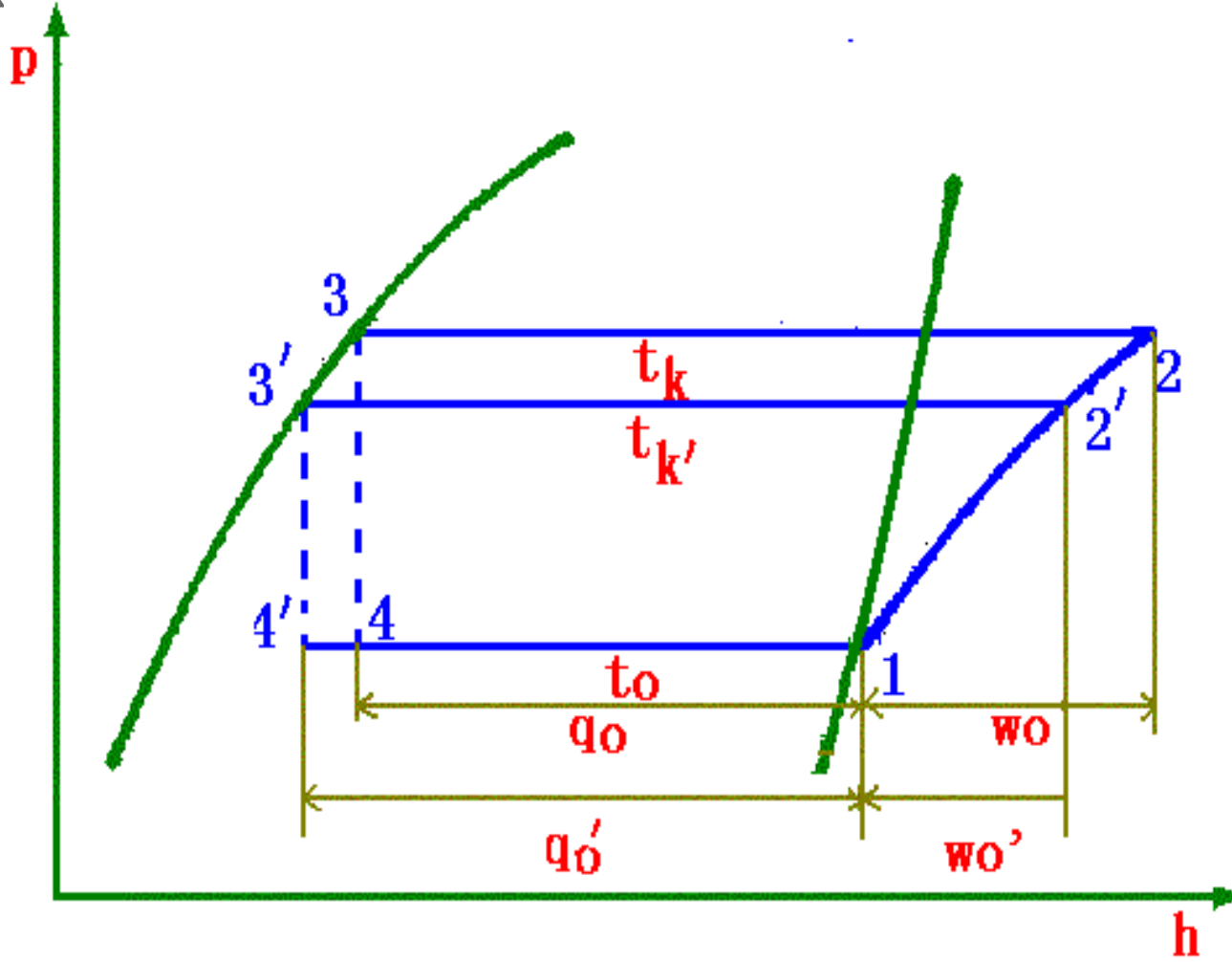
- Pay olan v_1 , basınçla dolayısıyla buharlaşma sıcaklığı ile oldukça değişir. Ama kesrin paydası olan (h_1-h_3) nispeten daha az değişir.
- Böylece hacim soğutma etkisi, artan buharlaşma sıcaklığı ile hızlıca artar.

-
- *İzentropik sıkıştırma hacim işi,*
- $$w_v = (h_2 - h_1) / v_1$$

- Sabit yoğunlaşma sıcaklığında, (h_2-h_1) artan buharlaşma sıcaklığının artması ile düşer. Aynı şekilde v_1 de azalır.
- Bu yüzden değişim kesin değildir.

- İzentropik soğutma performans katsayısı,
- $COP = (h_1 - h_3)/(h_2 - h_1)$
- İzentropik soğutma performans katsayısı azalan buharlaşma sıcaklığı ile küçülür; çünkü özgül soğutma etkisi artar ve izentropik sıkıştırma özgül işi azalır.
- **2.8.2 Yoğunlaşma Sıcaklığının Değişimi**
- Şekil-2.11, yoğunlaşma sıcaklığı arttırıldığında, sabit bir buharlaşma sıcaklığı p-h diyagramındaki temel çevrimdeki değişimi göstermektedir.
- Şemada görüldüğü üzere; soğutma etkisi artar (4-1 yerine 4'1), izentropik sıkıştırma özgül işi (1-2 yerine 1-2'), ve uzaklaştırılan ısı düşer (2-3 yerine 2'-3').

Şekil-2.11 Azaltılan yoğunlaşma sıcaklığının etkisi



- **Şekil-2.10'dan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:**

- *Özgül soğutma etkisi,*

- $$q_0 = h_1 - h_3$$

- Azalan yoğunlaşma sıcaklığı ile birlikte h_3 de azalır. Böylece azalan yoğunlaşma sıcaklığı ile birlikte özgül soğutma etkisi artar.

-

- *İzentropik sıkıştırma özgül işi,*

- $$w_{in} = h_2 - h_1$$

- İzentropik sıkıştırma özgül işi, azalan yoğunlaşma sıcaklığı ile birlikte düşer.

- İzentropik sıkıştırma hacim işi,

- $w_v = (h_2 - h_1) / v_1$

- Azalan yoğunlaşma sıcaklığı, izentropik sıkıştırma hacim işini önemli ölçüde düşürebilir, dolayısıyla da verilen bir makineyi çalıştırmak için gerekli gücü de düşürür.

-

- Soğutma performans katsayısı,

- $COP = (h_1 - h_3) / (h_2 - h_1)$

- Azalan yoğunlaşma sıcaklığı ile birlikte h_1-h_3 artar ve h_2-h_1 azalır, böylelikle soğutma performans katsayısı da artar.
- Yoğunlaşma sıcaklığındaki artış bunlara ters bir etkide bulunacaktır.
- Yukarıdaki analizlere göre, STK (COP)'ın iyileştirilmesi için, çalışma koşulları ile ilgili yapacak bir şeylerin olduğu söylenebilir.
- Ev tipi buzdolabı, klima ve su soğutma grubu gibi pratik soğutma aletlerinin performansı çevreye, soğutucu parçalarına, uygulamaya ve soğutma mevsimine göre değişir.

2.9 ÇOK KADEMELİ BUHAR SIKIŞTIRMA SİSTEMLERİ

- *Tek kademeli buhar sıkıştırma sistemleri genellikle yoğunlaşma ve buharlaşma basınçları arasındaki sıkıştırma oranı makul olduğunda kullanılır. Ama bu oran düşük bir buharlaşma sıcaklığı ya da yüksek bir yoğunlaşma sıcaklığı yüzünden arttığında bazı faktörler soğutma kapasitesini ve çevrim performans (COP) katsayısını düşürür.*
- *Gosney'e göre, tek kademeli buhar sıkıştırma sistemi için uygun sınır, yoğunlaşma-buharlaşma sıcaklıkları arasındaki fark 40 K'dir.*
- *40 K'den fazla sıcaklık farklılıkları için tek kademeli buhar sıkıştırma sistemi tavsiye edilmez. Çok kademeli sistemler (hem kademeli sıkıştırma hem de ardışık sistemler) düşünülmeli ve incelenmelidir.*
-
- *Tek kademeli sistemin yerine çok kademeli buhar sıkıştırma sistemi kullanmanın nedenleri:*
- *Çok kademeli bir sistemde her aşamanın sıkıştırma oranı R_{com} , tek kademeli bir birimdekinden daha küçüktür.*

- Sıkıştırma oranı R_{com} , kompresörün basma basıncı olan p_{dis} , kPa'nın kompresör girişindeki emme basıncı olan p_{suc} , kPa'ya oranı olarak tanımlanır ya da

$$R_{com} = \frac{P_{dis}}{P_{suc}}$$

diye gösterilir.

- Sıvı soğutucu daha düşük bir entalpide buharlaştırıcıya girer ve soğutma etkisini artırır.
- Yüksek kademeli kompresördeki gaz basıncı, yoğunlaşma ve buharlaşma basıncı arasındaki aynı basınç farkındaki tek kademeli sistemden daha düşük bir sıcaklığa sahip olabilir.
- Çok kademeli sistem, soğutma yükündeki değişimleri uyumlaştırabilir.
- Yüksek kademeli kompresörün emme basıncına eşit olan düşük kademeli kompresörün basma basıncı, ara kademe basıncı olarak adlandırılır.
- Ara kademe basıncı genellikle, her kademedeki sıkıştırma oranı daha yüksek COP için aynı olsun diye ayarlanır.
- İki kademeli genişleme sistemi için ara kademe basıncı p_i (kPa) şu şekilde hesaplanabilir:

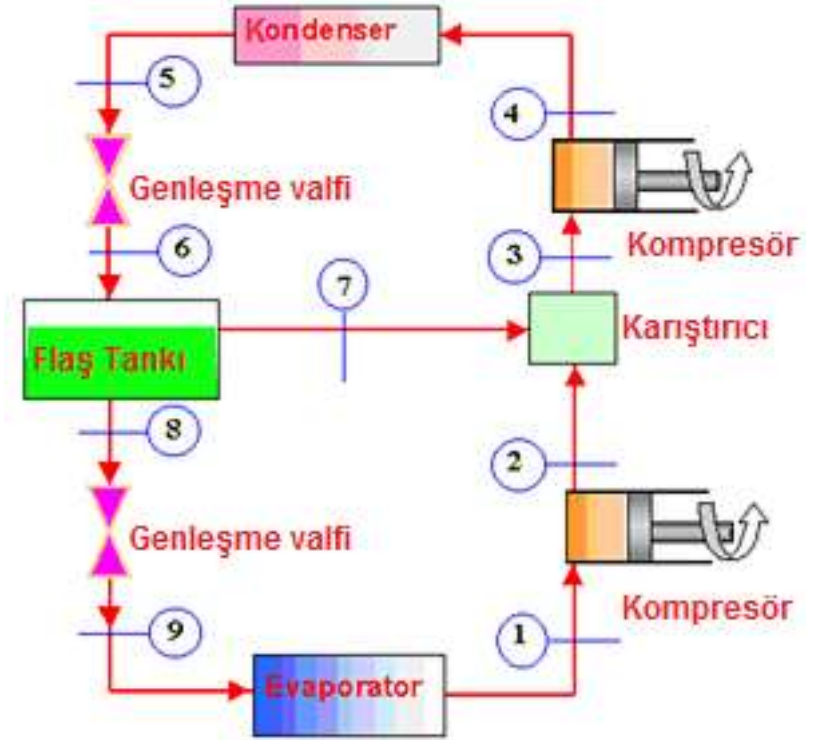
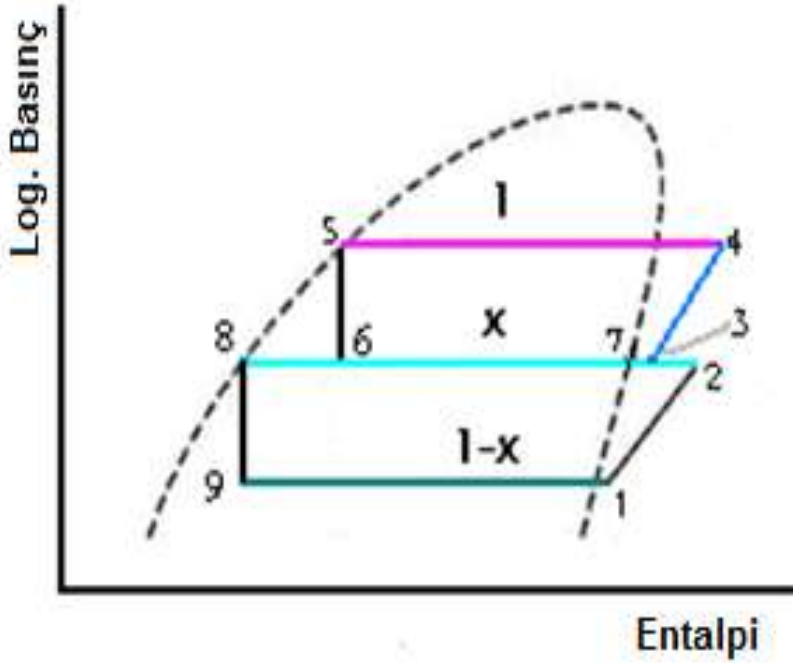
$$p_i = \sqrt{p_{con} p_{ev}}$$

- p_{con} yoğunlaşma basıncı (kPa) ve P_{ev} buharlaşma basıncı (kPa)'dır.

2.10 FLAŞ SOĞUTUCULU İKİ KADEMELİ GENLEŞME SİSTEMİ

- *İki kademeli sistem, iki kademeli sıkıştırma ve çoğunlukla da iki kademeli bir genleşme ile çalışan bir soğutma sistemidir.*
- *Şematik sistem planı ve sürece uygun bir log p-h diyagramı Şekil-2.12'de gösterilmiştir.*
- *Ani basınç düşümüyle oluşan gaz (flaş gaz), iki genleşme valfi arasındaki bir ara depodaki sıvı soğutucu akışkandan ayrılır.*
- *Sonra Şekil-2.12'de görüldüğü gibi yüksek kademeli kompresör flaş gazı ayıracaktır.*
- *Seri bağlı iki kompresör ve iki genleşme valfinden oluşan sistemin temel bileşenleri Şekil-2.12'de ve çevrim boyunca soğutucu akışkanın durumları Şekil-2.12'de basınç-entalpi koordinat düzleminde gösterilmiştir.*

Şekil-2.12 Flaş soğutuculu iki kademeli genişleme sistemi



- 1 noktasında soğutucu akışkan buharı kuru-doygun durumda düşük kademeli kompresöre girer.
- Gaz ara kademe basınca p_i 'ye 2 noktasında sıkıştırılır ve genellikle ekonomizör olarak adlandırılan flaş soğutucudan gelen buharlaştırılmış soğutucu akışkan ile karışır.
- Ardından karışım 3 noktasında yüksek kademeli kompresöre girer. Yoğunlaşma basıncı olan p_{con} 'a sıkıştırılan sıcak gaz 4 noktasında yüksek kademeli kompresörü terk eder.
- Sonra kızgın gazın ısısının geri kazandırıldığı, yoğunlaştırıldığı kondensere tahliye edilir ve oradan da 5 noktasında sıvı duruma geçer.
- Yoğunlaşma sürecinden sonra aşırı soğutulmuş sıvı soğutucu akışkanı, şamandıralı valf gibi yüksek basınçlı taraftaki bir kısma aygıtı üzerinden akar.

- *Sıvı soğutucu akışkanının küçük bir miktarı 7 noktasında flaş soğutucudaki buhara geçer ve buharlaşmanın gizli ısı, kalan sıvı soğutucu akışkanını 8 noktasında kademeler arası basınca uygun doyma sıcaklığına indirir.*
- *Flaş soğutucunun içinde, buhar ve sıvı soğutucu akışkan karışımı 6 noktasındadır.*
- *Ardından sıvı soğutucu akışkanı başka bir kısma aygıtı üzerinden akar, küçük bir miktarı 9 noktasında kaynar ve sıvı-buhar karışımı evaporatöre girer.*
- *Kalan sıvı soğutucu akışkan evaporatörde 1 noktasında buharlaştırılır.*
- *Sonra buhar düşük kademeli kompresörün emişine döner ve çevrimi tamamlar.*
- *Bu, flaş soğutuculu iki kademeli genleşme sisteminin tüm sürecidir.*

- **2.10.1 Flaş Soğutucudaki Buharlaştırılmış Soğutucu akışkanın Kuruluk Oranı**
- Flaş soğutucuda, yoğunlaştırıcı aracılığı ile akan 1 birim soğutucu akışkan dışında sıvı soğutucu akışkanın (1-x) birimindeki kalan kısmı, p_i ara kademe basıncında doyma sıcaklığına (t_8) düşürür.
- Flaş soğutucuya giren sıvı soğutucu akışkanın entalpisi h_5 olduğu için h_6 , kısma aygıtından sonra buhar ve sıvı soğutucu akışkan karışımının entalpisidir, kısma süreci için $h_5=h_6$ kabul edilir.
- h_7 ve h_8 entalpileri, ara kademe basınçta sırasıyla doymuş buhar ve doymuş sıvının entalpileridir ve h_9 , kısma aygıtının düşük basınçlı kısmından sonra flaş soğutucudan çıkan sıvı soğutucu akışkan ve buhar karışımının entalpisidir.
- Yine kısma süreci için $h_8=h_9$ kabul edilir.
- Flaş soğutucuda buharlaştırılan sıvı soğutucu akışkanın kuruluk oranı x şu şekilde verilir:
-

$$x = \frac{h_5 - h_8}{h_7 - h_8}$$

- **2.10.2 Yüksek Kademeli Yoğunlaştırıcıya Giren Buhar Karışımının Entalpisi**
- Karışım noktası 3'te çevreye olan ısı kaybını göz ardı ederek 2 noktasında düşük kademeli kompresörden tahliye edilen gaz halindeki soğutucu akışkanın ve 7 noktasında flaş soğutucudan çıkan buharlaşmış soğutucu akışkanın karışımı adyabatik bir süreç olarak kabul edilir.
- Yüksek kademeli kompresöre girişteki 3 durumu, enerji denklemini 7 ve 2 akışlarının karışımına uygulayarak bulunur.
- Böylece 3 durumun özgül entalpisi şu şekilde bulunur:
 - $$h_3 = (1 - x)h_2 + xh_7$$

• 2.10.3 Performans Katsayısı

- Kondensere akan soğutucu akışkanın bir birimi için evaporatöre akan soğutucu akışkanın miktarı $(1-x)$ 'dir.
- Özgül soğutma etkisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_e = (1-x)(h_1 - h_9)$$

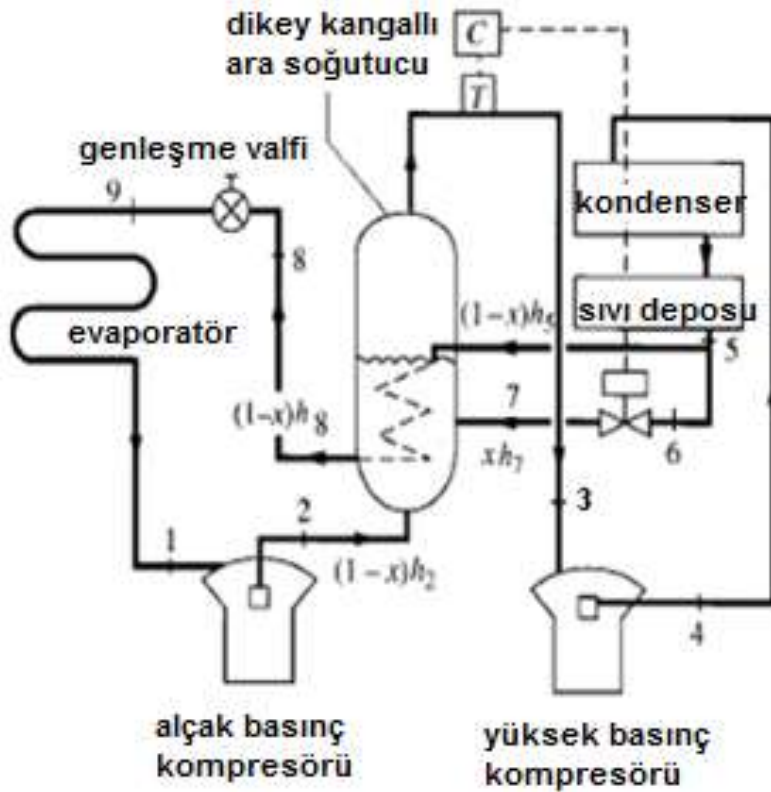
- Kompresöre toplam iş girişi (düşük ve yüksek kademeli kompresör dahil) W_i ;

$$w_i = (1-x)(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)$$

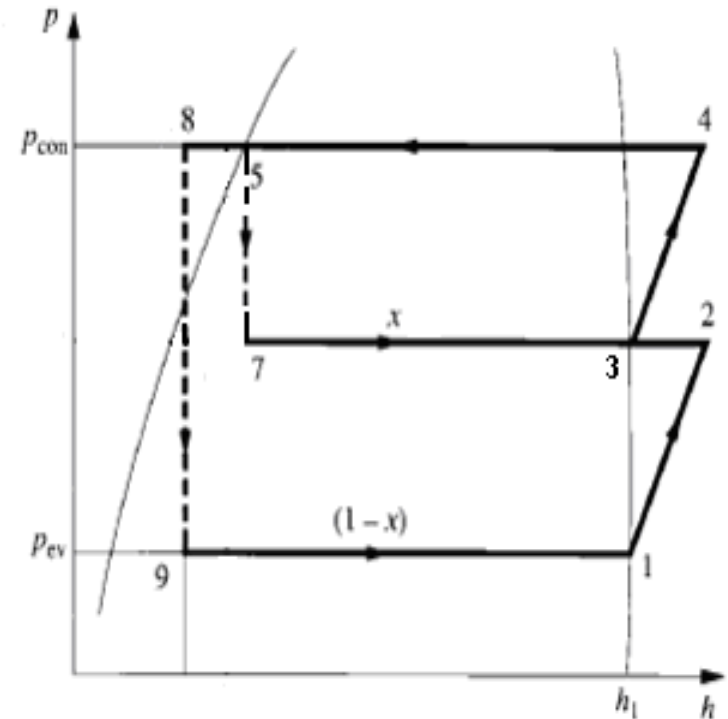
- Flaş soğutuculu iki kademeli genişleme sisteminin performans katsayısı olan COP;

$$COP = \frac{q_e}{W_i} = \frac{(1-x)(h_1 - h_9)}{(1-x)(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)}$$

- **2.10.4 Dikey Bir Ara Soğutuculu Sıvı Soğutma ve Isı Geri Kazanımının Birleştirildiği Sistem**
- Şekil-2.13, dikey bir kangal tipi ara soğutuculu iki kademeli genişleme sisteminin soğutma çevrimini ve şematik diyagramını gösterir.



(a)



(b)

Şekil-2.13 Dikey ara soğutuculu iki kademeli bileşik sistemi

- *5 noktasında ara soğutucudan gelen aşırı soğutulmuş sıvı soğutucu akışkan iki akıma ayrılır.*
- *Akımın biri ara soğutucunun içindeki kangala girer.*
- *Diğer akım, 7 noktasında ara kademe basıncına göre kısıldıktan sonra ara soğutucu kabuğuna girer.*
- *Ara soğutucu kabukta, 5 noktasında olan kangaldaki sıvının gizli ısını çekerek ve ardından onu 8 noktasına kadar aşırı soğutularak sıvı soğutucu akışkanının birazı 3 noktasında doymuş buhara dönüştürülür.*
- *Bu aşırı soğutulan sıvı 9 noktasında genişleme valfi tarafından kısılır ve sonra evaporatörde 1 noktasında doymuş buhara dönüştürülür.*

- 1 noktasında evaporatördeki buhar soğutucu akışkan, düşük kademeli kompresöre girer.
- 2 noktasında sıkıştırılmış sıcak gaz, ara kademe basınçta ara soğutucudaki sıvı ile karışmak üzere ara soğutucuya tahliye edilir.
- Ara soğutucudaki sıvı seviyesi, ara soğutucudaki ara kademe basınçta doyma sıcaklığı tarafından kontrol edilir.
- 3 noktasında dikey kangal tipi ara soğutucudaki doymuş buhar yüksek kademeli kompresöre girer.
- 4 noktasında yüksek kademeli kompresörden tahliye edilen sıcak gaz, yoğunlaştırılır ve ardından yoğunlaştırıcıda 5 noktasında aşırı soğutulur.

- **2.10.5 Flaş Soğutucu İle Dikey Kangallı Ara Soğutucu Arasındaki Karşılaştırma**
- *Düşük kademeli kompresörden tahliye edilen sıcak gaz her zaman, dikey kangallı ara soğutucuda, ara kademe basınçta neredeyse doymuş buhar durumuna geri döndürülür.*
- *Bu işlem, yüksek bir basma sıcaklığına sahip olan amonyak gibi soğutucu akışkanlar için daha uygundur.*
- *Flaş soğutucularda, sıcak gaz ile kaynar buharın karışımı kızgınlığın giderilmesine neden olur ve kuru doymuş bir durumda sonuçlanmaz.*
- *Böylece, flaş soğutucular genellikle HCFC ya da HFC soğutucu akışkan kullanan soğutma sistemlerinde kullanılır.*
- *Flaş soğutucudaki sıvı soğutucu akışkanın basıncı ara kademe basıncına düşürülürken dikey bir kangala akan sıvı soğutucu akışkan, yoğunlaşma basıncından kısmen daha az bir basınçta muhafaza edilebilir.*
- *Bazı soğutucu akışkanlar kısma aygıtından önce kaynayabilir ve soğutma kapasitesinde azalmaya neden olur.*
- *Flaş soğutucu kısma aygıtındaki basınç düşümünü azaltır.*

2.11 ÇOK KADEMELİ KATI KARBONDİOKSİT ÜRETİM SİSTEMİ

- *Kısma işlemleri katı karbondioksit yapmak için olağan bir yöntemdir, fakat kısımadan önce iyi bir verim elde etmenin yolu, mümkün olduğu kadar düşük özgül entalpiye sahip olmasıdır.*
- *Basit bir sistemde, ek bir soğutucu olmadan, minimum özgül entalpinin bu hali, mevcut soğutma suyu sıcaklığının üzerinde (örnek olarak 25°C ve 64 bar civarında basınçta) bir sıcaklıkta sıvı olabilir.*
- *Soğuma sıcaklığı kritik sıcaklığa yaklağığında özgül entalpiyi azaltmak için basınç arttırılabilir.*
- *İşlenecek gaz atmosfer basınca ulaşırsa, soğutma suyu sıcaklığı yüksekken gazı yoğunlaşma sıcaklığına ya da gerekli kritik üstü basınca getirmek için sıkıştırmanın birkaç kademedede olmasına ihtiyaç duyulabilir.*
- *Böylece orta derecede basınçlardan flaş buharın geri çekilmesi ve bunun sıkıştırması ile karbondioksitin genişleme kademesini düzenlemek için bir fırsat sağlanır.*

- *Şekil-2.14'de kuru buz üretimi için kullanılan bir soğutma sistemi görülmektedir.*
- *7 noktasında, 70 bar'da ve 28°C'de yüksek basınçlı gaz 12 noktasına kadar üç kez genişler ki bu da katı ile buharın bir karışımıdır.*
- *13 noktasında katı CO₂ kuru buz olarak ayrıştırılır ve 1a durumunda buhar CO₂, düşük basınçlı kompresörün emme tarafında 1 noktasına ulaşmak için 1b durumundaki bileşim gazı CO₂ ile karışır.*

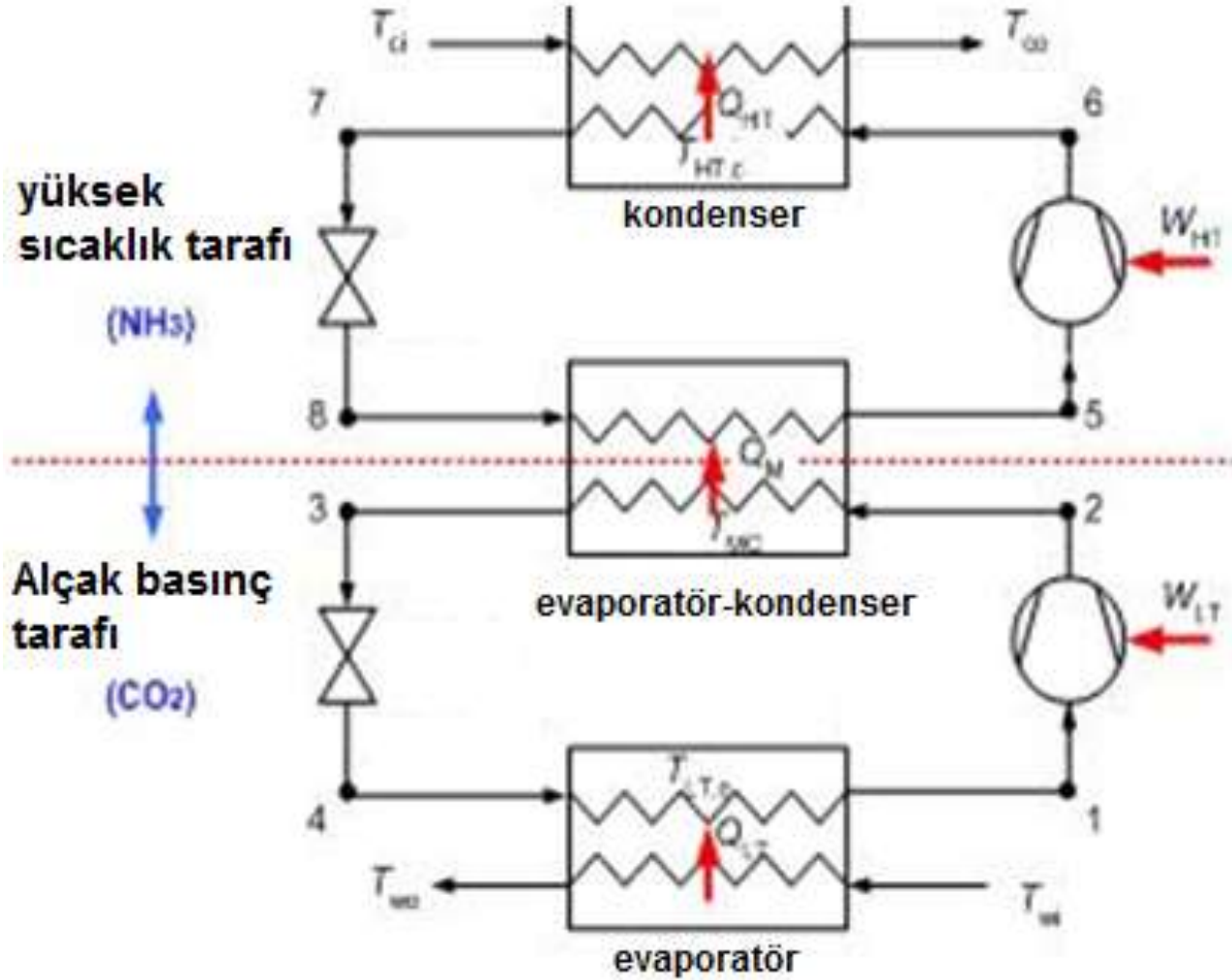
2.12 ARDIŞIK (KASKAD) BUHAR SIKIŞTIRMA SİSTEMLERİ

- *Ardışık (kaskad) soğıtma sistemleri -70°C 'den -100°C 'ye kadar olan bir sıcaklık kademesi için uygulanır.*
- *Sođutucu akıŐkanların çok dűŐük basınçlarda donma sıcaklıđına ulaŐma ihtimalleri olduđu için -70°C 'den daha dűŐük buharlaŐma sıcaklıkları için en fazla ű kademeli buhar sıkıŐtırma sistemleri uygulanabilir.*
- *DűŐük emme basıncı pistonlu kompresörler $p_0 > 10\text{KPa}$ ve turbo kompresörler için 6Kpa ile sınırlıdır.*
- *Derin bir vakum ağırlığı ile çok dűŐük basınç, sistem parçalarının sızdırmazlığı ve özellile geniŐ boyutları ile zorluklara neden olur.*

• **2.12.1 İki Kademeli Ardışık (kaskad) Sistem**

- İki kademeli ardışık (kaskad) sisteminde, düşük sıcaklık çevriminin soğutucu akışkan buharının yoğunlaştırıldığı yer olan evaporatör-kondenser olarak adlandırılan ısı değiştirici, ısıyı yüksek sıcaklık çevrimindeki akışkana atmasına rağmen iki bağımsız soğutma ünitesi birleştirilir.
- Böylece, evaporatör-kondenser biraz orta seviyeli basınç/sıcaklıkta yüksek sıcaklık devresi için evaporatör ve düşük sıcaklık devresi için kondenser olarak çalışır.
- Yüksek sıcaklık devresinin kondenseri, geleneksel buhar sıkıştırma ünitelerine benzer şekilde çevre havası ya da su ile soğutulur.
- Soğutma düşük sıcaklıklarda, düşük sıcaklık devresinin evaporatöründen elde edilir.
- İki devreyi dengelemek için daha düşük kademedeki tarafından atılan ısı daha yüksek kademe tarafından emilmek zorundadır.
- Ardışık (kaskad) sistemin her devresinde, devrenin sıcaklık yelpazesine en uygun olan farklı bir soğutucu akışkan kullanılır.

Şekil-2.15 NH₃/CO₂ kaskad sistem için şematik gösterim



- **2.12.2 Optimum Ara Sıcaklık**
- İki ardışık (kaskad) devre arasındaki ara sıcaklık, tüm sistemin performans katsayısını (COP) belirlemede önemli bir rol oynayan bir tasarım parametresidir.
- Evaporatör-kondenserde iki sıvı arasında hiçbir sıcaklık farkı olmadığını varsayarsak, tersinir döngülerde, en uygun kademe sıcaklıkları, kaskad sistemin yoğunlaşma ve buharlaşma sıcaklıklarının geometrik ortalamasıdır. Örneğin, gerçek değerler ideal değerlerden %10'dan daha fazla farklı olmadığı için devrelerin her birinde aynı sıcaklık oranına sahip olduğu var sayılır.
- İki sıvı arasındaki en uygun sıcaklık farkının ne kadar olması gerektiği sadece iki devredeki soğutucu akışkanların ısı transfer özelliklerine değil, aynı zamanda tasarım ekonomisine (işletmeye karşı sermaye maliyeti) bağlı olacaktır.
- Sıcaklık farkı ne kadar büyükse sistemin COP 'si o kadar düşüktür.

- **2.12.3 Ardışık (Kaskad) Çevrim Performans Katsayısı (COP)**
- Ardışık (kaskad) sistemin performans katsayısı COP, evaporatörde üretilen soğutma etkisinin sistemdeki bütün kompresörlerdeki toplam iş girişine oranı olarak tanımlanır. Aşağıda gösterildiği üzere;

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{comp1} + W_{comp2}}$$

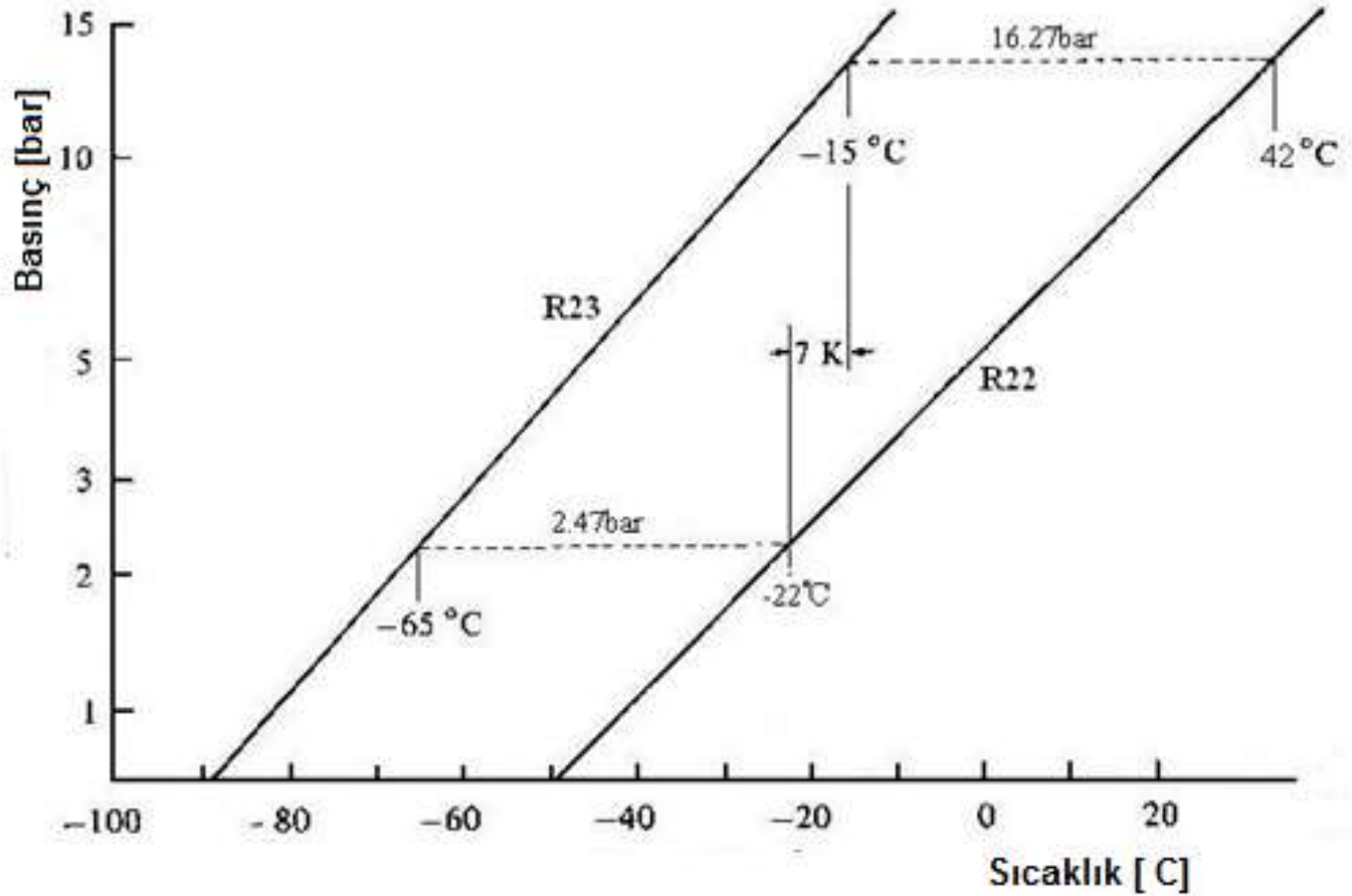
• **2.12.4 Evaporatör-kondenser**

- *Düşük sıcaklıklı soğutucu akışkanın yoğunlaşması ile yüksek sıcaklıklı soğutucu akışkanın buharlaşması arasındaki ve yaklaşım olarak adlandırılan 2.5°C'den 5°C'ye olan sıcaklık farklılığı, kompresörü uygun maliyetli ve enerji tüketimini düşük tutmak için makul bir denge gibi görünmektedir.*
- *Yüzey boru tipi evaporatör-kondenser hantal olduğu için kondenserlerin yenilikçi tasarımları geliştirilmelidir. Pahalı ama kompakt olan yüzey ve levha tipi kondenser kullanımının karbondioksitin amonyak sistemine olan sızıntısını en aza indirdiği rapor edilmektedir.*
- *Soğutucu akışkan olarak karbondioksit ve amonyak kullanıldığında, evaporatör-kondenserde karbondioksit ve amonyak karışımının kimyasal reaksiyon sonucunda katı bir çökelti oluşturması büyük bir sorundur.*
- *Evaporatör-kondenserlerin güvenli çalışması için yüzey ve boru tipi kondenselerde kaliteli malzemelerden yapılmış bir ucu kaynaklanmış çift yüzeyli borular, sıkı test işlemi ve sürekli kaçak izlenmesi tavsiye edilir.*

2.13 OTOMATİK ARDIŞIK (KASKAD) BUHAR SIKIŞTIRMA SİSTEMLERİ

- Sadece bir kompresörün kullanıldığı otomatik ardışık (kaskad) soğutma sistemi 1946 yılında Ruhemann tarafından öne sürülmüştür.
- Çok bileşenli zeotropik soğutucu akışkan karışımları tek sıkıştırımalı kaskad sistemlerde sıcaklığı -180°C yapmak için bu oto-kaskad sistemleri ya da otomatik soğutma kaskad'lar olarak bilinen sistemler kullanılır.
- Diğer ikili ya da çoklu kaskadlı soğutma tipleri ile karşılaştırıldığında oto-kaskad sistemlerinin birçok avantajları vardır.
- Bu avantajlar sistem elemanlarının kompakt tasarımıdır; güvenilirliği, emniyeti ve kullanımdaki esnekliği; bakımının nispi kolaylığı ve makul fiyatı.
- Ve oto kaskad sisteminin yağlama akıcılığı gibi konulardaki çok sayıda sınırlılıklarından kaçınılması gerekir.
- Örnek olarak R-23 ve R-22 ile çalışan iki döngülü kaskad sistemini göz önüne alın.
- Şekil-2.16, bir Dühring çizimi üzerinde bu maddelerin buhar basıncını gösterir.

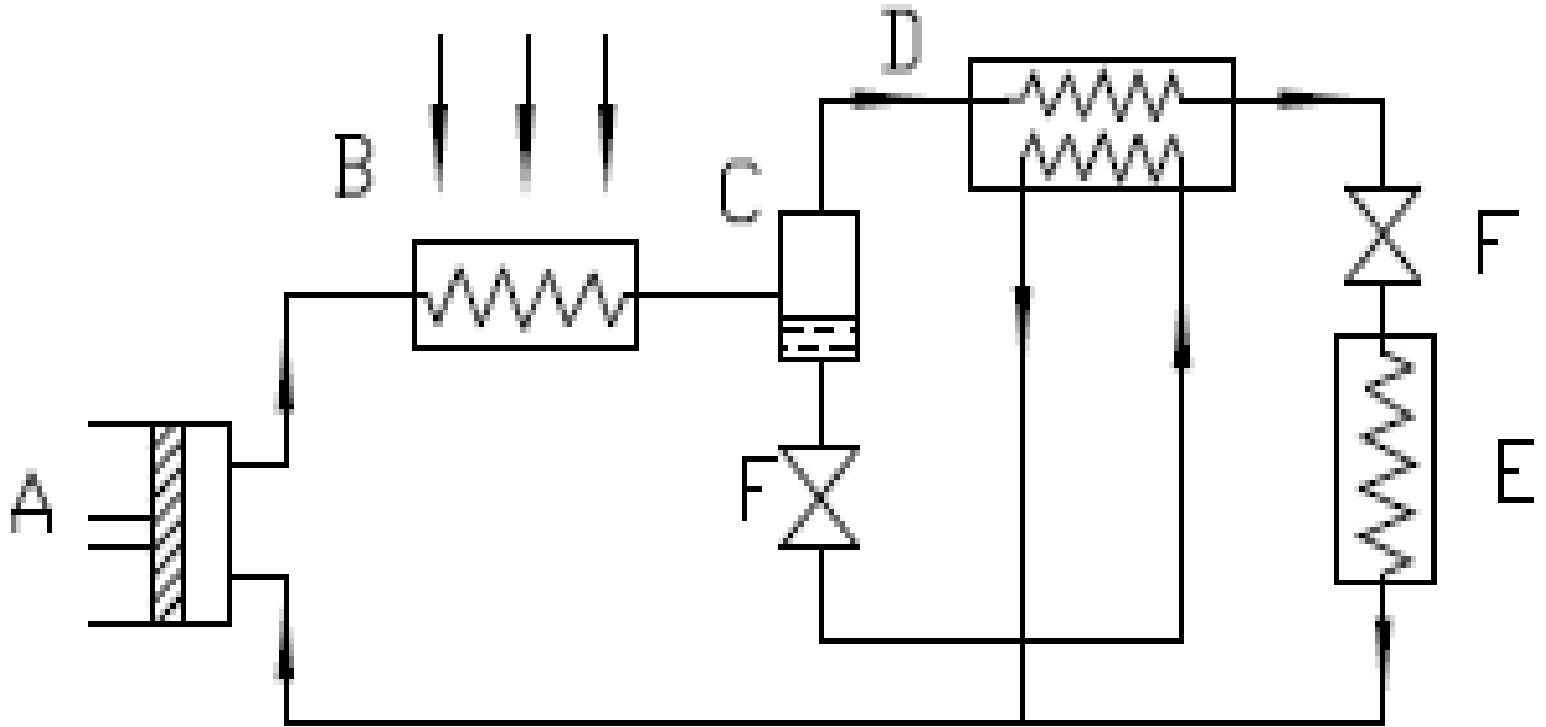
Şekil-2.16 Oto-kaskadın çalışmasını göstermek için R-23 ve R-22 için sıcaklığa karşı buhar basıncı



- *R-23 devresinde buharlaşma sıcaklığı -65°C için basınç 2.47 bardır ve yine R-23 devresinde yoğunlaşma sıcaklığı -15°C için basınç 16.27 bardır.*
- *R-23'ü yoğunlaştırmak için R-22 soğutucu akışkanı -15°C 'den daha az bir sıcaklıkta kaynatılmak zorundadır.*
- *Buharlaşa sıcaklığı -22°C olarak seçilirse R-22 devresindeki emme basıncı R-23 devresindeki ile aynıdır.*
- *Ayrıca R-22 devresindeki yoğunlaşma sıcaklığı 42°C 'ye ayarlanırsa iki devredeki basma basıncı aynı olur.*
- *Buhar daha sonra emme ile karıştırılabilir ve daha sonra ayrılması koşuluyla birlikte sıkıştırılabilir.*
- *Ayrılma Şekil-2.17'de gösterildiği gibi bir devre kullanılarak kısmi yoğunlaşma tarafından gerçekleştirilebilir.*

2.17 Oto-kaskad çevrim diyagramı

A: Kompresör B: Kondenser C: Buhar sıvı ayırıcı D: Evaporatör-kondenser E: Evaporatör F: Kısmi valfi



- Karışmış buhar kondensere geçtiğinde, 16.27 basıncında yoğunlaşmak için sıcaklık R-23 için çok yüksek olacaktır. Ama karışımdaki kısmi basıncı yeterince yüksek olma koşulu ile R22 yoğunlaşabilir.
- Yoğunlaşmış R-22 sonradan R-23 buharından ayrılır ve -22°C 'de kaynadığı düşük taraftaki basınca genleştirilir.
- Sonra soğutma etkisi -15°C R-23 buharını yoğunlaştırmak için kullanılır ve bu sıvı -65°C 'de kaynadığı evaporatöre gider.
- Oto-kaskad sisteminin başlıca dezavantajı soğutucu akışkanın özel bir karışım kullanımını gerektirmesidir.
- Bu özellik bakımla alakalı üç probleme neden olur.
- İlk olarak, soğutucu akışkan karışım farklı kaynama noktalı değişik tipte soğutucu akışkandan oluştuğu için sistemdeki bir sızıntı, kalan soğutucu akışkanların oranında bir dengesizliğe yol açar.
- Sistemi düzgün çalışır hale geri döndürmek için doğru bir karışım oranı sağlamak adına yeni ve imkân dâhilinde maliyetli bir şarj ile soğutucu akışkanın kalan kısmının hepsi yenilenmelidir.
- İkinci olarak, karışım özel olduğu için geleneksel soğutucu akışkan sağlama kaynaklarında hazır bir şekilde mevcut değildir ve ayrıca elde edilmesi zor ve masrafı olabilir.
- Üçüncü olarak, bu tip sistemler yaygın olarak kullanılmadığı için tamire ve bakım prosedürüne hâkim olan vasıflı bakım elemanları bulmak bazen zordur.