

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
TEKNİK BİLİMLER MESLEK YÜKSEKOKULU  
İKLİMLENDİRME VE SOĞUTMA TEKNOLOJİSİ

# İKLİMLENDİRME VE SOĞUTMA TEKNOLOJİLERİ

## DERS NOTLARI

ORHAN KISA  
Makina Yüksek Mühendisi  
Öğretim Görevlisi

ANTALYA-2011

## 1. SOĞUTMANIN TANIMI VE TARİHİ GELİŞİMİ

### 1.1 Soğutmanın Tanımı ve Tarihçesi

Bir maddenin veya ortamın sıcaklığını onu çevreleyen hacim sıcaklığının altına indirmek ve orada muhafaza etmek üzere ısının alınması işlemine soğutma denilebilir.

En basit ve en eski soğutma şekli, soğuk yörelerde tabiatın meydana getirdiği kar ve buzu muhafaza edip bunların sıcak veya ısı alınmak istenen yerlere koyarak soğutma sağlanmasıdır. Kış aylarında meydana gelen kar ve buzu muhafaza ederek sıcak mevsimlerde soğutma maksatları için kullanma usulü M.Ö. 1000 yıllarından beri uygulanmakta olduğu bilinmektedir. Mısırlılar, geceleri açık gökyüzünü görecektarзда yerleştirilen toprak kap içindeki sıvıların soğutulabileceğini tespit etmişlerdir. Bu soğutma şekli, gökyüzünün karanlıktaki sıcaklığını mutlak sıfır (-273°C) seviyesinde olmasından ve ışıma (radyasyon) yolu ile ısının gökyüzüne iletilmesinden yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. İmparator Neron, güneşin etkisinden korunmak için duvarları samanla izole edilmiş odalar yaptırmış ve bu odalarda sebze ve meyvelerin uzun zaman muhafazasını sağlamıştır.

Ticari maksatla ilk büyük buz satışı 1806 yılında Frederic TUDOR tarafından Antil adalarına 130 tonluk buz Favorite adlı teknikle götürülmesi ile başlamıştır. İlk macerasından zarar etmesine rağmen bu olumsuzluğun depolanmadan kaynaklandığını, gerçekte ise buz işinde büyük kazançlar olduğunu görmüş, nakliye esnasında buzu uzun süre muhafaza etmek için teknesinde değişiklikler yaparak yılda 150.000.000 Tona ulaşan bir buz ticareti hacmi geliştirmiştir. Hatta başka ülkelere buz satmıştır. Tabiatın bahsettiği buz ile soğutma şeklinden 1880'li yıllara kadar geniş ölçüde yararlanılmıştır.

Buz ve kar ile elde edilen soğutma şeklinin gerek zaman gerekse bulunduğu yer bakımından çoğu kez pratik ve ucuz bir soğutma sağlayamayacağı bir gerçek olduğundan mekanik araç ve cihazlarla soğutma teknikleri üzerinde araştırmalar başlamıştır.

1755 yılında Dr. William Cullen, eline eter sürdüğünde meydana gelen buharlaşma sonucunda elinin serinlediğini hissederek ilk mekanik soğutmanın temelini atmıştır. Dr. William Cullen bu olaya dayanarak, 1775 senesinde vakum prensibine dayanan buz yapma makinasını imal etmiş fakat laboratuvar aleti olarak kalmış ve geliştirilememiştir.

1792 yılında, Pellas adında bir Norveçlinin yönettiği kaşifler gurubu Kuzey Sibiryanın Lena Nehri yakınında kamp kurmuşlar, dondurucu soğuktan korunmak için çadırlarına sığınmış olan gezginler köpeklerin havladıklarını duyarak dışarıya çıkarlar, karları telaşla eşeleyen köpekleri görürler, köpeklerin yanına gittikleri zaman kar altında gömülü duran bir mamutun bozulmamış başını görürler. Dev mamutun gövdesini saran buzları temizleyip bir parça et keserler. Mamutdan kesilen bir parça eti pişirip yiyen gezginler etin bozulmamış olduğunu fark ederler.

Bu öykü besinlerin soğuk ortamda uzun zaman saklanabileceğini gösteren gerçek bir örnektir. Bu öyküyü duyan bilim adamları 1792 senesinden sonra soğutma işine tekrar önem vermeye başlamışlardır. 1834 yılında Jakop PERKINS adında Amerikalı bir Mühendis Londra'da eter ile çalışan pistonlu bir soğutma makinasının patentini almıştır. Otuz yıl boyunca bu prensiple çalışan makineler yapılmış, elektrik enerjisi olmayan yerlerde çalışan bir makine üzerinde de durulmuş ve 1858 yılında Fransız Ferdinand CARRE absorpsiyon sistemini bulmuştur. 1886 senesinde mühendis Windhausen CO<sub>2</sub> gazı ile çalışan sistem yaparak -80°C düşük sıcaklık elde etmiştir.

Bu tarihten sonra buz endüstrisi gelişerek, evlere gıda maddelerinin muhafazasına buz ile başlanılmıştır.

1910 yılında J.M. Larsen şirketi tarafından ilk küçük buzdolabı yapılmış fakat otomatik olmadığı için pek fazla tutulmamıştır.

1918 yılında Kelvinatör şirketi ilk otomatik buz dolabını piyasaya sürmüştür.

1930'da R-12 gazı bulunarak CFC soğutucuların temeli atılmıştır.

1935'te R-22 soğutucu akışkanı bulunarak HCFC kökenli akışkanlar geliştirildi

1989'da R-134 A ve R-123 soğutucu akışkanları bulunarak ozon tabakasına zarar vermeyen HFC.kökenli akışkanlar geliştirilmiştir.

1990'lı yılların başında R-22 ve R-502 yerine kullanılmak üzere ikili ve üçlü alternatif soğutucu akışkan karışımları geliştirildi.

## 2. ÇEVRE

Isı yüksek sıcaklık kaynağından düşük sıcaklık kaynağına kendiliğinden geçer. Kış aylarında yüksek sıcaklık kaynağı mahal içerisi, yaz aylarında dış hava sıcaklığıdır. Isı akışının tamamen engellenmesi mümkün olmadığı için mahal içerisinden düşük sıcaklık kaynağına (dış havaya), yüksek sıcaklık kaynağı (dış hava) dan mahal içerisine doğru ısı transferi olacaktır. Sıcaklığın yaz ve kış aylarında sabit kalabilmesi için iş görme esasına dayanan bir sistemle hacmin kaybolan ısıyı yerine ısı ilavesi yapılarak, kazanılan ısıyı yüksek sıcaklık kaynağına taşıyarak ısı dengesi korunabilir .Bu sistem sıcaklığın yanında havanın hızı, nemi, tazelikliğini istenilen değerlerde tutma özelliğine de sahip olabilir.

### 2.1 KONFOR

Kapalı bir ortamda sıcaklık ve diğer hava şartlarından ileri gelen bir rahatsızlık olmaması halidir. Konforun tam manasıyla belirlenebilmesi için deneysel olarak gözlenebilecek kesin bir fizyolojik olay yoktur. Deri sıcaklığı bu konuda iyi bir fikir sağlayabilir. Tarafsız sıcaklık aralığı konfor için bir kriter olarak alınabilir.

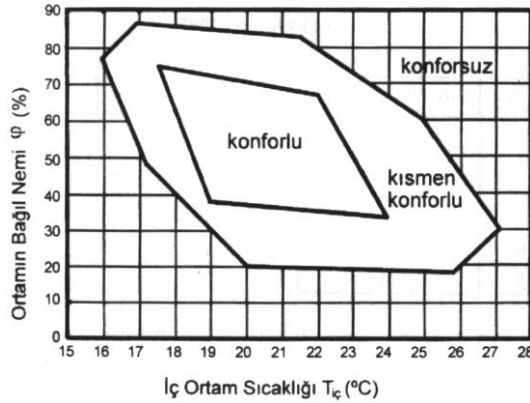
#### 2.1.1 Tarafsız Sıcaklık Aralığı

Tarafsız sıcaklık aralığı 27-30°C sıcaklıkları arasındaki bir hava hareketsiz olduğu zaman çıplak bir insan için öyle bir denge noktası vardır ki bu nokta vücuttaki denge halini korur. İnsan bu aralıkta ne üşüme nede sıcaklık hisseder.

Bir insanın konfor halinde bulunması sadece havanın sıcaklığına bağlı değildir. Havanın nemi, hareketi, temizliği ve civar yüzeylerinin ortalama sıcaklığı konfora etki eder. Yaz aylarında bağıl nemin % 6 artması insan vücudu tarafından 1 °C sıcaklık artışı olarak algılanır, hava hızı arttığında ise insanlarda üşüme hissi oluşur.

#### 2.1.2 Etken (Efektif) Sıcaklık

Sıcaklık ile beraber bağıl nem ve hava hızını da dikkate alarak yeni bir sıcaklık ölçeği tarif etmek gerekmiştir. Bu sıcaklığa (ET) adı verilmiş olup fizyolojik olarak hissedilen sıcaklığı temsil eder. Aşağıdaki şekilde (ET) ve konfor bölgeleri görülmektedir.



Şekil 2.1 İç ortam sıcaklığı ve ortamın bağıl nemine bağlı olarak konfor bölgesi.

## 2.2 GIDALARIN MUHAFAZASI

Her gün yediğimiz bitkisel ve hayvansal gıdaları, her an bulmak mümkün olmaya bilir. Bu güçlkle karşılaşan insanlar hal çareleri aramaya başlayarak kimya, fizik ve biyoloji esasına dayanan çeşitli usuller geliştirmişlerdir.

### 2.2.1 Kimya Esasına Dayanan Muhafazalar;

- Tuzla muhafaza (salamura)
- Baharatla muhafaza (sucuk-pastırma)
- Şekerle muhafaza (reçel)

### 2.2.2 Fizik Esasına Dayanan Muhafazalar;

- Kurutmak (kuru yemişler, bazı meyveler vs)
- Hararete pişirmek (konserve)
- Maddeyi yağ ve parafinle örtmek.

Kimyaya dayanan muhafaza usulleri, maddenin bünyesinde esaslı değişiklikler yapmaktadır. Gıda maddelerinin taze bütün doğal özelliklerine yakın muhafaza, yine fizik esasına dayanan << Soğukta Muhafaza >> usulüdür.

### 2.2.3 Gıda Maddelerinin Bozulma Nedenleri

Hayvansal ve bitkisel gıda maddelerinde zamanla (hayvanın kesilmesi, meyve ve sebzelerin koparılması) birçok değişiklikler olur. Sonuçta gıda maddesi bozulur veya kokar.

Gıda maddelerinde meydana gelen bozulma veya kokma, gıda maddesinin bizzat kendi hücrelerinin çıkarmış olduğu diastazların etkisindedir. Ayrıca maddenin üzerine düşen mikropların çıkardığı diastazlarla da madde bozulur. Muhafaza usullerinin amacı bu diastazları öldürmek veya çalışmasını durdurmaktır.

### 2.2.4 Gıda Maddelerine Sıcaklığın Etkisi

Diastazların en fazla çalışma gösterebildiği sıcaklık derecesi 35-47 °C dir. Yeni kesilmiş bir hayvanın sıcaklık derecesi 38-40 °C olduğu göz önünde bulundurulursa bu sıcaklık diastazların üremesi için en uygun sıcaklık olduğu görülür. Yeni kesilmiş bir hayvan etinin bozulmaması için pişirilmesi veya soğuk depolara konması gerekir. Çünkü diastazlar ıslak halde sıcaklığa karşı çok duyarlıdır. 35~47 °C sıcaklığın üzerine çıkıldıkça çalışması azalır. +80~+90°C de çalışması durur, kaynama derecesinde tamamen harap olurlar. Kuru halde +150~+160 °C sıcaklığa kadar dayanırlar, bu sıcaklığın üzerinde harap olurlar.

### 2.2.5 Gıda Maddelerine Soğukun Etkisi

Soğuk ne kadar etkili olursa olsun, diastazları harap etmez. 0 °C de çalışması azalır. Kısa süre saklanacak etler 0 °C-+1°C lik depolara konur.

Uzun süre saklanacak etler ise -30 °C seri halde dondurulup -20 °C'lik soğuk depolarda saklanır.

## 2.3 SOĞUTMA USULLERİ

Gıda maddeleri fiziksel ve kimyasal usullerle kısa süre ve uzun süreli olarak muhafaza edilebilir.

### 2.3.1 Kimyasal Yöntemler

Normal sıcaklıkta bazı maddeler, birbirleri ile çeşitli oranlarda karıştırıldığında, kendi sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklar oluşur. Seyyar dondurmacıların metodu bu usule örnek olarak gösterilebilir. Aşağıdaki cetvel ağırlık olarak karıştırılan bazı kimyasal maddelerin ilk ve son sıcaklıkları göstermektedir.

Karıştırılan maddeler (Ağırlık olarak)	İlk sıcaklık derecesi	Son sıcaklık derecesi
2 birim kar + 1 birim N <sub>a</sub> Cl	0 °C	-20 °C
3 birim kar + 2 birim H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0 °C	-30 °C
3 birim kar + 4 birim KOH	0 °C	-46 °C
4 birim kar + 5 birim CaCl	0 °C	-40 °C

Tablo 2.1 Çeşitli maddelerin salamura sıcaklıkları.

### 2.3.2 Fiziksel Yöntemler

Fiziksel usullerde, dış ve iç kuvvetlere iş yaptırarak, ısıyı başka bir enerji şekline dönüştürmek yoluyla soğutma sağlanır. Bugünkü soğutma makinalarının, esas çalışma prensibi fiziksel yöntemlere dayanmaktadır. Bu yöntemler:

#### Sıkıştırılmış gazların genişletilmesiyle soğukluk elde etmek:

Bu metoda pnömatik çekiçler örnek olarak gösterilebilir. Pnömatik çekiç fazla çalıştığında etrafı buz tutar. Bütan gaz ocaklarında brülör fazla yanarsa karlanır.

#### Maddenin halini değiştirerek soğukluk elde etmek:

Bir cisim katı halden sıvı hale, sıvı halden gaz haline geçmesi ile soğukluk elde edilir. Bunların içinde buhar halindeki soğutucu akışkanı kızgın buhar haline getirip sonra sıvı daha sonra gaz haline getirerek soğukluk elde edilmesi bugünkü soğutma makinalarının temel prensibini oluşturur.

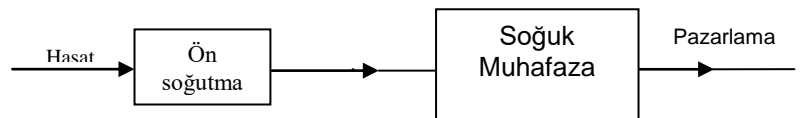
## 2.4 GIDA MADDELERİNİN MUHAFAZA USULLERİ

Gıda maddesinin cinsine ve saklama sürelerine göre gıda maddeleri aşağıda açıklanan usullerle muhafaza edilebilir.

### 2.4.1 Soğuk Muhafaza

Kısa müddetli muhafazalar için soğuk muhafaza usulü uygulanır. Gıda maddelerinin özelliği ve muhafaza sürelerine göre bir soğuk muhafaza deposunun sıcaklığı ± 0°C ~ +15°C arasında değişir.

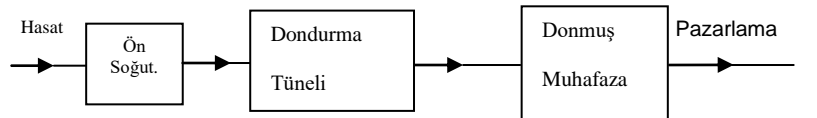
Herhangi bir gıda maddesi bir soğuk muhafaza odasına alınmadan önce ön soğutma odasına alınır. Bu ön soğutma odasında o gıda maddesinin sıcaklığı en fazla 24 saat içinde soğuk muhafaza sıcaklığına getirilerek soğuk muhafaza odasına alınır.



### 2.4.2 Donmuş Muhafaza

Uzun müddetli muhafazalar için donmuş muhafaza usulü uygulanır. Gıda maddelerinin özelliği ve muhafaza müddetlerine göre donmuş muhafaza deposunun sıcaklığı -12~-25 °C arasında değişir.

Herhangi bir gıda maddesinin donmuş muhafaza odasına alınmadan önce ön soğutma odasına alınır. Ön soğutma odasına gıda maddesi en fazla 24 saat içinde 0 °C'ye kadar soğutulur, daha sonra gıda maddesi dondurma tüneline alınır. Dondurma tüneline en fazla 48 saat içinde -18 °C veya -35 °C'ye kadar dondurulur. Muhafaza müddetine göre sıcaklığı belirlenmiş olan gıda maddesi donmuş muhafaza odasına alınır.



### 3. ISI VE SICAKLIK

#### 3.1 ISI

Isı bir enerji çeşididir. Isı enerjisi maddeleri meydana getiren moleküllerin hareket etmelerinden dolayı açığa çıkan enerjidir. Bir cismin ısısı, moleküllerinin hareket enerjisi ile oluşur. Diğer bir deyişle ısı bir moleküler harekettir. Katı bir maddeye ısı ilave edildiği sürece sıcaklığı artmaya devam eder, taki sıvı hale dönmeye başlayıncaya kadar. Madde tamamen sıvı hale dönüşüncüye kadar sıcaklık artmaz. Sıvı haldeki maddeye ısı verilmeye devam edilirse sıcaklık kaynama noktasına kadar artacaktır.

**Isı miktarı:** Soğutmacılıkta Kcal, BTU ve Joule birimleri ile ısı miktarları belirlenmektedir.

**Kcal:** +14,5 °C deki 1 kg suyun sıcaklığını 1 °C artırmak için ilave edilmesi gereken ısı miktarıdır.

**BTU:** 1 libre ağırlığındaki suyun sıcaklığını 1 °F yükseltmek için ilave edilmesi gereken ısı miktarıdır.

1 Joule = 0,24 Cal

1 BTU = 0,252 Kcal

1 Kcal = 3,96 BTU

#### 3.2 SICAKLIK

Sıcaklık ısıнын bir göstergesidir. Isı alıp veren cisimlerin üzerindeki sıcaklık değişimini değerlendirmek için kullanılan bir kavramdır. Cisimlerin sıcaklığı hakkında karar verirken vücut sıcaklığını referans kabul ederiz.

Sıcaklık ve ısı birbirine bağlı fakat farklı kavramlardır. Maddenin sıcaklığı yalnız başına ısı miktarını belirtebilir.

##### 3.2.1 Mutlak Sıcaklık

Fizikte düşük sıcaklıklar 0 °C den daha aşağıdadır. Sıcaklığın 1 °C düşmesine karşılık termometredeki gazın basıncı 0 °C'de sahip olduğu değerin 1/273,15' i kadar eksilir. O halde sıcaklık 0 °C 'den itibaren -273,15 °C 'den daha fazla azalamaz. Çünkü -273,15 °C sıcaklıkta gazın basıncının sıfır olması gerekir. -273,15 °C sıcaklıkları mutlak sıfır olarak almak uygun olur.



Şekil 3.1

Yukarıdaki kapların birine 1 litre, diğerine 2 litre su doldurarak kapların altına aynı özellikte iki bek koyup aynı anda ısıtmaya başlayalım. 1 numaralı kaptaki suyun sıcaklığı, 2 numaralı kaptaki su kaynamaya başladıktan sonra kaplardaki su sıcaklıkları eşit olacaktır. Kaplardaki su sıcaklıkları aynı olmasına rağmen 2 numaralı kapta daha fazla ısı enerjisi vardır.

Sadece maddenin sıcaklığı ile o maddenin sahip olduğu ısı miktarı belirlenemez.

Mesela 1000 °C 1 kg demirin ısısı, 100 °C deki 20 kg demirden daha azdır, fakat birincisi daha sıcaktır.

Sıvılar kaynamaya başladığı zaman sıcaklıkları yükselmez. Fakat kap içindeki suyun tamamı buhar haline getirilirse sıcaklığı kızgın buhar şeklinde yükseltilebilir. Eğer sıvı halde suyun sıcaklığı yükseltmek istenirse, sıvının kaynamasını önlemek için sıvı yüzeyine basınç uygulayarak sıcaklık yükseltilebilir.

##### 3.2.2 Isı Enerjisinin Cisimler Üzerindeki Etkileri

Isı enerjisi cisimler üzerinde bir takım değişikliklere yol açmaktadır. Bu değişiklikler cismin özellikleri hakkında bilgi verdiği gibi cismin halini değiştirmekte ters işlem yapıldığında, ise eski haline dönüşmekte veya dönüştürememektedir.

#### 1. Boyut değişimi

Katı, sıvı ve gazlar ısıtıldıklarında genişirler.

#### 2. Hal değişimi

Isı enerjisi cisimlerin halini değiştiren bir enerjidir.

Buz ısıtıldığında erir ve suya dönüşür. Isı verilmeye devam edilirse kaynar ve buhar olur.

Tam tersi yapıldığında, buhar soğutulduğunda su olur. Su soğutulduğunda ise buz haline döner. Görüldüğü gibi aynı madde ısı tesiri ile hem gaz, hem sıvı hem de katı hale dönüşmektedir.

#### 3. Kimyasal yapı değişimi

Bir miktar şeker ısıtıldığında rengi önce kahverengi daha sonra siyaha dönüşür. Bu işlemin tersi yapıldığında ise şeker eski haline dönemez, çünkü şekerin kimyasal yapısı değişmiştir.

#### 4. Renk değişimi

Bir elik parçası ısıtıldığında rengi önce koyu kırmızı, sonra kiraz kırmızısı, sonra sarı, en son beyaz renge dönüşür. Metaldeki bu renk değişimi metalindeki sıcaklığı hakkında bize bilgi verir.

#### 5. Elektrik etkisi

Birbirinden farklı iki metal telin (bakır ve demir gibi) uçları birleştirilip, o noktada ısıtıldıklarında düşük miktarda elektrik akımı oluşur. Akım değeri galvanometre ile ölçülerek sıcaklık hakkında bilgi sahibi olunur.

### 3.3 SICAKLIK ALGILAYICILAR (Termometreler)

Cisimlerin veya ortamın sıcaklığını hissedenden ölçü aletleridir. Termometrelerin yapımında ısı enerjisinin cisimler üzerindeki bazı tesirlerinden istifade edilir.

- Isı tesiri ile cisimlerin boyut değişimi
- Isı tesiri ile cisimlerin elektriksel direncinin değişimi
- Isı tesiri ile cisimlerin renklerinin değişimi.

#### 3.3.1 Termometre eřitleri

##### Cam tüpte akışkanlı termometreler

Bu termometreler sıcaklık ölçülmesinde geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu tip termometrelerin yapısı basit ve maliyeti ucuzdur. Akışkan olarak cam tüp içinde renkli alkol veya civa kullanılır.

**Çalışma prensibi:** Genelde sıvı maddeler ısının artmasıyla katılardan daha fazla genleşirler. Cam tüpte civa bulunan bir termometrede sıcaklık yükselmesi ile civanın hacmi cam tüpün hacminden daha fazla genleşecektir. Cam tüpte akışkanlı termometrelerde ince kılcal bir borunun alt kısmında civanın asıl toplandığı hazne üst kısmında ise küçük emniyet haznesi olup bunların arasındaki kısım homojen silindirik yapıdadır.

##### Metalik Dirençli Termometreler

Metallerin çoğunun artan sıcaklıkla elektrik direnci de artar. Metallerin bu özelliğinden dolayı hassas sıcaklık ölçümlerinde kullanılır. Herhangi bir metalin direnç sıcaklık katsayısı  $\alpha$  ile gösterilir. Bu değer sıcaklıkla değişmekte olup, malzemenin sıcaklığının artmasında her dereceye karşılık gelen direnç değişimidir.  $R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$

##### Thermocouples (Termokaplı)

Farklı iki metalin birleşme noktasında ısıtıldıklarında artan sıcaklığa bağlı olarak elektriksel bir potansiyel farkı oluşur. Devrenin tamamlanması için metallerin diğer boştaki iki uçları da birleştirildiğinde devreden bir miktar akım geçer. Bu kaide termokapıların önemli bir özelliğidir.

Bu tip devreye bir galvanometre yerleştirildiğinde iki nokta arasındaki sıcaklık farkından dolayı meydana gelen akımı gösterecektir

Termokapıların kullanım avantajları:

- Çok basit bir yapısı vardır.
- Çok küçük ve sağlam yapılıdır.
- Uzun müddet kullanılabilir.
- Zarar gören parçaları deęiřtirilebilir.
- Uzaktan kontrol durumları için idealdir.
- Otomatik sisteme baęlanabilir.
- Kısa zaman içinde sıcaklık ölçümü verir.

#### 3.3.2 Pirometreler

Termometrelerin sıcaklık ölçülecek bölge ile direkt temas halinde bulunma zorunluluğu yüksek sıcaklıklarda kullanımı sınırlamaktadır.

Pirometreler yüksek sıcaklıklarda kullanılan sıcak kaynaktan yayılan radyasyona göre ölçüm yapan bir sıcaklık ölçüm cihazıdır.

Pirometreler ısı kaynağından uygun uzaklığa konup ölçüm yapabildiğinden çok emniyetli ve kullanımı rahattır. Yüksek fırının içerisindeki ergimiş metalin sıcaklığının ölçülmesinde pirometreler rahatlıkla kullanılabilir.

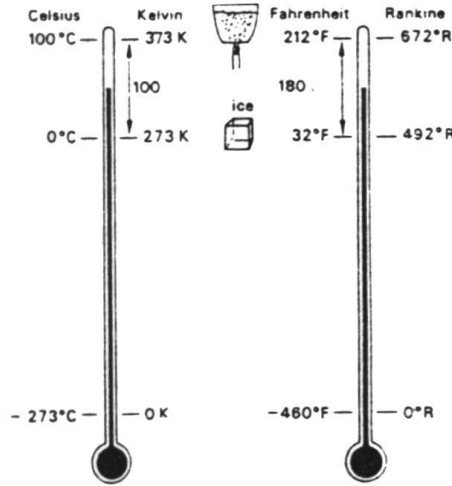
#### Renk ve sıcaklık

Sıcak bir metalin rengi sıcaklığı ile anlaşılabilir.

Renk	Sıcaklık °C
Mat kırmızı	700
Kiraz kırmızı	900
Portakal kırmızı	1000
Sarı	1100
Beyaz	1300

### 3.4 BİR TERMOMETRENİN SKALASININ BELİRLENMESİ

Bir termometre tüpünün ölçümlendirilmesi için iki sabit nokta alınır, Bunlardan biri en düşük, diğeri en yüksek noktadır.



Şekil 3.2 Sıcaklık ölçeklerinin karşılaştırılması.

### 3.4.1 Celcius Termometresinde

Suyun donma noktası olan 0 °C en düşük nokta.

Suyun kaynama noktası olan 100 °C en yüksek nokta olarak alınır.

Aradaki mesafe 100 eşit parçaya bölünür.

### 3.4.2 Kelvin Termometresi

SI sisteminde kullandığımız Kelvin Termometresinde ise;

Suyun donma noktası 273 °K, suyun kaynama noktası 373 °K alınmış olup aradaki mesafe 100 eşit parçaya bölünmüştür. 1 °C = 1 °K

$$\text{Kelvin} = \text{Celcius} + 273$$

$$0 \text{ °K} = -273 \text{ °C}, \quad +273 \text{ °K} = 0 \text{ °C}$$

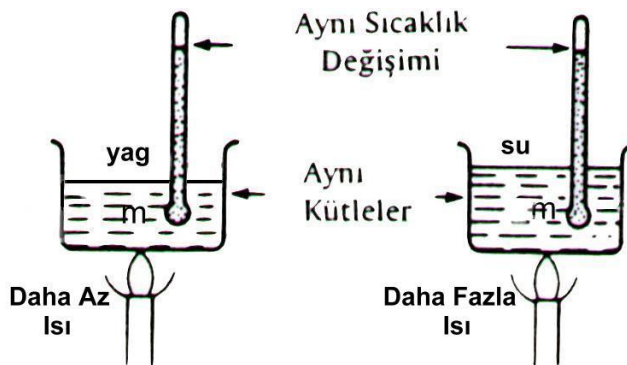
### 3.4.3 Fahrenheit Termometresi

Fahrenheit skalda suyun donma noktası 32 °F, kaynama noktası 212 °F sıcaklıkları arasında 180 eşit parçaya bölerek her bir aralık için 1 °F alınarak belirlenmiştir.

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32), \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32$$

$$T_C = \frac{T_{Ra} - 492}{1,98} = \frac{T_{Rc}}{0,8}$$

## 3.5 ISI MİKTARI VE CİSİMLERİN ÖZGÜL ISI KAPASİTELERİ



Şekil 3.3 Isı miktarı ve cisimlerin özgül ısı kapasitelerinin bir deney düzeneği ile gösterilmesi.

Şekil 3.3'te kütleleri aynı,  $t_1$  sıcaklığında yağ ve suyu izole ile edilmiş kaplarda aynı sıcaklığa ulaştırmak için suya daha fazla ısı vermek gerekecektir.

Bu da gösterir ki su, yağa nispeten daha fazla ısı emme kapasitesine sahiptir.

Isı miktarı maddenin kütlesi, ısınma ısısı ve sıcaklıktaki değişimin çarpılmasıyla hesaplanır.

Q değerinin (-) çıkması maddeden ısı çekildiğini gösterir.

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

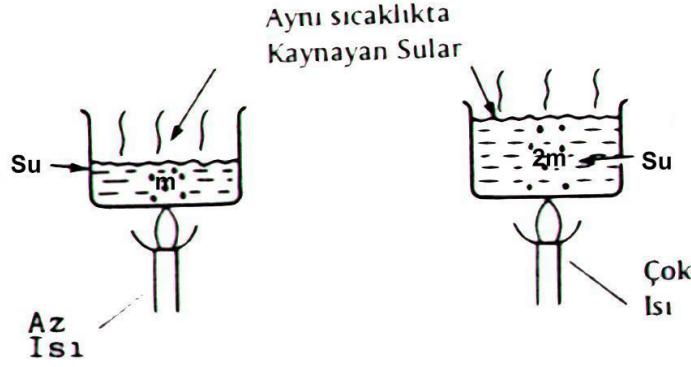
Q = Gereken ısı miktarı (Jule)

m = Cisim kütlesi (kg)

c = Cismin özgül ısı kapasitesi (J/kg °K veya J/kg °C)

t<sub>1</sub> = İlk sıcaklık (°K veya °C)

t<sub>2</sub> = Son sıcaklık (°K veya °C)



Şekil 3.4 Isı miktarı ve cisimlerin özgül ısı kapasitelerinin bir deney düzeneği ile gösterilmesi.

Şekil 3.4'te kütleleri farklı iki türdeş sıvıyı izole edilmiş. Kaplara aynı sıcaklığa ulaştırmak için 2m kütleli sıvı daha fazla ısı vermek gerekecektir.

### 3.5.1 Özgül Isı (Isınma ısısı)

1 kg kütledeki bir cismin sıcaklığını 1 °C veya 1°K artırmak için gerekli ısı miktarıdır. Basınç, hacim ve sıcaklık şartlarına göre değişir. Bundan dolayı ısı hesaplamalarında basınç veya hacimden biri sabit tutularak C<sub>v</sub> (sabit hacim), C<sub>p</sub> (sabit basınç) sembolleriyle ifade edilir. Akışkanlarda sıcaklık farkı olması durumunda özgül ısı tablolardan bulunur. Tüm cisimlerin değişen sıcaklık değerlerine göre özgül ısı kapasiteleri bir miktar değişir.

0 °C' de suyun özgül ısı kapasitesi 4217 J/kg °C

20 °C' de suyun özgül ısı kapasitesi 4182 J/kg °C

Genel olarak problemlerde su için ısınma ısısı 4200 J/kg°C alınır.

Madde	Özgül ısı kapasitesi J/kg °K
Alüminyum	950
Bakır	385
Cıva	139,3
Çelik	450-480
Ahşap	1800
Kum	800

Tablo 3.1 Bazı maddelerin özgül ısı kapasiteleri

### Örnek Problem 3.1

20 °C deki sıcaklıkta 2 kg ve 5 kg suyun 100 °C sıcaklığa ulaştırmak için gereken ısı miktarını bulunuz?

#### Çözüm

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q_1 = m_1 \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q_1 = 2 \cdot 4200 \cdot (100 - 20) = 672000 \text{ j}$$

$$Q_2 = m_2 \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

$$Q_2 = 5 \cdot 4200 \cdot (100 - 20) = 1680000 \text{ j}$$

### Örnek Problem 3.2

5000 gr kütledeki alüminyum bloğun sıcaklığı 120 °C' den 15 °C'ye düşürülmektedir. Alüminyumdan çekilen ısı miktarını bulunuz.



**Çözüm**

$$C_{al} = 950 \text{ j /kg } ^\circ\text{C}$$

$$m = 5000 \text{ gr} = 5 \text{ kg}$$

$$Q = m c_{al} (t_2 - t_1)$$

$$Q = 5 \cdot 950 (15 - 120)$$

$$Q = - 498750 \text{ j} = - 498750/1000 = 498,750 \text{ kJ}$$

Sonucun eksi çıkması sistemden ısı çekildiğini gösterir.

**Örnek Problem 3.3**

1200 kg kütledeki bir cismin sıcaklığı 20 °C'den 220 °C'ye çıkarılması için 120.000 kJ ısı enerjisi harcanmaktadır, ısı kayıplarını ihmal ederek cismin özgül ısı kapasitesini bulunuz.

**Çözüm**

$$Q = m c_x (t_2 - t_1)$$

$$C_x = \frac{Q}{m (t_2 - t_1)} = \frac{120,000}{1200 (220 - 20)} = 0,5 \text{ kJ /kg}^\circ\text{C}$$

**Örnek Problem 3.4**

Kütleleri 5'er kg olan etil alkol ve suyun sıcaklığı 30 °C 'dir. Bu iki sıvı maddenin sıcaklığı 60 °C 'ye çıkarmak gereken ısı miktarını bulunuz?

**Çözüm**

$$Q_{su} = m_{su} \cdot c_{su} (t_2 - t_1)$$

$$Q_{su} = 5 \cdot 4200 (60 - 30) = 630000 \text{ j}$$

$$Q_{etil \text{ alkol}} = m_{etil \text{ alkol}} \cdot c_{etil \text{ alkol}} (t_2 - t_1)$$

$$Q_{etil \text{ alkol}} = 5 \cdot 2400 (60 - 30) = 360000 \text{ j}$$

Bu problemin sonucundan şu sonuca varabiliriz: aynı sıcaklıkta aynı kütledeki akışkanların istenilen sıcaklığa getirmek için verilen ısı miktarı özgül ısı kapasitelerine göre değişmekte yani ısınma ısısı fazla olan su etil alkole göre aynı sıcaklığa getirmek için daha fazla enerjiye sahip olur.

**3.6 ISI VE SICAKLIK DENGESİ**

Farklı sıcaklıkta iki madde aynı ortamda karıştırıldıklarında iki cisim sıcaklıkları aynı oluncaya kadar ısı nakli devam eder.

Bu işlemde de kimyasal reaksiyonun ve dışarıya ısı iletiminin önlenmesi gereklidir.

Sıcak cismin verdiği ısı = Soğuk cismin aldığı ısı

$$Q_1 = Q_2 \quad m c_1 \Delta t = m c_2 \Delta t$$

Cisimler ikiden fazlada olsa aynı kural geçerlidir.

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots \dots \dots Q_n$$

**Örnek Problem 3.5**

0,05 kg kütlede 100°C sıcaklıktaki bir metal 20 °C, 0,2 kg'lık suyun içine atılmaktadır. Karşımın son sıcaklığı 25°C olup dışarıya olan ısı kaybı ihmal edilmektedir. Metal malzemenin özgül ısı kapasitesini hesaplayınız?

**Çözüm**

$$m_{metal} = 0,05 \text{ kg}$$

$$m_{su} = 0,02 \text{ kg}$$

$$c_{metal} = ?$$

$$\Delta t = 75^\circ\text{C}$$

Metal tarafından kaybedilen ısı;

$$Q_1 = m_{metal} \cdot c_{metal} \cdot 75 = 0,05 \cdot c \cdot 75$$

Su tarafından kazanılan ısı;

$$Q_2 = m_{su} \cdot c_{su} (25 - 20) = 0,2 \cdot 4200 \cdot 5 = 4200 \text{ j}$$

Kaybedilen ısı = Kazanılan ısı

$$75 \cdot 0,05 \cdot c = 4200 \quad c = 1120 \text{ j/kg}^\circ\text{K veya j/kg}^\circ\text{C}$$

**Örnek Problem 3.6**

Sıcaklığı bilinmeyen çelik kütlesi 15 kg ısınma ısısı  $c = 0,635 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$  olup, bu parça 15 °C sıcaklıkta, 50 kg kütlede ve ısınma ısısı  $2,01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$  olan yağ banyosuna atılmaktadır. Banyonun son sıcaklığı 60 °C olduğuna göre, çelik

parçanın ilk sıcaklığını bulunuz?

### Çözüm

Yağ banyosu  $Q_1 = m_{\text{yağ}} c_{\text{yağ}} (t_1 - t_2)$  ısısını alır.

Çelik malzeme  $Q_2 = m_{\text{çelik}} c_{\text{çelik}} (t_1 - t_2)$  ısısını verir.

Alınan ısı = Verilen ısı

$$Q_1 = Q_2$$

$$m_{\text{yağ}} c_{\text{yağ}} (t_1 - t_2) = m_{\text{çelik}} c_{\text{çelik}} (t_1 - t_2)$$

$$50 \cdot 2,01 (60 - 15) = 15 \cdot 0,6 (t_2 - 60)$$

$$t_2 = 535 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Örnek Problem 3.7

20 °C'de 500 gr suyun sıcaklığını 80 °C'ye çıkarmak için, sıcaklığı 150 °C olan bakırdan kaç gram suyun içerisine atılması gerekir? (Bakırın özgül ısı = 390 J/kg°C)

### Çözüm

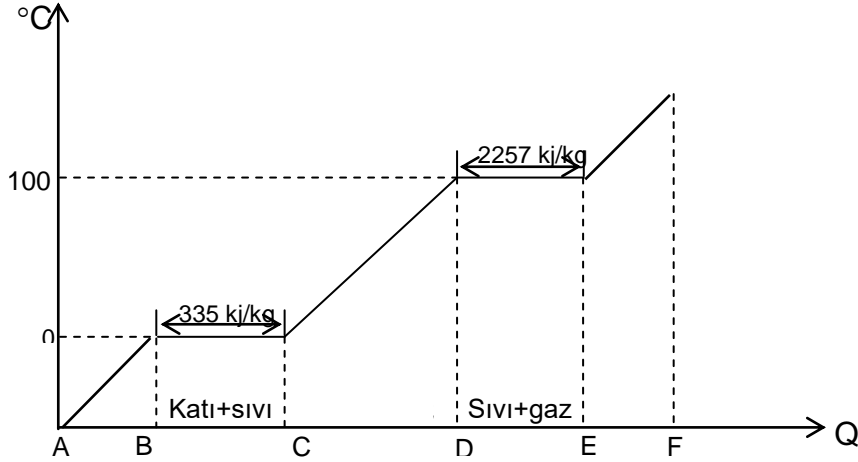
Alınan ısı = Verilen ısı

$$m_{\text{su}} \cdot c_{\text{su}} (t_2 - t_1) = m_{\text{cu}} \cdot c_{\text{cu}} (150 - 80)$$

$$0,5 \cdot 4,200 (80 - 20) = m_{\text{cu}} 0,390 (150 - 80)$$

$$m_{\text{cu}} = \frac{0,5 \cdot 4,200 \cdot 60}{0,390 \cdot 70} = 4,615 \text{ kg}$$

### 3.7 ERGİME ISISI, BUHARLAŞMA ISISI, DUYULUR ISI VE GİZLİ ISI KAVRAMLARININ SICAKLIK - ENTALPİ DİYAGRAMI ÜZERİNDE GÖSTERİLMESİ



Diyagram 3.1 Suyun sıcaklık toplu ısı diyagramı

### 3.8 ERGİME ISISI

Katı bir cisme ısı enerjisi verildiğinde cismin sıcaklığının artmayıp sıvı hale geçmesi için verilen ısı miktarına ergime ısısı denir. Her katı cisim için bu değer farklıdır. Ayırt edici bir özelliktir.

Diyagram 3.1'de B-C bölgesinde verilen ısı buz için ergime ısısıdır. Buz için ergime ısısı 335 kJ/kg'dır. Bu değer buzun 0 °C'de tamamen buz haline gelmesi için verilen ısı miktarıdır. B-C bölgesinde cismin sıcaklığının hep aynı olduğu görülmektedir.  $Q = m \cdot L_E \rightarrow Q = m(\text{kg})L_E (\text{kJ/kg}) = \text{kJ}$

### 3.9 BUHARLAŞMA ISISI

Sıvı bir cisme ısı enerjisi verildiğinde, cismin sıcaklığının artmayıp, cismin sıvı halden buhar haline geçmesi için verilen ısı miktarıdır. Her sıvı cisim için buharlaşma ısısı farklıdır. Su için buharlaşma ısısı: 2257 kJ/kg'dır.

Diyagram 3.1'de D bölgesinde kaynamakta olan suya tamamen buharlaşabilmesi için E noktasına kadar ısı verilmesi gerekir. D-E bölgesinde sıvının sıcaklığının artmadığı görülmektedir. Verilen ısı enerjisi suyun tamamının buharlaştırılmasına harcanmaktadır.

$$Q = m \cdot L_B, Q = m(\text{kg})L_B (\text{kJ/kg}) = \text{kJ}$$

### 3.10 DUYULUR ISI

Herhangi bir maddeye verilen veya o maddeden çekilen ısı, bir sıcaklık farkı meydana getiriyorsa bu ısı enerjisine “**duyulur veya hissedilir ısı**” diyoruz. Başka bir deyişle, bir sıcaklık farkı oluşturan ve açıkça hissedilen bu ısıya duyulur ısı diyoruz.

Diyagram 3.1’de A-B, C-D ve E-F bölgesi duyulur ısı bölgelerini göstermekte yani verilen ısı enerjisi sıcaklığı artırmıştır.

### 3.11 GİZLİ ISI

Herhangi bir maddeye verilen veya o maddeden çekilen ısı, maddenin halini değiştirip sıcaklığında değişme oluşturmuyorsa bu ısı enerjisine “**gizli ısı**” diyoruz.

Diyagram 3.1’de B-C ve D-E bölgeleri gizli ısı bölgelerini göstermektedir. Verilen ısı enerjisi maddenin sıcaklığını değiştirmeyip halini değiştirmiştir. B noktasındaki buz kütesine ısı verilerek sıcaklığı artmadan C noktasında tamamen su haline, D noktasında atmosfer basıncı altında 100 °C’de kaynayan su E noktasında tamamı buhar haline dönüşmüştür.

#### Örnek Problem 3.8

Atmosfer basıncı altında 20 °C sıcaklığında 20 kg suyu doymuş buhar haline getirmek için verilecek ısı miktarını hesaplayınız?

#### Çözüm

$$Q_1 = m \cdot c_p (t_2 - t_1)$$

$$Q_1 = 20 \cdot 4,18 (100 - 20) = 6688 \text{ kJ}$$

$$Q_2 = m L_b$$

$$Q_2 = 20 \cdot 2257 = 45140 \text{ kJ}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 = 6688 + 45140 = 51828 \text{ kJ}$$

#### Örnek Problem 3.9

-40 °C sıcaklıktaki 150 gr buzun 150°C sıcaklıkta buhar haline gelmesi için gereken ısı miktarını bulunuz?

Buzun ergime ısısı	$L_E = 335 \text{ kJ/kg}$
Suyun buharlaşma ısısı	$L_B = 2257 \text{ kJ /kg}$
Buzun özgül ısı kapasitesi	$C = 2,14 \text{ kJ /kg}$
Buharın özgül ısı kapasitesi	$C = 2,01 \text{ kJ /kg}$
Suyun özgül ısı kapasitesi	$C = 4,19 \text{ kJ /kg}$

#### Çözüm

-40°C sıcaklıkta 150 gr buzun 150 °C sıcaklıkta buhar haline gelmesi için suyun hal değişimi dikkate alınarak 5 kademede hesaplanır:

1. -40 °C buz 0 °C ‘ye çıkarmak için gereken ısı

$$Q = m \cdot c_{\text{buz}} (t_2 - t_1) \quad C = m (\text{kg}) \quad C (\text{kJ/kg}^\circ\text{C}) \Delta t (^\circ\text{C}) = \text{kJ}$$

$$Q_1 = 0,15 \cdot 2,14 (0 - (-40))$$

$$Q_1 = 12,84 \text{ kJ}$$

2. Buzun tamamen ergimesi için gereken ısı ;

$$Q_2 = m \cdot L_E$$

$$Q_2 = 0,15 \cdot 335$$

$$Q_2 = 50,25 \text{ kJ}$$

3. Suyun sıcaklığını 0 °C’den 100 °C çıkarmak için gereken

$$Q_3 = m \cdot c (t_2 - t_1)$$

$$Q_3 = 0,15 \cdot 4,18 (100 - 0)$$

$$Q_3 = 62,85 \text{ kJ}$$

4. Suyun 100 °C’de tamamen buhar haline gelmesi için gereken ısı;

$$Q_4 = m L_B$$

$$Q_4 = 0,15 \cdot 2257$$

$$Q_4 = 338,55 \text{ kJ}$$

5. Buharın 100 °C’den 150 °C çıkması için gereken ısı;

$$Q_5 = m \cdot c (t_2 - t_1) = 0,15 \cdot 2,01 \cdot (150 - 100) = 15,075 \text{ kJ}$$

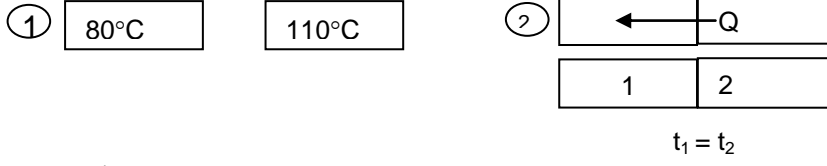
Toplam ısı;

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$= 479,6 \text{ kJ} = 479,6/4,187 = 114,545 \text{ kcal} \quad (1\text{Kcal} = 4,187 \text{ kJ})$$

### 3.12 TERMİK DENGİ

Farklı sıcaklıklarda iki cisim birbirleri ile temas haline getirildiğinde sıcaklığı büyük olan cisim soğur, sıcaklığı düşük olan cisim ısınır, belirli bir süre sonra cisimlerin sıcaklıkları eşit olur. Isı akışı durduğunda sıcaklık düşmesi de olmayacaktır. İki cisim üzerindeki sıcaklıları ölçtüğümüzde sıcaklıklar aynı ise sistem termik dengedir.



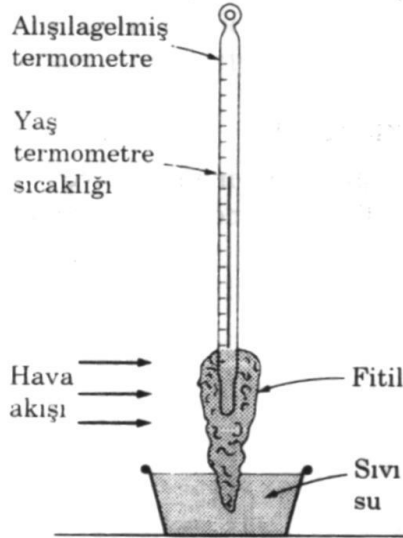
Şekil 3.5 İki cisim arasında termik denge

### 3.13 KURU TERMOMETRE SICAKLIĞI

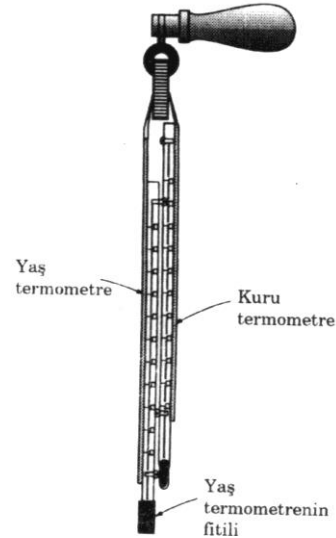
Termometre haznesinin üzerinde kuru veya ıslak bir örtü olmadan yani haznenin ölçüm yapılacak ortam ile direkt temas halinde okunan değerdir.

### 3.14 YAŞ TERMOMETRE SICAKLIĞI

Doymamış hava ıslak fitilin üzerinden geçerken, havanın kuruluk derecesine göre fitilden bir miktar buharlaşma olur. Bunun sonucu olarak suyun (fitilin) sıcaklığı düşer ve havadan suya ısı geçişine neden olan bir sıcaklık farkı oluşur. Bir süre sonra, sudan buharlaşma nedeniyle olan ısı kaybı, sıcaklık farkından dolayı havadan suya olan ısı geçişi eşitlenir ve su bir denge sıcaklığına erişir. Bu denge sıcaklığı yaş termometre sıcaklığıdır. Yaş termometre sıcaklığını ölçerken, termometre üzerindeki hava akışı, ucuna ıslak fitil bağlanmış olan bir termometreyi hızla savurarak sağlanabilir. (Şekil 3.6)'da gösterilen savurmalı psikrometre yaş termometre sıcaklığını ölçen bir cihazdır.



Şekil 3.6-a Yaş termometre sıcaklığı ölçmek için basit bir düzenek.



Şekil 3.6-b Savurmalı yaş termometre

### 3.15 ÇİĞ NOKTASI SICAKLIĞI

Nemli bir iklimde yaşayanlar, yazın sabahları uyandıklarında çimenlerin ıslak olduğunu görürler Gece yağmur yağmamasına rağmen çimenlerin ıslak oluşu havada nemin soğuk yüzeyler üzerinde yoğunlaşması ve çığ adı verilen su örtüsünü oluşturmasıdır. Yaz mevsiminde gündüzleri büyük miktarda buharlaşma olur. Akşamları sıcaklık düşerken, havanın nem tutma kapasitesi, başka bir deyişle içerisinde bulundurabileceği en çok su buharı miktarı da azalır. Bir süre sonra havanın nem tutma kapasitesi, havadaki su buharına eşit olur. Bu noktada hava doymuş haldedir ve bağıl nemi %100'dür. Sıcaklığın biraz daha düşmesiyle su buharının bir bölümü yoğunlaşır ve çığ oluşumu başlar.

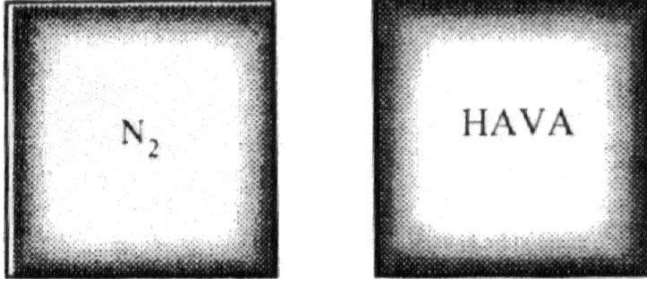
Hava sabit basınçta soğutulduğu zaman yoğunlaşmanın başladığı sıcaklık diye tanımlanabilir.

#### 4. SAF MADDENİN ÖZELLİKLERİ

##### 4.1 SAF MADDE

Her noktasında aynı ve değişmeyen bir kimyasal bileşime sahip olan maddeye saf madde adı verilir. Su, azot, helyum, hidrojen, karbondioksit, saf maddedir.

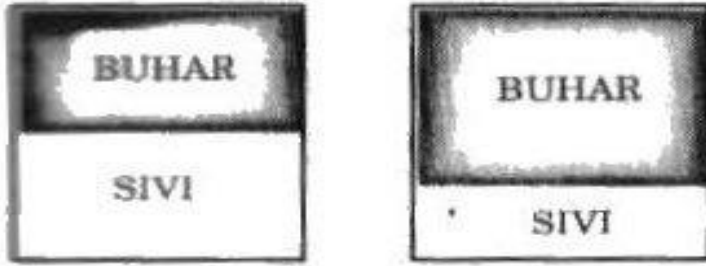
Saf maddenin sadece bir tek kimyasal element veya bileşiminden oluşması gerekmez. Değişik kimyasal elementlerden veya bileşimlerden oluşan bir karışımda, homojen olduğu sürece saf madde kabul edilir. Hava değişik gazlardan oluşan bir karışımdır, kimyasal bileşimi her noktada aynı ve değişmez olduğu için saf maddedir.



Şekil 4.1 Azot ve gaz hava birer saf maddedir.

Su ve yağ karışımı saf bir madde sayılamaz, çünkü böyle bir karışımda yağ, suda çözülmeyp üstte toplandığından homojen bir kimyasal karışım oluşturmazlar.

Saf bir maddenin iki veya daha çok fazının bir arada bulunduğu bir karışımda, fazların kimyasal bileşiminde bir farklılık olmadığı sürece saf madde kapsamına girer. Sıvı buhar karışımı saf bir maddedir, çünkü her iki fazında kimyasal bileşimi aynıdır. Buna karşılık sıvı hava ile gaz havanın oluşturduğu karışım saf madde değildir, çünkü sıvı havanın kimyasal bileşimi gaz havaninkinden farklıdır. Bunun nedeni, havayı oluşturan gazların değişik yoğunlaşma sıcaklıklarına sahip olmalarıdır.

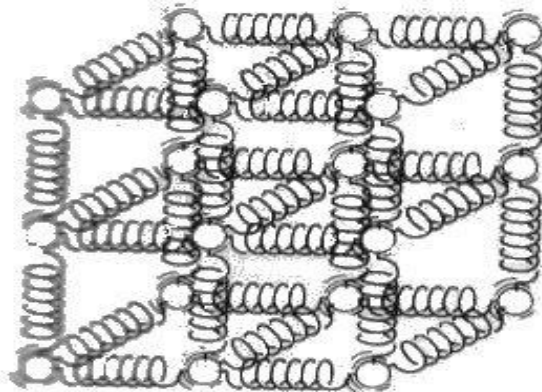


Şekil 4.2 Sıvı buhar karışımı su saf bir maddedir, fakat sıvı ve gaz havanın karışımı saf bir madde değildir.

##### 4.2 SAF MADDENİN FAZLARI

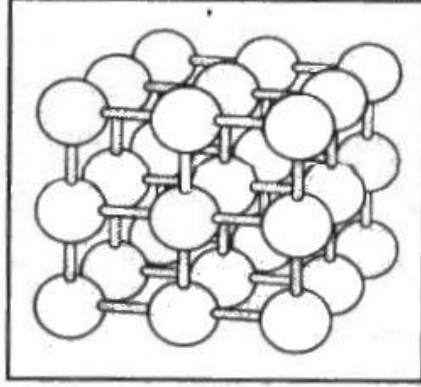
Maddeler değişik şartlarda farklı fazlarda bulunabilir. Oda sıcaklığında ve basıncında bakır katıdır, cıva sıvıdır, azot ise gazdır. Temelde katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç grup faz vardır. Fakat her temel faz içinde farklı molekül düzenine sahip başka fazlarda olabilir. Örnek olarak karbon, katı fazı içinde grafit veya elmas fazlarında bulunabilir. Yüksek basınçlarda buz yedi değişik fazda bulunabilir. Faz, fiziksel olarak belirgin sınırların içinde her noktada aynı olan belirli bir molekül düzenini simgeler. Buzlu su, suyun iki fazını açıklayıcı iyi bir örnektir.

Katı fazında moleküller latis adı verilen ve kendini tekrarlayan üç boyutlu bir düzende yer almaktadır.



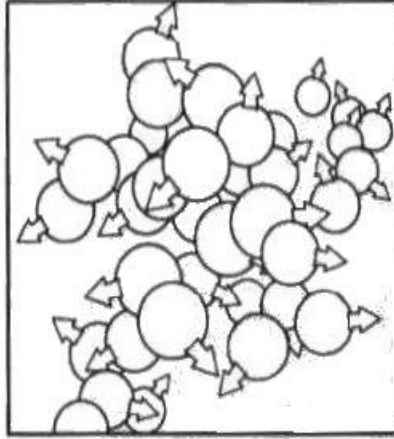
Şekil 4.3 Katı bir cismi oluşturan molekülleri, yay benzeri moleküller arası kuvvetlerle yerlerinde tutulurlar.

Katı cisim içindeki moleküller birbirlerine yakın olduklarından, onları birbirine çeken kuvvetler güçlüdür ve bu nedenle yerlerinde sabit kalırlar. Katı bir cisimdeki moleküller her ne kadar yerlerinde kalsalar da, buldukları yerde sürekli olarak titreşirler. Bu titreşim sırasında moleküllerin hızları sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık yeterince arttığı zaman molekülleri burada tutan kuvvetlere üstünlük sağlayarak molekül kümeleri ayrılmaya başlar. Bu nokta erimenin başladığı andır.



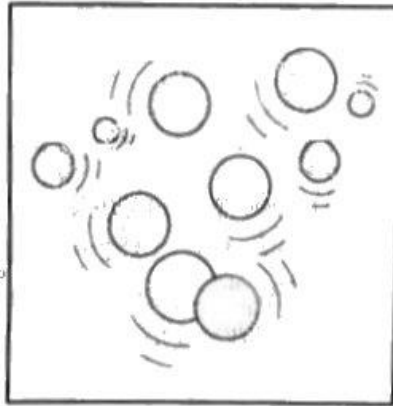
Şekil 4.4 Katı fazında moleküller yerlerinde hemen hemen sabittir.

Sıvı fazında moleküllerin arasındaki mesafe katı fazına oranla çok fazla değildir, fakat moleküller artık yerlerinde sabit kalmak yerine kümeler halinde birbirlerinin üzerinde kayarlar. Bununla birlikte, her küme içindeki yapısal düzen bozulmaz ve moleküller birbirlerine göre yerlerini korurlar.



Şekil 4.5 Sıvı fazında molekül kümeleri birbiri üzerinden akar.

Gaz fazında moleküller birbirlerinden iyice uzaklaşmışlardır. Yapısal bir düzenden söz edilmez. Gaz molekülleri rastgele bir hareket içindedir ve sürekli olarak birbirleriyle ve içinde buldukları kabın cidarlarıyla çarpışırlar. Gaz fazındaki moleküllerin enerji düzeyleri sıvı ve katı fazlardakine oranla oldukça yüksektir. Bu nedenle gaz yoğunlaşırken veya donarken çevreye büyük miktarlarda enerji vermek durumundadır.



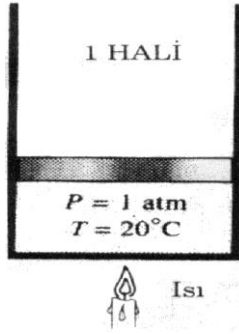
Şekil 4.6 Gaz fazında molekülleri rastgele bir hareket içindedir.

### 4.3 SAF MADDELERİN FAZ DEĞİŞTİRDİKLERİ HAL DEĞİŞİMLERİ

Saf maddenin iki fazının bir arada bulunduğu durumlarla sık karşılaşılır. Su bir kazanda veya buharlı güç santralinin yoğuşturucusunda sıvı buhar karışımı olarak bulunur. Buzdolabının soğutucusunda soğutucu akışkan, sıvıdan buhara dönüşür.

#### 4.3.1 Sıkıştırılmış Sıvı

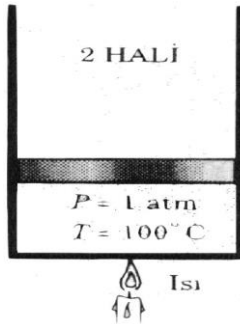
İçinde 20 °C sıcaklık ve 1 atm basınçta bulunan su bulunan bir piston-silindir düzeneği ele alalım (Şekil 4.7). Bu şartlarda su sıvı fazındadır ve sıkıştırılmış sıvı diye adlandırılır. Bu terimler suyun henüz buharlaşma aşamasına gelmediğini gösterir. Suyu ısıtmayı 40 °C olana dek sürdürelim. Bu işlem sırasında su çok az genişler özgül hacmi artar. Bu genişleme sırasında basıncı 1atm'de sabit kalmaktadır, çünkü atmosfer basıncı ve piston ağırlığı değişmemektedir. Bu şartlarda su sıkıştırılmış sıvı halindedir, çünkü buharlaşma henüz başlamamıştır.



Şekil 4.7 1 atm basınç ve 20°C sıcaklıkta su sıvı fazındadır. (Sıkıştırılmış sıvı)

#### 4.3.2 Doymuş Sıvı

Suyun ısıtılması sürdürülürse sıcaklıktaki artış 100 °C olana kadar sürecektir. (Şekil 4.8). Bu noktada su hala sıvıdır, fakat bu noktadan sonra en ufak ısı geçişi bile bir miktar sıvının buhara dönüşmesine yol açacaktır. Başka bir deyişle faz değişimi başlamak üzeredir. Buharlaşma başlangıcı olan bu hal, doymuş sıvı hali olarak bilinir. Bu nedenle 2 hali doymuş sıvı halidir.

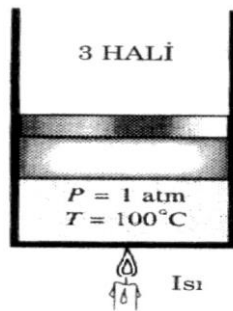


Şekil 4.8 1 atm basınç ve 100 °C sıcaklıkta su buharlaşma basıncında sıvıdır (Doymuş sıvıdır.)

#### 4.3.3 Doymuş Buhar

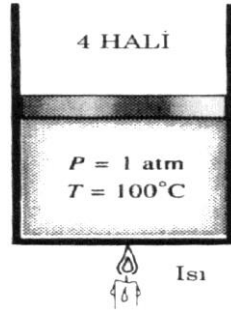
Buharlaşma başladıktan sonra, sıvının tümü buhara dönüşene kadar sıcaklıkta bir artış olmayacaktır. Başka bir deyişle, faz değişimini kapsayan hal değişiminin tamamı süresince sıcaklık sabit kalacaktır. Bu işlemler sabit basınçta olması gerekir.

Piston silindir düzeneğine geri dönersek, buharlaşma sürecinin ortalarında, silindirin içinde yarı yarıya sıvı ve buhar olacaktır. (Şekil 4.9) 3 hali, ısıtma işlemi sürdürülürse, tüm sıvı buhara dönüşür.



Şekil 4.9 Isıtma sürdürüldüğünde doymuş sıvının bir bölümü buharlaşır. (Doymuş sıvı buhar karışımı).

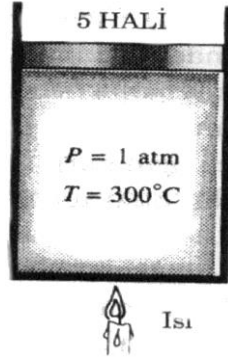
Isıtma işlemi sürdürülürse, tüm sıvı buhara dönüşür. Şekil (4.10.) 4 hali. Bu noktada silindirin içi yoğuşmanın sınırında buharla doludur. Buhardan çevreye azda olsa ısı geçişi bir miktar buharın yoğuşmasına (buhardan sıvıya dönüşmesine) yol açacaktır. Yoğuşmanın sınırında olan bu buhara doymuş buhar adı verilir.



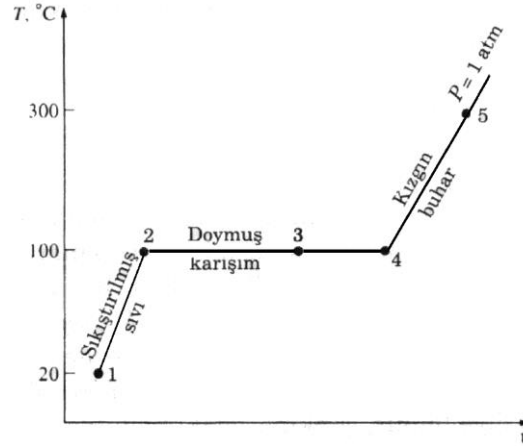
Şekil 4.10 1 atm basınçta, sıvının son damlası da buharlaşana kadar, sıcaklık 100 °C sabit kalır (Doymuş buhar.)

#### 4.3.4 Kızgın Buhar

Silindir içerisindeki suyun 100 °C'de tamamı buharlaştıktan sonra ısıtma işlemi sürdürülürse sıcaklık ve özgül hacminin artışı gözlenecektir. (Şekil 4.11) 5 halinde buharın sıcaklığı örneğin 300 °C olabilir. Bu halde buharın biraz ısı çekersek sıcaklık düşer fakat yoğuşma olmaz. Yoğuşma sınırında olmayan buhara kızgın buhar denir.



Şekil 4.11 Isıtma sürdürülürse, buharın sıcaklığı yükselmeye başlar (Kızgın buhar).



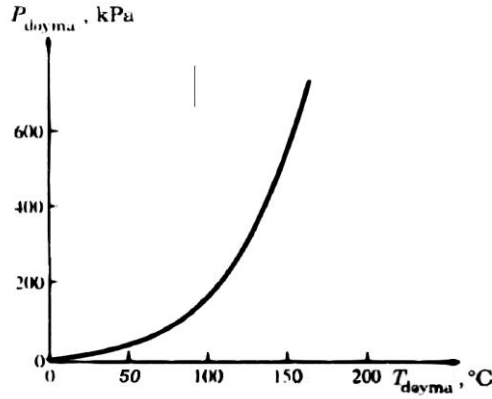
Diyagram 4.1 Suyun sabit basınç altında ısıtılmasının T-V diyagramında gösterilmesi.

#### 4.3.5 Doyma Sıcaklığı ve Doyma Basıncı

Verilen bir basınçta saf maddenin kaynamaya başladığı sıcaklık doyma sıcaklığı  $T_{\text{doyma}}$  olarak tanımlanır. Benzer biçimde, verilen bir sıcaklıkta, saf maddenin kaynamaya başladığı basınç ise doyma basıncı,  $P_{\text{doyma}}$  olarak tanımlanır. 101,35 kpa basınçta suyun doyma sıcaklığı 100 °C'dir. Doğal olarak 100 °C'de suyun doyma sıcaklığı doyma basıncında 101,35 kpa olur.

Açıkça görüldüğü gibi, faz değişiminin gerçekleştiği bir hal değişimi sırasında sıcaklık ve basınç birbirine bağlı özellikleridir.  $T_{\text{doyma}} = f(P_{\text{doyma}})$  olur. Doyma sıcaklığını doyma basıncına göre değişimi veren eğri sıvı-buhar doyma eğrisi diye adlandırılır. Su için bu ilişkiyi gösteren eğri diyagram 4.2'de verilmiştir. Tüm saf maddelerin sıvı-buhar doyma eğrileri buna benzer özellikler gösterir.





Diyagram 4.2 Saf maddenin sıvı buhar doyma eğrisi (sayısal değerler su içindir).

Diyagram 4.2 incelendiğinde, doyma sıcaklığının doyma basıncıyla yükseldiği görülmekte yani basınç arttıkça kaynama noktası sıcaklığı yükselmektedir.

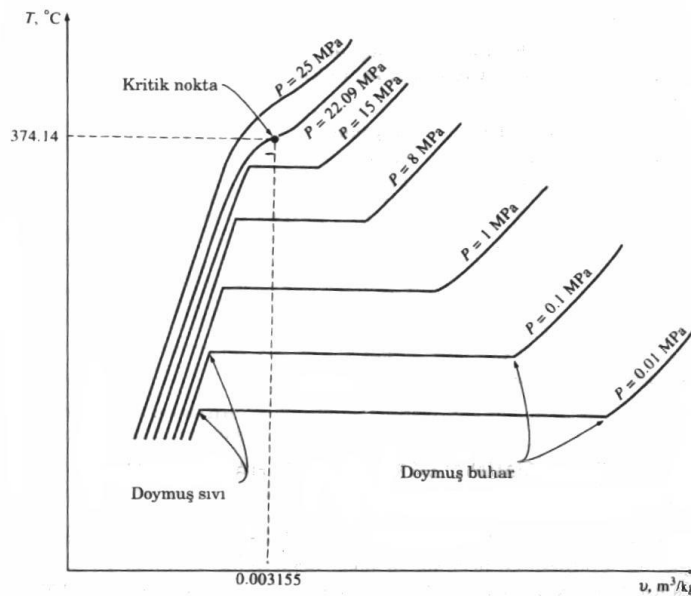
Atmosfer basıncı ve dolayısıyla suyun kaynama sıcaklığı yükseklikle azalır. Bu bakımdan, eğer düdüklü tencere kullanılmıyorsa, yüksek yerlerde yemeklerin pişirme süresi daha uzun olacaktır. Atmosfer basıncının ve suyun kaynama sıcaklığının yükseklikle değişimi çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Her 1000m yükseklik artışı için kaynama sıcaklığı yaklaşık 3 °C düşmektedir.

Yükseklik (m)	Atmosfer basıncı (kPa)	Kaynama sıcaklığı (°C)
0	101.33	100.0
1000	89.55	96.3
2000	79.50	93.2
5000	54.05	83.0
10000	26.50	66.2
20000	5.53	34.5

Çizelge 4.1 Standart atmosfer basıncının ve suyun kaynama (doyma) sıcaklığının yükseklikle değişimi.

#### 4.3.6 Kritik Sıcaklık

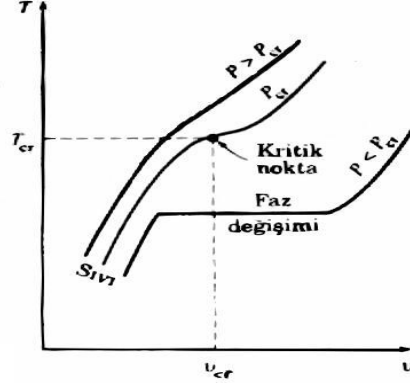
Doymuş sıvıyla doymuş buhar hallerinin aynı olduğu hal olarak tanımlanır. Bir maddenin kritik noktada sahip olduğu sıcaklık, basınç ve özgül hacim değerleri sırasıyla kritik sıcaklık,  $T_{kr}$ , kritik basınç  $P_{kr}$  ve kritik özgül hacim,  $V_{kr}$  diye adlandırılır. Su için kritik nokta değeri  $T_{kr} = 374,14^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{kr} = 22,09 \text{ Mpa}$  ve  $V_{kr} = 0,003155 \text{ m}^3/\text{kg}$  dir.



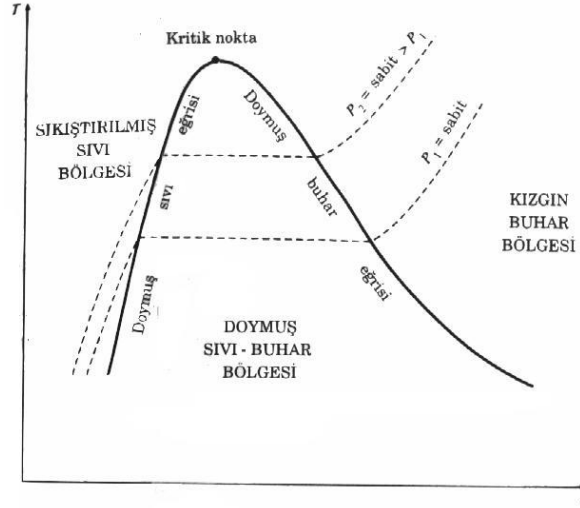
Diyagram 4.3 Farklı basınçlar için saf maddenin faz değişimi eğrilerinin T-V diyagramı (Sayısal değerler su içindir).

Kritik basıncın üzerindeki basınçlarda belirgin bir faz değişimi görülmez. (Diyagram 4.3) Bunun yerine maddenin özgül hacmi sürekli olarak artar ve sürekli aynı fazda bulunur. Genellikle kritik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda maddeye kızgın buhar, kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda maddeye sıkıştırılmış sıvı denir.

Diyagram 4.3'de doymuş sıvı hallerini gösteren noktalar birleştirildiği zaman doymuş sıvı eğrisi elde edilir. Benzer olarak doymuş buhar halleri birleştirilerek doymuş buhar eğrisi çizilebilir. Bu iki eğri Diyagram 4.5'de görüldüğü gibi kritik noktada birleşerek bir kubbe oluşturulur. Tüm sıkıştırılmış sıvı halleri doymuş sıvı eğrisinin solunda kalır. Bu bölge sıkıştırılmış sıvı bölgesi diye adlandırılır. Tüm kızgın buhar bölgeleri doymuş buhar eğrisinin sağında kalır. Bu bölgeye kızgın buhar bölgesi adı verilir. Madde bu iki bölgede sadece sıvı veya sadece buhar fazındadır. Her iki fazın bir arada dengede bulunduğu hallerin tümü kubbenin altında, doymuş sıvı-buhar karışımı bölgesi veya ıslak buhar bölgesi adı verilen bölgedir.



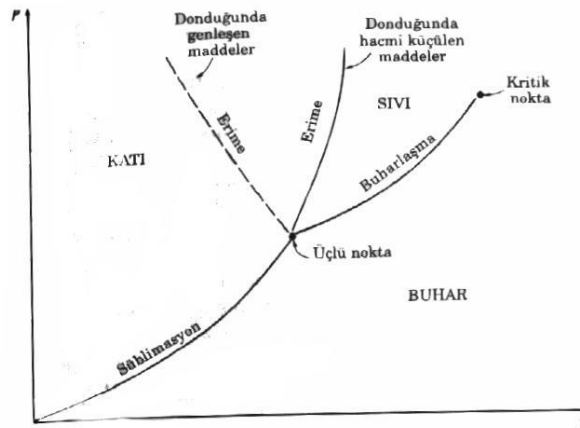
Diyagram 4.4 Kritik basıncın üzerindeki basınçlarda ( $P > P_{CR}$ ) belirgin bir faz değişimi (kaynama) süreci yoktur.



Diyagram 4.5 Saf maddenin T-V diyagramı

#### 4.3.7 Saf Bir Maddenin P-T Diyagramı

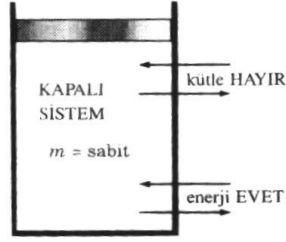
Bu diyagram genellikle faz diyagramı olarak bilinir, çünkü her üç faz birbirlerinden bir eğriyle ayrılmıştır. Süblimasyon eğrisi katı ve buhar bölgelerini ayırır, ergime eğrisi de katı ve sıvı bölgelerine ayırır. Bu üç eğri, her üç fazın birarada dengede olduğu üçlü noktada buluşur. Buharlaşma eğrisi kritik noktada sona erer. Çünkü kritik noktanın üzerinde sıvı ve buhar fazları arasında bir ayırım yapılamaz.



Diyagram 4.6 Saf maddenin P-T diyagramı

## 5. TERMODİNAMİK

### 5.1 TERMODİNAMİĞİN TANIMI



Şekil 5.1 Kapalı bir sistemde kütle ve enerji akışı

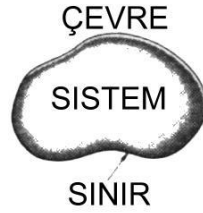
Enerji ve kuvvet uygulanmış cisimlerin incelenmesi anlamına gelen Termodinamik fiziğin ısı ile enerji arasındaki bağlantılarını inceleyen ve enerjinin şekil değiştirmesi ile uğraşan kolu olarak tanımlanır. Termodinamikte bir maddeye iş veya ısı verdiğimiz zaman maddenin hal değiştirmesi için, maddeye ne kadar iş veya ısı verilmesi veya alınması gerektiği hesaplanır. Termodinamikte diğer bir hedef de ısının işe çevrilmesi yöntemleri ve düşük sıcaklık kaynağından yüksek sıcaklık kaynağına ısı nakletmek için ne kadarlık bir iş verilmesi gerektiğini tespit etmektir.

Sanayinin 18. Yüzyılda büyük atılımlar yapması, geliştirilen makinelerin çalıştırılabilmesi için insan ve hayvan gücünün yetersiz kalması, bazı bölgelerde akarsulardan faydalanma imkanlarının bulunmaması, buhar makinasının icadına yol açtı 1712 yılında ilk buhar makinasının yapılması, 1770 yılında James Watt tarafından bu alanda büyük gelişmeler sağlanması yakıtlardan daha ucuz, kolay ve verimli iş elde edilmesi araştırmaya yönelterek Termodinamik biliminin doğmasına sebep oldu. Buhar ve Gaz Türbinleri, Benzin Diesel Motorları, Soğutma Makinaları gibi tüm termik makinelerin çalışma prensiplerinin araştırılması Termodinamiğin konularını kapsamaktadır.

### 5.2 TERMODİNAMİKTE KULLANILAN KAVRAMLAR

Termodinamik işlemlere geçmeden önce bu bölümde sık kullanılan kavramları iyi öğrenmek gerekecektir.

#### 5.2.1 Termodinamik Sistem



Şekil 5.2 Sistem, çevre ve sınırın resim üzerinde gösterilmesi.

Kavramı belirli bir kütleli veya uzayın incelenmek üzere ayrılan bir bölgesini belirtir. (Şekil 5.2)

#### 5.2.2 Çevre

Sistemin dışında kalan kütle veya bölgedir. (Şekil 5.2)

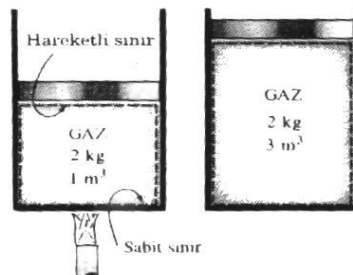
#### 5.2.3 Sınır

Sistemi çevresinden ayıran gerçek veya hayali yüzeydir. Sistemin sınırları hareketli veya sabit olabilir. Sınır, sistem ile çevresinin ortak temas ettiği yüzey olarak tanımlanabilir. Matematiksel açıdan, sınırın kalınlığı sıfırdır, bu nedenle kütlesi ve hacmi yoktur. (Şekil 5.2)

#### 5.2.4 Kapalı Sistem (Kontrol kütlesi)

Sınırlarından kütle giriş çıkışı olmayan sabit bir kütledir.

Kapalı sistem sınırlarından kütle geçişi olmaz, fakat enerji geçişi olabilir.



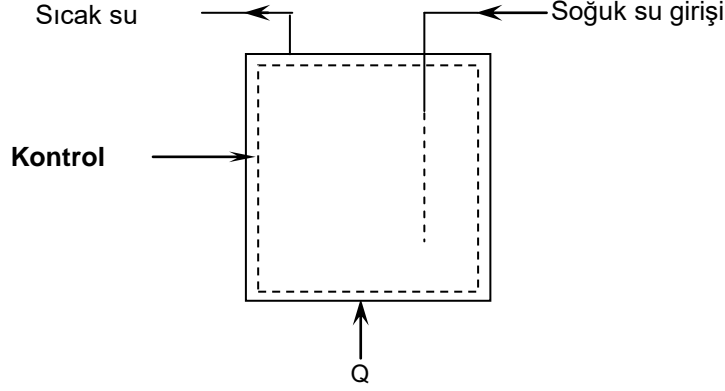
Şekil 5.3 Hareketli sınıra sahip bir kapalı sistem.

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi kapalı sistemde kütle giriş çıkışı olamaz. Enerji iş veya ısı şeklinde kapalı sistemin sınırlarından geçebilir. Kapalı sistem hacminin sabit olması gerekmez.

Şekil 5.3’te gösterilen düzenekte 1 nolu sisteme ısı akışı olduğunda belirli bir süre sonra 2 konumuna gelecektir. Sistemde kütle alış verişi olmadığı için kapalı bir sistemdir. Sisteme enerji transferi olduğundan sınırların bir bölümü hareket etmiştir.

### 5.2.5 Açık sistem (Kontrol hacmi)

Termodinamik olarak incelenmek üzere göz önüne alınan belirli bir hacme denir. İçinden kütle ve enerji giriş çıkışı olan bir sistemdir.



Şekil 5.4 Bir girişli ve çıkışlı açık sistem (kontrol hacmi).

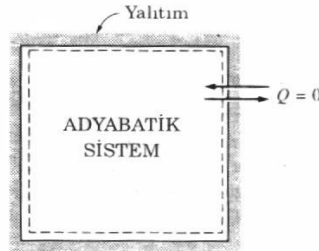
Şekil 5.4’teki termosifonda sürekli su giriş ve çıkışı olmaktadır. Q ısı kaynağından termosifondaki suya ne kadar ısı taşınımı olduğunu bulmak için sabit kütleli seçmek doğru olmaz. Bunun yerine kontrol hacmine giren sıcak ve soğuk su akışlarını çıkan kütleler olarak suya taşınan ısı miktarını bulabiliriz.

### 5.2.6 Ayrık (İzole) Sistem

Sınırlarından enerji ve kütle geçişi olmayan sistemdir. Ayrık sistem üzerinden çevrenin hiçbir tesiri olmadığı kabul edilecektir.

### 5.2.7 Adyabatik Sistem

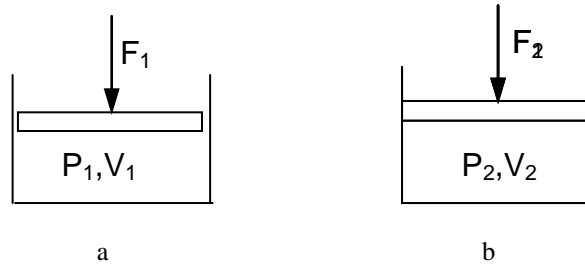
Bir hal değişimi iki şekilde adyabatik olabilir ya sistem çok iyi yalıtılmıştır dolayısıyla sınırlarından ancak ihmal edilebilir. Ölçülerde ısı geçebilir, yada sistem ve çevresi aynı sıcaklıktadır ve bu nedenle ısı geçişine etken olacak sıcaklık farkı yoktur.



Şekil 5.5 Adyabatik bir hal değişimi sırasında sistemle çevresi arasında ısı geçişi olmaz.

### 5.2.8 Tersinirlik Geri Dönüşebilirlik

Denge durumundaki bir sistem herhangi bir etkiyle hal değiştirdikten sonra hem sistemi hem de çevresini başlangıçtaki denge haline, getiriyorsa yapılan işlem tersinir bir işlemdir. (Şekil 5.6-a,b)

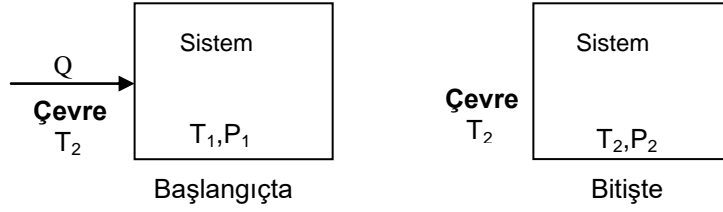


Şekil 5.6 Tersinir bir işleme örnek

Şekil 5.6-a’daki  $F_1$  kuvvetinin şiddeti küçültür. Şekil 5.6-b’deki konuma dönecek çevreyle ısı veriş ve sürtünme kuvveti olmadığı kabulüne göre  $F_2$  kuvveti  $F_2 - F_1$  kadar artırılırsa yani  $F$  bir olursa sistem tekrar eski haline gelecektir.

### 5.2.9 Tersinmez İşlem

Çevre sistem üzerine bir miktar net iş yapar ve bu nedenle ilk haline dönmez. (Şekil 5.7)



Şekil 5.7 Tersinmez bir işleme örnek

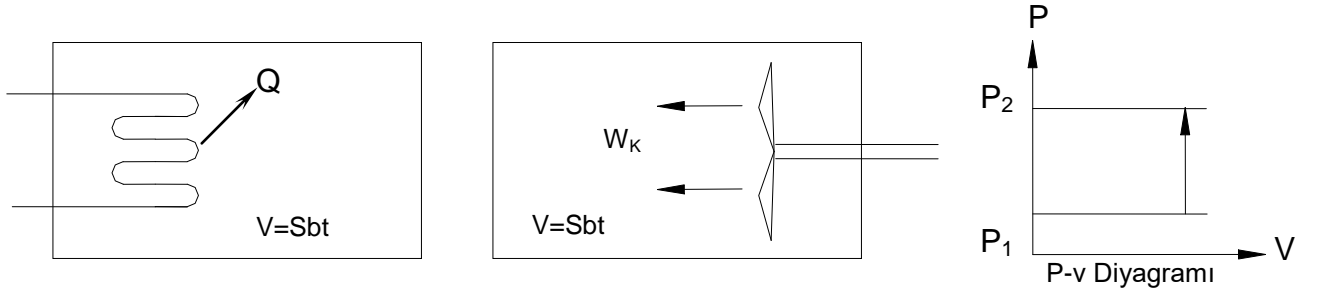
Şekil 5.7'de sistem sıcaklığı  $T_1$ , çevre sıcaklığı  $T_2$ 'ye ulaşınca kadar  $Q$  ısıyı alacaktır. Herhangi bir işlem uygulanmadan bitiş durumundaki sistem kendi kendiliğinden başlangıçtaki haline dönemeyecektir.

### 5.3 TERMODİNAMİK İŞLEMLER

Isı transferi ile ilgili tüm işlemlerde en az kayıpla sistem tasarımı hedeflenir. Soğutma işleminin sağlanmasında da gene en az enerji tüketimiyle belirli bir soğutma yükünün karşılanması istenir. Soğutma çevrimin meydana getiren her bir işlemin en az kayıpla ve en az enerji sarfıyla çalışması gerekir. Soğutma çevrimlerinde kullanılan bazı termodinamik işlemler aşağıda açıklanmıştır.

#### 5.3.1 Sabit Hacimde Termodinamik İşlem (İzometrik)

Şekil 5.8-a'da elektrikli rezistanstan kapalı hacimde bulunan gaz akışkana  $Q$  ısı verilmiş. Şekil 5.8 b'de  $W_k$  işi verilmiş kapalı bir sistem olduğu için Diyagram 5.1'de görüldüğü gibi basıncın  $P_1$ 'den  $P_2$ 'ye çıkmasına neden olmuştur.

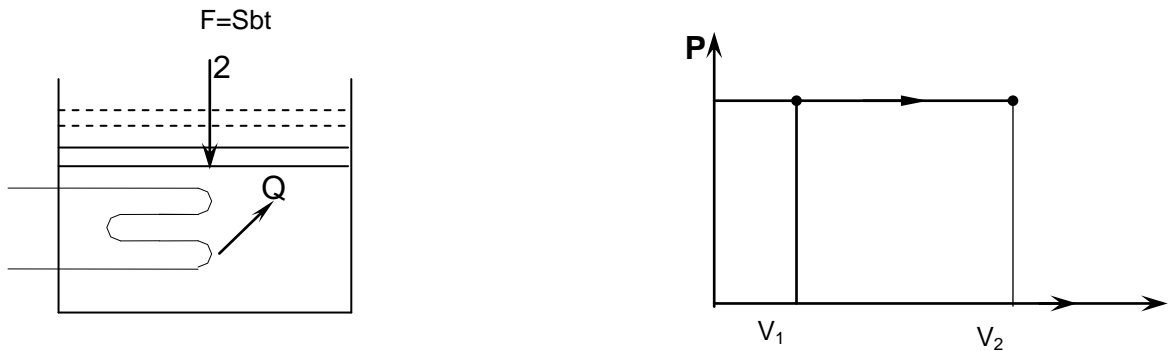


Şekil 5.8 Sisteme verilen ısı ve işin kapalı bir sistemde basınç hacim ilişkisi

Diyagram 5.1

#### 5.3.2 Sabit Basıncıta (İzobar)

Şekil 5.9'da sisteme verilen  $Q$  ısı, piston sürtünmesiz, piston kütlesi ve atmosfer basıncı değişmediği kabulüne göre piston 2 konumu olarak sistemin basıncı sabit kalacaktır. Diyagram 5.2'de görüldüğü gibi.



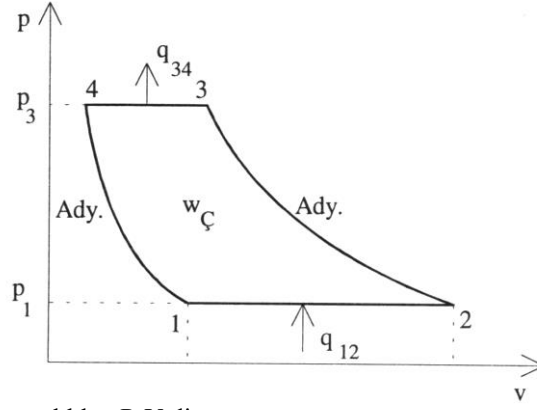
Şekil 5.9 Sabit hacmin deney düzeneğinde gösterilmesi

Diyagram 5.2 Sabit basınçta P-V diyagramı

#### 5.3.3 Sabit Sıcaklıkta (İzotermik)

Aşağıdaki P-V diyagramında  $P_1$  basıncında 1-2 arası sabit basınçta olup sistem  $q_{1,2}$  ısıyı alarak sabit sıcaklık ve basınç altında,  $P_3$  basıncında ise 3-4 arası sabit basınç altında olup sistem 3 noktasından itibaren  $q_{3,4}$  ısıyı atmosfere transfer ederek 3 noktasından itibaren sabit sıcaklık ve basınç altında 4 noktasına kadar sıkıştırılmaktadır.

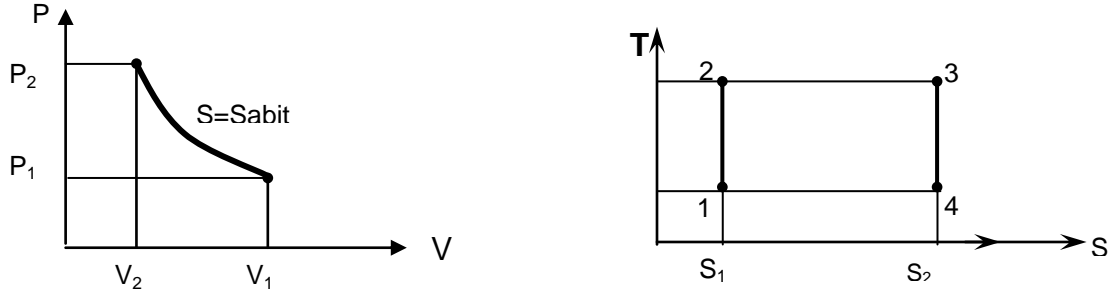
$P_1$  basıncında 1-2 arasında sabit sıcaklık ve basınç altındaki genişleme  $q_{1,2}$  ısıyı alarak gazın halini değiştirmekte,  $P_3$  basıncında 3-4 arasındaki sabit sıcaklık ve basınç altındaki sıkıştırma  $q_{3,4}$  ısıyı atmosfere transfer edip 4 noktasındaki gazın halini değiştirmektedir. Soğutma çevrimlerinde olduğu gibi.



Diyagram 5.3 Sabit sıcaklıkta P-V diyagramı.

### 5.3.4 Sabit Entropi (İzentropik) Veya Geri Dönüşebilir Adyabatik

Diyagram 5.4'teki P-V ve T-S diyagramlarında görüleceği üzere sistem  $P_1$ 'den  $P_2$ 'ye kadar sıkıştırma işlemine tabii tutulursa hacmi  $V_2-V_1$  kadar küçülmekte sıcaklığı  $T_1$ 'den  $T_2$ 'ye çıkmakta fakat sistemin entropisi sabit kalmaktadır.

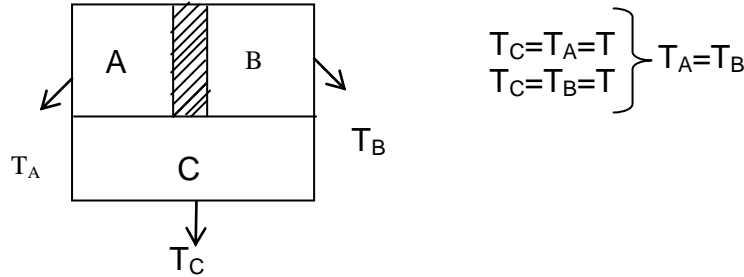


Diyagram 5.4 İzentropik işlemin P-V ve T-S diyagramında gösterilmesi

## 5.4 TERMODİNAMİK KANUNLARI

### 5.4.1 Termodinamiğin Sıfıncı Yasası

İki ayrı sistem üçüncü bir sistemde (cisimle) ayrı,ayrı termik dengede ise bu iki sistem termik dengedir.

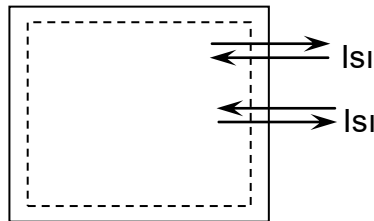


Şekil 5.9 Sıcaklık ölçüm sonuçlarının gerçekliği bu yasaya dayanır.

### 5.4.2 Termodinamiğin Birinci Yasası

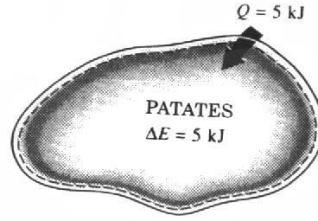
Enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini vurgular. Sistemle çevresinin etkileşimi sırasında, sistem tarafından kazanılan enerji çevresi tarafından kaybedilen enerjiye eşit olmak zorundadır.

Enerji kapalı bir sistemin sınırlarından farklı iki biçimde geçebilir: Isı ve iş olarak.



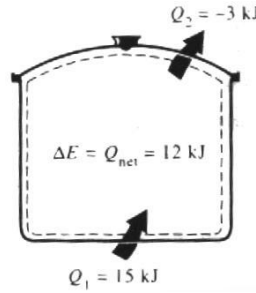
Şekil 5.10 Enerji, kapalı bir sistemin sınırlarından iş veya ısı olarak geçebilir.

Birinci yasanın özü toplam enerji adı verilen özelliğin ortaya konmasıdır.



Şekil 5.11 Fırındaki patatesin enerjisindeki artış, patatese geçen enerjiye eşittir.

Şekil 5.11’de patatese olan ısı geçişi sonunda patatesin enerjisi artacaktır. Kütle geçişinin, başka bir deyişle patatesin nem kaybının olmadığını kabul edersek, patatesin toplam enerjisindeki artış, ısı geçişine eşit olacaktır. Eğer patatese 5 kJ ısı geçişi olmuşsa, patatesin enerjisi 5 kJ artacaktır. Böylece bu örnek için enerjinin korunumu ilkesi  $Q=\Delta E$  şeklinde yazılabilir.



Şekil 5.12 Isı etkileşiminin olmaması durumunda sistemin enerji değişimi net ısı geçişine eşittir.

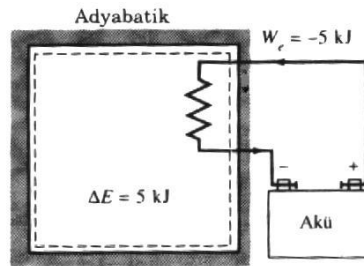
Şekil 5.12’de ocaktan suya 15 kJ ısı geçişi olur ve bunun 3kj kadarı sudan çevre havaya geçerse, suyun enerjisi artarsa 12 kj olur. Buda net ısı geçişine eşittir.

$$Q = Q_{\text{net}} = \Delta E$$

Yukarıda varılan sonuçlar şöyle özetlenebilir; Sistemle çevresi arasında iş etkileşimlerinin olmadığı durumlarda, kapalı sistemin bir hal değişimi sırasındaki toplam enerji değişimi, sistemle çevresi arasındaki net ısı geçişine eşittir.

Bu kez de sistem olarak elektrikli ısıtıcıyla ısıtılan, adyabatik bir oda alınsın. Şekil 5.13’de sisteme verilen elektrik işinin sonunda enerjisi artacaktır. Sistemde adyabatik olduğundan çevreyle ısı alışverişi yoktur. Enerjinin korunumu ilkesine göre, sistemin enerji artışının, sistem üzerinde yapılan elektrik işine eşit olması gerekir. Başka bir anlatımla:

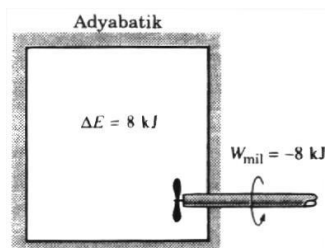
$$-W_e = \Delta E$$



Şekil 5.13 Adyabatik bir sistem üzerinde yapılan iş (elektrik işi), sistemin enerji artışına eşittir.

Yukarıdaki bağıntıda eksi işaretinin yer alması, sistem üzerinde yapılan işin eksi kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Böylece sistem üzerinde yapılan işin sistemin enerjisini artırması, sistem tarafından yapılan işin de enerjisini matematiksel olarak sağlamış olur.

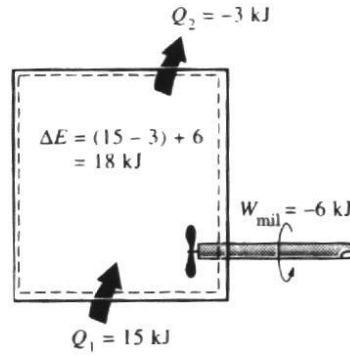
Şekil 5.14’de elektrik ısıtıcısı yerine pervane takalım karıştırma sonunda sistem enerjisi artacaktır. Sistem ve çevresi arasında ısı geçişi olmadığı için ( $Q=0$ ), pervanenin sistem üzerinde yaptığı iş, sistemin enerji artışı olarak kendini gösterecektir. Matematiksel anlatımla  $-W_p = \Delta E$



Şekil 5.14 Bir hal değişimi sırasında sistemin enerji değişimi, net iş çevreyle ısı alışverişinin toplamına eşittir.

Yukarıdaki örneklerden, kapalı bir sistemde adyabatik hal değişimi sırasında yapılan iş, sistemin toplam enerji değişimine eşittir.

Eğer bir hal değişimi sırasında hem iş hem de ısı etkileşimi oluyorsa, sonuç her birinin katkısı toplanarak elde edilecektir. Şekil 5.15'de sistemin hal değişimi sırasında sisteme 15kj ısı geçişi oluyor, ayrıca sistem üzerinde pervane tarafından 6kj iş yapılıyorsa, sistemin bu hal değişimi sırasındaki net enerji artışı 18kj olacaktır.



Şekil 5.15 Bir hal değişimi sırasında sistemin enerji değişimi, net iş ve çevreyle ısı alışverişlerinin toplamına eşittir.

Sonuçları genelleştirirsek, kapalı sistem olarak tanımlanan, belirli sınırlar içinde bulunan sabit bir kütle için termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left( \begin{array}{c} \text{Sisteme veya sistemden} \\ \text{Isı veya iş olarak} \\ \text{net enerji geçişi.} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Sistemin} \\ \text{toplam enerjisindeki} \\ \text{net artış veya azalma.} \end{array} \right)$$

$$Q - W = \Delta E \text{ (KJ)} \quad (5.1)$$

Q, sistem sınırlarından net ısı geçişini ( $=\sum Q_g - \sum Q_c$ )

W, değişik biçimleri kapsayan net işi ( $=\sum W_g - \sum W_c$ )

$\Delta E$ , Sistemdeki toplam enerji değişimi ( $E_2 - E_1$ )

Sistemin toplam enerjisi: İç enerji U, kinetik enerji KE ve potansiyel enerji PE. Bu nedenle bir hal değişimi sırasında sistemin toplam enerjisinin değişimi, iç enerji, kinetik enerji ve potansiyel enerjisindeki değişimlerin toplamı olarak ifade edilebilir.

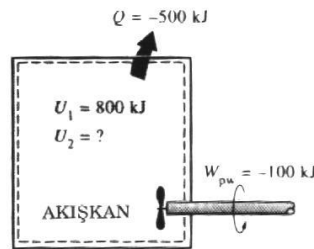
$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \text{ (KJ)} \quad (5.2)$$

Bu bağıntıyı 5.1 numaralı denklemde yerine koyarsak

$$\begin{aligned} Q - W &= \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \text{ (kj)} \\ \Delta U &= m (U_2 - U_1) \\ \Delta KE &= (m/2) (v_2^2 - v_1^2) \\ \Delta PE &= m g (Z_2 - Z_1) \end{aligned} \quad (5.3)$$

### Örnek Problem 5.1

Sabit hacimli kapalı bir kaptaki sıcak bir sıvı soğutulurken, bir taraftan da karıştırılmaktadır. Şekil 5.16 Başlangıçta sıvının toplam iç enerjisi 800 kj'dür. Soğutma işlemi sırasında çevreye 500 kj ısı geçişi olmaktadır. Sıvının son haldeki toplam iç enerjisini hesaplayınız?



Şekil 5.16 Örnek problem 5-1 genel çizimi?

### Çözüm

Sistem olarak kabın içindeki sıvı seçilsin. Sistem, sınırlarında kütle geçişi olmadığı için, kapalı sistemdir. Sistem ayrıca hareketsizdir, bu nedenle potansiyel ve kinetik enerji değişimleri sıfırdır.



$$Q - W = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE}$$

$$= U_2 - U_1$$

$$-500 \text{ kJ} - (-100) \text{ kJ} = U_2 - 800 \text{ kJ}$$

$$U_2 = 400 \text{ KJ}$$

Uygulamada karşılaşılan sistemlerin çoğu hareketsizdir, bu nedenle hızlarında veya kütle merkezlerinin bulunduğu noktada hal değişimi ve sırasında bir değişiklik olmaz. Hareketsiz kapalı sistemlerin kinetik ve potansiyel enerjilerindeki değişimler göz ardı edilebilir. ( $\Delta KE = \Delta PE = 0$ ) ve birinci yasayı sadeleştirerek

$$Q - W = \Delta U \text{ (kJ)} \quad (5.4)$$

Bazı durumlarda iş teriminin  $W_{\text{diğer}}$  ve  $W_s$  olarak iki kısımda ele almak kolaylık sağlar. Burada  $W_{\text{diğer}}$ , sınır işi dışında yapılan tüm işlerin toplamıdır. Bu durumda birinci yasa şu şekilde yazılabilir.

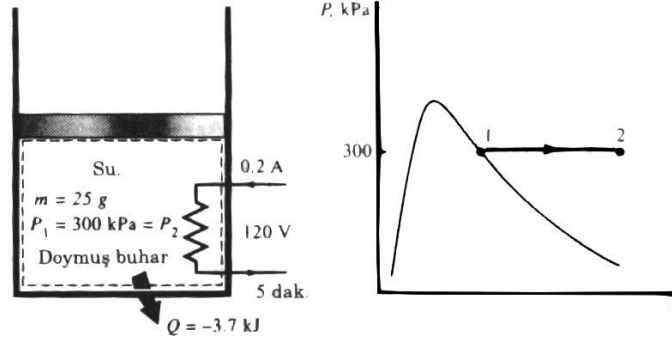
$$Q - W_{\text{diğer}} - W_s = \Delta E \quad (5.5)$$

Sistemde olan ısı geçişiyle sistem tarafından yapılan iş artı, sistemden olan ısı geçişiyle sistem üzerinde yapılan iş eksi alınmalıdır.

### Örnek 5.2

Bir piston silindir düzeneğinde başlangıçta 300 kPa basınçta 25 gr doymuş su buharı bulunmaktadır. Daha sonra silindir içindeki bir elektrik ısıtıcısı çalışmakta ve 5 dk süresince ısıtıcıdan, 120 V kaynaktan sağlanan 0,2 A'lık bir akım geçmektedir. Bu süre içinde çevreye 3.7 kJ ısı geçişi olmaktadır.

- a) Kapalı bir sistemde sabit basınçta gerçekleşen bir hal değişimi için sınır işi  $W_s$  ve iç enerji değişimi  $\Delta U$ 'nun birleştirilip entalpi, değişimi  $\Delta H$  olarak bir terime indirgenebileceğini gösteriniz?  
b) Sistemin son sıcaklığını hesaplayınız?



Şekil 5.17 Örnek problem 5.2'nin genel çizimi P-v diyagramı

$$Q - W = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE}$$

$$Q - W_{\text{diğer}} - W_s = U_2 - U_1$$

Hal değişimi, pistonun kütlesi ve atmosfer basıncı sabit kaldığı için basınçta gerçekleşmektedir. Bu durumda sınır işi  $W_s = P_0(V_2 - V_1) = U_2 - U_1$  elde edilir.

$$\text{Fakat } P_0 = P_2 = P_1 \quad Q - W_{\text{diğer}} = (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1) \quad \text{ayrıca } H = U + PV \text{ olduğu için}$$

$$Q - W_{\text{diğer}} = H_2 - H_1 \quad (\text{kJ})$$

$$W_e = V \cdot I \cdot \Delta t = 120 \text{ V} \cdot (0,2 \text{ A}) \cdot (300)$$

$$W_e = V \cdot I \cdot \Delta t = 120 \text{ V} \cdot (0,2 \text{ A}) \cdot (300 \text{ s}) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ V A s}} \right) = 7,2 \text{ kJ}$$

$$Q - W_e = m (h_2 - h_1)$$

$$-3,7 \text{ kJ} - (-7,2 \text{ kJ}) = 0,025 (h_2 - 2725,3 \text{ kJ/kg})$$

$$h_2 = 2865,3 \text{ kJ/kg}$$

Basınç ve entalpi bilindiği için son sıcaklık belirlenebilir.

$$\left. \begin{array}{l} \text{1 Hali: } P_1 = 300 \text{ kpa} \\ \text{doymuş buhar} \end{array} \right\} h_1 = h_{g \text{ 300kpa}} = 2725,3 \text{ kJ/kg}$$

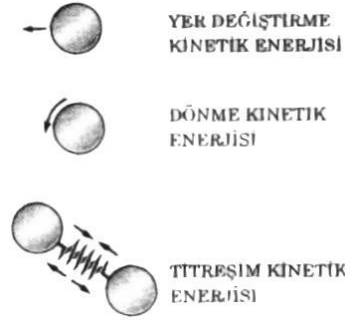
$$\left. \begin{array}{l} \text{2 Hali:} \\ P_2 = 300 \text{ kpa} \\ h_2 = 2865,3 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} T_2 = 200^\circ\text{C}$$

### 5.4.3 İç Enerji

İç enerji moleküler yapıya ve moleküllerin hareketlilik düzeyine bağlı olup, moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamı olarak düşünülebilir.

Bir sistemdeki moleküller genelde rastgele bir hareket içinde, belirli bir hızla hareket eder, toplu olarak titreşir ve kendi eksenleri etrafında dönerler. Bu hareketin sonucu olarak, bir molekülün yer değiştirme, titreşim ve dönme enerjilerinin toplamından oluşan bir kinetik enerjisi vardır. Sistemin iç enerjisinin, moleküllerin kinetik enerjisiyle ilişkili olan bölümüne duyulur enerji adı verilir.

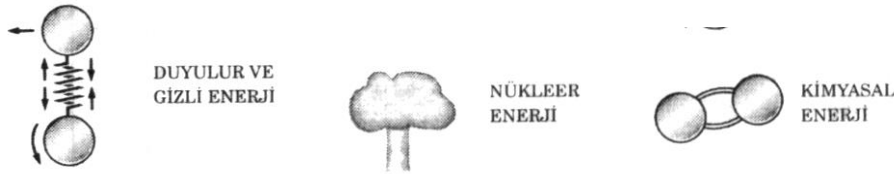
İç enerji aynı zamanda sistemin molekülleri arasındaki kuvvetlerle ilişkilidir. Bu kuvvetler molekülleri birbirine bağlayan kuvvetlerdir ve tahmin edileceği gibi katı cisimlerde çok güçlü, gazlarda ise daha zayıftır. Katı veya sıvı bir cismin moleküllerine yeterince enerji verilirse, moleküller, aralarındaki kuvvetleri yenip bağları kopararak sistemi gaza dönüştürebilirler. Bu bir faz değişimidir. Eklenen bu enerjiden dolayı gaz fazındaki sistem, katı veya sıvı fazlarına oranla daha yüksek bir iç enerjiye sahip olur. Sistemin fazıyla ilgili bu iç enerjisine gizli enerji adı verilir.



Şekil 5.17 Duyulur iç enerjiyi oluşturan moleküler enerji biçimleri

Yukarıda sözü edilen değişimler, sistemin kimyasal bileşiminde bir değişiklik olmadan gerçekleşebilir. Bir molekülün atomları arasındaki kuvvetlerle ilgili iç enerjiye kimyasal enerji veya bağ enerjisi denir. Yanma işleminde olduğu gibi bir reaksiyon sırasında, bazı kimyasal bağlar bozulurken bazı yeni bağlar oluşur. Bu nedenle İç enerji değişir.

Atom çekirdeği içindeki parçacıklar arasında var olan bağlarla ilişkisi çok büyük miktarlardaki İç enerjiden söz etmek gerekir. (Şekil 5.18) Bu enerji, nükleer enerji diye adlandırılır ve nükleer reaksiyonlar sırasında açığa çıkar.

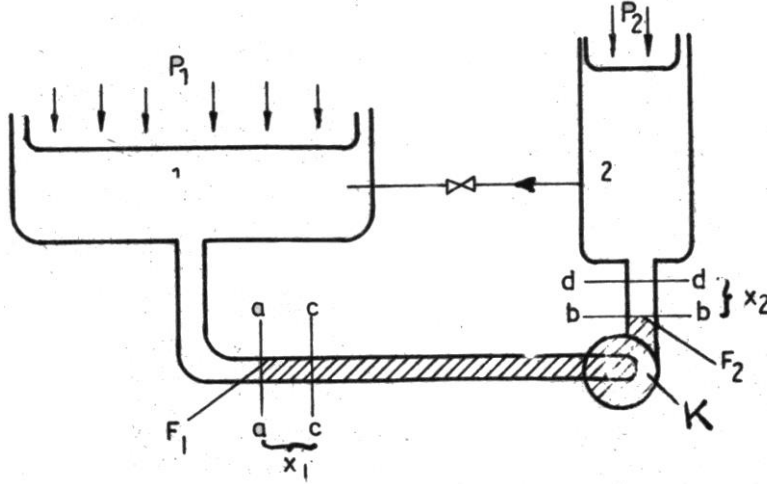


Şekil 5.18 Sistemin iç enerjisi enerji biçimlerinin toplamıdır.

Sistemin toplam enerjisini oluşturan ve yukarıda açıklanan enerji biçimleri, sistem içinde bulunduğu veya depolandığı için enerjinin statik biçimi diye tanımlanabilir. Sistem içinde depolanmayan enerji ise enerjinin dinamik biçimi diye adlandırılabilir. Enerjinin . dinamik biçimleri sistem sınırlarını geçerken algılanır ve hal değişimi sırasında sistem tarafından kazanılan veya kaybedilen enerjiyi gösterir.

### 5.4.4 Isı Tutumu (Entalpi)

Mutlak sıfır sıcaklığı noktasına kadar tüm maddelerin iç enerjileri vardır. Bir sisteme iş veya iş etki ettirildiğinde sistemin ısı tutumunda değişecektir. Bir sistemdeki maddenin başlangıçtaki iç enerjisi tablolardan bulunabilir. Sistemin herhangi bir anındaki toplu ısı miktarını bulabilmemiz için sisteme etki ettirilen iş veya ısı miktarını hesaplayıp sistemdeki maddenin başlangıçtaki iç enerjisiyle toplamamız gerekecektir.



Şekil 5.19 Isı tutumu bir deney düzeneğiyle gösterilmesi

Şekil 5.19'daki K kompresörü tarafından 1 nolu tanktan gelen soğutucu akışkan buharı emilir. K Kompresörü bu soğutucu akışkan buharını 2 nolu tanka basar. 1 nolu tankta basınç  $P_1$ , 2 nolu tankta ise  $P_2$ 'dir. Kompresör belirli bir zamanda iş görüp soğutucu akışkanın yerini değiştirerek iş yapmış olur. Belirli bir zaman içinde kompresörün emme ve basma işlemi neticesinde a-a kesiti c-c kesiti yerini, b-b kesiti de d-d kesiti yerini alacaktır.

a-a ve b-b kesitleri arasındaki 1 nolu tanktan hareket eden buhar hacminin c-c ve d-d kesitleri arasındaki duruma gelebilmesi için belirli bir iş yapması gerekir. B u iş soğutucu akışkan buharı hacmince absorbe edilen bir iş olup, kuvvetle yolun çarpımına eşittir.

$$P_1 \cdot F_1 \cdot X_1 \quad (5.4.2.1)$$

Burada;

$P_1$ : a-a kesitindeki buhar basıncı

$F_1$ : a-a kesitinin alanı

$X_1$ : c-c ve a-a kesitleri arasındaki mesafedir.

$F_1 \cdot X_1 = V_1$  süpürme hacmi olarak tarif edilmekte olup, bu tarife dayanarak  $P_1 \cdot V_1$  ifadesi süpürme işi olarak isimlendirilir.

a-a kesitindeki buharın iç enerjisi  $U_1$  ise c-c kesitinde bu iç enerji  $P_1 \cdot V_1$  kadar artmış ve ;

$$U_1 + P_1 \cdot V_1 \text{ olmuştur.} \quad (5.4.2.2)$$

Kompresörde aynı buhara bir L sıkıştırma işi ilave olunur ve kompresörden hemen sonra buharın toplam enerjisi

$$U_1 + P_1 \cdot V_1 + L \quad (5.4.2.3)$$

Ancak enerjisi artan soğutucu akışkan buharı basıncı  $P_2$  olan 2 nolu tanka basılmak mecburiyetinde olup, basma sırasında toplam enerjisinde:

$$P_2 \cdot F_2 \cdot X_2 = P_2 \cdot V_2 \quad (5.4.2.4)$$

Kadar azalma olur, Matematiksel olarak ifade edersek

$$U_1 + P_1 \cdot V_1 + L - P_2 \cdot V_2 = U_2 \quad (5.4.2.5)$$

Bu ifadeyi tekrar düzenlersek

$$(U_1 + P_1 \cdot V_1) + L = (U_2 + P_2 \cdot V_2) \quad (5.4.2.6)$$

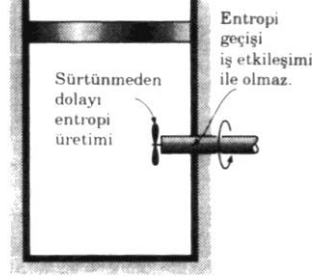
$(U_1 + P_1 \cdot V_1) + L$  ve  $(U_2 + P_2 \cdot V_2)$  değerleri değişik iki durumdaki buharın ısı tutumunu gösterir.

$$H = U + P \cdot V \quad \text{kJ Toplam entalpi} \quad (5.4.2.7)$$

$$H = U + P \cdot V \quad \text{kJ/kg Özgül entalpi (birim kütle için)} \quad (5.4.2.8)$$

### 5.4.5 Entropi

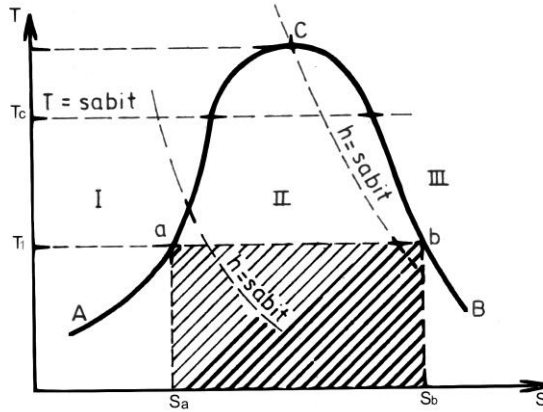
Termodinamiğin birinci yasası ısı geçişiyle iş arasında, enerji olarak ayırım yapmaz. Birinci yasa açısından ısı geçişi ve iş eşdeğerdedir. Isı geçişiyle iş arasındaki ayırım ikinci yasa tarafından ortaya çıkarılmaktadır. Başka bir deyişle, entropi geçişinin olmadığı enerji etkileşimi ise iştir. Bir sistemle çevresi arasında olan iş etkileşimi sırasında entropi alış veriş yoktur. Böylece, sistemle çevresi arasındaki iş etkileşimi sırasında sadece enerji alış veriş olur, oysa ısı geçişi sırasında hem enerji hem entropi geçişi söz konusudur. (Şekil 5.20)



Şekil 5.20 Sistem sınırlarından iş geçişi sırasında entropi geçişi olmaz. Ancak, sistem içinde enerji daha az kullanılabilir biçimlere dönüştürken entropi üretimi olur.

Entropi kavramını daha iyi anlayabilmek için özel bir kap içinde sıvı halde bir miktar soğutucu akışkan ele alalım. Bu soğutucun akışkan  $\Delta Q$  kadar bir ısının tesiri altında kaynamaya terk edildiğinde ve belirli bir sıcaklıkta kaynamaya başladığını düşünelim. Bu durumda entropi diyagramında görüleceği gibi entropilerin farkı ( $S_2 - S_1$ ) kadar değişmiştir.

$$S_2 - S_1 = \frac{\Delta Q}{T} \quad (5.4.3.1)$$



Diyagram 5.5 Sıcaklık entropi diyagramı.

Diyagramı şekil 5.5'te verilen 1 No'lu bölge sıvı, 2 No'lu bölge sıvı+buhar (yaş buhar), 3 No'lu bölge kızgın buhar bölgesidir. A-C eğrisi, sıvı bölgesi ile yaş buhar bölgesini ayıran bir sınır eğrisi olup, alt sınır eğrisi olarak adlandırılır. C-B eğrisi ise yaş buhar bölgesi ile kızgın buhar bölgesini ayıran bir sınır eğrisi olup, üst sınır eğrisi olarak adlandırılır. C noktası kritik noktayı göstermektedir.

Herhangi bir soğutucu akışkanı  $T_1$  sıcaklığında kaydığını düşünelim. Diyagram 5.5'te a noktası soğutucu akışkanın sıvı olduğu nokta, b noktası ise soğutucu akışkanın doymuş buhar halinde olduğu noktadır. Böyle bir buharlaşma için gerekli ısı miktarı

$$q = T_1(S_2 - S_1) \quad (5.4.3.2)$$

olarak hesaplanır. Bu ısı miktarı T-S diyagramında bir alan olarak görülür.

#### Örnek Problem 5.3

Şekil 5.20'de gösterilen sürtünmesiz piston silindir düzeneğinde başlangıçta  $100^\circ\text{C}$  sıcaklığında doymuş sıvı-buhar karışımı su bulunmaktadır. Daha sonra  $25^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki çevre havaya sabit basınçta bir hal değişimiyle,  $600\text{ kJ}$  ısı geçişi olmaktadır. Hal değişimi sırasında silindir içinde bulunan su buharının bir bölümü yoğuşmaktadır.

- Suyun entropi değişimini hesaplayınız?
- Hal değişimi sırasında çevre havanın entropi değişimini bulunuz?

**Çözüm**

a) Basınç sabit kaldığı için, sıcaklığında  $100^{\circ}\text{C}$  değerinde kalacaktır.

$$\Delta S_{\text{su}} = \frac{Q_{\text{su}}}{T_{\text{su}}} = \frac{-600\text{kJ}}{(100 + 273)^{\circ}\text{K}} = -1,61\text{kJ}/^{\circ}\text{K}$$

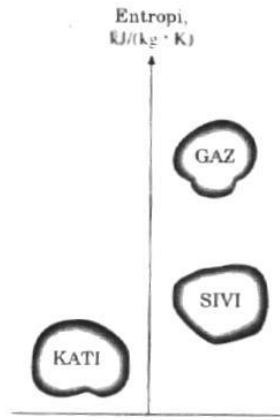
Dikkat edilirse suyun sıcaklığında bir değişiklik olmayıp çevreye verilen ısı, su buharının bir bölümünün daha yoğunlaşmasına harcanarak entropisinin azalmasına neden olmuştur.

b) Düşük sıcaklıkta ısıl enerji deposu çevre havanın entropi değişimide benzer biçimde hesaplanır. Fakat bu kez ısı geçişi artı değerdedir .Çünkü sistem tarafından verilen ısı çevre hava tarafından alınmaktadır.

$$Q_{\text{çevre}} = -Q_{\text{sistem}} = 600\text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{çevre}} = \frac{Q_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} = \frac{600\text{kJ}}{(25 + 273)\text{K}} = 2,01\text{kJ}/\text{K}$$

Entropi moleküler düzensizlik veya moleküler rastgelelik olarak görülebilir. Bir sistem daha düzensiz bir hal aldıkça moleküllerin konumları belirsizleşecek ve entropi artacaktır.



Şekil 5.21 Bir maddenin moleküler düzensizliğinin ölçüsü olan entropi madde erirken veya buharlaşırken artar.

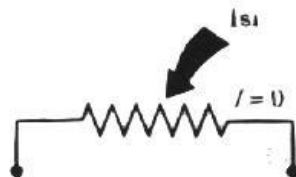
**5.5 TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ YASASI**

Birinci yasaya göre enerjinin var veya yok edilemeyeceği bilinen bir gerçektir. Termodinamiğin birinci yasasına aykırı bir hal değişimi bugüne kadar görülmemiştir. Bu nedenle denilebilir ki, bir hal değişiminin gerçekleşebilmesi için birinci yasanın sağlanması zorunludur. Fakat birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşebilmesi için yeterli değildir.

Masada bırakılan bir fincan sıcak kahvenin kısa sürede soğuduğu herkes tarafından bilinen bir gerçektir.(Şekil 5.22) fincan içindeki kahvenin hal değişimi termodinamiğin birinci yasasına uymaktadır .Çünkü kahvenin yitirdiği enerji çevre havanın kazandığı enerjiye eşittir. Şimdi bunun tersi olan bir hal değişimini düşünelim; sıcak kahvenin çevre ortamdan alacağı enerjiyle ısınması. Böyle bir hal değişiminin olamayacağını biliyoruz, fakat gerçekleşseydi, havanın kaybettiği enerji kahvenin kazandığı enerjiye eşit olduğu sürece birinci yasaya aykırı olamazdı.



Şekil 5.22 Bir fincan kahve daha serin bir odada ısınmaz.



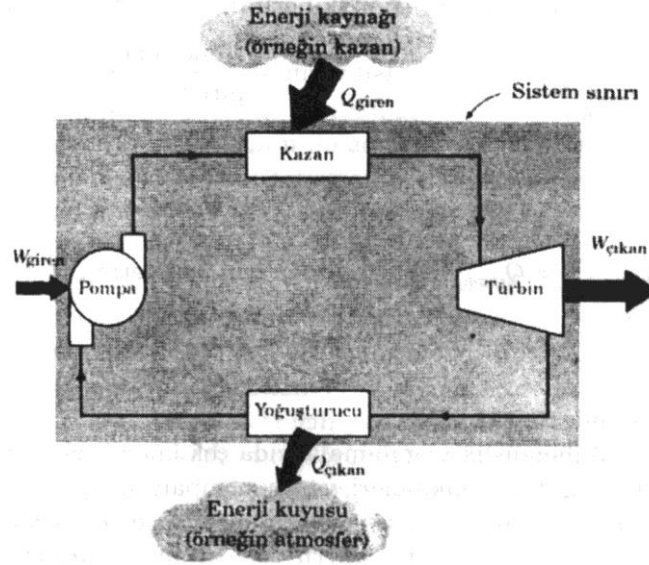
Şekil 5.23 Tele ısı geçişi elektrik üretimine yol açmaz

Şekil 5.23’de bir odanın elektrik direncinden geçen akımla ısıtılması düşünülün, birinci yasaya göre direnç tellerine sağlanan elektrik enerjisi odaya ısı olarak geçen enerjiye eşit olmak zorundadır. Bu hal değişimini diğer yönde uygulayalım. Telleri ısıtarak tellerde eşit miktarda elektrik enerjisi sağlamak imkan dışıdır.

Yukarıdaki örneklerden açıkça görüldüğü gibi, hal değişimleri belirli bir yönde gerçekleşirken, tersi olan yönde gerçekleşmemektedir. Birinci yasa hal değişimlerinin yönü üzerinde herhangi bir kısıtlama getirmez, birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşebileceği anlamına gelmez. Bu hal değişiminin olup olmayacağı konusunda birinci yasanın yetersizliği ikini yasayla kapatılır.

### 5.5.1 Isı Makineleri

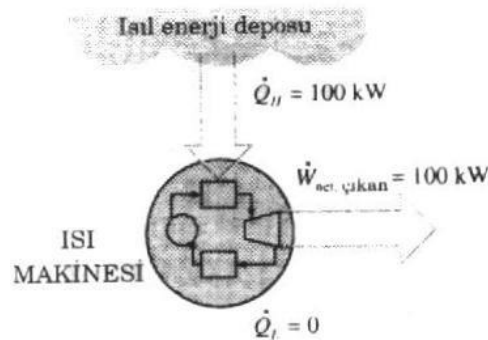
Isı makinesi tanımına en çok uyan makine, dıştan yanmalı bir motor olan buharlı güç santralidir. Bu makine dıştan yanmalı olarak adlandırılır çünkü yanma işlemi makinenin dışında olur ve yakıtın ısı enerjisi dönüşen kimyasal enerjisi aracı akışkan olan suya ısı olarak geçer.



Şekil 5.24 Buharlı güç santralinin genel çizimi

### 5.5.2 Termodinamiğin ikinci Yasasının Kelvin-Planck İfadesi

Hiçbir ısı makinesi aldığı ısı enerjisinin tamamını işe dönüştüremez. Isı makinelerinin sürekli çalışabilmeleri için, yüksek sıcaklıktaki bir ısı enerji deposuyla düşük sıcaklıktaki bir ısı enerji deposuyla ısı alışverişinde bulunmak zorundadır. Kelvin Planck ifadesine göre hiçbir ısı makinesinin ısı verimi yüzde 100 olamaz veya bir güç santralinin sürekli çalışabilmesi için, aracı akışkanın kazandan ısı enerji almasının yanı sıra çevre ortamına da ısı enerji aktarması gerekir. Bir ısı makinesinin yüzde 100 verime sahip olmamasının sürtünme veya diğer kayıplardan kaynaklanmadığı vurgulanmalıdır. Bu sınırlama, hem gerçek hem de sadece düşüncede var olan mükemmel ısı makinelerini kapsar.



Şekil 5.25 İkinci yasanın Kelvin Planck ifadesine aykırı bir ısı makinesi

### 5.5.3 Soğutma Makineleri ve Isı Pompaları

Isının yüksek sıcaklık kaynağından düşük sıcaklık kaynağına kendiliğinden geçtiği, düşük sıcaklık kaynağından yüksek sıcaklık kaynağına kendiliğinden geçemeyeceği bilinen bir gerçektir. Düşük sıcaklıktaki bir ortamdaki yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi ancak soğutma makinelerinin kullanımıyla gerçekleşebilir.

## 1. Carnot Çevrimi

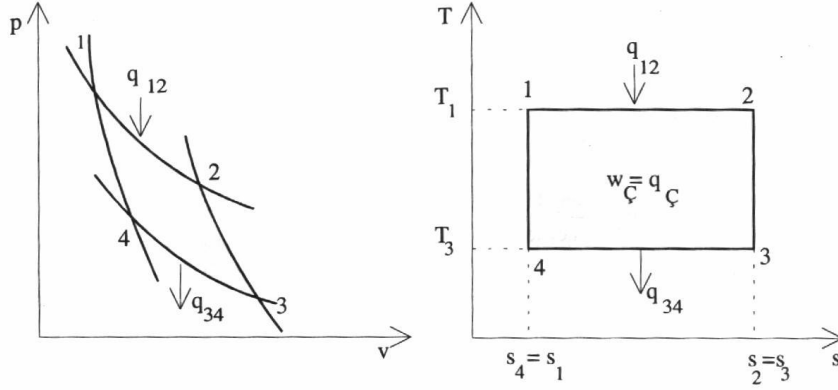
Isı makinelerinin bir çevrim gerçekleştirerek çalıştığı ve aracı akışkanın her çevrimin sonunda ilk haline döndüğü Kelvin-Planck ifadesi açıklanırken belirtilmiştir. Çevrimin bir bölümünde aracı akışkan iş yapar, bir bölümünde ise aracı akışkan üzerinde iş yapılır. İkiisi arasındaki fark ısı makinesinin net işidir. Isı makinesi çevriminin verimi büyük ölçüde çevrimi oluşturan hal değişimlerinin nasıl gerçekleştiğine bağlıdır.

Tersinir çevrimlere gerçek uygulamalarda rastlanmaz, çünkü gerçek hal değişimlerinde tersinmezlikler yok edilmez. Fakat tersinir bir çevrimin verimi, gerçek çevrimin ulaşabileceği en yüksek verimi belirler.

En çok bilinen tersinir çevrim, 1824 yılında Sadi Carnot tarafından ortaya atılan Carnot çevrimidir. Carnot çevrimine göre çalışan ısı makinesi diye adlandırılır. Carnot çevrimi ikisi sabit sıcaklıkta, ikisinde adyabatik olmak üzere dört hal değişiminden oluşur.

## 2. Tersinir Carnot Çevrimi

Carnot iki ayrı sıcaklık kaynağı arasında çalışan, geri dönüşebilir (tersinir) bir makine tasarlamış ve  $T_1$  yüksek sıcaklık kaynağındaki  $Q$  ısıyı  $T_2$  alçak sıcaklık kaynağına verirken sıcaklığın izoterm olması ve tersinir işlemin diğer yarısında aynı şekilde izoterm olması gerektiğini görmüştür. Buradan ideal çevrime ısının  $T_1$  sıcaklığında izotermik olarak verilmesi ve çevrimden yine  $T_2$  sıcaklığında izoterm olarak ısı çekilmesi gerektiği görülmektedir. Diğer yandan, ayrıca akışkanın makine içerisinde  $T_1$ 'den  $T_2$ 'ye kadar soğuyabilmesi için tersinir bir adyabatik bir genişlemeye uğrayarak iş vermesi (genişleme makinası gibi) ve yeniden  $T_2$ 'den  $T_1$ 'e çıkarılması için adyabatik bir sıkıştırmaya uğrayarak bir iş yapması gerekecektir.



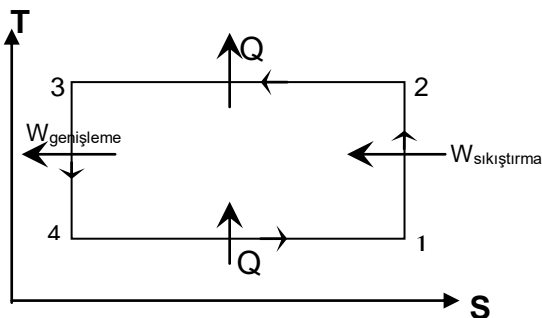
Diyagram 5.5 Carnot çevriminin P.V ve T.S diyagramı

Bir ısı makinası için tasarlanan bu ideal çevrimin ters yönde çalıştırılması düşünüldüğünde soğutma çevrimi (buhar sıkıştırmalı) için ideal çevrim haline gelmektedir, yani çevrime iş vererek alçak sıcaklık kaynağından yüksek sıcaklık kaynağına ısı transferi mümkün hale gelmektedir.

## 3. Ters Carnot Çevrimi

Yukarıda açıklanan Carnot ısı makinesi tersinir bir çevrimdir. Bu nedenle tüm hal değişimleri ters yönde gerçekleşebilir. Bu çevrime **Carnot soğutma** çevrimi denilmektedir. Bu çevrimde ısı ve iş etkileşimlerinin yönü değişmektedir. Düşük sıcaklıktaki ısı deposundan  $Q_L$  miktarında ısı alınmakta, yüksek sıcaklıktaki ısı deposuna  $Q_H$  miktarında ısı verilmektedir. Bu çevrimi gerçekleştirmek için ayrıca sistem üzerinde  $W_{sıkıştırma}$  miktarında iş yapılmaktadır. Ters Carnot çevrimi diyagram 5.5'te görüldüğü gibi tersinir Carnot (ısı makinesi) çevrimine göre hal değişimlerinin sadece yönü değişmiştir.

## 4. Carnot Verimi



- 1-2 İzoterm adyabatik sıkıştırma
- 2-3 İzoterm sıkıştırma
- 3-4 İzoterm genişleme
- 4-1 İzoterm genişleme

Diyagram 5.6 Ters Carnot Çevrim Diyagramı

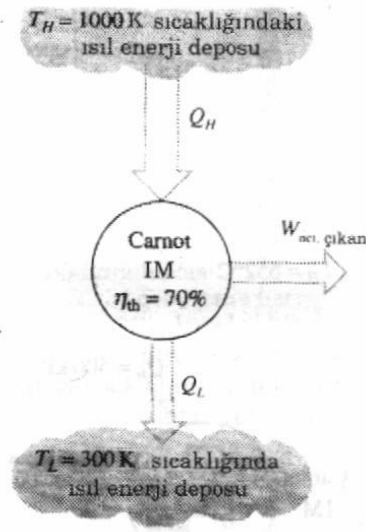
Tersinir veya tersinmez carnot çevriminin verimi aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5.4.4.1)$$

$$\eta_{th} \begin{cases} < \eta_{th} \text{ tersinmez ısı makinesi} \\ = \eta_{th} \text{ tersinir ısı makinesi} \\ > \eta_{th} \text{ imkansız} \end{cases}$$

Bu değer  $T_H$  ve  $T_L$  sıcaklıklarındaki ısı enerji depoları arasında çalışan bir ısı makinesinin sahip olabileceği en yüksek verimdir. Diyagram 5.6'da bu sıcaklık sınırları arasında ( $T_H$  ve  $T_L$ ) çalışan tüm tersinmez (gerçek) ısı makinelerinin verimleri bu değerden daima daha düşük olacaktır. Gerçek bir ısı makinesi bu verime ulaşamaz, çünkü gerçek hal değişimleriyle ilgili tersinmezlikler tümüyle yok edilmez.

Yukarıdaki denklemlerde  $T_H$  ve  $T_L$  sıcaklıklarının mutlak sıcaklıklar olduğu devamlı hatırlanmalıdır. Bu denklemde °C veya °F sıcaklıklarının kullanılması büyük hatalara yol açar.



Şekil 5.26 Carnot ısı makinesi.

Carnot ısı makinesi, aynı ısı enerji depoları arasında çalışan tüm ısı makinelerinin en yüksek verime sahip olanıdır.

Bir carnot makinasının verimi  $T_H$  yükseldikçe veya  $T_L$  düşürüldükçe artacağı denklemden açıkça görülmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü  $T_L$  düşüldüğü zaman çevreye verilen ısıda azalacaktır.

#### Örnek: Problem 5.4

Şekil 5.27'de gösterilen carnot ısı makinesi 652 °C sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan 500 kJ enerji almakta ve 30 °C sıcaklıktaki bir ısı enerji deposuna ısı vermektedir.

Carnot makinesinin ısı verimini

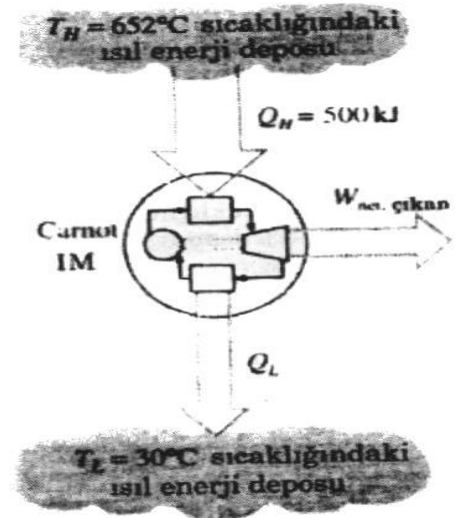
Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposuna verilen ısıyı hesaplayınız.

**Çözüm:**

$$\eta_{th,c} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273)K}{(652 + 273)K} = 0,672$$

Carnot ısı makinesi aldığı ısı enerjinin 0,672'sini işe dönüştürmektedir.

$$Q_L = \frac{T_L}{T_H} \cdot Q_H = 0,672 \cdot 500 = 163,8KJ$$



Şekil 5.27 Örnek problem 5.4 genel çizimi



### 5. Carnot Soğutma Makinesi ve Isı Pompası

Ters Carnot çevrimine göre çalışan bir soğutma makinesi veya ısı pompası, Carnot soğutma makinesi veya Carnot ısı pompası diye adlandırılır. Tersinir veya tersinmez olsun bir soğutma makinesinin veya ısı pompasının etkinlik katsayısı, aşağıdaki denklemlerle verilmektedir.

$$C.O.P_{SM} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

$$C.O.P_{IP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

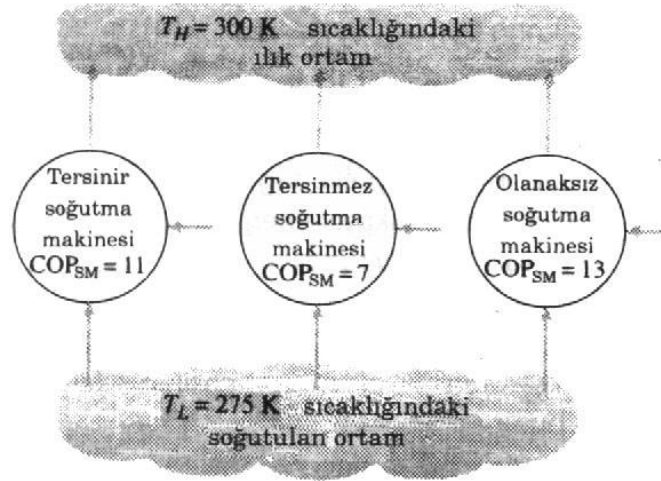
Bu arada  $Q_L$ , soğuk ortamdan çekilen ısı çekilen ısı,  $Q_H$ 'de sıcak ortama verilen ısıdır.

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H}$$

$$C.O.P_{SM} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

$$C.O.P = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

Bu değerler,  $T_L$  ve  $T_H$  sıcaklıkları sınırları arasında çalışan soğutma makinesi veya ısı pompasının etkinlik katsayılarının alabilecekleri en yüksek değerlerdir.  $T_L$  ve  $T_H$  sıcaklıkları arasında çalışan tüm gerçek makineleri ve ısı pompalarının etkinlik katsayıları daha düşük olacaktır. (Şekil 5.28)



Şekil 5.28 Soğutma makinesi COP'leri

Hiçbir soğutma makinesi aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan tersinir bir soğutma makinesinden daha yüksek bir COP' ye sahip olamaz.

Aynı sıcaklık sınırları arasında çalışan gerçek ve tersinir (Carnot) soğutma makinelerinin etkinlik katsayıları aşağıda karşılaştırılmıştır.

$$COP_{SM} \begin{cases} < COP_{SM} \text{ tersinmez ısı makinesi} \\ = COP_{SM} \text{ tersinir ısı makinesi} \\ > COP_{SM} \text{ imkansız} \end{cases}$$

Isı pompaları için benzer bir çizelge SM indisini IP ile değiştirerek hazırlanabilir.

Tersinir bir soğutma makinesinin veya ısı pompasının COP'si, verilen sıcaklık sınırları arasında olabilecek en yüksek değerlerdir.

Soğutma makinelerinin ve ısı pompalarının COP değerleri,  $T_L$  düştükçe azalır. Başka bir deyişle, daha soğuk bir ortamdan ısı çekmek için daha çok iş yapmak gerekir.

### Örnek Problem 5.5

Bir evi ısıtmak için şekil 5.29'da gösterilen ısı pompası kullanılmaktadır. Evin içi sürekli olarak 21°C sıcaklıkta tutulmaktadır. Dışarıda sıcaklık -5 °C iken evin ısı kaybı 135000 kJ/h'dır. Verilen şartlarda ısı pompasını çalıştırmak için en az ne kadar güç gerekecektir?

### Çözüm

Evin içini istenen sıcaklıkta tutabilmek için, ısı pompası kaybedilen ısı enerjisi kadar ısı enerjisi eve vermek zorundadır aksi takdirde sıcaklık 21°C'nin altına düşecektir. Başka bir deyişle ısı pompası eve (yüksek sıcaklıktaki enerji deposuna)  $Q_H = 135000 \text{ kJ/h} = 37,5 \text{ kw}$  ısı vermek durumundadır.

Güç gereksiniminin en az düzeyde olması için ısı pompası tersinir olmalıdır. Evin içi ( $T_H = 21 + 273 = 294 \text{ °K}$ ) ile dış ortam ( $-5 + 273 = 268 \text{ °K}$ ) arasında çalışan tersinir ısı pompasının COP'si aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

$$\text{COP}_{\text{IP}} = \frac{1}{1 - T_L / T_H} = \frac{1}{1 - (268\text{k} / 294\text{k})} = 11,3$$

Tersinir ısı pompasını çalıştırmak için gerekli güç

$$\text{COP}_{\text{IP}} = \frac{\text{elde edilmek istenen de\u011fer}}{\text{harcanması gereken de\u011fer}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net, giren}}}$$

$$W_{\text{net, giren}} = \frac{Q_H}{\text{COP}_{\text{IP}}} = \frac{37,5}{11,3} = 3,32 \text{ kw}$$

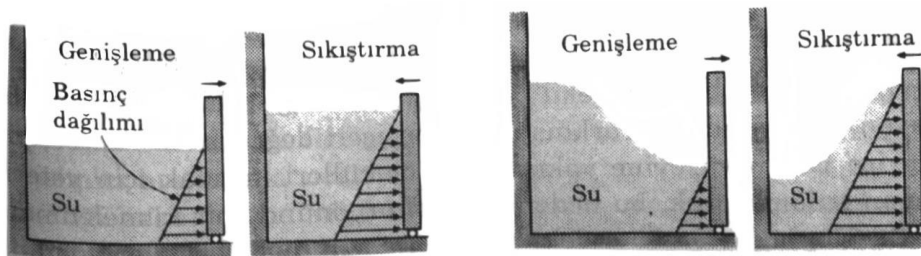
Isı pompası evin ısı gereksinimini 3,32 kw elektrik gücü tüketerek karşılamaktadır. Eğer bu evde elektrikli ısıtıcılar kullanılsaydı güç gereksinimi bu de\u011ferin 11,3 katı olan 37,45 kw olur. Bunun nedeni, elektrikli ısıtıcılarda elektri\u011fin ısıya dönüşüm oranının 1:1 olmasıdır. Fakat ısı pompasıyla dışarıdan alınan ısı enerjisinin bir so\u011fıtma çevrimiyle eve aktarılması sadece 3,32kw güç gerektirmektedir. Isı pompasının enerji var etmedi\u011fi, sadece bir ortamdan (so\u011fuk dış hava) aldığı ısı enerjisi bir başka ortama (evin içi) verdiği bilinen bir gerçektir.

### 6. Tersinmez Hal De\u011fişimleri

Tersinir hal de\u011fişimlerinde çevrime tabi tutulan sistem başlangıçtaki haline çevreye etkisi olmadan dönmesi gerekir. Tersinir olmayan hal de\u011fişimi tersinmez hal de\u011fişimi diye adlandırılır.

Bir sistem ister tersinir ister tersinmez olsun, bir dizi hal de\u011fişiminden geçerek yeniden ilk haline dönebilir. Dikkat edilmesi gereken husus, çevrimin tersinir hal de\u011fişimlerinden oluşması durumunda, çevrede net bir de\u011fişimin olmamasıdır. Tersinmez hal de\u011fişimlerindeyse çevre sistem üzerinde bir miktar iş yapar ve bu nedenle sistem başlangıçtaki haline dönemez.

Bir hal de\u011fişiminin tersinmez olmasına neden olan etkenlere tersinmezlik adı verilir. Sürtünme, dengesiz genişleme, iki gazın karıştırılması, sonlu sıcaklık farkında ısı geçişi, iki gazın karıştırılması, katıların elastik olmayan şekil de\u011fiştirmeleri ve kimyasal reaksiyonlar bu etkenler arasındadır. Bunlardan herhangi birisi hal de\u011fişimini tersinmez yapar. Tersinir hal de\u011fişimlerinde bu etkenlerden hiç birisi yoktur.



Şekil 5.29 En çok tersinir hal de\u011fişimlerinde elde edilir. En az iş tersinir hal de\u011fişimlerinde gerekir.

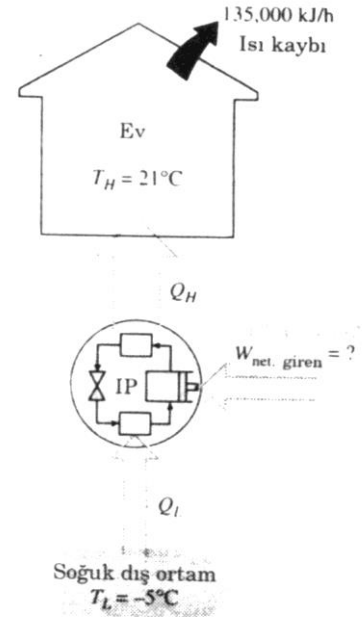
### 7. Tersinir Carnot Çevrimini Tersinmez Hale Getiren Etkenler

Soğutucu ünite de serpantinlerinde ve emme borusunda ve klapesindeki sürtünme belirli bir ısı kazancı sağlar ve basınç düşmesine neden olur,

Piston ve silindir cidarları arasındaki sürtünme, sistem çevre ile ısı alışverişi,

Kompresörün adyabatik olarak sıkıştırma yapmadığı için,

Basma borusundaki ve yo\u011fuşturucudaki sürtünme basınç düşüşüne neden olduğu için,



Şekil 5.29 Örnek problem 5.5 genel çizimi.

## 6. GAZ KANUNLARI

### 6.1 GİRİŞ

Gazlar sıkıştırılabilen akışkanlar olarak tanımlanırlar. Yeryüzünü saran hava bir gaz karışımıdır. %78 Azot , % 21 Oksijen ve diğer gazlardan oluşmaktadır. Ayrıca endüstride oksijen , hidrojen , azot , karbondioksit , vb gazlar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

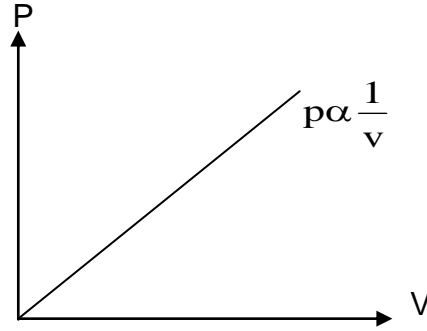
Gazlar moleküllerden oluşmuştur. Moleküllerin ise, artan sıcaklığa bağlı olarak kinetik enerjileri dolayısı ile hızları artmaktadır. Gaz akışkanları etkileyen diğer etmenler ise basınç ve hacimdir.

Basınç, gaz moleküllerinin kap çeperlerine yapmış oldukları vuruş etkileridir. Moleküller buldukları kapların çeperlerine dik etki yaparlar.

Bu bölümde Boyle, Charles, basınç kanunları genel gaz eşitliği, kısmi basınçlar ve karakteristik gaz eşitlikleri incelenecektir.

### 6.2 BOYLE KANUNU

Sabit kütleli, sabit sıcaklıkta bir gaz maddenin hacmi ile basıncı ters orantılıdır. Yani basıncı arttıkça hacmi azalır, hacmi arttıkça da basıncı azalmaktadır.



Diyagram 6.1 Sabit kütleli, sabit sıcaklıkta bir gaz maddenin hacmi ile basıncı ters orantılı olduğunun P-V diyagramında gösterilmesi.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Basınç ile hacminin çarpımı da sabittir.

$$P.V = k$$

Tablo 6-1 'de örnek olarak değişik basınç ve değişik hacimlerdeki P.V çarpımlarının sabit olduğu görülmektedir.

V(hacim)	P(basınç)	P.V
48.0	1.00	48.0
38.0	1.27	48.3
23.0	2.10	48.3
13.0	3.70	48.1

Tablo 6.1 P.V çarpımlarının sabit olduğunun gösterilmesi

P.V çarpım değerlerindeki çok küçük değerlerde değiştikleri için bu değerleri sabit kabul edebiliriz. Ama çok yüksek basınçlarda ve çok düşük sıcaklıklarda Boyle yasasından sapmalar olabilir. Aşağıdaki tablo buna bir örnektir.

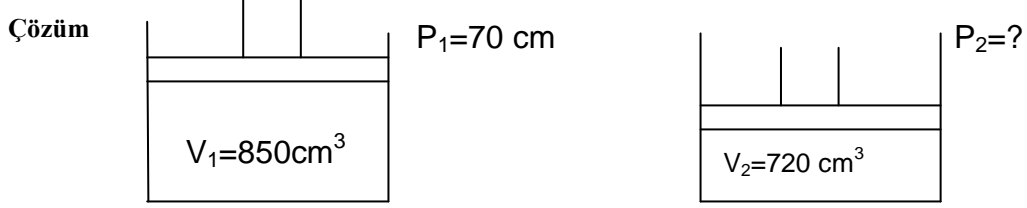
P	Azot(P:V)	Karbondioksit(P:V)	Hidrojen(P.V)
1atm	1.00	1.00	1.00
50atm	0.9846	0.7413	1.033
200atm	1.0365	0.4087	1.1336
400atm	1.2557	0.7178	1.2775
1000atm	2.0641	1.5525	1.7107

Tablo 6.2 Çok büyük basınçlarda P.V sabitinin değişmesi

Gerek Boyle ve gerekse ileride anlatacağımız yasalara tamamen uyan gazlara ideal gaz bu yasaya uymadığı durumlardaki davranışlar için ise gaz gerçek gaz niteliğindedir denir.

**Örnek Problem 6.1**

70 cmHg basıncında 850 cm<sup>3</sup> olan bir gaz, sıcaklık sabit tutularak hacmi 720 cm<sup>3</sup> olacak şekilde bastırıldığında, basıncının ne kadar artacağını hesaplayınız ?



Şekil 6.1 Örnek problem 6.1 genel çizimi

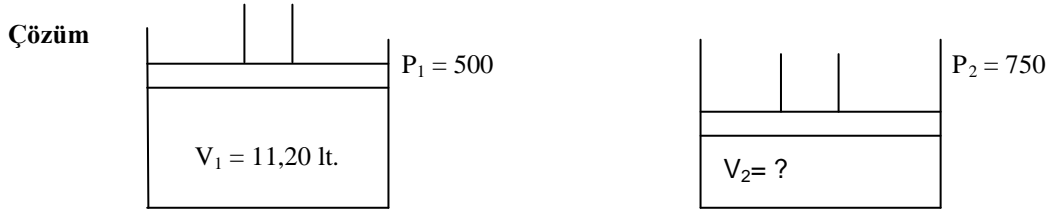
Sıcaklığın soğuk tutulabilmesi için silindir soğutulur.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}, \quad \frac{70}{P_2} = \frac{720}{850} \quad P_2 = 82,6 \text{ cm}$$

Basıncın artan miktarı = 82.6-70.0=12.6 cm civa basıncıdır.

**Örnek Problem 6.2**

Sabit sıcaklıkta ve belirli miktarda gazın 500mmHg basıncında işgal ettiği hacim 11.20 lit 'dir. Gazın basıncı 750mm Hg basıncına yükseltirse son hacim ne olur?



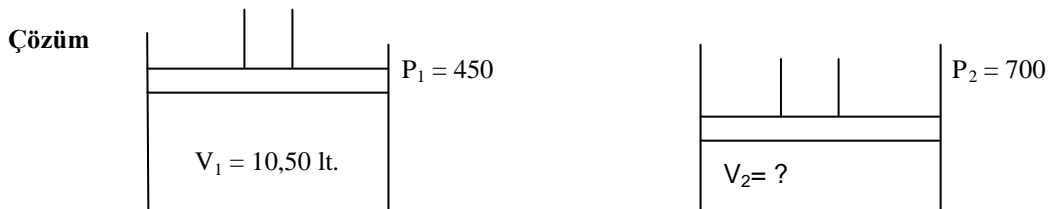
Şekil 6.2 Örnek problem 6.2 genel çizimi

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1},$$

$$\frac{500}{750} = \frac{V_2}{11,20}, \quad V_2 = 7,46 \text{ lt}$$

**Örnek Problem 6.3**

Sabit sıcaklıkta ve belirli miktarda gazın 450 mmHg basıncında işgal ettiği hacim 10,50 lt'dir. Gazın basıncı 700 mmHg basıncına yükseltirse son hacmi ne olur?



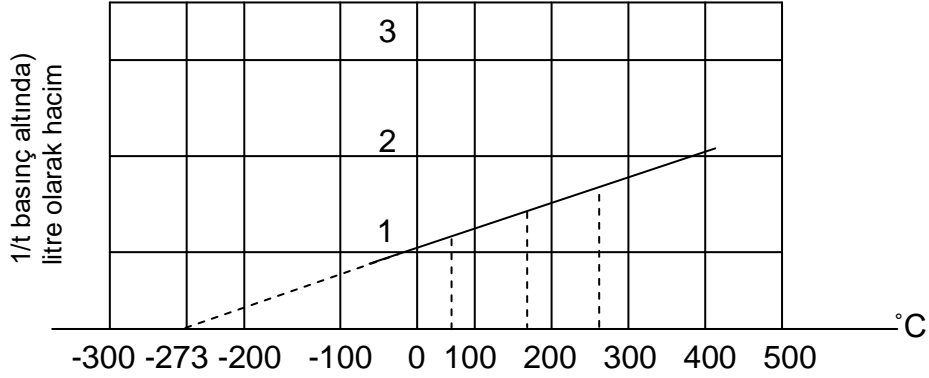
Şekil 6.3 Örnek problem 6.3 genel çizimi

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1},$$

$$\frac{450}{700} = \frac{V_2}{10,5}, \quad V_2 = 6,75 \text{ lt}$$

### 6.3 CHARLES KANUNU

Bir gazın sıcaklığı değiştirilirse o gazın ya hacmi ,ya basıncı ya da her ikisi de değişebilir. Gazların sabit kütlede ve sabit basınçta sıcaklığı ile hacmi doğru orantılı olarak değişmektedir. Bir gazın çeşitli sıcaklıklarda hacimleri seri deneylerle tayin edilerek, bir grafik çizilecek olursa düzgün doğru elde edilir.



Grafik 6.1 Sabit kütle ve basınçta hacim sıcaklık ilişkisi

Elde edilen doğrunun eğimi deneyde kullanılan gazın hacmine bağlıdır. (Grafik 6.1) incelenirse nokta nokta gösterilen kısım ölçü yapılması mümkün olmayan sıcaklıklar sınırındır. Sıcaklık sıfır olduğu zaman gazın hacmi sıfır değildir. Uzatılan doğru sıcaklık eksenini  $-273^{\circ}\text{C}$  'de keser. Bu nokta erişilebilen en düşük sıcaklık olup, bu sıcaklıkta gazın molekülleri arasındaki hacmi sıfır olmaktadır.  $-273^{\circ}\text{C}$  'de hiç bir madde gaz halinde bulunamaz.

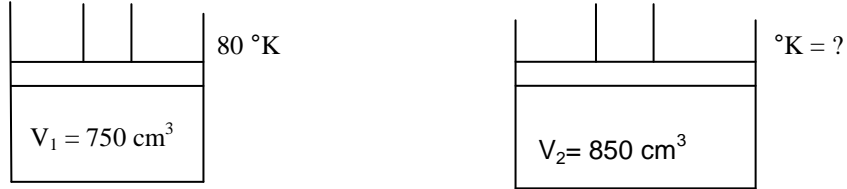
Charles kanununda sabit kütlede ve sabit basınçta bir gazı sıcaklığı ile hacmi doğru orantılı olarak değişir.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad V_1 \cdot T_2 = V_2 \cdot T_1$$

#### Örnek Problem 6.4

Sabit kütlede ve sabit basınçta bir gaz birincide hacmi  $750 \text{ cm}^3$ 'te ve  $80^{\circ}\text{K}$ 'dir. Hacmi  $850 \text{ cm}^3$ 'e çıkarılırsa sıcaklığı ne olur?

#### Çözüm



Şekil 6.4 Örnek problem 6.4 genel çizimi

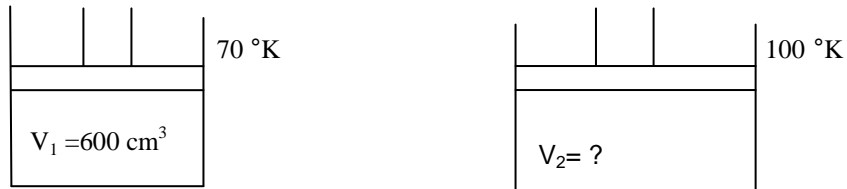
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{750}{80} = \frac{850}{T_2}, \quad T_2 = 90,66^{\circ}\text{K}$$

#### Örnek Problem 6.5

Sabit kütlede ve sabit basınç bir gaz birinci ölçümde  $600 \text{ cm}^3$  hacme sahip ve  $70^{\circ}\text{K}$  'dir. İkinci ölçümde sıcaklığı  $100^{\circ}\text{K}$  'dir. Hacmi ne kadardır?

#### Çözüm

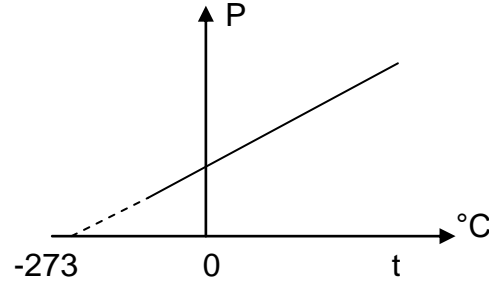


Şekil 6.5 Örnek problem 6.5 genel çizimi

$$\frac{600}{70} = \frac{V_2}{100} \quad V_2 = 847,1 \text{ cm}^3$$

#### 6.4 GAY-LUSSAC KANUNU

Kütlesi ve hacmi sabit olan gazların basınçları, sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişir. Bu ilke Gay-Lussac kanunu olarak bilinir. Kapalı bir çelik kaptaki gazın sıcaklığı arttırılırsa gaz moleküllerinin kinetik enerjileri artar. Kinetik enerjinin artması, gaz moleküllerinin hızlarının artmasından ileri gelir. Birim zamanda birim yüzeye çarpan molekül sayısı artar ve gaz basıncı artmış olur. Sıcaklığı azaltılan gazların basınçları azalır. Kütlesi ya da mol sayısı sabit olan bir gazın hacmi sabit tutularak, basınç değişimi y ekseninde, sıcaklık değişimi °C olarak x ekseninde gösterilmek üzere bir grafik çizilse, bu grafik Şekil 6.6'daki gibi olur.



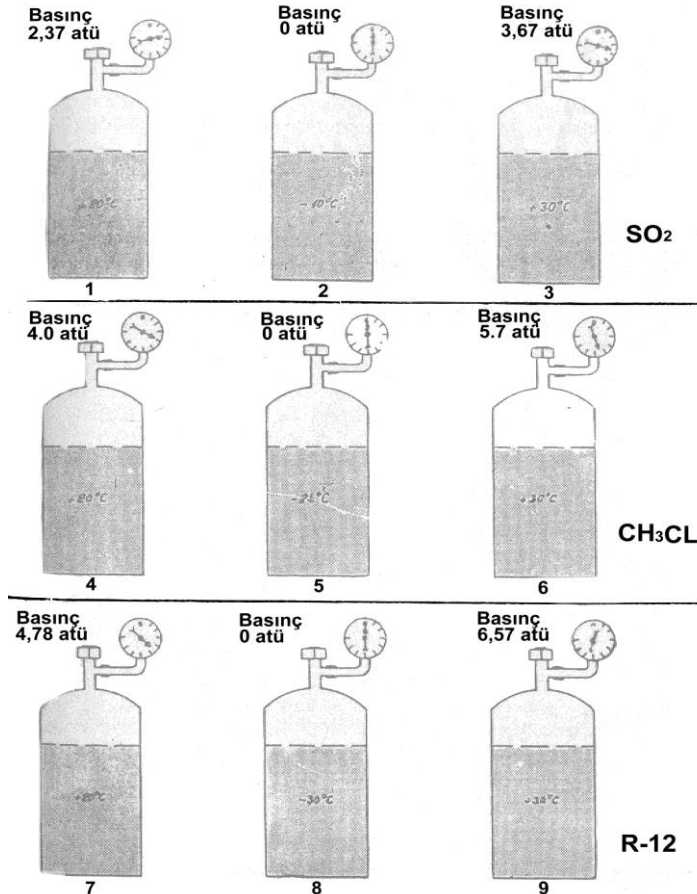
Şekil 6.6 Kütlesi ve hacmi sabit tutulan bir gazın basınç ve sıcaklık ilişkisi

Bir kap içinde bulunan gazın basıncı gaz ısıtılırsa artar. Basınç ve sıcaklık arasındaki matematiksel bağıntı, hacim ve sıcaklık arasındaki bağıntıya benzer. Hacim sabit tutulduğunda, bir gazın basıncı doğrudan mutlak sıcaklık ile değişir.

$$P \propto T \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$P = KT$$

Bu durumda k'nın değeri incelenen gazın miktarına ve hacmine bağlıdır. Bu genelleme bazen Amontons yasası olarak ta isimlendirilir.



Şekil 6.7 Sıcaklık değişiminin basınç değişimine etkisi.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi SO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>Cl ve R-12 gazlarının basınç sıcaklık ilişkisi görülmektedir.

SO<sub>2</sub> gazı +20°C sıcaklıkta basıncı 2,37 atü iken, -10°C sıcaklığında 0 atü basıncı değerinde, +30°C ‘de ise basıncı 5,7 atü’dür.

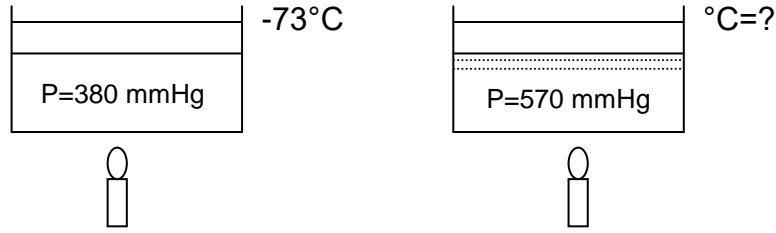
CH<sub>3</sub>Cl ‘de ise +20°C sıcaklıkta basınç 4,0 atü iken -24 °C sıcaklığında 0 atü basıncı değerinde, +30°C ‘de ise basıncı 5,7 atü’dür.

R-12 gazı +20°C sıcaklıkta basıncı 4,78 atü iken, -30 °C’ de sıcaklıkta 0 atü değerinde, +30 °C ‘de ise basıncı 6,57 atü ‘dür. Sabit hacim ve kütlede gazların basıncı arttıkça sıcaklığı da artmakta, basınç azaldıkça sıcaklığında azalmakta görülmektedir.

### Örnek Problem 6.6

Bir çelik kap içinde 380mmHg basıncında, -73°C sıcaklıkta He gazı vardır. Bu gazın basıncını, 570 mmHg basıncına çıkardığımızda sıcaklığı kaç °C olur?

### Çözüm



Şekil 6.8 Problem 6.6 genel çizimi

$$380 \text{ mmHg} = \frac{380}{760} = 0,5 \text{ atm}$$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

$$570 \text{ mmHg} = \frac{570}{760} = 0,75 \text{ atm}$$

$$\frac{0,5}{200} = \frac{0,75}{T_2}$$

$$-73^\circ\text{C} = 200^\circ\text{K}$$

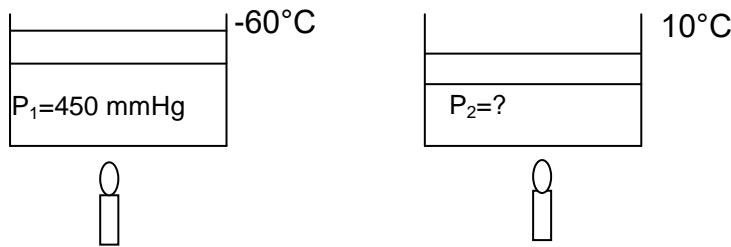
$$T_2 = 300^\circ\text{K}$$

$$300 - 273 = 27^\circ\text{C}$$

### Örnek Problem 6.7

Bir çelik kap içinde 450mm Hg basıncında -60°C sıcaklıkta CO<sub>2</sub> gazı vardır. Bu gazın sıcaklığını 10°C sıcaklığına çıkardığımızda çelik kap içindeki basıncı hesaplayınız?

### Çözüm



Şekil 6.9 Problem 6.7 genel çizimi

$$\frac{450}{760} = 0,592$$

$$\frac{0,592}{213} = \frac{P_2}{283}$$

$$-60^\circ\text{C} = 213^\circ\text{K}$$

$$P_2 = 0,786 \text{ atm}$$

$$10^\circ\text{C} = 283^\circ\text{K}$$

## 6.5 GAZLARIN GENEL DENKLEMİ

Gazların genelde en çok karşılaşılan durumu basınç, sıcaklık ve hacim değişkenlerin her üçünün de değişimidir. Bu durum aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Birinci durumdaki toplam değer, ikinci durumdaki toplam değerle aynıdır. Sadece değişen basınç, hacim ve sıcaklık değerleridir.

Genel gaz denklemi Gay- Lussac, Boyle ve basınç kanunlarının en son şeklidir.

### Örnek Problem 6.8

Birinci durumda bir gazın basıncı 5 Mpa, hacmi 2 m<sup>3</sup> sıcaklığı ise 20 °C 'dir. İkinci durumda gazın basıncı 8 Mpa 'a çıkarılmakta; hacmi ise 1m<sup>3</sup>'e düşmektedir. Buna göre gazın ikinci durumdaki sıcaklığını bulunuz?

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{5,2}{293} = \frac{8,1}{T_2}$$

$$T_2 = 234,4 \text{ °K}$$

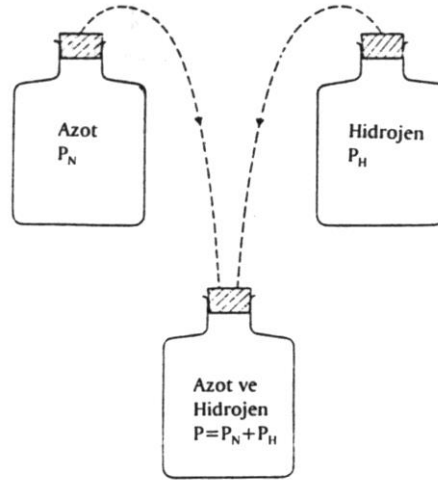
$$T_2 = -38,6 \text{ °C}$$

### 6.6 DALTONUN KISMİ BASINÇ KANUNU

Dalton'un kısmi basınç kanunu sabit sıcaklıkta belirli hacimdeki gaz karışımlarının kaba uyguladıkları basınç toplamı, her bir gazın kaba tek tek yapmış oldukları basınca eşittir.

Şekil 6-10'da görüleceği gibi bir kap içine azot ve hidrojen gazı birlikte konuluyor. Her iki gazın kaba yaptıkları basınç, her birinin tek tek yaptıkları basınca eşittir.

$$P_T = P_N + P_H$$



Şekil 6.10 Dalton'un Kısmi Basınçlar kanunu

### Örnek Problem 6.9

Bir kap içinde azot ve hidrojen gazları bulunmaktadır. Her iki gazın kaba yapmış oldukları basınç değeri 10 Mpa'dır. Kap içinde tek azot bulunduğunda kaba yaptığı basınç 3 Mpa olduğuna göre hidrojenin kaba yaptığı basıncı hesaplayınız?

$$P_T = P_N + P_H$$

$$P_H = P_T - P_N$$

$$P_H = 10 - 3$$

$$P_H = 7 \text{ Mpa}$$



## 6.7 KARAKTERİSTİK GAZ EŞİTLİĞİ

Genel gaz denkleminde ifade edildiği gibi bir yazın sıcaklığı basıncı ve hacmi sonsuz sayıda değiştirilse de sonuçta sabit bir sayıya ulaşır.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n V_n}{T_n} = R$$

Her gaz için farklı ve sabit olan bir sayıya gaz sabitesi denir. Her gazın sabitesi farklıdır. Sabite birim kütle için dikkate alındığında buna karakteristik gaz sabitesi denir. R ile gösterilir.

Birim iş  $J/kg^\circ K$  veya  $J/kg^\circ C$ 'dir.

Sonuçta eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\frac{PV}{T} / m = R \text{ olduğunda eşitlik}$$

$P \cdot V = m \cdot R \cdot T$  şeklinde oluşur.

$P$  = Mutlak Basınç (Pa)

$V$  = Hacim ( $m^3$ )

$m$  = Kütle(kg)

$R$  = Gaz sabitesi ( $J/kg^\circ K$ )

$T$  = Sıcaklık ( $^\circ K$ )

Oksijen gaz sabitesi  $R_{O_2} = 230 J/kg^\circ K$

Havanın gaz sabitesi  $R_{hava} = 288 J/kg^\circ K$

Helyumun gaz sabitesi  $R_{He} = 2079 J/kg^\circ K$

Hidrojen gaz sabitesi  $R_H = 4157 J/kg^\circ K$

### Örnek Problem 6.10

$0,9m^3$  hacme sahip bir tankın içinde  $15^\circ C$  sıcaklıkta  $520kPa$  basınçta helyum ve hidrojen gazı bulunmaktadır. Helyum gazının kütlesi  $0,5kg$  olduğuna göre:

- Her bir gazın ayrı ayrı yaptıkları kısmi basınç değerlerini;
- Hidrojen gazının kütlesini hesaplayınız?

- Helyumun tek basına yapacağı basınç;

$$P_{He} V = m \cdot R_{He} \cdot T$$

$$P_H = \frac{0,5 \cdot 2079 \cdot 288}{0,9}$$

$$P_{He} = 332,6kPa$$

Hidrojenin yaptığı basınç Dalton Kanuna göre;

$$P_T = P_H + P_{He}$$

$$P_H = P_T - P_{He}$$

$$P_H = 520 - 332,6$$

$$P_H = 187,4kPa$$

b) Hidrojen gazının kütlesi;

$$P_H V = m \cdot R_H \cdot T$$

$$m_H = \frac{187400 \cdot 0,9}{4157 \cdot 288}$$

$$m_H = 0,141 \text{ kg}$$

### Örnek Problem 6.11

1m<sup>3</sup> hacme sahip bir tankın içinde 27°C sıcaklıkta , 500 kPa basınçta gaz bulunmaktadır. Gazın karakteristik gaz sabiti 2079 j/kg°K'dır. Kap içindeki gazın kütlesini hesaplayınız?

$$P = 500 \cdot 10^3 (\text{Pa})$$

$$V = 1 \text{ m}^3$$

$$T = (273 + 27)^\circ \text{ K}$$

$$R = 2079 \text{ J/kg}^\circ \text{ K}$$

$$m = ?$$

$$PV = m \cdot R \cdot T$$

$$m = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$$

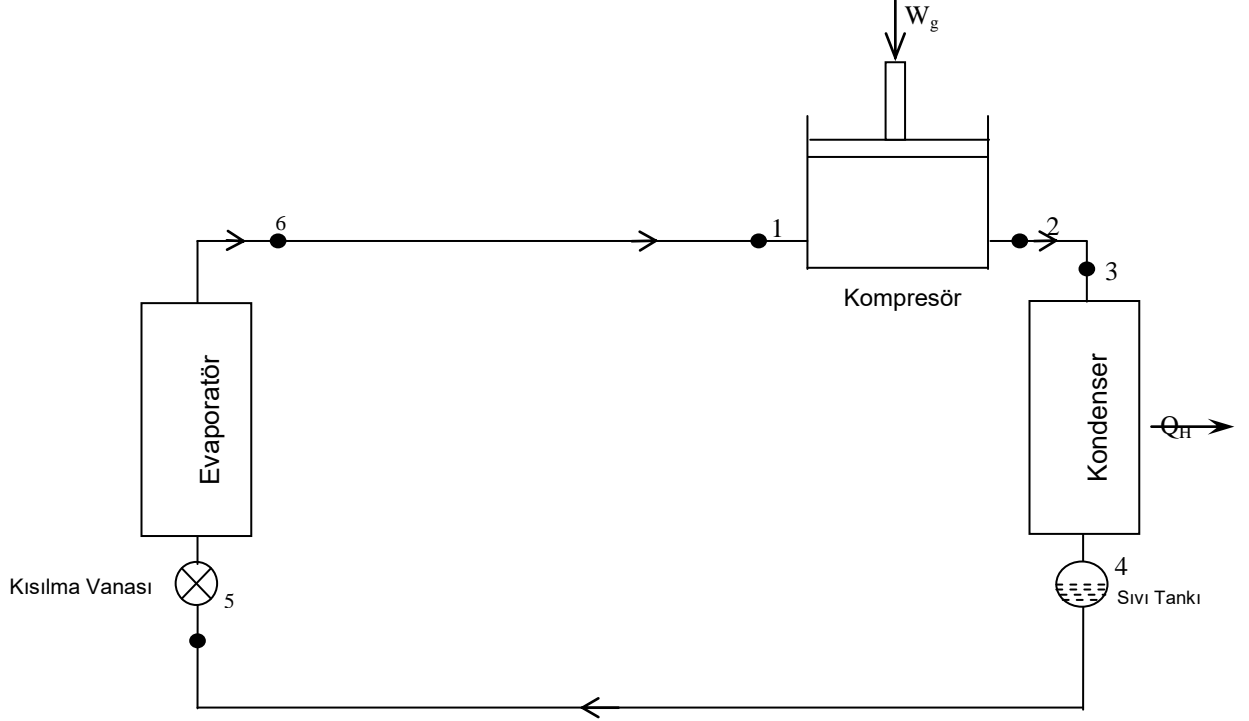
$$m = \frac{500 \times 10^3 \cdot 1}{2079 \cdot 300}$$

$$m = 0,80 \text{ kg}$$

## 7. TEK KADEMELİ SOĞUTMA DEVRESİ

Gerçek (tersinmez) buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi, ideal (tersinir) çevrimden farklıdır. Bu farklılık daha çok, gerçek çevrimi oluşturan elemanlardaki tersinmezliklerden kaynaklanır. Tersinmezliğin iki ana kaynağı, basıncın düşmesine neden olan akış sürtünmesi ve çevreyle olan ısı alışverişidir.

Buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma çevrimlerinde gazların halini değiştirerek düşük ısı enerji kaynağı  $Q_L$ 'den yüksek ısı enerji kaynağı  $Q_H$ 'a ısı transferi  $W_g$  işiyle gerçekleşmektedir.(Şekil 7.1)



Şekil 7.1 Tek Kademeli Soğutma Devresi

Şekil 7.1'de sisteme etki ettirilen  $W_g$  işi pistonu silindir içerisinde doymuş buhar halindeki soğutucu akışkanı sıkıştırarak kızgın buhar haline getirip yoğuşturucuya göndermekte, yoğuşturucu çıkışında sıvı haline gelen sıvı soğutucu akışkan kısılma vanasına gelerek vana çıkışında soğutucu akışkan basıncı ve sıcaklığı düşerek şiddetle kaynayan sıvı haline gelerek buharlaştırıcıya taşınır. Soğutucu akışkan buharlaştırıcının bulunduğu ortamdan ısı kazanarak buharlaştırıcı çıkışında doymuş buhar haline gelir. Piston alt ölü noktaya hareket ederken doymuş buhar halindeki soğutucu akışkan silindir içerisine dolarak sistem başlangıçtaki haline dönmüştür fakat tersinmez olarak.

### 7.1 TEK KADEMELİ SOĞUTMA DEVRESİ ELEMANLARI

#### 7.1.1 Kompresör

Soğutucu ünite buharlaşan ısı ile yüklü soğutucu akışkanı emerek arkadan gelen ısı yüklenmemiş akışkana yer temin edip buhar halindeki soğutucu akışkanın basıncını yoğuşturucudaki yoğuşma basıncına çıkartarak akışın sürekliliğini sağlamaktadır.

#### 7.1.2 Basma Borusu

Kompresörün bastığı yüksek basınç ve sıcaklık altındaki soğutucu akışkan buharının kondensere taşınmasını sağlar.

#### 7.1.3 Yoğuşturucu (Kondenser)

Soğutucu akışkanın buharlaştırıcıdan aldığı ısı ile kompresördeki sıkıştırma işlemi sırasında ilave olunan ısının alınarak kızgın buhar veya doymuş buhar halindeki soğutucu akışkanın kondenser çıkışında sıvı haline gelmesi kondenserde gerçekleşir.

Belirli bir ısı transferi yüzeyinde olup yoğuşurma ortamı hava, su, hava-su olabilir.

#### 7.1.4 Sıvı Tankı

Kondenserde yoğuşan sıvı soğutucu akışkan sıvı tankında toplanır. Sıvı tankında soğutucu akışkanın sürekli olması soğutucu ünitenin ihtiyacı olan akışkanı kesintisiz besler. Sıvı tankında eksik soğutucu akışkan olması durumunda soğutucu ünite dolaştırılması gereken akışkan miktarı temin edilemediği için soğutma sisteminin performansını olumsuz yönde etkiler. Düzenli bir soğutma işlemi için sıvı tankının bulunması kaçınılmazdır.

### 7.1.5 Sıvı Borusu

Sıvı tankında biriken sıvı soğutucu akışkanı kısılma (genleşme) valfine kadar taşınmasını sağlar.

### 7.1.6 Kısılma (Genleşme) Valfi

Kısılma vanaları, akış kesitini herhangi bir şekilde azaltarak akışkanın basıncını önemli ölçüde düşüren elemandır. Bilinen bazı örnekler arasında ayarlanabilir vana, kılcal (kapiler) borular vardır. (Şekil 7.2)



Şekil 7.2 Kısılma vanaları akışkanın basıncını büyük ölçüde düşürmek için kullanılır.

Akışkanın basıncı düşerken, sıcaklığında da büyük bir düşme gözlenir. Genleşme çok ani olduğu için soğutucu akışkanın ısı tutumunda bir değişiklik olmaz. Bu nedenle kısılma vanaları soğutma ve iklimlendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kısılma valfi genellikle küçük elemanlardır. Bu nedenle soğutucu akışkanla çevre arasında ısı geçiş alanı küçüktür. Isı geçişi için alanın küçük zamanında kısa olması nedeniyle kısılma vanalarında akış adyabatik kabul edilebilir.

### 7.1.7 Buharlaştırıcı (Soğutucu Ünite)

Belirli bir ısı transfer yüzeyinde olup soğutulan hacimden soğutucu akışkana ısı transfer ederek soğutucu akışkanı buharlaştırır. Bu işlem sırasında soğutulan hacim havasının ısı tutumu azalır, buharlaşan soğutucu akışkanın ısı tutumu artar. Isı tutumu azalan soğutulan hacim havasının sıcaklığı düşer ve bu işlemin devamı halinde soğutma işlemi gerçekleşmiş olur.

### 7.1.8 Emme Borusu

Soğutucu üniteye buharlaşan düşük basınçlı soğutucu akışkan buharının kompresör emişi girişine taşınmasını sağlar.

## 7.2 SOĞUTMA DEVRELERİNDE BASINÇ VE SICAKLIK KAVRAMLARI

Soğutma devrelerinde sistem içerisindeki soğutucu akışkanın sıcaklığı ve basıncı sistemin kısımları ve akışkanın çalışma şartlarını gösterir. Bu kavramlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

### 7.2.1 Yüksek Basınç Tarafı

Bir soğutma devresinin kompresörün basma tarafından basma borusu, kondenser, sıvı tankı, sıvı borusu ve genleşme valfine kadar olan kısmına “yüksek basınç tarafı” denir.

### 7.2.2 Alçak Basınç Tarafı

Bir soğutma devresinin genleşme valfi çıkışından itibaren soğutucu ünite, emme borusu ve kompresörün emişine kadar olan kısmına «alçak basınç tarafı» denir.

### 7.2.3 Yoğuşma Basıncı

Soğutucu akışkanın kondenserdeki kızgın buhar, doymuş buhar, ıslak buhar ve sıvı durumundaki akışkan sıcaklığına uyan basınç, yoğuşma basıncıdır. Yoğuşma basıncı aynı zamanda soğutma devresinin yüksek taraf basıncıdır.

Soğutma sisteminde kompresör devre dışı kaldığında belirli bir süre sonra yüksek basınç tarafındaki soğutucu akışkan sıcaklığı yüksek basınç tarafını çevreleyen hava sıcaklığına eşit olur. Bu durumda, soğutma devresinin yüksek taraf basıncı, çevre havasının sıcaklığına uygun bir basınç olarak belirlenir.

Belirli bir süre devre dışı kalan kompresör tekrar devreye girdiğinde soğutucu akışkan sıcaklığı ile yoğuşurma ortamının sıcaklığı (çevre havası yoğuşurma ortamı olarak kullanılırsa) arasında çok kısa bir süre sıcaklık farkı olmadığından dolayı yoğuşma olmaz. Çok kısa bir zaman içinde yüksek taraf sıcaklığı yoğuşurma ortamı (çevre havası sıcaklığının üzerine çıkarak bir sıcaklık farkı meydana gelir. Bu fark yeterli bir değere ulaşıncaya kondenserdeki soğutucu akışkandan yoğuşurma ortamına olan ısı transferi yeterli duruma gelerek kararlı bir yoğuşma işlemi başlamış olur.

### 7.2.4 Yoğuşma Sıcaklığı

Kondenserde yoğuşma durumundaki soğutucu akışkanın doymuş buhar, ıslak ve sıvı durumundaki sıcaklığıdır.

Yoğuşma sıcaklığı kondenser ısı transfer yüzeyi ile yoğuşurma ortamının sıcaklığı ile belirlenir. Yoğuşma sıcaklığı, yoğuşurma ortamının sıcaklığından ekonomik nedenlerden dolayı ve atmosfer sıcaklığının belirlenen ortam sıcaklığının üzerine zamanla çıkma olasılığına karşı daha yüksek seçilir. Ancak bu yükseklik farkının mümkün olduğu kadar küçük seçilmesi istenir.

### 7.2.5 Basma Hattı Sıcaklığı

Basma hattı sıcaklığı yoğuşma sıcaklığından farklıdır. Kompresörce basma hattına gönderilen soğutucu akışkan buharı, doymuş buhar ıslak buhar durumunda ise basma hattı sıcaklığı yoğuşma sıcaklığına eşit kabul edilebilir. Uygulamada soğutucu akışkan basma hattında kızgın buhar durumundadır. Kızgın buharın sıcaklığı, aynı basınçtaki doymuş buhar veya ıslak buhardan daha yüksek sıcaklıktadır. Basma hattı sıcaklığı ile yoğuşma sıcaklığı ayrı ayrı sıcaklık kavramlarıdır.

### 7-2-6 Buharlaştırma Basıncı

Soğutucu üniteye buharlaşan soğutucu akışkanın basıncına buharlaştırma basıncı denir. Buharlaştırma basıncı soğutucu ünite ısı transfer yüzeyi ile soğutulan hacmin havasının sıcaklığına göre değişir. Soğutucu ünite ısı transfer yüzeyinin belirli bir değeri için, soğutulan hacmin sıcaklığının daha düşük değerler alması halinde buharlaştırma basıncı düşer. Soğutulan hacmin sıcaklığının artması buharlaştırma basıncını da artırır.

### 7.2.7 Buharlaştırma Sıcaklığı

Her soğutucu akışkanın buharlaştırma basıncına bağlı olarak buharlaştırma sıcaklığı vardır, bu sıcaklık basınca göre değişir. Buharlaştırma sıcaklığı düşükçe buharlaştırma basıncında düşecektir. Buharlaştırma sıcaklığı da soğutulan hacmin havasının sıcaklığına göre değişmektedir.

### 7.2.8 Soğutma Tesiri

Birim ağırlıktaki soğutucu akışkanın tamamının soğutulmakta olan hacimden absorbe ettiği ısı miktarı, o soğutucu akışkanın soğutma tesiridir. Mesela, 1 kg ağırlığında 0 °C'de 1 kg buz ele alalım. Buz kütlelerinin tamamı eriyip su haline gelinceye kadar çevre havasından 335 kJ ısı absorbe eder. 335 kJ 0 °C'de ve 1kg ağırlığındaki buz' un gizli ısısı olup, buz için soğutma tesiridir.

Buz örneği gibi soğutucu akışkanları da inceleyelim. Bir soğutucu akışkanın 1 kg'ının soğutucu üniteye buharlaşırken soğutulan hacmin havasından absorbe ettiği ısı miktarı soğutma tesiri olup, bu miktar o soğutucu akışkanın buharlaştırma gizli ısısına eşittir. Ancak bu karşılaştırma soğutucu akışkanın sıvı durumundaki sıcaklığı ile, buharlaştırma durumundaki sıcaklığının birbirine eşit olması haline göre yapılmıştır. Uygulamada, soğutucu akışkanın sıvı durumundaki sıcaklığı soğutucu üniteye buharlaştırma sıcaklığından daima yüksektir. Soğutucu akışkanın buharlaştırıcı da soğutulmakta olan hacmin havasından ısı absorbe etmeden önce sıcaklığı buharlaştırma sıcaklığına düşürülür. Bu sebeple, soğutucu akışkanın sadece belirli bir kısmı soğutucu üniteye buharlaşır ve soğutulmakta olan hacmin havasından ısı absorbe eder. Demek ki soğutma tesiri soğutucu akışkanın sıvı durumundaki sıcaklığı ile soğutucu üniteye buharlaştırma sıcaklığına göre belirlenmekte olup, bu değer soğutucu akışkanın toplam buharlaştırma gizli ısısından daha küçüktür. Toplam buharlaştırma gizli ısısı soğutma tesiri yüzünden erişilebilecek ideal bir değerdir.

Her soğutucu akışkanın buharlaştırma gizli ısısı farklı olduğundan belirli sıvı ve buharlaştırma sıcaklıklarına göre değişik soğutucu akışkanların soğutma tesirleri de farklı değerlerde olur.

Soğutma sistemlerinde soğutma tesiri yüksek olan soğutucu akışkanlar tercih edilir, çünkü sistemde daha az soğutucu akışkan dolaştırılacağı için sistemde dışarıdan verilen iş az olacaktır.

Soğutma tesirleri termodinamik tablo veya çalışma sıcaklıkları verildiği zaman ph diyagramından bulunabilir.

### Örnek Problem 7.1

+30 °C yoğuşma sıcaklığı, -10 °C buharlaştırma sıcaklıkları arasında R-134a soğutucu akışkanla çalışacak sistemin soğutma tesir katsayısını bulunuz? (Tablo R-134a)

### Çözüm

Termodinamik tablodan -10 °C' deki soğutucu akışkanın doymuş buhar halindeki entalpisi, +30 °C' deki sıvı soğutucu akışkanın entalpisi bulunup doymuş buhar hakkındaki soğutucu akışkanın entalpisiyle sıvı halinde soğutucu akışkanın entalpi farkı 1kg soğutucu akışkanın soğutma tesirini verir.

R-134a termodinamik tablosundan ısı tutumları;

+30 °C doymuş sıvı durumundaki R-134a soğutucu akışkanın ısı tutumu = 142 kJ/kg,

-10 °C doymuş buhar durumundaki R-134a soğutucu akışkanın ısı tutumu = 294 kJ/kg,

Soğutma tesiri = 294 – 142 = 152 kJ/kg

### Örnek Problem 7.2

Örnek 7-1'deki çalışma şartlarında soğutma sistemi R-12 soğutucu akışkanla çalıştırılırsa soğutma tesirindeki değişimi bulunuz. (Tablo R-12)

+30 °C doymuş sıvı durumundaki R-12'nin entalpisi  $h_f = 227$  kJ/kg  
 -10 °C doymuş buhar durumundaki R-12'nin entalpisi  $h_g = 346$  kJ/kg  
 $q_0 = 346 - 227 = 119$  kJ/kg

### 7.3 KAPASİTE KAVRAMLARI

Tek kademeli buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma sistemlerinde ortam sıcaklığının istenilen düzeyde tutulabilmesi için soğutucu akışkana dışarıdan bir iş verilmesi gerektiği tekrar hatırlanırsa, soğutucu akışkana verilen işin ne kadarının ortam sıcaklığını istenilen düzeyde tutulabilmesi için harcadığı bilinmelidir. Sistemin istenilen şartlarda çalışabilmesi için aşağıdaki kapasite hesaplarının iyi öğrenilmesi gereklidir.

#### 7.3.1 Sistem Kapasitesi (soğutma yükü)

Bir soğutma sistemi soğutulmakta olan hacim veya hacimlerden absorbe ettiği ısı miktarına sistem kapasitesi veya soğutma yükü denir. Sistem kapasitesi kJ/h, kcal/h, Btu/h veya ton soğutma birimi ile ölçülür.

##### 1. Ton soğutma

Buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma sistemleri ev tipi soğutucu olarak geliştirilmeden önce yaz aylarında su meşrubat gibi içecekler ve gıda maddelerinin kısa sürede olsa soğuk muhafazası için, satın alınan buz kalıpları dolap içerisine konularak, soğuk muhafaza sağlanmaya çalışılmıştır.

Mekanik soğutma sistemlerinin geliştirilmesinden sonra soğutma kapasiteleri eriyen buz kütesinin yaptığı soğutmaya göre mukayesesi devam etmiştir.

2000 lb ağırlığındaki buz kütesi 32°F' tamamen eriyip su oluncaya kadar bulunduğu ortamdan aldığı ısı miktarı 1 ton soğutmadır.

1 ton ağırlık = 2000 lb

32 °F'de 1lb buz eridiği ortamdan 144 Btu ısı emer

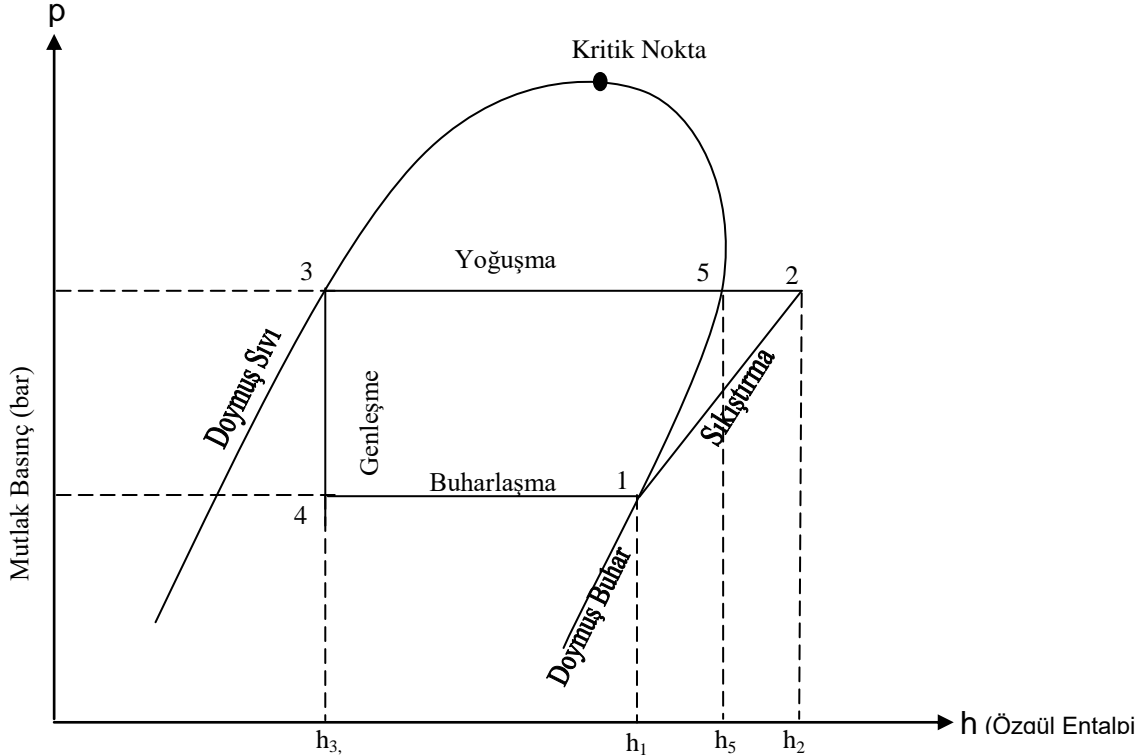
1 ton soğutma = 2000 lb x 144Btu/lb = 288000 Btu,

1 ton buz 24 saatte su haline gelirse ortamdan

288000 Btu/24h = 12000/60 = 200 Btu/dak

Soğutma yükü ve diğer kapasite hesaplarını yapabilmek için en yaygın kullanılan yöntem, soğutma sisteminin çalışma (buharlaşma ve yoğunlaşma) sıcaklıkları belirlenip termodinamik tablo ve p-h diyagramıyla bulunur.

##### 2. Sistem kapasitesinin P-h diyagramı ve termodinamik tabloyla bulunması



Diyagram 7.1 P-h diyagramı

Diyagram 7.1'de soğutucu akışkan, kondenser çıkışı 3 noktasında doyma eğrisiyle çakıştığı için doymuş sıvı halinde, soğutucu ünite çıkışı 1 noktasında doyma eğrisiyle çakıştığı için doymuş buhar halindedir. İdeal bir soğutma çevrimi bu diyagramdaki gibi çalışmaktadır. Fakat uygulamada dış havanın ve soğutulan hacmin sıcaklığının değişken olması diyagramdaki doyma eğrilerinden sapmalarına neden olmaktadır. Pratik soğutma çevrimlerine kapasite hesapları anlatıldıktan sonra tekrar üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulacaktır.

Soğutulan hacim sürekli olarak yüksek sıcaklık kaynağı çevre havasının ve diğer ısı kazançlarının etkisi altındadır. Soğutulacak hacimdeki ısı kazaçlarına göre soğutma yükü belirlenip bu ısının soğutulan hacimden uzaklaştırılabilmesi için yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıklarına göre soğutucu ünite de birim zamanda dolaştırılacak akışkan miktarını belirlemek gerekecektir. Soğutma yükü ısı kazaçları hesaplanıp bulunduğu göre sistemin doymuş buhar halindeki özgül entalpisi ve sıvı halindeki entalpisi termodinamik tablodan bulunarak aşağıdaki denklemden sistemde dolaştırılması gereken akışkan miktarı bulunabilir.

$$Q_0 = m_r \cdot (h_1 - h_{3,4})$$

$Q_0$  = Sistem kapasitesi

$m_r$  = Sistemde dolaştırılması gereken akışkan miktarı ( kg/h)

$h_1$  = Soğutucu akışkanın evaporatör çıkışında doymuş buhar halindeki ısı tutumu

$h_{3,4}$  = Soğutucu akışkanın kondenser çıkışında doymuş sıvı halindeki ısı tutumu

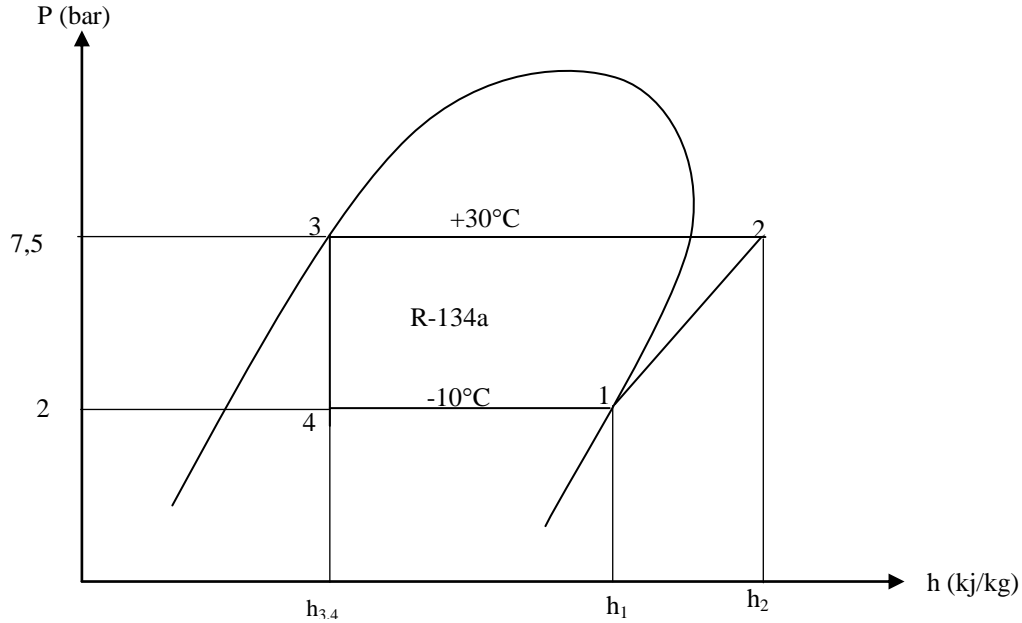
$$m_r = \frac{Q_0}{(h_1 - h_{3,4})} = \frac{\text{kJ/h}}{\text{kJ/kg}} = \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \times \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} = \text{kg/h}$$

### Örnek Problem 7.3

Sistem kapasitesi 2 kwh olan tek kademeli bir soğutma sistemi R-134a soğutucu akışkanla +30 °C yoğuşma , -10 °C buharlaşma sıcaklıkları arasında çalışmaktadır.

- Sistemin p-h diyagramını çizin.
- Sistemde dolaştırılması gereken akışkan miktarını bulunuz.

### Çözüm



Diyagram 7.2 P-h Diyagramı

134a soğutucu akışkan için P-h diyagramından

-10 °C doymuş buhar için  $h_1 = 294$  kJ/kg

+30 °C doymuş sıvı için  $h_{3,4} = 142$  kJ/kg

1kwh = 3600 kJ, 2 kwh = 7200 kJ

$$Q_0 = m_r (h_1 - h_{3,4})$$

$$m_r = \frac{7200 \text{ kJ/h}}{(294 - 142) \text{ kJ/kg}} = 47,368 \text{ kg/h}$$

### 7.3.2 Kompresör kapasitesi

Kompresör kapasitesi sistemdeki soğutucu akışkan buharını emip kondensere basabilecek değerde olmalıdır. Soğutucu akışkanın hareket hacmi sistem kapasitesine göre olduğundan herhangi bir soğutma devresi için kompresör kapasitesi sistemin soğutma kapasitesine eşit olmalıdır.

Kompresör kapasitesi soğutma kapasitesinden küçük olursa buharlaşma sıcaklığı ve basıncı yükselerek yeterli soğutma yapılamadığı gibi kompresörde zorlanma olur.

Kompresör kapasitesi sistemin soğutma kapasitesinden büyük olursa, buharlaşma sıcaklığı ve basıncı düşer. Hatta alçak basınç tarafı vakuma inerek sisteme atmosfer havası sızabilir. Bu durumda soğutma devresinde soğutucu akışkanla birlikte atmosfer havası dolaştığı için soğutma tesirini düşürdüğü gibi yeterli kapasitede soğutma yapamayarak kompresör işini artırır.

Kompresör kapasitesi mutlaka sistem kapasitesine eşit olmalıdır. Soğutma sistemlerinde yoğuşma sıcaklığının ve buharlaşma sıcaklığının sabit olmaması sistem kapasitesinde de değişken haline getirmektedir. Bu değişkenliği minimumda tutmak için kompresör devir sayısını yüke göre değiştiren sistemler ve buharlaşma basıncını otomatik veya elle sabit tutacak basınç regülatörleri geliştirilmiştir.

### Sıkıştırma işlemi

Sıkıştırma işleminde P-h diyagramında görüleceği üzere doymuş buhar noktası 1'de emilen soğutucu akışkan buharı kompresör tarafından 2 noktasına kadar basılarak soğutucu akışkanı kızgın buhar haline dönüştürür. Bu sıkıştırma işlemi sırasında kompresör tarafından yapılan birim ağılıktaki soğutucu akışkan için iş ısı olarak

$$q_y = (h_2 - h_1) = \text{kJ/kg}$$

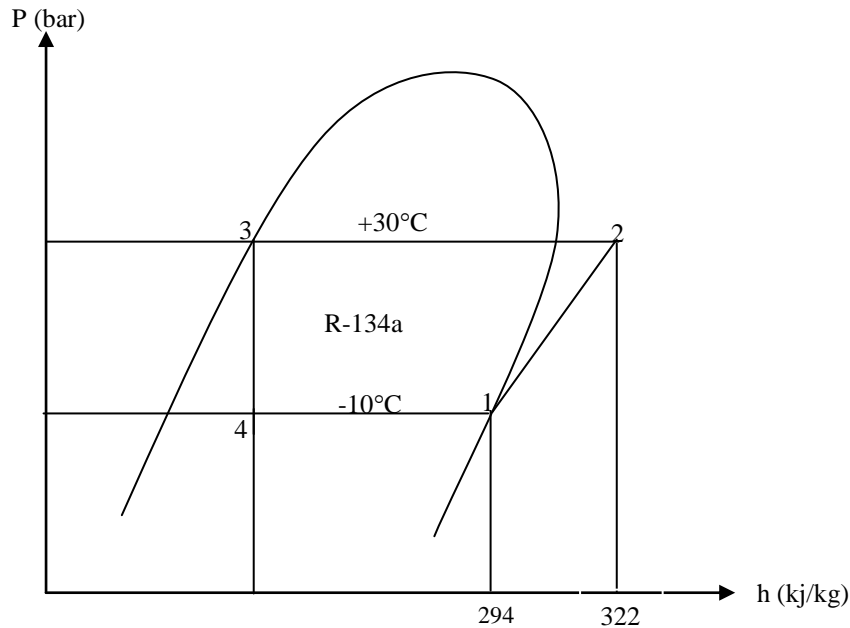
Sistemde m kg soğutucu akışkan dolaştırılıyorsa

$$Q_y = m_r (h_2 - h_1) = \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \text{kJ/h}$$

### Örnek Problem 7.4

Örnek 7.3'deki soğutma sisteminin P-h diyagramını çizip ve kompresör sıkıştırma ısısını bulunuz.

### Çözüm



Diyagram 7.3 P-h Diyagramı



P-h diyagramında +30 °C doymuş sıvı eğrisinden aşağıya dik inerek (3 noktası) –10 °C buharlaşma sıcaklığından yatay çizilen doğruyla kestirilerek  $h_{3,4}$  noktası bulunur, doymuş buhar noktası 1'den sabit entropi çizgilerine paralel doğru çıkılarak +30 °C yatay çizgisiyle karşılaştırılarak 2 noktası bulunur, 2 noktasından dik inilerek 2 noktasının entalpisi bulunur.

$$q_y = 322 - 294 = 28 \text{ kJ / kg}$$

$$Q_y = m_r (h_2 - h_1)$$

$$Q_y = 47,368(322 - 294) = 1326,304 \text{ kJ / h}$$

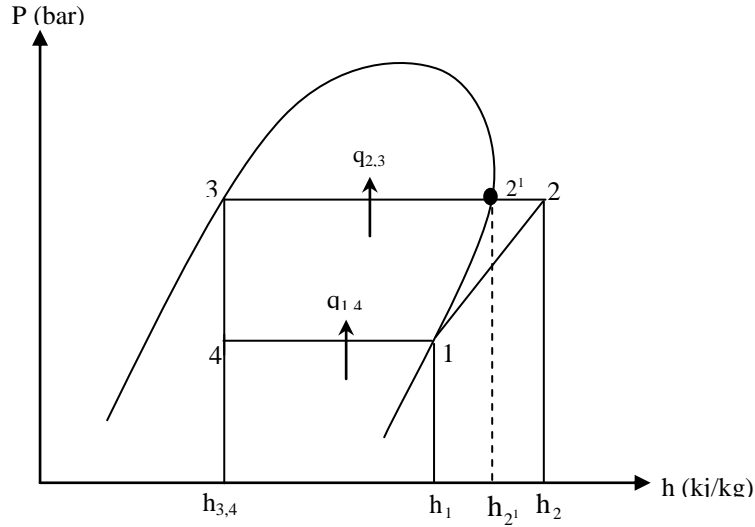
### 7.3.3 Yoğuşma işlemi

P-h diyagramı 7.4'te görüleceği üzere 2 noktasında kızgın buhar halindeki soğutucu akışkan  $q_{2,3}$  ısının bir miktarını atmosfer havası veya suya transfer edip entalpisi  $h_2 - h_{2'}$  kadar azalarak 2' noktasında doymuş buhar haline dönüşmüştür. 2' noktasında doymuş buhar haline gelen soğutucu akışkan  $q_{2,3}$  ısısının kalan kısmında yoğuşurma ortamına transfer ederek 3 noktasında doymuş sıvı haline gelerek entalpisi  $h_{2'} - h_3$  kadar azalır. P-h diyagramında entalpideki toplam değişim  $(h_2 - h_{2'}) + (h_{2'} - h_3)$  veya  $(h_2 - h_3)$  kadardır.

Kondenser tarafından yoğuşurma ortamına transfer edilen birim ağırlıktaki soğutucu akışkan için yoğuşma ısı  $q_k = h_2 - h_3$  kJ/kg

Sistemde m kilogram soğutucu akışkan dolaştırılıyorsa kondenser yoğuşurma kapasitesi;

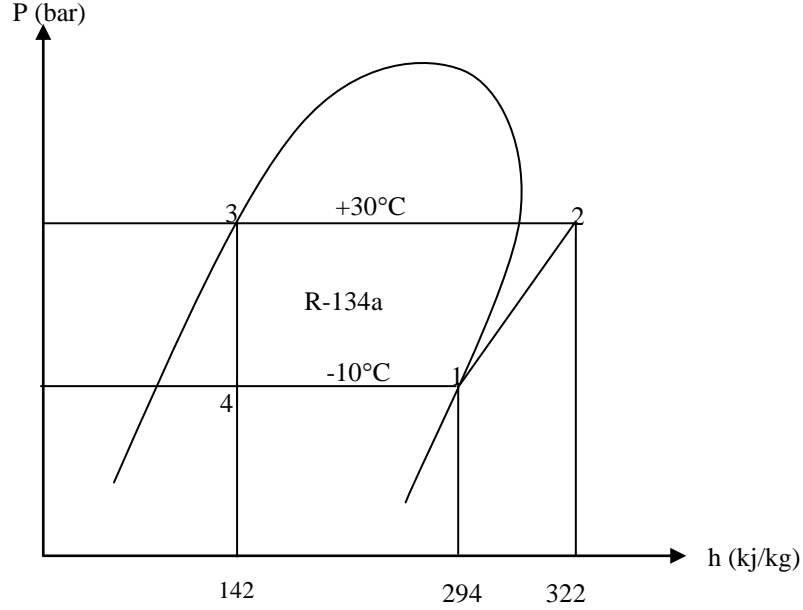
$$Q_k = m_r (h_2 - h_3), \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \text{kJ / h}$$



Diyagram 7.4 P-h diyagramı

**Örnek Problem 7.5**

Örnek 7.3'deki soğutma sisteminin kondenser yoğuşurma kapasitesini P-h diyagramı çizerek bulunuz?  
Diyagram 7.5 P-h Diyagramı



$$Q_k = m_r (h_2 - h_3)$$

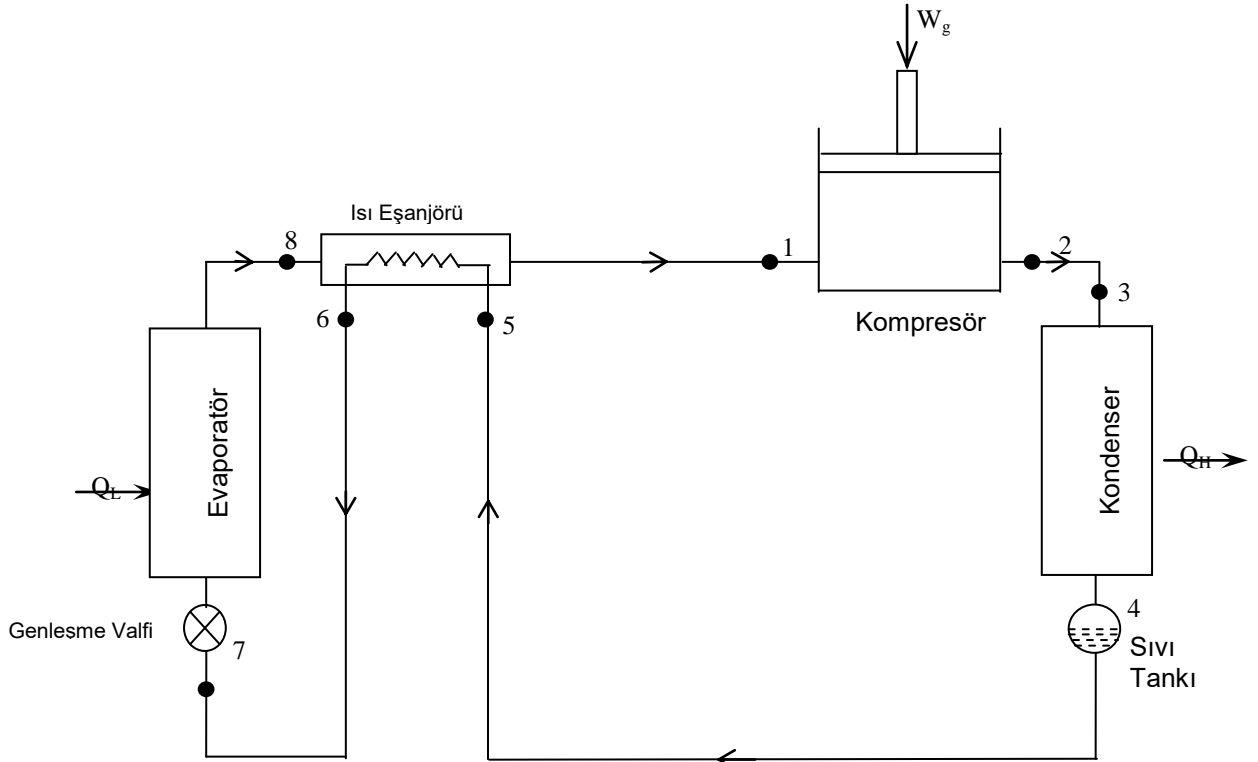
$$Q_k = 47,368 (322 - 142) = 8526,24 \text{ kJ/h}$$

**7.4 ISI EŞANJÖRLÜ TEK KADEMELİ SOĞUTMA DEVRELERİ**

Soğutma sistemleri, soğutucu akışkanın yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıklarına göre belirlendiği için yoğuşurma ortamı sıcaklığı belirlenen şartlarda ideal bir durumdur. Tatbikatta bu durumun pek mümkün olmadığı görülür.

Yoğuşurma ortamı (hava, su) sıcaklığının belirlenen değerden yüksek olması basma hattı basıncını artırarak kompresörün zorlanmasına, yoğuşurma ortam sıcaklığının düşük olması ise kondenser çıkışında soğutucu akışkanın aşırı soğutulmuş sıvı olarak çıkışına neden olacaktır.

Buharlaştırma sıcaklığı belirlenen değerden düşük olursa soğutucu akışkanın tamamı iç üniteye buharlaşamayıp emme hattına sıvı yürütmesine, ortam sıcaklığı yüksek olursa kompresörün uzun süreli çalışmasına neden olacaktır.



Şekil 7.4 Isı eşanjörlü tek kademeli soğutma sistemi şeması

Emme hattından kompresöre sıvı yürümesi halinde vuruntu oluşur. Bu vuruntuların emme ve basma klapeleri üzerinde yıpratıcı etkileri olduğu gibi fazla sıvı yürümesi durumunda silindir bloku ve kapağında çatlamalara neden olabilir.

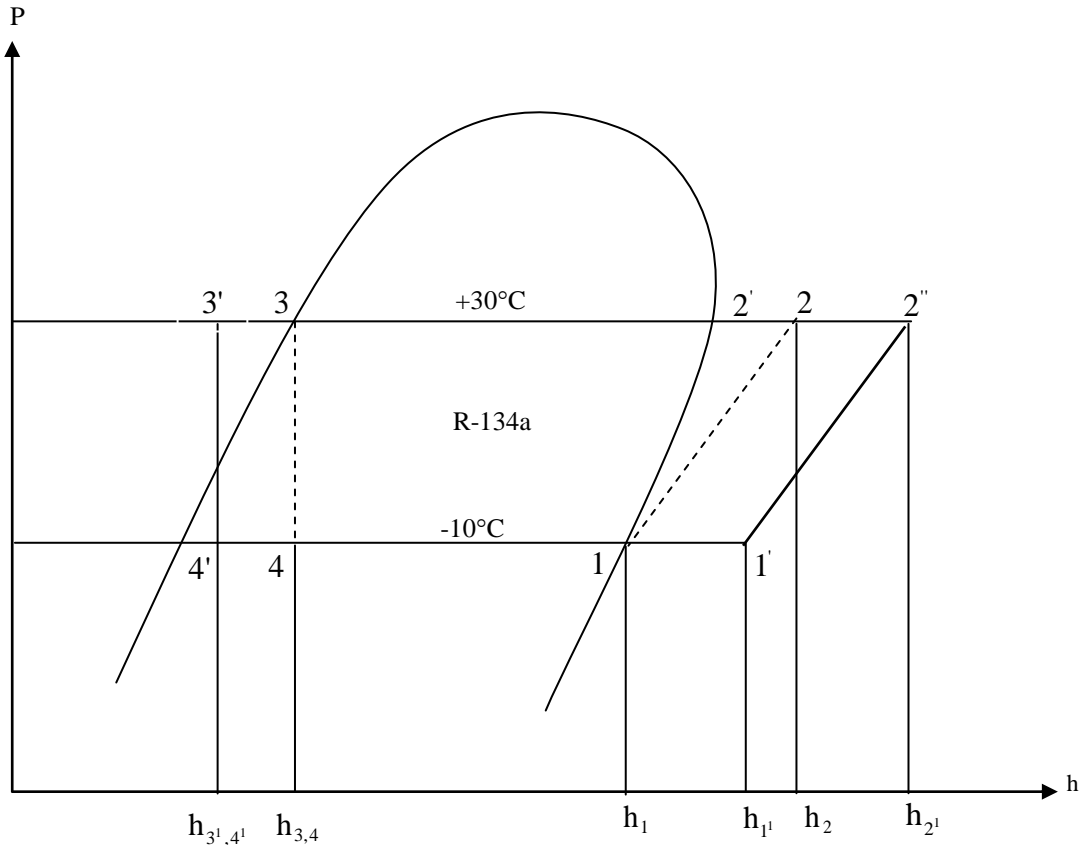
Kompresör kapasitesi sistem kapasitesinin üzerinde olursa kompresör tarafından emilen soğutucu akışkanın tamamı, buharlaşamayacağı için emme hattına sıvı yürümesi olacaktır.

Kompresöre emilen soğutucu akışkan buharında sıvı bulunmasını önlemek için, kompresörce emilen sıvı+buhar karışımı soğutucu akışkan, sıvı hattı tarafından aşırı ısıtma işlemine tabi tutularak soğutucu akışkanın tamamı buhar haline getirilip bu olumsuz durum giderilmiş olur.

1 noktasında, evaporatörde buharlaşan soğutucu akışkan buharı kompresör tarafından emilerek silindir içersine dolar.

2 noktasından soğutucu akışkana dışarıdan verilen  $W_g$  işi soğutucu akışkanı kızgın buhar haline dönüştürerek 3 noktasından kondensere gönderir. 4 noktasında sıvı haline dönüşen soğutucu akışkan sıvı tankına ve 5 noktasında ısı eşanjörüne girerek eşanjör çıkışı 6 noktasında aşırı soğutulmuş sıvı olarak 7 noktasında genişleme valfine gelir genişleme valfi çıkışında adiabatik olarak genişleyerek basıncı ve sıcaklığı düşen soğutucu akışkan evaporatörde buharlaşarak 8 noktasında ısı eşanjörüne girer, ısı eşanjörü çıkışında soğutucu akışkan aşırı ısıtılarak emme hattına sıvı yürümesi önlenmiş olur.

#### 7.4.1 Isı Eşanjörlü Tek Kademeli Soğutma Sisteminin P-h Diyagramı Üzerinde İncelenmesi



Diyagram 7.6 Isı eşanjörlü ve eşanjörsüz tek kademeli soğutma sisteminin ortak P-h diyagramı üzerinde gösterilmesi.

Diyagram 7-6'ta 1,2,3,4 notaları eşanjörsüz soğutma sisteminin P-h diyagramını  $1', 2'', 3', 4'$  noktaları da eşanjörlü soğutma sisteminin P-h diyagramını göstermektedir.

Eşanjörsüz soğutma sisteminin diğer sistemden açık farkı  $1'$  ve  $3'$  noktalarındaki soğutucu akışkanın halidir.

Eşanjörsüz soğutma sisteminde soğutucu akışkan kondenserde 2 noktasında kızgın buhar,  $2'$  de doymuş buhar, sıkıştırılmış doymuş sıvı eğrisi 3 de ise sıvı halindedir. 3 noktası aynı zamanda genişleme valfi giriş noktasıdır.

Soğutucu akışkan, evaporatör çıkışında doymuş buhar eğrisi 1 noktası ile çakışarak doymuş buhar halindedir. 1 noktası aynı zamanda kompresör giriş noktasıdır.

Eşanjörlü soğutma sisteminde sıvı soğutucu akışkan tarafından evaporatör çıkışında soğutucu akışkana verilen ısı soğutucu akışkanın ısı tutumunu doymuş buhar eğrisinin sağ tarafındaki  $h_1$ 'ne çıkartıp kuru doymuş buhar haline gelmesini sağlayıp emme hattına sıvı yürüme olasılığını da ortadan kaldırmıştır. Aşırı ısıtma kompresör giriş sıcaklığını buharlaşma sıcaklığının belirli miktar üzerine çıkarmıştır.

Sıkıştırılmış sıvı üzerindeki 3 noktası kondenser çıkışındaki soğutucu akışkanın sıvı olduğu noktadır. Diyagram da kondenser çıkışında soğutucu akışkanın ısı tutumu doyma eğrisinin sol tarafı 3<sup>1</sup> ne kaydığı görülmektedir. Bu sapma, ısı eşanjörüne emme hattından gelen soğutucu akışkan buharının kondenser çıkışındaki sıvı soğutucu akışkanı aşırı soğutarak gerçekleşmektedir.

Buraya kadar anlattıklarımızı aynı buharlaştırma ve yoğuşurma sıcaklıkları arasında çalışan eşanjörlü ve eşanjörsüz soğutma sistemlerini örnek problem üzerinde incelersek konu daha iyi anlaşılacaktır.

### Örnek problem 7.6

+30 °C yoğuşma, -10 °C buharlaşma sıcaklıkları arasında R-134a soğutucu akışkanla çalışan tek kademeli soğutma sisteminin soğutma yükü 5000 kJ/h'tır.

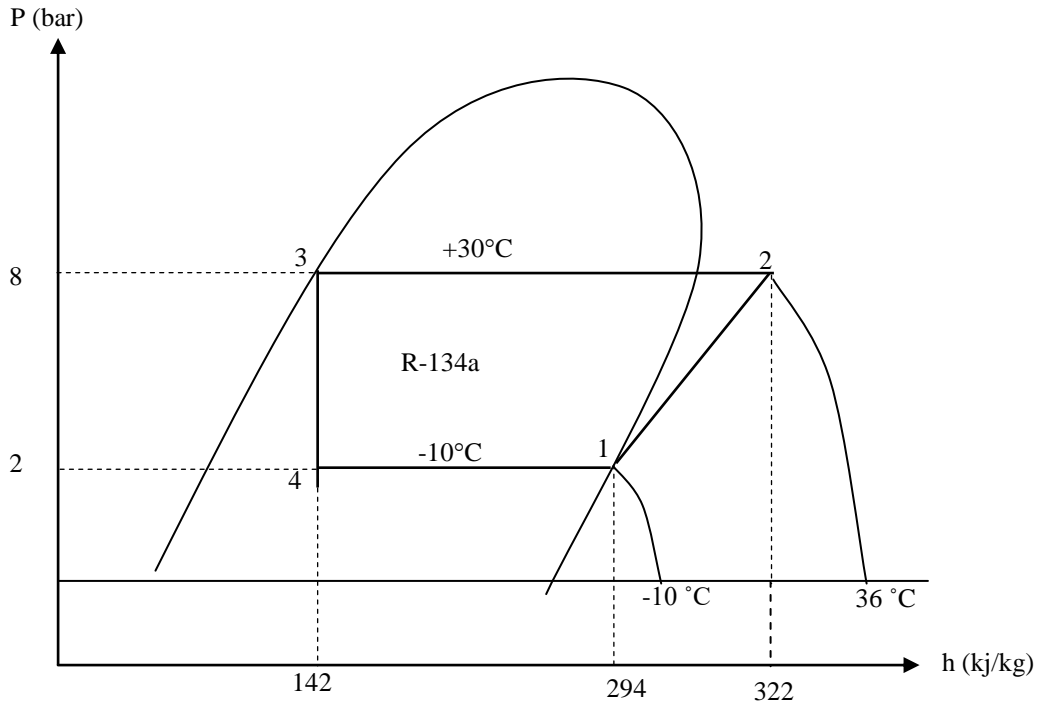
- Eşanjörsüz sistemin p-h diyagramını,
- Verilen soğutma yükünde sistemde dolaştırılması gereken soğutucu akışkan miktarını,
- Kompresör sıkıştırma ısısını,
- Kondanser yoğuşurma kapasitesini, bulunuz.

### Çözüm

134-a P-h diyagramı üzerinde +30 °C yoğuşma sıcaklığı sıkıştırılmış doymuş sıvı eğrisiyle çakıştırılıp -10°C buharlaşma sıcaklığından dik inilerek 3 ve 4 noktaları bulunur. -10 °C buharlaşma sıcaklığı doymuş buhar eğrisiyle çakıştırılarak 1 noktası bulunur. 1 noktasından sabit entropi çizgilerine paralel çizgi çizerek 3 noktasından (+30°C yoğuşma sıcaklığı) yatay çizgi çizerek 1 ve 3 noktaları çakıştırılarak 2 noktası bulunur.

1-2 ve 3,4 noktalarından entalpi doğrusuna dik inilerek soğutucu akışkanın entalpileri bulunur.

a) P-h diyagramı



$$\begin{aligned} \text{b) } Q_0 &= m_r (h_1 - h_{3,4}) \\ 5000 &= m_r (294 - 142) \\ m_r &= 5000 / 152 \\ m_r &= 32.89 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

$$\text{c) } Q_y = m_r (h_2 - h_1) = 32,89 (322 - 294) = 921,06 \text{ kJ/h}$$

$$\text{d) } Q_k = m_r (h_2 - h_3) = 32,895 (322 - 142) = 5921,1 \text{ kJ/h}$$

$$\begin{aligned} Q_k &= Q_0 + Q_y \\ Q_k &= 5000 + 921,1 = 5921,1 \text{ kJ} \end{aligned}$$

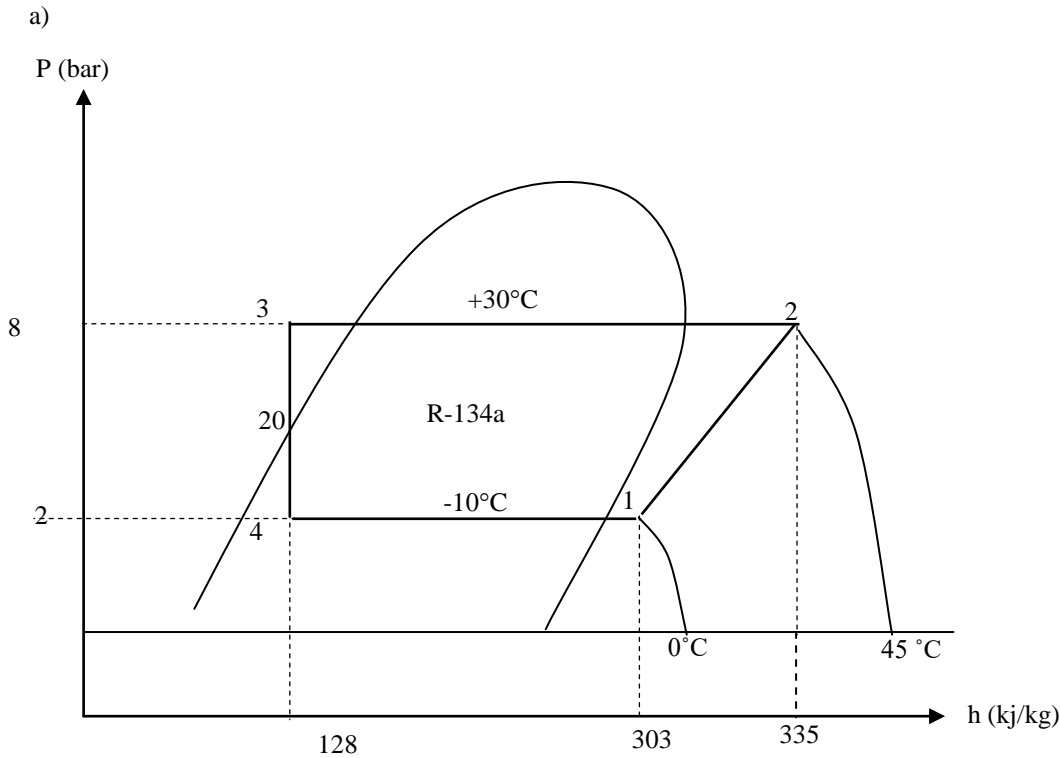
**Örnek problem 7.7**

Örnek problem 7.6'daki soğutma sistemi eşanjörlü hale getirildiği zaman; sıvı soğutucu akışkan ısı eşanjöründe 10°C aşırı soğutulmuş 20 °C oluyor, ısı eşanjöründe 10 °C aşırı ısıtılarak kuru doymuş buhar haline gelen soğutucu akışkan buharının kompresör giriş sıcaklığı 0 °C oluyor.

**Çözüm**

134a p-h diyagramı üzerinde +30°C yoğuşma sıcaklığı çizgisini sıkıştırılmış doymuş sıvı çizgisini kestirerek bir miktar uzatılır, kondenser sıvı çıkışında sıvı soğutucu akışkan aşırı soğutulduğu için 20°C doyma eğrisinde yukarı dik çıkılarak yatay çizgiyle kesiştirilip 3 noktası, 3 noktasından -10°C buharlaşma sıcaklığına aşağı inilerek 3noktası bulunur.

Emme hattında doymuş buhar halindeki soğutucu akışkan ısı eşanjöründe aşırı ısıtılarak kuru doymuş buhar haline geldiği için doymuş buhar eğrisinin sağ tarafına doğru -10 °C'den uzatılan yatay çizgi çizilir, diyagramın alt kısmında bulunan 0 °C'de üzerindeki eğriden yukarıya çıkılarak -10°C çizgisiyle kesiştirilerek 1noktası, 1noktasından sabit entropi çizgisine paralel çizgi çizerek +30°C yoğuşma sıcaklığıyla çakıştırılarak 2noktası bulunur. Bulunan noktalardan dikler inerek soğutucu akışkanın entalpisi belirlenir.



b)

$$Q_{\ominus} = m_r(h_2 - h_1)$$

$$m_r = \frac{5000}{303 - 128} = \frac{5000}{175} = 28,571 \text{ kg/h}$$

c)

$$Q_y = m_r(h_3 - h_2) = 28,571(335 - 303)$$

$$Q_y = 914,272 \text{ kJ/h}$$

d)

$$Q_k = 28,571(335 - 128)$$

$$Q_k = 5914,197 \text{ kJ/h}$$

$$Q_k = Q_{\ominus} + Q_y$$

$$Q_k = 5000 + 914,272 = 5914,272 \text{ kJ/h}$$

Eşanjörlü ve eşanjörsüz örnek problemleri incelediğimiz zaman şu sonuçları çıkartabiliriz.

Her iki sistemde sistem kapasitesi ile kompresör sıkıştırma ısısı kondenser yoğunlaştırma kapasitesine eşit olduğu görülmektedir.

$$Q_k = Q_0 + Q_y$$

Eşanjörsüz sistemde sıkıştırılmış doymuş sıvı eğrisi üzerinde olan 1noktası, eşanjörlü sistemde sıvı soğutucu akışkan doyma eğrisinin sol tarafına koyarak aşırı soğutulmuş sıvı haline gelmekte,

Eşanjörlü sistemde birim ağırlıktaki soğutucu akışkanın soğutma tesiri artarken özgül hacmi de artarak kompresör kapasitesini negatif yönde etkilemektedir. Şöyle ki eşanjörsüz sistemde soğutucu üniteye buharlaşan doymuş buhar halindeki soğutucu akışkanın 1noktasındaki özgül hacmi 0,100m<sup>3</sup>/kg iken eşanjörlü sistemde aşırı ısıtmanın etkisiyle soğutucu akışkanın 1noktasındaki özgül hacmi 0,125m<sup>3</sup>/kg'a çıkararak birim hacimden dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisini negatif yönde etkileyecektir. Bu negatif durumu gidermek için genleşme valfiyle ayar yapmak mümkündür.

Eşanjörlü sistemde aynı sistem kapasitesi için daha az kompresör sıkıştırma ısısı verileceği hesaplardan görülmektedir.

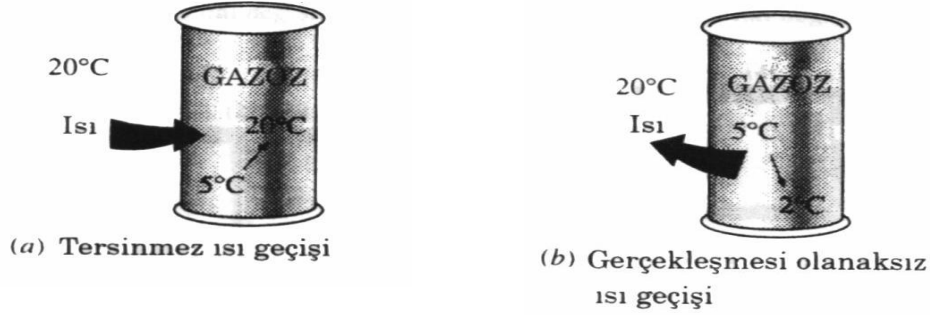
Örnek Problem 7-6'daki soğutma sistemi ısı eşanjörlü sistem haline getirildiğinde;

Kondenser çıkışındaki sıvı soğutucu akışkan ısı eşanjöründe -10°C aşırı soğutuluyor,

Evaporatör çıkışındaki doymuş buhar -10°C aşırı ısıtılarak kuru doymuş buhar haline getiriliyor.

## 8. ISI TRANSFERİ

Isı bir enerji çeşidi olup yüksek sıcaklıktaki ısı enerji deposundan düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposuna kendiliğinden geçer. Isı geçişinin olabilmesi için sistemle çevresi arasında mutlaka bir sıcaklık farkı olması gerekir aksi takdirde ısı geçişinden söz edilemez.



Şekil 8.1 Isı geçişi

Şekil-8-1'de gösterilen 5 °C sıcaklıkta bir meyve suyu kutusunu inceleyelim. Meyve suyu kutusunun bulunduğu ortamdan (yüksek ısı enerji deposu) meyve suyuna ısı geçişi olacak belirli bir süre sonra meyve suyunun sıcaklığı yükselecek veya termik dengeye ulaşacaktır. Bu işlemin tersini uygulayacak olursak yani meyve suyunun sıcaklığını başlangıçtaki haline getirmek istersek bu işlem kendiliğinden gerçekleşemez çünkü düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposundan yüksek sıcaklıktaki ısı enerji deposuna kendiliğinden ısı geçişi sağlanamaz.

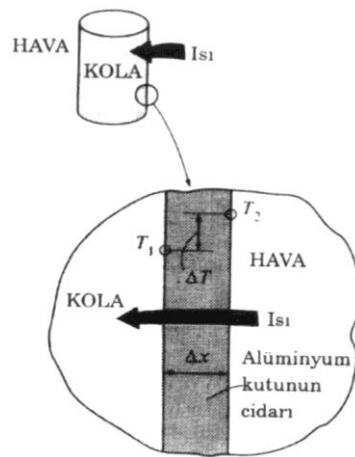
Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposundan yüksek sıcaklıktaki ısı enerji deposuna ısı transfer edebilmek için sisteme dışarıdan bir iş verilmesiyle (soğutma makinasıyla ) mümkün olmaktadır.

Isı farklı sıcaklıktaki iki ortamdan birinden diğerine geçerken iki ortamın arasında kalan ortamın bileşenlerini de geçmesi söz konusudur. Örneğin dış hava sıcaklığı 40°C olan bir yaz gününde yüksek ısı enerji deposu dış havadan düşük ısı enerji deposu odaya geçen ısının duvarın dış sıvasını, tuğla kısmını, iç sıvasını da geçmesi gibi; transfer edilen ısının büyüklüğü sıcaklık farkı yanında yüzeye,zamana ve ortamların fiziksel özelliklerine bağlıdır.

Isı geçişi üç farklı biçimde gerçekleşebilir.

### 8.1 Isı iletimi ( Kondüksiyon )

İletim bir maddenin enerjisi daha fazla olan moleküllerinden yakındaki diğer moleküllere, moleküller arasındaki etkileşim sonucunda enerji geçidir. İletim katı, sıvı ve gaz ortamlarda gerçekleşebilir. Katılarda iletim ısı enerjisinin bir molekülden diğerine aktarılması ile, sıvılarda ve gazlarda ise iletim, moleküllerin rastgele hareketleri sırasında birbirleriyle çarpışması sonucunda oluşur. Sıcak bir odadaki soğuk kola kutusu oda sıcaklığına gelirken havadan kolaya alüminyum cidardan iletimle ısı geçişi olur. (Şekil 8.2)



Şekil 8.2 Sıcak havadan soğuk kolaya alüminyum kutunun civarından iletimle ısı geçişi.

$\Delta x$  kalınlığında bir tabakadan birim zamanda iletimle geçen ısı  $Q_{\text{iletim}}^1$  sıcaklık farkı  $\Delta T$  ve ısı geçişine dik alan  $A$  ile doğru orantılı tabakanın kalınlığıyla ters orantılıdır. Bu, deneylerle gözlenebilen olgudur. Aşağıdaki gibi bağıntı yazılabilir.

$$Q_{\text{iletim}} = -k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ (W)}$$

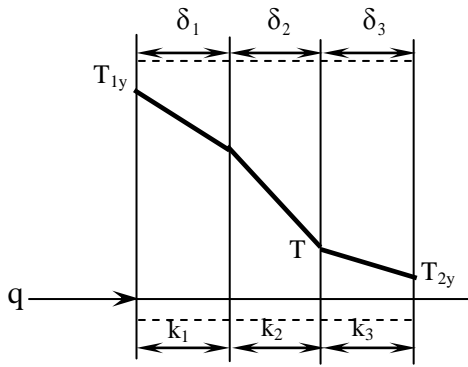
Burada  $k_t$  ısı iletim katsayısıdır. İletim katsayısı bir maddenin ısı iletme yeteneğinin bir ölçüsüdür.

Malzemenin Adı	$\rho$ : kg/m <sup>3</sup>	k: kcal/mh <sup>0</sup> K
Kaba sıva (dışta)	1600	0,80
Kaba sıva (içte)	1600	0,60
Buz: 0°C de	917	1,90
-20°C	920	2,10
Cam yünü	—	0,040
Mantar levha	—	0,036
Pencere camı (ortalama değer)	—	0,70

Çizelge 8.1 Bazı maddelerin ısı iletim katsayıları.

Gümüş, bakır, altın ve alüminyum gibi elektrik akımını iyi ileten maddeler aynı zamanda ısıyı da iyi ilettiklerinden dolayı bu metallerin büyük  $k_i$  değerleri vardır. Lastik, tahta, cam yünü gibi maddeler ısıyı iyi iletemedikleri için  $k_i$  değerleri de küçüktür.

### 8.1.1 İçinde Kaynak Bulunmayan Paralel levhalarda Isı İletimi



Şekil 8.3 İçinde kaynak bulunmayan paralel levhalar.

$$q = \frac{-\Delta T}{\Delta x (\text{iletimdirenci})}$$

$$q_1 = \frac{T_{1y} - T_1}{\frac{\delta_1}{k_1}}$$

$$q_2 = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_2}{k_2}}$$

$$q_3 = \frac{T_2 - T_{2y}}{\frac{\delta_3}{k_3}} \quad q_1 = q_2 = q_3$$

Birim zamandan geçen ısı miktarı olduğu gibi öbür levhalara'da aynen iletiliyor.

$$T_{1y} - T_1 = q \frac{\delta_1}{k_1}$$

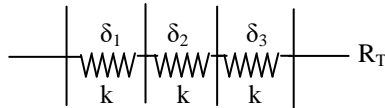
$$T_1 - T_2 = q \frac{\delta_2}{k_2}$$

$$T_2 - T_{2y} = q \frac{\delta_3}{k_3}$$

$$T_{1y} - T_{2y} = q \left( \frac{\delta_1}{k_1} + \frac{\delta_2}{k_2} + \frac{\delta_3}{k_3} \right)$$

$$q = \frac{T_{1y} - T_{2y}}{\frac{\delta_1}{k_1} + \frac{\delta_2}{k_2} + \frac{\delta_3}{k_3}}$$

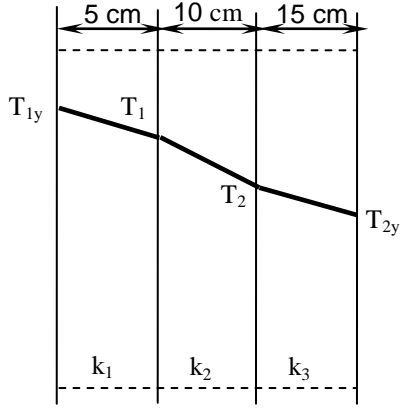
$$\frac{1}{k_T} = \frac{\delta_1}{k_1} + \frac{\delta_2}{k_2} + \frac{\delta_3}{k_3} \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \left( Q/L^2T\theta \right)$$



$$q = \frac{T_{1y} - T_{2y}}{\sum R_T}$$

### Örnek Problem 8.1





Şekil 8.4

$$k_1 = 0,56 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$$

$$T_{1y} = 40^\circ\text{C}$$

$$k_2 = 1,56 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$$

$$T_{2y} = 20^\circ\text{C}$$

$$k_3 = 0,75 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$$

$$T_1 = ?$$

$$T_2 = ?$$

$$q = -\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$q = \frac{T_{1y} - T_{2y}}{k_T}$$

$$q = \frac{T_{1y} - T_{2y}}{\frac{\delta_1}{k_1} + \frac{\delta_2}{k_2} + \frac{\delta_3}{k_3}}$$

$$q = -\frac{40 - 20}{\frac{0,05}{0,56} + \frac{0,10}{1,56} + \frac{0,15}{0,75}} = 56,64 \text{ kcal/h}$$

$$q = \frac{t_{1y} - t_1}{\frac{\delta_1}{k_1}}$$

$$t_1 = t_{1y} - q \frac{\delta_1}{k_1}$$

$$t_1 = 40 - 56,64 \frac{0,05}{0,56}$$

$$t_1 = 40 - 5,040 = 34,96^\circ\text{C}$$

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_2}{k_2}$$

$$t_2 = 34,96 - 56,54 \frac{0,10}{1,56}$$

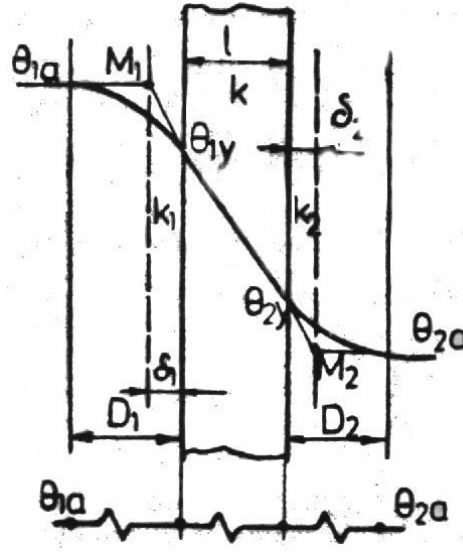
$$t_2 = 34,96 - 3,624 = 31,33^\circ\text{C}$$

## 8.2 Isı Taşınımı (Konveksiyon)

Katı bir yüzeyin temas ettiği akışkan bir ortam arasında gerçekleşen ısı geçiş şeklindedir.

### 8.2.1 Paralel Levhaların Her Yanında İki Akışkan Bulunması Hali ve Isı Taşınım Katsayısı ile Toplam Isı

## Geçiş Katsayısının Belirlenmesi



Şekil 8.5 Paralel Levhaların Her Yanında İki Akışkan Bulunması Hali

Üst taraftaki şekilde görüldüğü gibi levhanın her iki yüzeyindeki akışkan sıcaklıkları  $Q_{1a} > Q_{2a}$  olmak üzere  $Q_{1a}$  ve  $Q_{2a}$  olsun. Bu kabule göre  $Q_{1a}$  sıcaklığındaki akışkan ile temas eden yüzey sıcaklığı, daha küçük  $Q_{1y}$  değerinde, diğer yüzey sıcaklığı ise  $Q_{2a}$  dan daha büyük  $Q_{2y}$  değerinde olup, her iki bölgedeki sıcaklık değişimleri şekilde görüldüğü gibi eğriseldir.

Levha yüzeyleriyle temas eden akışkanların levha yüzey sıcaklıklarına kadar olan sıcaklık değişimleri  $D_1$  ve  $D_2$  kalınlıklarındaki bölgelerde olur. Düşey ekseninde sıcaklık değişimleri belirtildiğine göre,  $Q_{1y}$  ve  $Q_{2y}$  sıcaklıklarının buldukları seviyelerden bu eğrilere çizilen teğetler  $Q_{1a}$  ve  $Q_{2a}$  sıcaklıklarına uyan yatay doğruların kesişme noktaları olan  $M_1$  ve  $M_2$  noktalarının yüzeylere olan  $\delta_1$  ve  $\delta_2$  mesafeleri içinde akışkanların hareketsiz oldukları kabul edilebilir. Bu hareketsiz bölge katı cisim gibi düşünülürse ve ısı iletim katsayıları  $k_1$ ,  $k$ ,  $k_2$  ise

$$Q = F \cdot k_1 \frac{Q_{1a} - Q_{1y}}{\delta_1} = F \cdot k \frac{Q_{1y} - Q_{2y}}{L} = F \cdot k_2 \frac{Q_{2y} - Q_{2a}}{\delta_2} \quad \text{eşitliği yazılabilir.}$$

Bu eşitlikteki  $k / \delta$  oranı ısı taşınımı katsayısı olarak adlandırılır ve  $h$  ile gösterilir. Bazı literatürde (bilhassa Alman literatüründe)  $\alpha$  ile gösterilmektedir. Boyutu  $Q/L^2 T \theta$  olmaktadır.

Tarife göre levhanın her iki yüzeyi için

$$Q = F \cdot h_1 (Q_{1a} - Q_{1y}) = F \cdot h_2 (Q_{2y} - Q_{2a}) \quad \text{yazılabilir.}$$

Geçen ısı miktarı sadece  $Q_{1a}$  ve  $Q_{2a}$  sıcaklıkları cinsinden,

$Q = K \cdot F (Q_{1a} - Q_{2a})$  ifadesiyle de hesaplanabilir. Burada  $K$ , Toplam Isı Geçiş Katsayısı olup  $Q/L^2 T \theta$  boyutundadır ve  $\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{k} + \frac{1}{h_2}$  ifadesiyle belirlenir. Dikkat edilirse burada önceki bölümlerden farklı olarak her iki

tarafta ısı taşınım katsayısını görmekteyiz.  $1/h$  oranını Isı Taşınım Direnci olarak adlandırabiliriz.  $Q$  ısı sırasıyla  $\delta_1$  kalınlığındaki bölgeyi, levhayı ve  $\delta_2$  kalınlığındaki bölgeyi geçtiğine göre

$$Q = F \cdot h_1 (Q_{1a} - Q_{1y}) = F \cdot \frac{Q_{1a} - Q_{1y}}{R_{1t}}$$

$$Q = F \frac{k}{L} (Q_{1y} - Q_{2y}) = F \cdot \frac{Q_{1y} - Q_{2y}}{R_i}$$

$$Q = F \cdot h_2 (Q_{2y} - Q_{2a}) = F \cdot \frac{Q_{2y} - Q_{2a}}{R_{2t}}$$

$$Q = \frac{F \cdot (Q_{1a} - Q_{2a})}{R_{1t} + R_i + R_{2t}}$$

Şayet n adet bitişit paralel levha mevcut ise geçen ısı miktarı için

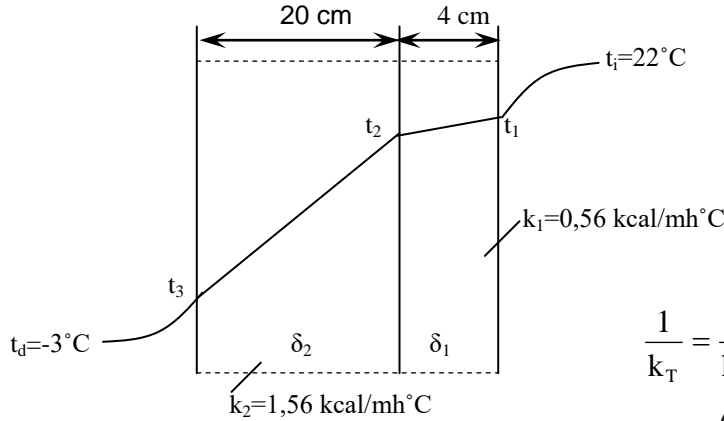
$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \dots + \frac{L_n}{k_n} + \frac{1}{h_2}$$

$$Q = K_T \cdot F (Q_{1a} - Q_{2a})$$

$$R_{1t} = \frac{1}{h_1}, \quad R_{2t} = \frac{1}{h_2}, \quad R_{li} = \frac{L}{k_1}, \dots, R_{ni} = \frac{L}{k_n}$$

$$Q = F \frac{Q_{1a} - Q_{2a}}{R_{1t} + R_{li} + \dots + R_{ni} + R_{2t}}$$

### Örnek: Problem 8.2



Şekil 8.6

$$Q = -\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$Q = F \cdot \frac{Q_1 - Q_d}{k_T}$$

$$\frac{1}{k_T} = \frac{1}{h_i} + \frac{0,04}{0,56} + \frac{0,20}{1,56} + \frac{1}{h_d} = 0,93 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

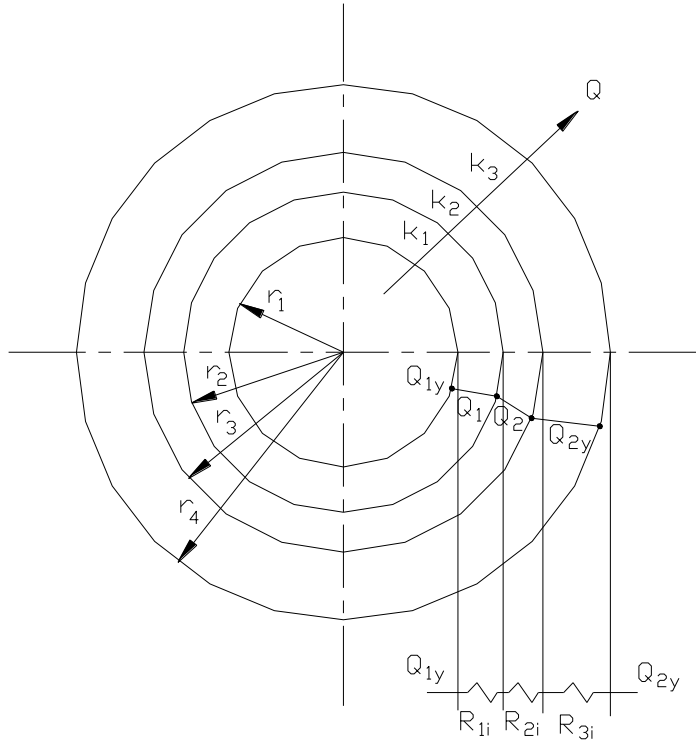
$$Q = 1 \frac{(22 - (-3))}{0,39} = 62,87 \text{ kcal/h}$$

$$q_1 = \frac{t_i - t_1}{\frac{1}{h_i}}, \quad q \frac{1}{h_i} = t_i - t_1, \quad t_1 = t_i - \frac{q}{h_i}, \quad t_1 = 22 - \frac{62,87}{7} = 13^\circ\text{C}$$

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{k_1}}, \quad q \frac{\delta_1}{k_1} = t_1 - t_2, \quad t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{k_1} = 13 - 62,87 \frac{0,04}{0,56} = 8,5^\circ\text{C}$$

$$q = \frac{t_2 - t_3}{\frac{\delta_2}{k_2}}, \quad t_3 = t_2 - q \frac{\delta_2}{k_2} = 8,5 - 62,87 \frac{0,20}{1,56} = 0,15^\circ\text{C}$$

### 8.2.2 İçice Aynı Merkezli Borularda Isı İletimi



Şekil 8.7 İçice Aynı Merkezli Borularda Isı İletimi

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  iç yarıçaplarındaki boruların ısı iletim katsayıları  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  ve dış yüzey sıcaklıkları  $Q_1$  ve  $Q_{2y}$  ara sıcaklıkları  $Q_1$  ve  $Q_2$  olduğuna göre içice aynı merkezli olan borulardaki ısı iletimi ifadesi için seri dirençlerin toplamı alınarak bulunabilir.

$$Q = L \cdot \frac{(Q_{1y} - Q_{2y})}{R_{1i} + R_{2i} + R_{3i}}$$

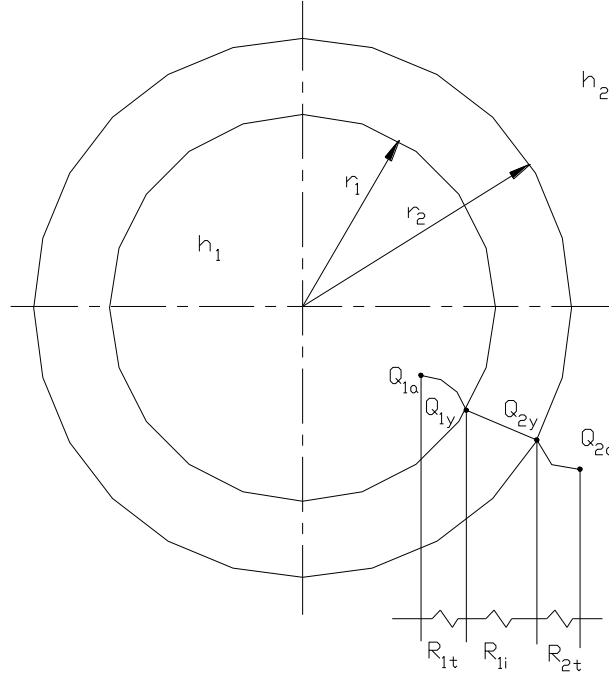
L'm borudaki ısı iletimi

$$Q = \frac{2\pi \cdot L \cdot (Q_{1y} - Q_{2y})}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$

Aynı ifadeyi;  $Q = K \cdot L \cdot (Q_{1y} - Q_{2y})$  şeklinde ifade etmek istersek,

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}, \frac{Q}{LTQ}$$

### 8.2.3 İçice Aynı Merkezli Borularda İçinde ve Dışında Akışkan Bulunması Halinde Isı Taşınımı



Şekil 8.8 İçice aynı merkezli borularda içinde ve dışında akışkan bulunması halinde ısı taşınımı

Şekil 8.8’de görüleceği gibi borunun iç ve dışındaki akışkan sıcaklıkları  $Q_{1a}$  ile  $Q_{2a}$ , iç ve dış ısı taşınımı kat sayıları  $h_1$  ve  $h_2$  ise aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$Q = 2\pi r_1 L h_1 (Q_{1a} - Q_{1y})$$

$$Q = 2\pi r_2 L h_2 (Q_{2y} - Q_{2a})$$

$$Q_T = \frac{2\pi L (Q_{1a} - Q_{2a})}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{1}{k} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 h_2}}, \quad Q = KL(Q_{1a} - Q_{2a})$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{1}{k} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 h_2}}, \quad Q = L \frac{Q_{1a} - Q_{2a}}{R_{1t} + R_i + R_{2t}}$$

Şayet içice aynı merkezli  $m$  adet boru mevcut ise geçen ( $Q$ ) ısı miktarı akışkan sıcaklıkları cinsinden

$$Q = L \frac{Q_{1a} - Q_{2a}}{R_{1t} + R_{1i} + \dots + R_{mi} + R_{2t}}$$

ifadesi yazılır.

### Örnek Problem 8.3

110x5 mm'lik 20 metre uzunluğundaki bir boru içinden 180 °C sıcaklığında buhar geçiyor. Boru dışındaki sıcaklık 10 °C olduğuna göre 1saatte kaybolan ısı miktarını bulunuz.

$$k_b = 40 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$Q_{1a} = 180^\circ\text{C}$$

$$Q_{2a} = 10^\circ\text{C}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

$$h_i = 8000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$h_d = 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$r_1 = 50 \text{ mm}$$

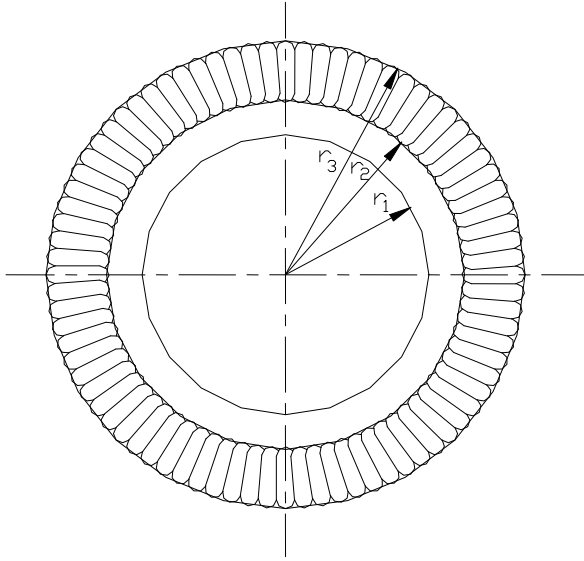
$$r_2 = 55 \text{ mm}$$

$$Q = K \cdot L(Q_{1a} - Q_{2a})$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{1}{k_d} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 h_2}} = \frac{2\pi}{\frac{1}{0,050 \cdot 8000} + \frac{1}{40} \ln \frac{55}{50} + \frac{1}{0,055 \cdot 10}}$$

$$Q = 3,26 \cdot 20(180 - 10) = 11087 \text{ kcal/h}$$

Yukarıdaki problemdeki borunun dışına 50 mm kalınlığında ve ısı iletimi katsayısı 0,035 kcal/mh°C olan cam yönünden ısı izalasyonu yapıldığı kabul edilerek saatteki kaybolan ısı miktarını, iç ve dış yüzey sıcaklığını hesaplayınız?



$$r_1 = 50 \text{ mm}$$

$$r_2 = 0,055 \text{ m}$$

$$r_3 = 0,050 + 0,005 + 0,050 = 0,105$$

$$k_b = 40 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$k_{cy} = 0,035 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$$

$$Q_{1a} = 180^\circ\text{C}$$

$$Q_{2a} = 10^\circ\text{C}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

$$h_i = 8000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$h_d = 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

Şekil 8.9

$$Q_T = \frac{2\pi \cdot L(Q_{1a} - Q_{2a})}{\frac{1}{r_1 h_1} + \frac{1}{k_d} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_{cy}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{r_3 h_d}}$$

$$Q_T = \frac{2\pi \cdot 20(180 - 10)}{\frac{1}{0,05 \cdot 8000} + \frac{1}{40} \ln \frac{0,055}{0,05} + \frac{1}{0,035} \ln \frac{105}{55} + \frac{1}{0,105 \cdot 10}}$$

$$Q_T = 1099,35 \text{ kcal/h}$$

$$Q_T = 2\pi \cdot r_1(Q_{1a} - Q_{2a}) \cdot h_i \cdot L$$

$$1099,35 = 2\pi \cdot 0,05(180 - Q_{1y})8000 \cdot 20$$

$$Q_{1y} = 179,68^\circ\text{C}$$

$$Q_T = 2\pi \cdot r_2 \cdot h_d(Q_{2y} - Q_{2a})$$

$$1099,35 = 2\pi \cdot 0,05(Q_{2y} - 10)$$

$$Q_{2y} = 18,33^\circ\text{C}$$

### 8.3 Borularda Sıcaklık Düşmeleri

$T_2 = T_1 \cdot e^{-A \cdot L}$  Girişten L kadar uzakta akışkan sıcaklığı

$$A = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{1}{k} + \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \cdot h_d}} \cdot \frac{1}{G \cdot C_p}$$

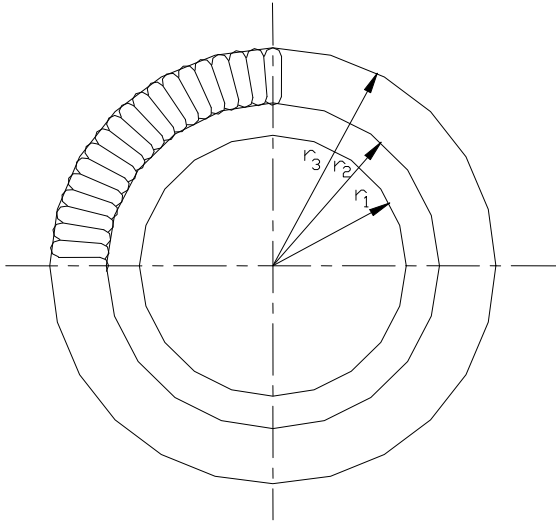
G= Akışkan debisi

$C_p$ =Akışkan özgül ısınma ısısı kcal/kg °C

#### Örnek Problem 8.4

125x4 mm'lik 35m uzunluğundaki bir boru içinden 195°C sıcaklığında bir akışkan geçiyor. Borunun dışında 49,5mm kalınlığında ve ısı iletim katsayısı 0,05 kcal/mh °C olan yalıtım malzemesiyle ısı izolasyonu yapılmıştır.

- İzolasyonsuz boruda 35m sonundaki sıcaklığı bulunuz?
- İzolasyonlu boruda 35m sonundaki sıcaklığı bulunuz?



$$\begin{aligned} r_1 &= 62,5 \text{ mm} = r_1 = 62,5 - 4 = 58,5 \text{ mm} \\ r_2 &= 62,5 \\ r_3 &= 116 \text{ mm} = 62,5 + 49,5 = 116 \text{ mm} \\ G &= 3000 \text{ kg/h} \\ C_p &= 0,5 \text{ kcal/kg} \\ L &= 35 \text{ m} \\ k_b &= 50 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ h_i &= 250 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ h_d &= 10 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \\ Q_i &= 195^\circ\text{C} \\ Q_d &= 20^\circ\text{C} \\ k_i &= 0,05 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Şekil 8.10

a) İzolasyonsuz boruda

$$A = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{1}{k} + \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \cdot h_d}} \cdot \frac{1}{G \cdot C_p}$$

$$A = \frac{2\pi}{\frac{1}{0,625 \cdot 250} + \frac{1}{50} + \ln \frac{62,5}{58,5} + \frac{1}{0,0585 \cdot 10}} \cdot \frac{1}{3000 \cdot 0,5}$$

$$A = 2,657 \times 10^{-3}$$

$$T_1 = 195 - 20 = 175^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 175 \cdot e^{-2,657 \cdot 10^{-3} \cdot 35}$$

$$T_2 = 159,45^\circ\text{C}$$

b) İzolasyonlu boruda

$$A = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1 \cdot h_i} + \frac{1}{k_b} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_{iz}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{r_3 \cdot h_d}} \cdot \frac{1}{G \cdot C_p}$$

$$A = \frac{2\pi}{\frac{1}{0,625 \cdot 250} + \frac{1}{50} \ln \frac{66,5}{62,5} + \frac{1}{0,05} \ln \frac{116}{66,5} + \frac{1}{0,116 \cdot 10}} \cdot \frac{1}{3000 \cdot 0,5}$$

$$T_2 = 175 \cdot e^{-A \cdot 35}$$

$$T_2 = 192,9^\circ \text{C}$$



## 9. AKIŞKANLAR MEKANİĞİ

Katı bir maddenin belirli bir hacmi ve şekli vardır. Bir tuğla, bilinen şeklini ve büyüklüğünü korumaktadır. Bir sıvının belirli bir hacmi olduğunu fakat belirli bir şekle sahip olmadığını biliyoruz. Boş bir su deposunu doldurduğunuzda su, deponun şeklini alır. Depoyu doldurmadan önce 10 lt suyunuz varsa, doldurduktan sonrada deponun şekil değişikliğine rağmen yine 10 lt suyunuz olacaktır. Gaz akışkan maddeler ne belli bir hacme ne de belli bir şekle sahiptir. Bu tanımlar bize maddenin hallerini anlamamıza yardım eder. Fakat bu ayırım aslında biraz yapaydır. Su sıcaklık ve basınca bağlı olarak, katı,sıvı, gaz yada ıslak buhar halinde olabilir. Bir dış kuvvetin veya basıncın etkisiyle maddenin biçimindeki değişiklik için geçen süre, maddenin katımı, çok viskoz bir sıvımı yoksa başka bir durumda mı olduğunu belirler.

### 9.1 YOĞUNLUK

Bir maddenin yoğunluğu birim hacminin kütlesi olarak tanımlanır. Yani, kütlesi m, hacmi V olan bir maddenin yoğunluğu

$$\rho = \frac{m(\text{kg})}{v(\text{m}^3)}$$

Madde	(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	Madde	(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>
Buz	0.917x10 <sup>3</sup>	Su	1.00x10 <sup>3</sup>
Alüminyum	2.7x10 <sup>3</sup>	Cıva	0.806x10 <sup>3</sup>
Demir	7.86x10 <sup>3</sup>	Hava	1.29x10 <sup>3</sup>
Altın	19.3x10 <sup>3</sup>	Helyum	1.79x10 <sup>-1</sup>

Tablo 9.1 Çeşitli maddelerin yoğunlukları

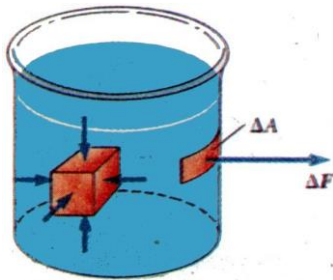
a = Bütün değerler 1 atm basıncında ve 0 °C sıcaklıkta tespit edilmiştir.

Çeşitli maddelerin yoğunlukları çizelge 9.1 'de verilmiştir. Bu değerler sıcaklıkla değişir, çünkü bir maddenin hacmi sıcaklığa bağlıdır.

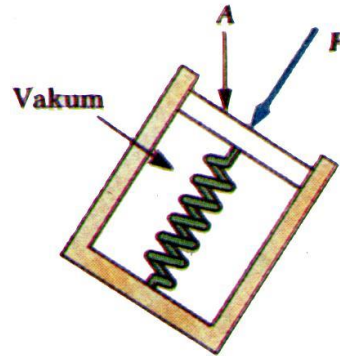
Bir maddenin bağıl yoğunluğu; +4 °C 'deki suyun yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Suyun +4 °C 'deki yoğunluğu 1.0x10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup> 'tür. Bağıl yoğunluk boyutsuz bir kavramdır. Bir maddenin bağıl yoğunluğu 5 ise yoğunluğu 5x(1.0x10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>) =5x10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup> olur.

### 9.2 BASINÇ

Akışkan içerisine daldırılan bir cisim sıkıştırmaya çalışır. Cisim üzerine akışkan tarafından uygulanan kuvvet, şekil 9.1 'de görüldüğü gibi cismin yüzeyine diktir.



Şekil 9.1 Cisim üzerine akışkan tarafından uygulanan kuvvet



Şekil 9.2 Basınç ölçen bir düzenek

Sıvı içerisine daldırılmış bir cismin herhangi bir noktasına etkileyen akışkan kuvveti cismin yüzeyine diktir. Kabın duvarlarına etkiye akışkan kuvveti bütün noktalarda duvar yüzeyine diktir.

Akışkan içinde belli bir noktadaki basınç şekil 9-2 'de gösterilen bir düzenekle ölçülebilir. Düzenek, bir yaya bağlı pistonla kapatılmış ve içi boşaltılmış bir silindirden ibarettir. Düzenek sıvı içine daldırıldığında; akışkan, pistonun üst kısmından aşağı doğru basınç uygular ve akışkanın içe doğru olan kuvveti, yayın dışa doğru olan kuvvetiyle dengeleninceye kadar yay sıkışır. Akışkanın basıncı ölçülenmiş bir yayla doğrudan ölçülebilir.

Pistona uygulanan normal kuvvetin büyüklüğü F ve pistonun alanı A ise, düzenegin daldırıldığı seviyedeki akışkanın P basıncı, kuvvetin alana oranı olarak tanımlanır; yani,

$$P = \frac{F(\text{N})}{A(\text{m}^2)}, \quad 1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

Bir akışkan içindeki basınç, bütün noktalarda aynı değildir. Belli bir noktadaki basıncı tanımlamak için Şekil 9.1'deki akışkanı ele alalım. Alanı  $\Delta A$  olan yüzey elemanına akışkan tarafından uygulanan kuvvet  $\Delta F$  ise, o noktadaki basınç;

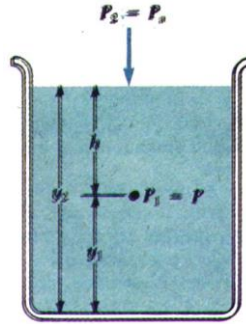
$$P = \frac{\Delta F}{\Delta A} \text{ olur.}$$

### 9.2.1 Basıncın derinlikle değişimi

Bir kap içinde durgun halde akışkanı düşünelim. (şekil9-3) Öncelikle, aynı derinlikteki bütün noktaların aynı basınçta olduğuna dikkat edelim. Eğer bütün noktaların basıncı aynı değilse sistem dengede olmayacaktır.

$$P_m = P_a + \rho \cdot g \cdot h$$

Üst yüzeyi atmosfere açık olan bir sıvının h derinliğindeki P mutlak basıncı, atmosfer basıncından kadar büyüktür.



Şekil 9.3

Üst yüzeyi atmosfere açılı olan bir sıvının yüzeyinden h derinliğinde bulunan bir noktadaki P basıncı  $P = P_a + \rho \cdot g \cdot h$  şeklinde verilir.

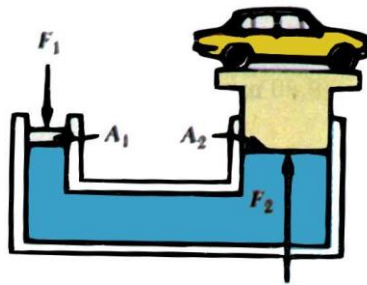
Bu sonuç, aynı yüksekliğe sahip olan bütün noktadaki basıncın aynı olduğunun kanıtıdır. Ayrıca basınç kabın şeklinden etkilenmez.

### 9.2.2 Paskal Yasası

Sıvı içindeki basıncın, yalnız sıvının derinliğine bağlı olmasından dolayı sıvının yüzeyine yapılan basıncın, sıvının diğer bütün noktalarına aynen iletildiği sonucuna varılmaktadır.

Kapalı bir sıvıya uygulanan basınçtaki değişiklik kabın duvarlarına ve sıvının her noktasına değişmeksizin aynen iletilir.

Paskal kanununun önemli bir uygulaması, şekil 9-4 'de açıklanan su cenderesidir.



Şekil 9.4

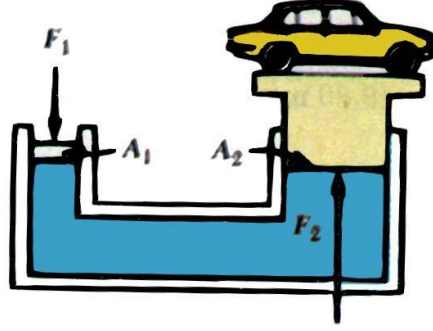
Bir su cenderesinin şematik gösterimi. Basınçtaki artış sol ve sağ taraflarda aynı olduğu için soldaki küçük bir  $F_1$  kuvveti, sağda büyük bir  $F_2$  kuvveti oluşturur.

Şekil 9-4 'de  $F_1$  kuvveti, alanı  $A_1$  olan küçük bir pistonu uygulanmaktadır. Basınç, sıvı tarafından alanı  $A_2$  olan daha büyük bir pistonu iletilmektedir. Her iki tarafta da basınç aynı olduğu için  $P = F_1 / A_1 = F_2 / A_2$  yazılır. Böylece;  $F_2$  kuvveti  $A_2/A_1$  çarpanı ile çarpılan  $F_1$  'den büyüktür. İş makineleri, hidrolik presler, hidrolik frenler, hidrolik krikolar gibi araçlar paskal prensibine göre çalışmaktadır.

### Örnek Problem 9.1

Servis istasyonlarında kullanılan araba kaldırımlarında sıkıştırılmış hava 5cm yarıçaplı bir pistonu kuvvet uygulamaktadır. Bu basınç 15 cm yarıçaplı ikinci bir pistonu iletilmektedir. Sıkıştırılmış hava 13300 N ağırlığındaki arabayı kaldırmak için ne kadar bir kuvvet uygular? Bu kuvvet ne kadar hava basıncı oluşturacaktır.

## Çözüm



Şekil 9.5

$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_1 = \frac{A_1 \cdot F_2}{A_2}$$

$$A_1 = \pi d_1^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,05^2 / 4 = 0,00196 m^2$$

$$A_2 = \pi d_2^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,15^2 / 4 = 0,0176 m^2$$

$$F_1 = \frac{A_1}{A_2} \cdot F_2$$

$$F_1 = 0,11136 \cdot 13300 = 1,48 \times 10^3 N$$

Bu kuvvetin oluşturacağı hava basıncı

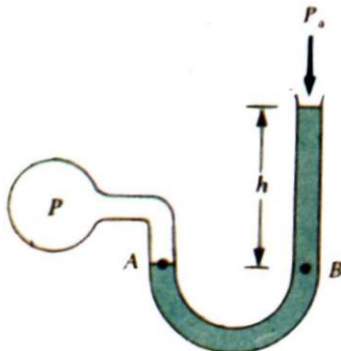
$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{1,48 \cdot 10^3}{0,00196} = 755102,04 Pa$$

Giriş enerjisinin ( $F_1$ 'in yaptığı iş) çıkış enerjisine ( $F_2$ 'nin yaptığı iş) eşit olduğuna dikkat ediniz.

## 9.2.3 Basınç Ölçümleri

Basınç birimi olarak uluslararası birim sisteminde  $N/m^2$  -Paskal ve fizikte kullanılan diğer bir basınç birimi bar =  $10^6 \text{ Dyn/cm}^2$  kullanılmaktadır.

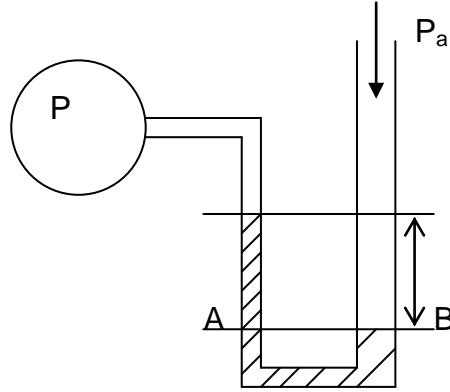
Basınç ölçmek için basit bir düzenek, şekil 9.6 'da gösterilen açık kollu manometredir. Sıvı ile dolu U şeklindeki borunun bir ucu atmosfere açık diğer ucu bilinmeyen P basıncındaki sisteme bağlıdır.



Şekil 9.6 Açık kollu manometre

Şekil 9.6 'da B noktasında basınç olur. B 'deki basınç A'daki basınca eşit olduğundan bu da bilinmeyen P basıncını verir. Burada P'ye mutlak basınç denirken  $P - P_a$  'ya gösterge basıncı denir. Böylece, sistemdeki basınç atmosfer basıncından büyük ise h pozitif, basınç atmosfer basıncından küçük ise (kabın içinde boşluk olması ) h negatif olur.

### Örnek Problem 9.2



Şekil 9.7 Sistemin vakumda olması

Şekil 9.7'de sistem vakumdadır. Yani sistemin basıncı atmosfer basıncının altında bir basınç değerindedir. Buradaki P basıncı aşağıdaki bağıntıyla bulunabilir.

$$-P = \rho \cdot h \cdot g$$

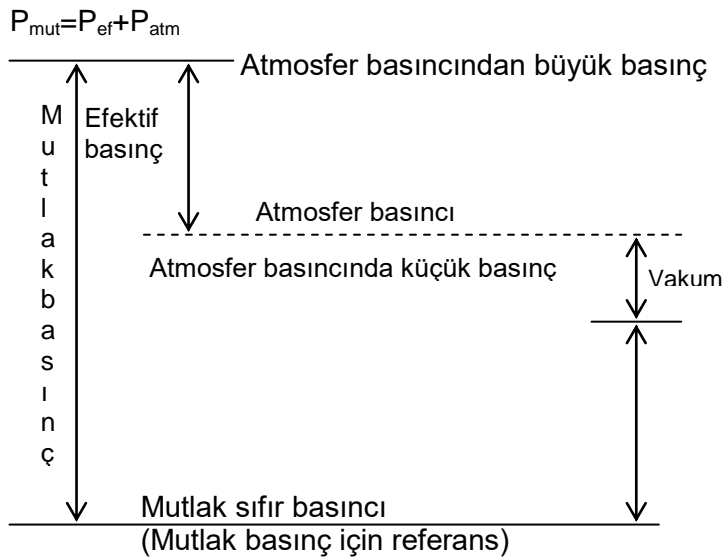
$$h = 0,6, \rho = 13600 \text{ kg/m}^3$$

$$-P = 13600 \cdot 0,6 \cdot 9,81 = -80049,6 \text{ Pas}$$

### Basınçlar Arasındaki İlişkinin Şematik Olarak Açıklanması

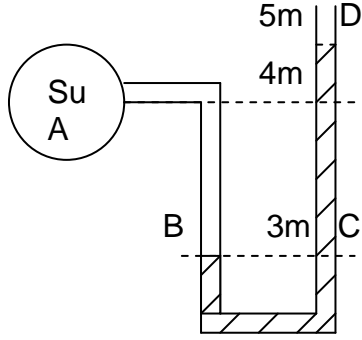
Basınç ölçmede kullanılan ölçü aletleri genellikle, atmosfer basıncından itibaren ölçülen bu basınca efektif basınç denir. Lâboratuar cihazlarında kullanılan manometreler, ölçüme atmosfer basıncından itibaren başlanıyorsa mutlaka laboratuvarın bulunduğu ortamdaki atmosfer basıncı manometreden okunan basınca ilave edilmektedir. Bu basınca mutlak basınç diyoruz.

### Örnek Problem 9.3



Şema 9.1 Basınçlar arasındaki ilişkinin şematik olarak gösterilmesi

A noktasındaki manometre basıncını Hg 'nın U tüpü içerisinde yükselişini göz önüne alarak bulunuz?

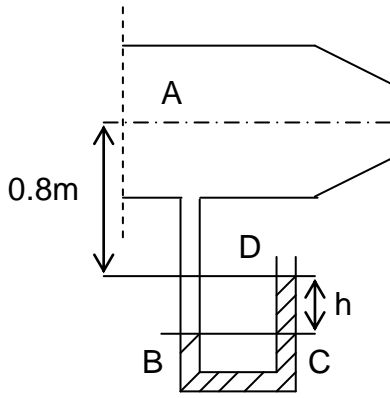


Şekil 9.8

$$\begin{aligned}
 P_B &= P_C \\
 P_B &= P_A + \rho_{su} \cdot g \cdot h_1 \\
 P_C &= P_D + \rho_C \cdot g \cdot h_2 \\
 P_A + \rho_{su} \cdot g \cdot h_2 &= \rho_C \cdot g \cdot h_2 \\
 P_A &= P_D + \rho_C \cdot g \cdot h_2 - \rho_{su} \cdot g \cdot h_1 \\
 P_A &= 0 + 13600 \cdot 9,81 - 1000 \cdot 9,81 \cdot 1 \\
 P_A &= 257022 \text{ Pa} = 2,57 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

### Örnek Problem 9.4

İzafi yoğunluğu 0.750 olan yağ şekil 9.9'da görüldüğü gibi akmaktadır. Bu akış esnasında U şeklindeki manometrede Hg h kadar yükselmektedir. A noktasındaki manometre basıncı 1.5 bar olduğuna göre h Hg yüksekliğini bulunuz?



$$\begin{aligned}
 P_B &= g(0.8 + h) + P_A \\
 P_B &= g \cdot 0.8 + g \cdot h + P_A
 \end{aligned}$$

$$P_C = g \cdot h + P_D$$

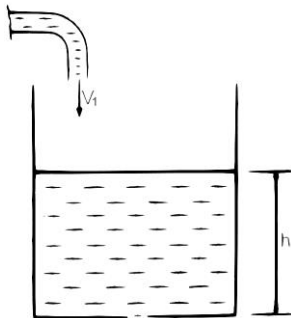
$$\begin{aligned}
 P_B &= P_C \\
 g \cdot 0.8 + g \cdot h + 150000 &= 13600 \cdot 9.81 \cdot h + 0 \\
 5886 + 7357 \cdot h + 150000 &= 133416 \cdot h \\
 h &= 1.2366 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Şekil 9.9 Örnek problem 9.2 genel çizimi

Bu bölümde şimdiye kadar çalışmamız sıvı akışkanlar üzerindeki durgun haldeki sıvılarla sınırlıydı. Bundan sonra hareket halinde olan sıvılar üzerinde çalışmamız devam edecektir.

### 9.3 AKIŞKANLARDA HACİMSEL DEBİ

Şekil 9.10'da görüldüğü gibi bir akışkanın debisini ölçmek için ölçekli bir kap alınarak kap doldurulur.



Şekil 9.10 Hacimsel debinin ölçülmesi

Kabın dolma süresi kronometre ile ölçülerek akışkanın hacmi, geçen zamana bölünerek akışkanın hacimsel debisi bulunur.

$$\dot{V} = \frac{V_V}{t} \quad (\text{Akış miktarı sabit ve düzenli})$$

Hacimsel debi aynı zamanda birim kesitten birim zamanda geçen akışkan miktarı olarak ta tanımlanabilir.

$$\dot{V} = A \cdot U$$

$$\dot{V}(\text{m}^3/\text{s}) = A(\text{m}^2) \cdot U(\text{m}/\text{s})$$

$$\dot{V}(\text{cm}^3/\text{s}) = A(\text{cm}^2) \cdot U(\text{cm}/\text{s})$$

### Örnek Problem 9.5

Çapı 10 mm olan bir boru içinden akmakta olan su 25 litre hacmindeki kabı 50 saniye içerisinde doldurmaktadır. Suyun hacimsel debisini (L/s) ve hortumdaki suyun akış hızını hesaplayınız?(Akış düzenli ve süreklidir.)

$$\dot{V} = \frac{V_v}{t} = \frac{25(\text{L})}{50(\text{s})} = 0,5 \text{ lt/s} (\text{dm}^3/\text{s})$$

$$\dot{V} = A \cdot u$$

$$u = \frac{0,5(\text{dm}^3/\text{s})}{\frac{\pi \cdot (0,1)^2}{4} \text{dm}^2} = 63 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} = \frac{63 \text{dm}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{dm}^2} = 63 \text{dm}/\text{s}$$

### 9.4 KÜTLESEL DEBİ

Akışkanın özgül kütleğine bağımlı olarak belirlenen debiye kütleli debi denilir ve  $\dot{m}$  ile gösterilir. Birimi ise  $\text{kg}/\text{m}^3$  tür.

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot u$$

### Örnek Problem 9.6

Boru çapı 200mm olan bir borudan özgül kütleği 900  $\text{kg}/\text{m}^3$  olan yağ 5.6m/s akmaktadır. Akışkanın hacimsel ve kütleli debisini bulunuz .

**Çözüm**

$$\dot{V} = 5,6 \frac{\pi(0,2)^2}{4}$$

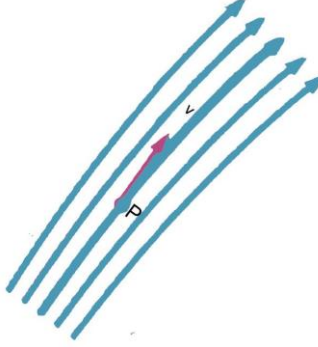
$$\dot{V} = 0,176 \text{m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

$$\dot{m} = 0,9 \cdot 0,176 = 158 \text{kg}/\text{s}$$

## 9.5 AKIŞ ÇİZGİLERİ VE SÜREKLİLİK DENKLEMİ

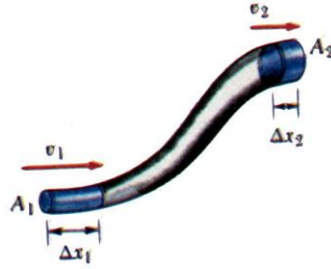
Kararlı akış yapan sıvı içindeki akışkan parçacığının aldığı yola akış çizgisi denir .Akışkan parçacığının hızı şekil 9.11'de görüldüğü gibi, o noktadaki akış çizgisine daima teğettir. İki akış çizgisi asla birbirini kesemez, aksi halde akışkan parçacığı, kesişme noktasında ters tarafa hareket edeceğinden akışkan kararlı olamayacaktır.



Şekil 9.11 P 'deki bir akışkan parçacığı bu akış çizgilerinden birini takip etmektedir ve hızı yol boyunca herhangi bir noktada akış çizgisine teğettir.

Şekil 9.11'de görülen akış çizgisi demektir bir akış borusu oluşturur. Akış çizgileri birbirlerini kesmemeleri gerektiğinden, akışkan parçacıkları borunun kenarlarından içeri veya dışarı akamazlar.

Şekil 9.12'deki kesitleri farklı borudaki akışkanı göz önüne alalım. Kararlı akışta, akışkan içindeki parçacıklar akış çizgisi boyunca hareket ederler. Bütün noktalarda, parçacık hızı, parçacığın hareketi boyunca akış çizgisine teğet olur.



Şekil 9.12 Kesitleri farklı borudaki akış

Kararlı akış halindeki sıkıştırılmayan sıvı, kesitleri değişen boru içinde akmaktadır. Bu durumda  $\Delta t$  zaman aralığı içinde  $A_1$  kesitinden geçen sıvının hacmi, aynı süre içinde  $A_2$  kesitinden geçen sıvının hacmine eşit olur.

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Küçük bir  $\Delta t$  zaman aralığı içinde, borunun  $A_1$  noktasındaki akışkan  $\Delta X_1 = V \Delta t$  kadar hareket eder. Bu bölgedeki kesitin alanı  $A_1$  ise, taralı bölgedeki akışkanın kütlesi

$$\Delta_{m1} = A_1 \Delta X_1 = A_1 V_1 \Delta t$$

Benzer şekilde  $\Delta t$  süresince borunun üst ucundan geçen akışkanın kütlesi

$$\Delta_{m2} = A_2 V_2 \Delta t \text{ şeklinde yazılır.}$$

Kütle korunduğu ve akış kararlı olduğu için,  $\Delta t$  süresi içinde  $A_1$  kesitinden geçen kütle aynı süre içinde  $A_2$  kesitinden geçen kütleyle eşit olur. Böylece

$$\Delta_{m1} = \Delta_{m2} \text{ ya da } A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \text{ olur.}$$

Bu ifadeye süreklilik denklemi denir. Sıkıştırılmayan bir sıvıda sabit olduğu için,

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \text{ sabit.}$$

Boru boyunca her noktada akışkanın hızı ile kesitinin çarpımı sabittir.

Kütle korunduğu için akışkanın hızı, borunun dar olduğu yerde büyük, geniş olduğu yerde küçüktür.

### Örnek Problem 9.7

Çapı 100mm olan boru içinden akmakta olan suyun hızı 3m/s 'dir. Borunun ucuna bağlanmış olan nozulun çapı ise 50 mm'dir. Nozuldan çıkan akışkan hızını hesaplayınız?

**Çözüm**

Süreklilik denklemi

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot A_2$$

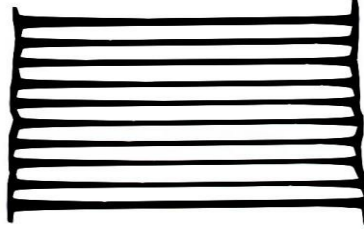
$$V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 = V_1 \frac{\frac{\pi d_1^2}{4}}{\frac{\pi d_2^2}{4}}$$

$$V_2 = 3 \cdot \frac{(0,1)^2}{(0,05)^2}$$

$$V_2 = 12 \text{ m/s}$$

**9.5 LAMİNAR AKIŞ**

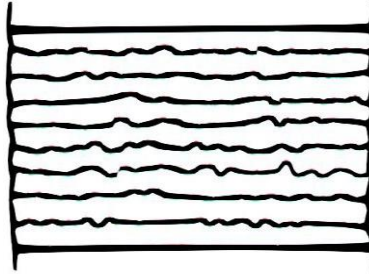
Bu tür akım şeklinde akış çizgileri süreklilik denkleminde anlatıldığı gibi akışkan parçacığının hızı Şekil 9.11'de görüldüğü gibi o noktadaki akış çizgisine teğettir. İki akış çizgisi asla birbirini kesmeyecektir. Sıvı akışkanın, boru çapı vizkozitesi, hızı hatta sıvı akışkanı taşıyan iletim ağındaki dirençler bu akım şeklini elde etmede önemli faktörlerdir. Şekil 9.14'de laminar akışa örnek resim görülmektedir.



Şekil 9.14 Laminer akış

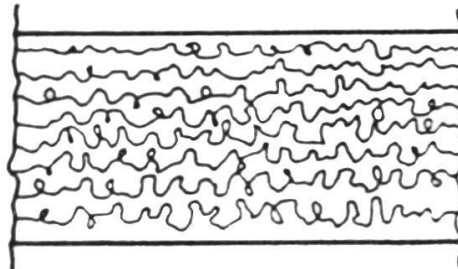
**9.6 TÜRBÜNLASLI (ZORLANMIŞ) AKIŞ**

Bu akımda ise akışkan parçacığının hızı o noktadaki akış çizgisine teyet olan durumu bozulmaya başlayarak Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş şeklini almıştır. Şekil 9.15



Şekil 15 Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişi

Şekil 9.16'da ise akışın tamamen türbülanslı akış şeklini aldığı görülmektedir.

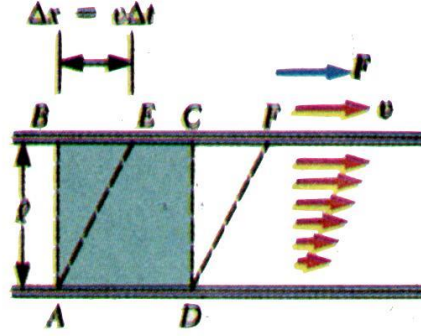


Şekil 9.16 Türbülanslı akış



### 9.7 VİSKOZİTE

Akışkanın akışına karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Sıvının viskozluk derecesi aşağıdaki örneklerle anlaşılabilir. Yağ gibi sıvı tabakasıyla ayrılmış iki cam levhadan biri sabit tutulup diğerini onun üzerinde kaydırmak kolaydır. Şekil 9.17 Ancak tabakaları ayıran sıvı katran ise levhaların birbiri üzerinde kaymaları zorlaşacaktır. Böylece katranın viskozluğunun yağdan daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Şekil 9.17'de levhalardan birinin sabit levhaya komşu olan tabakası, hareketli levhaya komşu olan tabakasına göre hareket ediyorken ardışık levhaların hızının doğrusal olarak O dan V ye kadar arttığına dikkat edilir.



Şekil 9.17 İki katı yüzey arasındaki sıvı tabakası .Aşağıdaki yüzey sabit, üst yüzey ise v hızı ile sağa doğru hareket etmektedir.

Bazı maddelerin viskozluk katsayısı tablo 9.2'de verilmiştir.

Sıvı	T (°C)	$\eta$ viskozluk katsayısı (N·s/m <sup>2</sup> )
Su	20	$1,0 \times 10^{-3}$
Su	100	$0,3 \times 10^{-3}$
Tam kan	37	$2,7 \times 10^{-3}$
Gliserin	20	$830 \times 10^{-3}$
Motor yağı (10-wt)	30	$250 \times 10^{-3}$

Tablo 9.2 Çeşitli sıvıların viskoziteleri

### 9.8 REYNOLDS SAYISI (Re)

Akışkanlardaki akış türünün belirlenebilmesi için Reynolds sayısı denilen boyutsuz bir parametrenin belirlenmesi gerekir.

#### 9.8.1 Akış Karakterini Etkileyen Faktörler

- 1 Akışkan hızı yüksek ise türbülanslı akışa meyilli olur.
- 2 Akışkan viskozitesi düşük ise türbülanslı akışa meyilli olur.
- 3 Akışkan sıcaklığı belirlenen sıcaklık altına düşerse türbülanslı akışa meyilli olur.
- 4 Boru çapı küçük ise türbülanslı akışa meyilli olur.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

u =Akışkanın hızı (m/s)

d =Boru çapı (m)

$\rho$  =Sıvının özgül kapasitesi (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  =Akışkanın dinamik viskozitesi (Pas)

$\nu$  =Akışkanın kinematik viskozitesi (m<sup>2</sup>/s)

Yapılan araştırma sonucunda:

Reynolds sayısı	Akış türü
2000 'in altında	Laminar
2000-40000	Laminardan - türbülanslı akışa geçiş
4000 üstünde	Türbülanslı

Tablo 9.3 Akış türünü gösteren tablo

### Örnek Problem 9.8

30mm çapındaki bir boru içindeki 3 L/s 'de akışkan akmaktadır. Akışkanın dinamik viskozitesi  $0.544 \times 10^{-3}$  Pas Özgül kapasitesi  $988 \text{ kg/m}^3$  'tür. Akışkanın akış türünü belirleyiniz.

$$u = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot (0,03)^2}{4}} = 4,24 \text{ m/s}$$

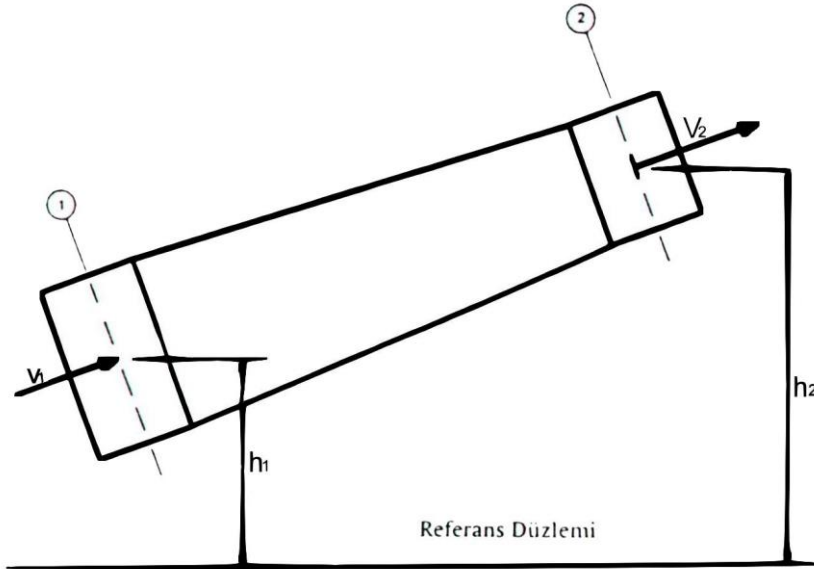
$$R_e = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{4 \cdot 24 \cdot 0,03 \cdot 988}{0,544 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_e = 231 \cdot 10^3$$

Akış türü türbülanslıdır.

### 9.9 İDEAL SIVI İÇİN ENERJİ DENKLEMİ (BERNOULLİ EŞİTLİĞİ)

İdeal akışkan; sıkıştırılmayan, akıcılığı mükemmel olan akışkan olarak tanımlanır. Bernouilli eşitliği ideal akışkan için incelenecektir. Şekil 9.18'de görülen eğik konumlu şeffaf bir boru içinde, birim kütlede 1 noktasından alınan akışkan 2 noktasında boruyu terk etmektedir. Neticede boru sürtünmesindeki kayıplar ihmal edildiğinde m kütledeki akışkanın sahip olduğu enerji boru içinde her kesitte aynıdır. Bu enerjiler potansiyel enerji, kinetik enerji ve akışta meydana gelen iş 'ten oluşmaktadır



Şekil 9.18 Eğik ve konik boru içinde akış.

Potansiyel enerji =Eğik konik boru için herhangi bir nokta referans olarak alındığında, m kg kütledeki akışkanın potansiyel enerjisi

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Kinetik enerji = m kg kütledeki akışkanın hızına bağlı olarak sahip olduğu kinetik enerji

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

Akışkanın yaptığı iş = 1 ve 2 noktaları arasında pompa olmadığından dolayı, yerçekimi ivmesi akışkanı ters yönde akışa zorlar. Akışkanın yukarı akışının nedeni 1 ve 2 noktaları arasındaki basınç farkıdır. Bu akış için gerekli enerji "akış işi" olarak tanımlanır.

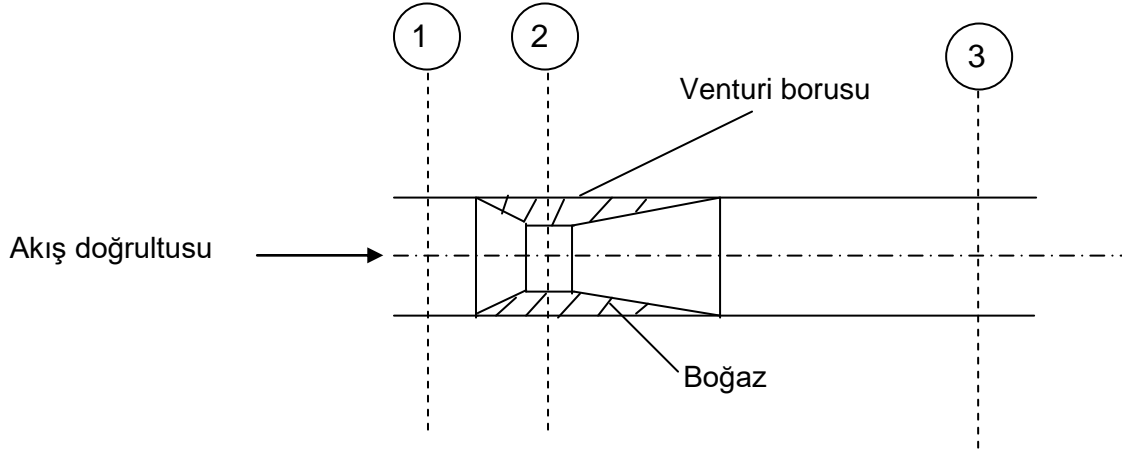
$$P_{E1} + K_{E1} + W_1 = P_{E2} + K_{E2} + W_2$$

Gerekli düzenlemeler referans düzlemine göre yapıldığında;

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

### 9.10 VENTÜRİ BORUSU

Ventürü borusu Şekil 9.19'da görüldüğü gibi orta kısımda düzgün şekilde daralan bir bölge (2) giriş ve çıkışta ise büyük çaplı bölgeler (1 ve 3) bulunmaktadır.



Şekil 9.19 Ventürimetre borusu

Ventürü borusunun 2 nolu kesiti dar, 1 ve 3 nolu kesiti ise geniştir. Akışkanın 1. ve 3. bölgede basıncı yüksek, hızı düşüktür. 2. bölgede ise basıncı düşük hızı yüksektir.

Kayıplar ihmal edildiğinde birim kütle için sahip olduğu toplam enerji tüm kesitlerde aynıdır.

Ventürimetre akışkanlarının hızının ve debisinin ölçümünde kullanılır.

### Örnek Problem 9.9

Yatay konumdaki bir ventürü borusunun geniş bölgesinin çapı 75mm, boğaz kısmının çapı ise 50 mm'dir. Boru içinden akmakta olan akışkanın geniş kesitinde basınç 45 kPa, akışkanın hızı ise 4 m/s'dir. Boğaz kısmında akışkan basıncı ve hızını bulunuz?

#### Çözüm:

$$\begin{aligned} d_1 &= 75\text{mm} \\ d_2 &= 50\text{mm} \\ V_1 &= 4\text{m/sn} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= h_2 \text{ (yatay boru )} \\ P_1 &= 45\text{kPa} = 45000\text{Pa} \\ \rho_{su} &= 10^3 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

$$V_2 = V_1 \frac{A_1}{A_2}$$

$$V_2 = V_1 \frac{\pi \cdot d_1^2}{\pi \cdot d_2^2} \cdot \frac{4}{4}, \quad V_2 = V_1 \left[ \frac{d_1}{d_2} \right]^2$$

$$V_2 = 4 \cdot \left[ \frac{75}{50} \right]^2 = 9 \text{ m/s}$$

Bernoulli eşitliğinde değerler yerine konularak;

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

$h_1=h_2$  olup, her iki taraf g ile çarpılabilir.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + 0 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + 0$$

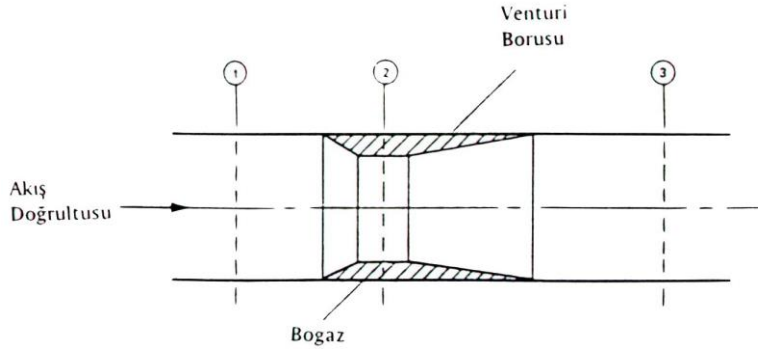
$$\frac{45 \cdot 10^3}{10^3} + \frac{4^2}{2} = \frac{P_2}{10^3} + \frac{9^2}{2}$$

$$45 + 8 = \frac{P_2}{10^3} + 40,5$$

$$P_2 = 12500 \text{ Pa} = 12,5 \text{ Pa}$$

### 9.11 VENTÜRİMETRE

Akışkanların hızının debisinin ölçülmesinde kullanılan ventürimetrenin çalışma prensibi aynı ventüri borusu gibi olup, dar ve geniş kesite U tipi basınç ölçer bağlanmıştır. U tipi manometredeki akışkan genelde civadır.



Şekil 9.20 Ventürimetre

Ventürimetrede debinin ölçülmesi için kullanılacak eşitlik Bernoulli eşitliğine bağımlı olarak ortaya konur.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

A noktasındaki basınç = B noktasındaki basınç

#### Örnek Problem 9.10

Şekil 9.20'de görülen yatay konumda yerleştirilen ventürimetrenin 1. kesitinin çapı 100 mm, 2. kesitinin çapı ise 50 mm'dir. Ventürimetrede akışkanın debisi  $72 \text{ m}^3/\text{h}$ 'dir. Ventürimetrenin ucuna bir nozul yerleştirilmiş olup, akışkan nozuldaki atmosfere tahliye edilmektedir.

1. ve 2. Kesitteki hızları,
- 1 noktasındaki basınçları hesaplayınız?

**Çözüm**

Akışkanın debisi tüm kesitlerde aynıdır.

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

$$A_1 = \pi d_1^2 / 4 = \pi \cdot (0,100)^2 / 4 = \pi / 400 \text{m}^2$$

$$A_2 = \pi d_2^2 / 4 = \pi \cdot (0,050)^2 / 4 = \pi / 1600 \text{m}^2$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{72/3600}{\pi/1600} = 10,19 \text{m/s}$$

$P_2$  noktasında akışkan atmosfere tahliye olduğundan  $P_2=0$ 'dir.

1 ve 2 noktaları arasında Bernouilli eşitliği uygulanırsa;

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{P_1}{1000} + \frac{(2,547)^2}{2} = 0 + \frac{(10,19)^2}{2g}$$

$$P_1 = 48700 \text{N/m}^2, 0,48 \text{ bar.}$$