



# ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Gökhan HIZAL | 070704049  
Mücahit ARAS | 070404029  
Başar SÜRÜCÜ | 940704040  
Süleyman AKIŞ | 060704013  
R. Alper BUĞATEKİN | 040704066

**Danışman:** Doç. Dr. İsak KOTÇİOĞLU

## ISI BORUSU İLE CPU SOĞUTULMASI

Meslek Seçmeli II Dönem Projesi  
Erzurum - 2011

# Isı Borulu Soğutma

**“Isı borusu ile bilgisayar işlemcisinin soğutulması”**

# ÖNSÖZ

---

Çağımızın elektronik aletleri zamanla küçülmekte buna karşın performansları katlanarak artmaktadır. Bilgisayar işlemcileri bunun en bariz örneğidir. Piyasaya her geçen gün bir öncekinden daha fazla performans sunan işlemciler çıkmaktadır. Üreticiler bu işlemcileri tasarlarırken soğutma sistemlerini de beraberinde tasarlamaktadır. Ancak mutlaka en az bir fan kullanan bu sistemler insanı rahatsız edecek boyutlarda gürültü üretebilmektedir. Isı borulu sistemler ise rahatsız edici herhangi bir gürültü oluşturmadan işlemciyi etkin bir şekilde soğutabilmektedir.

Bu çalışmada; masaüstü bilgisayar kasası içerisinde bulunan işlemcinin (CPU) soğutulmasında tasarlanacak ısı borusu ile soğutma sisteminin teorik çalışması yapılmıştır.

Çalışmanın amacı şöyle açıklanabilir. Bilgisayarların soğutma sistemlerinde kullanılan birçok sistem mevcuttur. Burada mühendislik açısından başka alternatiflerin değerlendirilip uygulanması düşünülmüştür. Sistemde termodinamik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi gibi enerji derslerinin bazı konuları tekrar edilmiştir. Bu çalışma içerisinde termodinamik çevrimler, çeşitli akışkanların özellikleri, yoğuşma, kaynama, saf maddenin özellikleri gibi temel kavramlar hakkında bilgiler verilmiştir.

Projenin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen başta danışman hocamız Doç. Dr. İsak Kotçioğlu'na, Prof. Dr. Adnan Özel'e ve Doç. Dr. Abdurrehim Bölükbaşı'na ve de eleştiri, yardım ve önerilerini esirgemeyen tüm öğrenci arkadaşlarımıza teşekkür ederiz.

**Gökhan HIZAL**  
**Başar SÜRÜCÜ**  
**Mücahit ARAS**  
**Süleyman AKIŞ**  
**R. Alper BUĞATEKİN**

# İÇİNDEKİLER

---

<b>1. Giriş</b>	<b>1</b>
<b>2. CPU Nedir?</b>	<b>2</b>
2.1. Tanım	2
2.2. İç Yapısı	2
<b>3. CPU Soğutma Çeşitleri</b>	<b>3</b>
3.1. Tanımlamalar	3
3.1.a. Soğutucular	3
3.1.b. Fanlar	3
3.1.c. Termal Macun	3
3.2. Hava Soğutma	3
3.3. Su Soğutma	3
3.3. Gaz Soğutma	4
3.3.a. Gaz Soğutma Sistemleri Özellikleri	4
<b>4. Soğutma Sistemi Elemanları</b>	<b>5</b>
4.1. Evaporatör	5
4.2. Kondenser	5
4.3. Kısılma Vanası	6
<b>5. Saf Madde</b>	<b>7</b>
5.1. P-T Diyagramı (Üçlü Nokta)	7
5.2. Kaynama	8
5.2.a. Havuz Kaynama Aşamaları	14
5.3. Yoğuşma	14
5.3.a. Damlacıklı Yoğuşma	15
5.3.b. Film Yoğuşma	15
5.4. Soğutma Makineleri ve Isı Pompaları	16
5.5. CARNOT Çevrimi	16
5.6. Hal Değişimleri	17
5.6.a. İçten Tersinir Hal Değişimleri	17
5.6.b. Dıştan Tersinir Hal Değişimleri	17
<b>6. Isı Borulu Soğutma</b>	<b>18</b>
6.1. Isı Borusu Nedir?	18
6.2. Fitiller	19
6.3. Kapilarite	20
6.4. Sistem Nasıl Çalışır?	21
6.5. Avantajları	21
6.6. Dezavantajı	21
6.7. Isı Borusu Seçimi	22

6.8. Akışkan Seçimi	22
6.8.a. Kullanılacak Akışkanda Aranacak Özellikler	22
6.8.b. Kullanılacak Akışkan Özellikleri (R-134a)	23
6.9. Isı Borularının Çalışmasını Sınırlayan Limitler	23
6.9.a. Kılcal Limit	23
6.9.b. Viskoz Limit	24
6.9.c. Ses Limiti	24
6.9.d. Köpürme Limiti	24
6.9.e. Kaynama Limiti	25
6.10. Sistemde Kullanılacak Formüller	25
6.10.a. Merit Sayısı	25
6.10.b. Priming Faktör	26
6.10.c. Ortalama Hız	26
6.10.d. Reynolds Sayısı	27
6.10.e. Kütleli Debi ve Isı Yükü	28
<b>7. MATLAB Programı</b>	<b>29</b>
7.1. Ana Program	29
7.2. Merit Sayısını Hesaplayan Alt Program	29
7.3. Ortalama Hızı Hesaplayan Alt Program	31
7.4. Reynolds R Sayısını Hesaplayan Alt Program	33
7.5. Reynolds Sayısını Hesaplayan Alt Program	34
7.6. Efektif Uzunluğu Hesaplayan Alt Program	34
7.7. Kütleli Debiyi Hesaplayan Alt Program	35
7.8. Çekilen Maksimum Isıyı Hesaplayan Alt Program	35
<b>8. Teknik Çizimler</b>	<b>36</b>
<b>Kaynaklar</b>	<b>38</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

---

Şekil 1: Bilgisayar sistemlerinde ısı borulu soğutma örneği	1
Şekil 2: İşlemci örneği	2
Şekil 3: Evaporatörün Çalışma Prensibi	5
Şekil 4: Kondenser Örneği	5
Şekil 5: Soğutma Çevrimi	6
Şekil 6: Katı Sıvı ve Gaz Hal İçin Atom Düzenleri	7
Şekil 7: Üçlü nokta grafiği	8
Şekil 8: Düşey boruda düşük ısı akısında akış kaynaması rejimleri	10
Şekil 9: Sabit ısı akısı sınır koşulunda kaynama rejimleri	11
Şekil 10: Aşırı soğutulmuş kaynama rejimlerinin akış boyunca değişimi	12
Şekil 11: Akış kaynaması için akış haritası	13
Şekil 12: Yoğuşma Örneği	15
Şekil 13: Isı borusunun şematik çalışma sistemi	18
Şekil 14: Isı borusu çalışma sistemi	19
Şekil 15: Fıtıl Örneği	19
Şekil 16: Isı borusu çalışma sistemi	20
Şekil 17: Isı borulu soğutma bloğu örneği	21
Şekil 18: Örnek ısı borusu	22
Şekil 19: Amonyak, R134-A ve Propan'ın Merit sayısının sıcaklıkla değişimi	26
Şekil 20: 2-10 arasında ikişerli artan boru sayısına göre ortalama hızın değişimi	27
Şekil 21: Açık değişimi ile QMax'ın değişimi	28
Şekil 22: Teknik resimler	36

# TABLO LİSTESİ

---

Tablo 1: Hava ve Su Soğutma Sistemlerinin Karşılaştırılması	4
Tablo 2: Isı borusu ile çalışma akışkanı uyumluluğu	22
Tablo 3: R-134a İçin Termodinamik Veriler	23

# SEMBOLLER

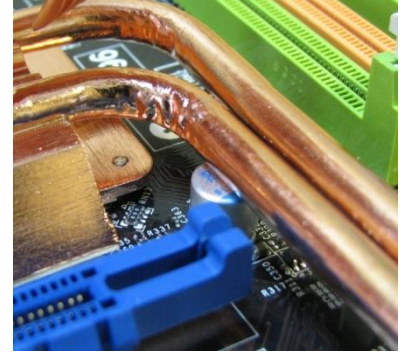
---

a	Yarıçap [m]
A	Kesit alanı [m <sup>2</sup> ]
g	Yerçekimi ivmesi [m/s <sup>2</sup> ]
l	Isı borusunun uzunluğu [m]
la	Ara bölge uzunluğu [m]
lc	Kondenser uzunluğu [m]
le	Evaporatör uzunluğu [m]
Leff	Efektif boru uzunluğu [m]
m	Kütleli debi [kg/s]
M	Merit sayısı [W/m <sup>2</sup> ]
P	Buhar basıncı [kPa]
Q	Isı miktarı [W]
Re	Reynolds sayısı
R	Eğrilik yarıçapı [m]
r <sub>v</sub>	Buharın aktığı kesitin yarıçapı [m]
r <sub>e</sub>	Efektif porozite yarıçapı [m]
T <sub>c</sub>	Kondenser sıcaklığı [°C]
T <sub>e</sub>	Evaporatör sıcaklığı [°C]
T <sub>v</sub>	Buhar sıcaklığı [°C]
T <sub>ort</sub>	Ortam sıcaklığı [°C]
V	Ortalama hız [m/s]
σ	Yüzey gerilimi [N/m]
ρ	Akışkanın yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]
μ	Dinamik viskozite [kg/ms]
φ	Isı borusu eğim açısı
κ	Fital malzemesi geçirgenliği [m <sup>2</sup> ]

# 1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesi ve bununla bağlantılı olarak, sanayideki gelişmeler pek çok sistemdeki ısının bir başka ortama taşınması veya bu ısının atılmasını gerektirmektedir. Elektronik cihazların soğutulması, otoyol ve köprülerde buzlanmanın önlenmesi, nükleer santrallerin soğutulması, bacalardaki atık ısının geri kazanılması gibi pek çok yerde ısının taşınmasına, bazı durumlarda da atık ısının geri kazanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak ısı enerjisinin bir ortamdan başka bir ortama aktarılmasında en önemli konu taşıma işleminin, en az güç harcanarak ve en verimli şekilde taşınmasıdır. Isı taşıyan pek çok sistem vardır. Isı boruları da ısı taşıyan sistemlerden biridir. Isı borularının diğer konvansiyonel ısı taşıma sistemlerine göre en önemli üstünlüğü, büyük miktarlardaki ısının çok küçük kesit alanları ile taşınabilmesi ve bu taşıma işleminde ek bir güce gereksinim duyulmamasıdır. Ayrıca tasarım ve üretim kolaylığı, ısıyı alan ve veren bölgeler arasında çok küçük sıcaklık farkının yeterli olması ve farklı sıcaklık aralıklarında çalıştırılabilmesi gibi üstünlükleri de vardır.

Isı borusunun ilk ortaya çıkışı, Perkins tarafından bulunan ve onun adıyla “Perkins tübü” olarak adlandırılan sistemdir (Peterson, 1994; Faghri, 1995). Bu cihaz ilk defa onsekizinci yüzyıl ortalarında (1836) İngiltere’de yapılmış, fitilsiz, yerçekimi destekli bir ısı borusudur. Buradaki ısı transferi, faz dönüşümü ile sağlanmaktadır. Isı borusunun temelleri, 1944 yılında Gaugler ve 1962’de Trefethen tarafından yapılan çalışmalarla atılmıştır. Grover tarafından 1964 yılında ve Gaugler tarafından 1966 yılında, Los Alamos laboratuvarlarında (USA) yapılan çalışmalarla tanınmış ve “Isı Borusu” adı Grover tarafından verilmiştir (Chi, 1976; Faghri, 1995). Isı borusu, bir ısı taşıma cihazı olarak çok geniş sıcaklık aralığında, değişik büyüklüklerde, sabit veya esnek şekillerde, silindirik, düzlemsel, dönele veya kullanım yerine ve amacına uygun olarak çok değişik şekillerde üretilebilir. Günümüzde ısı borularının kullanım alanı çok geniştir. Kullanım yelpazesinde bilgisayar CPU’larının soğutulmasından nükleer santrallere (Doughty ve Pruess, 1990), uzay araçlarındaki kullanımdan (Mo, 2000) elektronik uygulamalarına 2 (Sauciuc vd., 2000), çeşitli proseslerin kontrolünden güneş enerjisi uygulamalarına (Kalogirou, 2004), iklimlendirme tesislerinden (Noie-Baghban ve Majideian, 2000) otoyollara (Faghri, 1995), petrol boru hatlarından sıcaklık ölçme sistemlerine (Marcarino, 2003) veya tıbbi uygulamalara (Hamilton ve Hu, 1993) kadar pek çok uygulama alanında yer bulabilmektedir (Dunn ve Reay, 1994; Peterson, 1994; Faghri, 1995; Delil, 1998; Zhang ve Zhuang, 2003; Vasiliev, 1998; 2005).



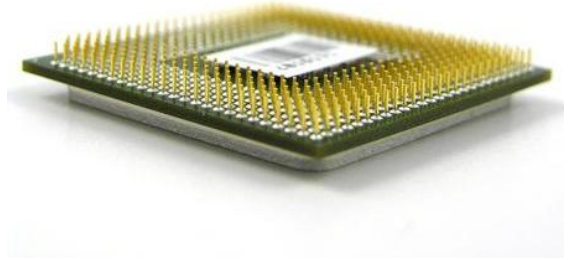
Şekil 1: Bilgisayar sistemlerinde ısı borulu soğutma örneği

Bilgisayarların soğutulması; hızlı çalışabilmesi ve performansının yüksek olması açısından önemlidir. Bilgisayar çipleri gelişen teknoloji ile birlikte küçülmeye başlamıştır. Bu gelişim beraberinde yüzey alanının küçülmesini sağlamış ancak ısı transferini zorlaştırmıştır. Geleneksel yöntemlerde bu ısı sistemden doğal ve zorlanmış taşınım ile kanatçıklar ve fan yardımıyla sistemden atılmaya çalışılmaktadır. Fanlı ve kanatçıklı ısı değiştiricileri sistemlerden ısıyı atmak için yetersizdir. Bunun önlenmesi için klasik fanlı soğutma yerine su soğutmalı, ısı borulu sistemlerle soğutma sistemlerine gereksinim duyulmuştur.

## 2. CPU NEDİR?

### 2.1. Tanım

İşlemci, bilgisayarın birimlerinin çalışmasını ve bu birimler arasındaki veri (data) akışını kontrol eden, veri işleme (verileri değerlendirip yeni veriler üretme) görevlerini yerine getiren elektronik aygıttır. İşlemci yerine mikroişlemci, CPU (Central Processing Unit ), (CPU'nun Türkçe karşılığı - Merkezi İşlem Birimi (MİB)) gibi isimler kullanılır. İşlemciler, bilgisayarda yönetici konumunda çalışır. İnsan beyninin tüm vücut organlarını sinir sistemi vasıtasıyla yönetmesi gibi işlemciler de kontrol sinyalleriyle sisteme bağlı tüm birimlerin çalışmasını düzenler ve yönetir.



Şekil 2: İşlemci örneği

### 2.2. İç Yapısı

3-4 santimetrekare büyüklüğünde bir silikon tabaka içinde milyonlarca transistörden oluşurlar. İşlemcilerin oluşturulmasını sağlayan sistem mikron teknolojisidir. Bu teknoloji sayesinde bir kaç santimetrekarelik bir alana milyonlarca transistor sığdırabilmek mümkündür.

İşlemcileri anakarta takabilmek için özel yuvalara gerek vardır. Örneğin, Pentium 2 model işlemciler ancak slot uyumlu anakartlara ve Celeron model işlemciler de Soket uyumlu anakartlara takılabilirler. Slot yuvalar düz ve 4-5 cm uzunluğunda slottur. Soket ise 3-4 santimetrekare büyüklüğünde bir yuvadır. Örneğin yanda gördüğünüz bir Pentium 3 450 MHZ işlemcidir ve ancak slot uyumlu anakartlara takılabilir. Üste gördüğünüz işlemci ise soket uyumlu bir işlemci olup soket uyumlu anakartlara takılabilirler.

Günümüz işlemcileri 100, 133, 333 MHZ ve daha fazla veriyolu hızında (Veriyolu hızı) çalışabilmektedir. Bu hız değeri ne kadar yüksek olursa, işlemci de o kadar fazla veri iletebilir. Ancak yukarıda da belirttiğim gibi hızı belirleyen asıl faktör frekanstır. Veriyolu hızı frekansın yanında pek fazla bir şey ifade etmemektedir.

Bütün işlemciler bir ön belleğe sahiptirler. Bunlar birincil (L1) ve ikincil (L2) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu tür belleklere "Cache" de denir ve 32 KB ile 512 KB (Kilobyte) arasında değişirler. Önceden yapılmış olan ve yapılmakta olan işlerin bu belleklerde geçici olarak tutulmasını sağlarlar. Bu sayede cache bellekte tutulan bu verilere daha hızlı erişim sağlanmış olur.

# 3. CPU SOĞUTMA ÇEŞİTLERİ

## 3.1. Tanımlamalar

### 3.1.a. Soğutucular

Kullanılan malzeme genelde alüminyum, bakır ya da her ikisinin karışımıdır. Isı dağıtıcılarının iki temel işlevi vardır. Bunlardan ilki, ısı üreten malzemenin üzerine takıldığı için üretilen ısının bir kısmını emmek, ikinci işlevi ise, hava ile temas yüzeyini artırarak ısı transferini arttırmaktır. Isı dağıtıcılarının pratikteki bir diğer işlevi ise tek başlarına yeterli olmadıkları durumlarda üzerlerine fan montajını kolaylaştırmalarıdır.

### 3.1.b. Fanlar

Günümüzde yaygın olarak 4 cm ile 12 cm arasında değişen ebatlarda fanlar kullanılmaktadır. Fanların performansını belirleyen iki şey vardır. Bunlardan ilki kanatlarının genişliğidir. Bir fanın kanadı ne kadar geniş olursa üfleyeceği hava miktarı o kadar artar. Dolayısıyla hava soğutmalı sistemlerde performansı artırmak için daha büyük fanlar kullanılır. Fanların performansını belirleyen ikinci şey ise dönüş hızıdır. Bir fan ne kadar hızlı dönerse performansı da o kadar artar.

### 3.1.c. Termal Macun

İşlemci ile fanın metal kısmı arasında sürülerek, iki madde arasındaki ısı iletimini kolaylaştırmada kullanılır. İşlemci ile heatsink denilen metal parça arasındaki ısı iletiminin aksamasına neden olan ise, iki yüzey arasındaki ufak boşluklarda kalan havadır. Her ne kadar çıplak gözle bakınca işlemcinin üst yüzeyi de, heatsinkin alt yüzeyi de pürüzsüz gözükseler bile, aslında her iki yüzeyde mikroskobik boyutta oldukça engebeli bir doku mevcuttur. Bu nedenle, iki yüzeyi birbirine bastırdığımızda, aslında birbirine fiziksel olarak temas eden alan çok düşüktür, arada kalan hava ise kötü bir ısı ileticidir. Bu nedenle heatsink ile işlemci arasında termal macun sürülür.

## 3.2. Hava Soğutma

Hava soğutmanın üç şekilde olabilir. Bunlardan ilkinde doğal soğutmadır. Bu yöntemde ısı üreten parçanın üzerine hiçbir ilave yapılmaz, parçanın kendi yüzeyi ve doğal hava akışı parçanın soğutulması için yeterlidir. Doğal soğutmanın yetmediği durumlarda soğutucu (heatsink) ile soğutma yöntemi gündeme gelir. Bu ikinci yöntemde, kullanılan ısı dağıtıcılar vasıtasıyla parçanın ısı emilir ve buna ek olarak ısıyı havaya ileten alan genişletilerek soğutma performansı artırılır. İkinci yöntemin soğutmaya yetmediği durumlarda sisteme bir fan eklenerek üçüncü yöntem olan fanla soğutma yöntemine başvurulur.

## 3.3. Su Soğutma

Sıvıların ısı iletim katsayısı havaya göre daha yüksektir. Bu nedenle sıvı soğutma çözümleri, hava soğutma çözümlerine göre daha yüksek performans sağlarlar. Bu nedenle çoğunlukla tercih edilirler. Su soğutma sistemlerinin başka olumlu özelliği ise diğer soğutma çözümlerine nazaran daha az gürültü üretmeleridir.

**Tablo 1: Hava ve Su Soğutma Sistemlerinin Karşılaştırılması**

	Hava Soğutmalı	Su Soğutmalı
Gürültü	-	++
Soğutma Performansı	-	++
Kurulum Zorluğu	+	--
Maliyet	++	--
Hacim İhtiyacı	+	-

### 3.3. Gaz Soğutma

Gaz ile soğutma sistemlerinin yapısı, gaz destekli sıvı soğutma sistemlerinin yapısına benzer. Bu sistemlerin en önemli farkı evaporatörün bir sıvı kap içinde durmayıp, bir soğutma bloğu şeklinde tasarlanıp, takıldığı parçayı soğutmasıdır. Bu nedenle gaz ile soğutma sistemlerinin içinde sıvı soğutma ve gaz destekli sıvı soğutma sistemlerindeki gibi radyatör, pompa ya da soğutma sıvısı bulunmaz. Gaz destekli soğutma sistemleri bilgisayarın ancak bir bileşenini (örneğin sadece CPU) soğutabilecek ürünlerdir. Bu sistemlerde kompresör sadece bir parçayı soğutur. Bunun etkisiyle o parçanın sıcaklığı, sistemin yapısına ve kompresörün performansına göre - 50 °C dereceye kadar düşebilir. Bu sistemler hiç durmadan, sürekli ve her zaman tam performans altında çalışır. Bu nedenle de elektrik sarfiyatı bundan önceki çözümlere göre çok daha yüksektir. Bu soğutma çözümünde terleme sorunu daha baskındır. Bu nedendir ki, bu sistemler günlük kullanıma uygun değildir. Bu soğutma tamamen profesyonel bir sistemdir ve çok pahalıdır. Kullanılan gaz sıvılaştırılmış nitrojendir.

#### 3.3.a. Gaz Soğutma Sistemleri Özellikleri

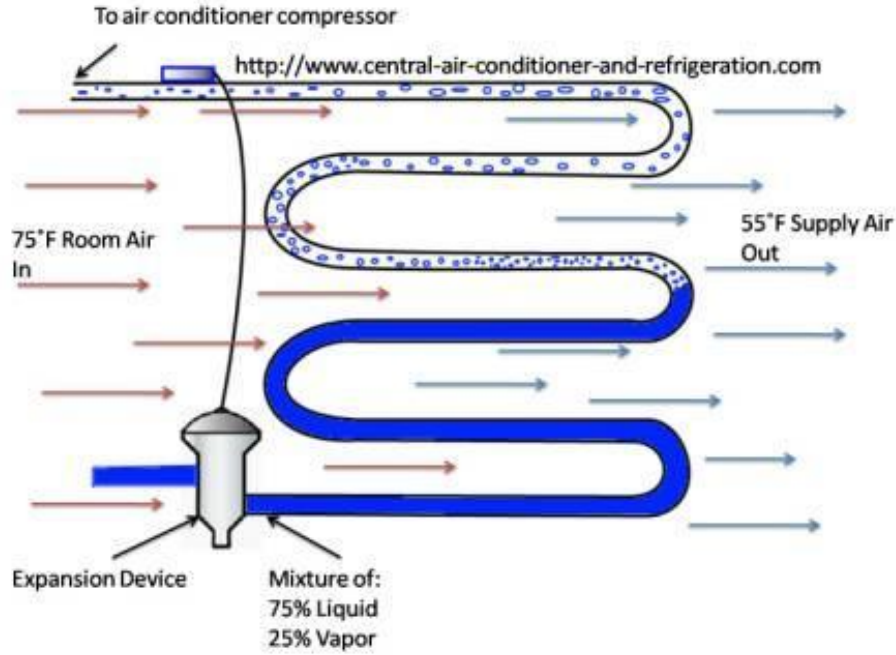
Bu sistem evaporatörün bir soğutma bloğu şeklinde tasarlanıp takıldığı parçayı soğutmasıdır. Bu nedenle gaz ile soğutma sistemlerinin içinde sıvı soğutma ve gaz destekli sıvı soğutma sistemlerindeki gibi radyatör, pompa ya da soğutma sıvısı bulunmaz.

- Gaz destekli soğutma sistemleri bilgisayarın ancak bir bileşenini (örneğin sadece CPU) soğutabilecek ürünlerdir. Bu sistemlerde kompresör sadece bir parçayı soğutur.
- Bunun etkisiyle o parçanın sıcaklığı, sistemin yapısına ve kompresörün performansına göre -50°C kadar düşebilir.
- Bu sistemler hiç durmadan sürekli ve her zaman tam performans altında çalışır. Bu nedenle de elektrik sarfiyatı bundan önceki çözümlere göre çok daha yüksektir.
- Bu soğutma çözümünde terleme sorunu daha baskındır. Bu nedendir ki, bu sistemler günlük kullanıma uygun değildir.

# 4. SOĞUTMA SİSTEMİ ELEMANLARI

## 4.1. Evaporatör (Buharlaştırıcı)

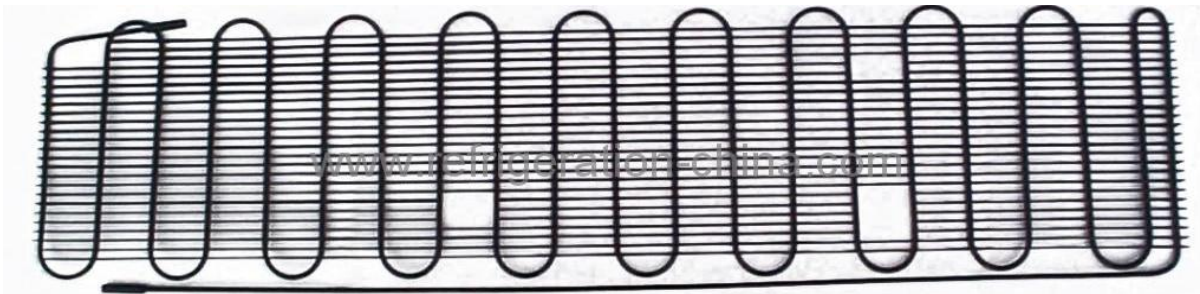
Evaporatör içine düşük basınçta ve sıcaklıkta sıvı halde gelen soğutucu akışkan ortam ısısını çekerek buharlaşır. Böylece ısısını çektiği ortam soğumuş olur. Buharlaşan akışkan kompresöre gider.



Şekil 1: Evaporatörün Çalışma Prensibi

## 4.2. Kondenser (Yoğuşturucu)

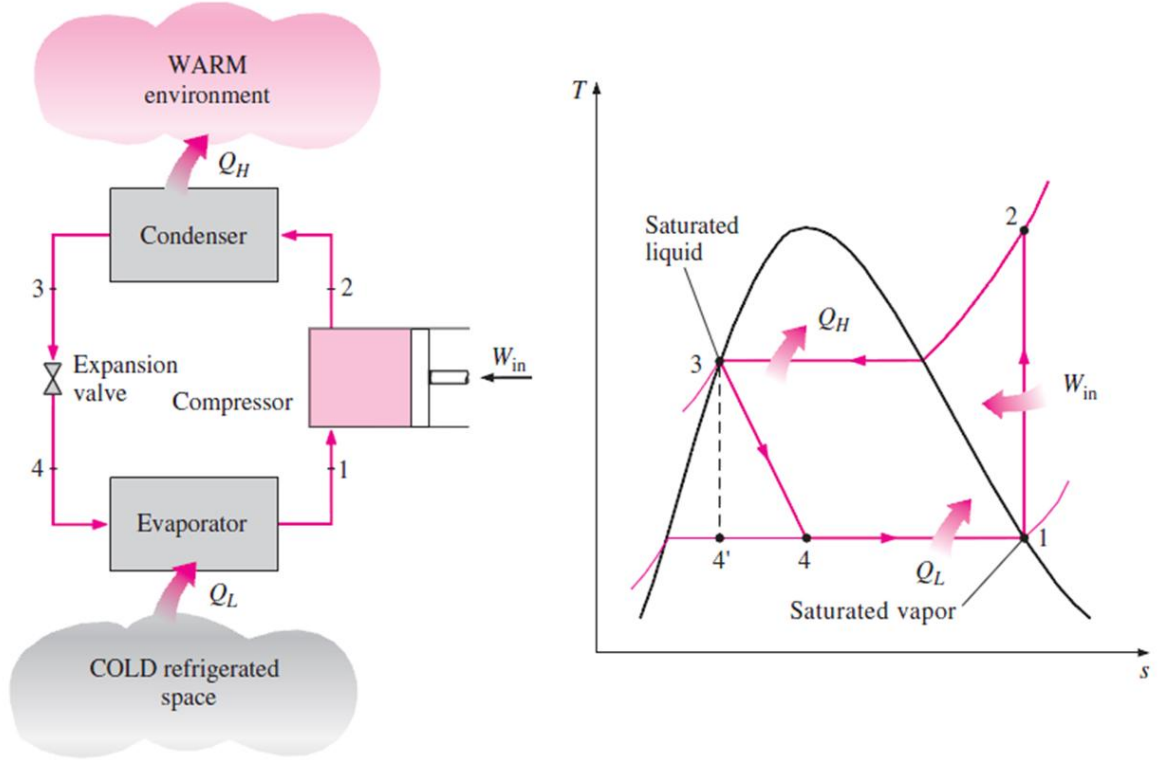
Buzdolabı gibi soğutucu makinelerde soğutkanın gaz olarak girdikten sonra ısısını çevreye vererek sıvı hale geçtiği bölümdür. Buzdolabının dışında veya yalıtım malzemesinin içinde saklı olarak yer almaktadır. Buzdolabının dışında yer aldığına, düz boruların kıvrılarak kat kat yapılmasıyla oluşturulan geçişlerin sayısı artırılarak, yoğuşturucunun ısıyı havaya atması kolaylaştırılmakta, soğutkanın aşırı soğutulmuş sıvı haline geçmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2: Kondenser Örneği

### 4.3. Kısılma Vanası

Kısılma vanası basit bir akış kontrol mekanizmasıdır. Soğutkanın akışını kısırarak, basıncını değiştirmektedir. Yoğuşturucudan gelen yüksek basıncı ve sıcaklıktaki aşırı soğutulmuş sıvı soğutkanın, basıncını ve sıcaklığını düşürerek buharlaşma basıncına getirmek için kullanılmaktadır. Soğutkanın bir kısmı buharlaştırıcıya girmeden, kısılma vanası içinde buharlaşmaya başlamaktadır. Bir diğer işlevi ise, kompresör durduğu zaman, soğutma devresindeki basıncı farklılığını dengelemektir.



şekil 3: Soğutma evrimi

# 5. SAF MADDE

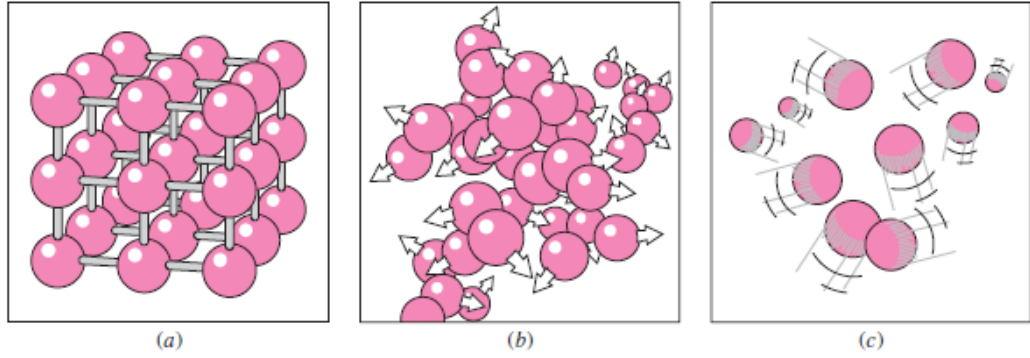
Her noktasında aynı ve değişmeyen bir kimyasal bileşime sahip olan maddeye **saf madde** denir.

Verilen bir basınçta saf maddenin faz değişimlerine başladığı sıcaklığa **doyma sıcaklığı** **T<sub>doyma</sub>** denir.

Verilen bir sıcaklıkta, saf maddenin faz değişimlerine başladığı basınç ise **doyma basıncı** **P<sub>doyma</sub>** olarak tanımlanır.

## Doyma basıncı ile doyma sıcaklığı arasındaki ilişki

Kaynama sırasında sıcaklık sabit tutulduğunda basınç sabit kalır. Dolayısıyla kaynama sırasında sistem doymuş haldedir. Bu durumda sıcaklık ile basınç birbirinden bağımsız olarak değiştirilemez. Basınç veya sıcaklıktan biri değiştirildiğinde bir geçiş süresinden sonra diğer değişkende sabit bir değere ulaşır. Sonuçta doymuş rejim halindeki sistemin basınç ve sıcaklıkları arasında  $T = f(P)$  ilişkisi elde edilir. Termodinamikte saf maddeler için verilen doymuş haller tabloları bu deneyde gözlemlendiği gibi elde edilebilir.



Şekil 4: Katı Sıvı ve Gaz Hal İçin Atom Düzenleri

**Sıkıştırılmış sıvı:** Sıvının buharlaşma safhasına henüz gelmediği faza sıkıştırılmış sıvı veya soğutulmuş sıvı denir.

**Doymuş Sıvı:** Buharlaşma başlangıcı olan hale denir.

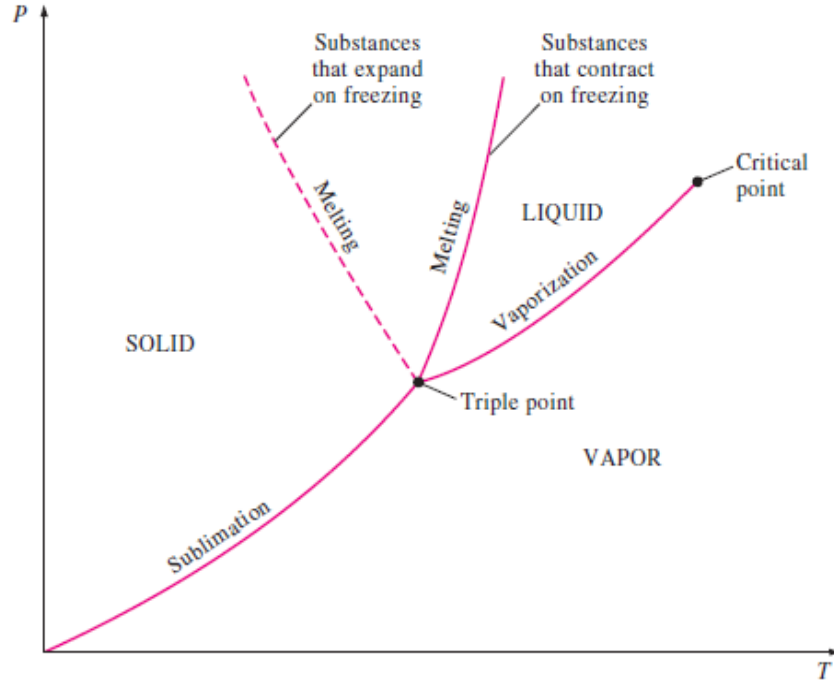
**Doymuş Buhar:** Yoğuşmanın sınırında olan buhara denir.

**Kızgın Buhar:** Yoğuşma sınırında olmayan (yani doymuş buhar gibi değil) buhara kızgın buhar denir.

## 5.1. P-T Diyagramı (Üçlü Nokta)

Bu diyagram genellikle faz diyagramı olarak bilinir, çünkü her üç faz birbirinden bir eğri ile ayrılmıştır.

Süblimasyon eğrisi katı ve buhar bölgelerini ayırır, buharlaşma eğrisi sıvı ve buhar bölgelerini ayırır, erime eğrisi de katı ve sıvı bölgelerini ayırır.



Şekil 5: Üçlü nokta grafiği

- Bu üç eğri, her üç fazın bir arada dengede olduğu üçlü noktada buluşur.
- Buharlaşma eğrisi kritik noktada sona erer, çünkü kritik noktanın üzerinde sıvı ve buhar fazları arasında bir ayırım yapılamaz.
- Donma sırasında genişleyen ve hacmi küçülen maddelerin P-T diyagramları arasında sadece erime eğrisinde farklılık vardır.

## 5.2. Kaynama

Doyma sıcaklığında bir sıvı daha yüksek bir sıcaklıkta bir yüzeyle temas halinde olursa yüzeyden sıvıya ısı geçişi olur. Bu ısı geçişi sonucu sıvıda faz değişimi yani buharlaşma başlar. Sabit basınçta ısı akısına bağlı olarak buharlaşma hızı değişir. Bu olaya kaynama adı verilir. Faz dönüşümü sırasında ısı transfer miktarı oldukça büyük olduğundan bu özelliğinden dolayı çok uygulamada yararlanır. Isı ve güç üretim sistemleri, buhar üreteçleri, soğutucular, arıtma, ısı taşıma vb. uygulamalar bu konuda örnek olarak verilebilir.

Kaynama olayı ilginç ve anlaşılması güç bir mekanizmadır. Konu üzerinde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak yoğunluk habbe (kabarık) oluşumu ve taşınım üzerinde yoğunlaşmaktadır. Habbe oluşumu ve taşınım, gizli buharlaşma enerjisi ve akışkan ısı iletim katsayıları ile yakından alakadardır. Bu konuda kuramsal bilgiler ısı transfer kitaplarında bulunabilir.

DeneySEL çalışmada hakim olan ısı geçişi mekanizması kaynama rejimleriyle ilişkili olduğundan, kaynama hakkında geniş literatür araştırması yapılmıştır.

Zorlanmış taşınımlı iç akışta kaynama, içinden bir sıvı akarken ısıtılan bir borunun iç yüzeyinde kabarcık oluşumu ile gerçekleşir. Kabarcık büyümesi ve yüzeyden ayrılması, akış hızından şiddetle etkilenir ve hidrodinamik etkiler, havuz tipi kaynamada (pool boiling)

ortaya çıkanlardan önemli ölçüde farklıdır. Genelleştirilebilir savların geliştirilmesini engelleyen, farklı iki-fazlı akış düzenlerinin varlığı nedeniyle işlem çok karmaşıklaşır.

Şekildeki ısıtılan düşey borunun içinde, akışın gelişimi göz önüne alınsın. Boruya, aşırı-soğutulmuş sıvı olarak giren akışkana ısı geçişi, başlangıçta, zorlanmış taşınım ile olur ve zorlanmış taşınım bağıntıları kullanılarak hesaplamalar yapılabilir. Ancak, kaynama bir kez başladıktan sonra, yüzeyde ortaya çıkan kabarcıklar büyür ve ana sıvı akışı içine taşınırlar. Akış düşük kuruluk derecesindedir. Ayrık buhar habbeleri sürekli sıvı fazının içerisine yayılmıştır. Kabarcıklı akışta (bubbly flow) habbelerin ortalama çapı genellikle boru çapından küçüktür. Bu *kabarcıklı akış aşamasında* (tıkaç akış, slug flow) taşınım ile ısı geçiş katsayısında, keskin bir artış vardır. Buharın hacim oranı, kuruluk derecesi arttıkça, ayrık kabarcıklar birleşerek kesitin neredeyse tamamını kaplayan buhar yastıkları oluştururlar. Bu *buhar yastıklı akış aşamasını*, sıvının neredeyse tamamının yüzeyde bir film oluşturduğu kuruluk derecesinin çok daha yüksek neredeyse tamamının buhar olduğu konfigürasyon izler. Buhar, daha büyük bir hızla borunun orta kısmı boyunca hareket ederken bu film, borunun iç yüzeyi boyunca hareket eder. Açıkça görülen nedenlerle bu rejim halka kesitli akış aşaması (annular flow) adını alır. Akış boyunca daha çok buharın üretilmesiyle birlikte, boşluk oranı artar, akış sıvı-buhar ara yüzeyinden buharlaşmanın çok daha önemli olduğu halkasal veya sanki halkasal yapıya bürünür

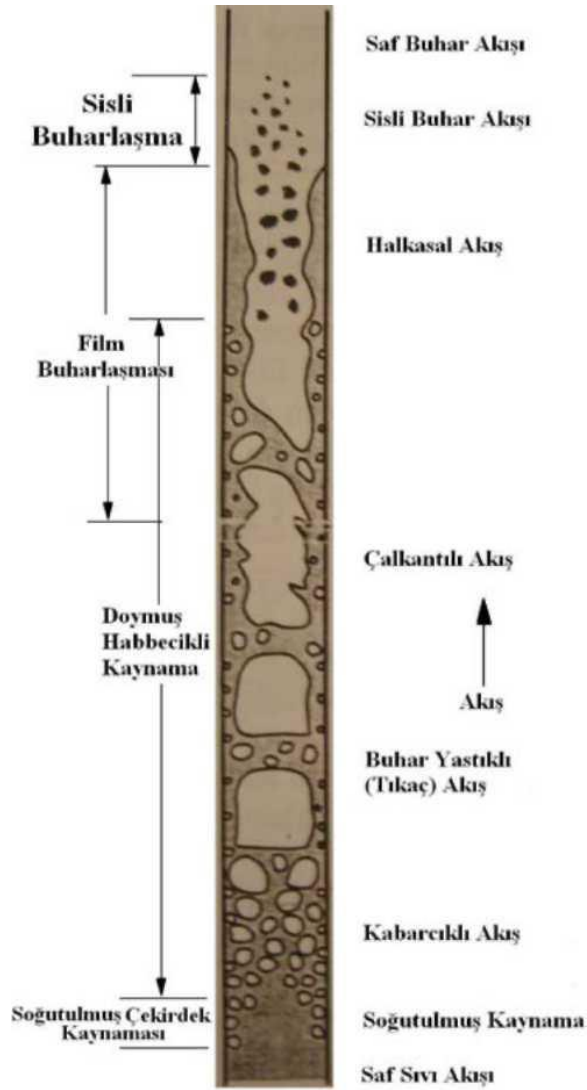
Buhar hızı yüksek olduğunda, sıvı filmi ara yüzeyi, ara yüzey de çalkantılara neden olan Helmholtz kararsızlığında olabilir. Çalkantılardan kopan sıvı damlacıkları merkezdeki buhar akışının içine katılırlar. Orta kuruluk derecelerinde, ek olarak iki akış rejiminden biri görünür. Eğer sıvı ve buhar fazlarının her ikisi de yüksek hızda ise merkezdeki buhar akışının içinde çözülmüş vaziyette yoğun sıvı kümeli halkasal akış görülür. Bu akış rejimi halkasal akışın bir tipi olmasına rağmen literatürde dar ('wispy) halkasal akış olarak bilinir.

Orta kuruluk derecesi ve düşük debilerde sıvı-buhar ara yüzeyi üzerindeki kayma gerilmesi, uygulanan basınç gradyeninin ve aşağı yönlü kütle kuvveti olan yerçekiminin toplam etkisini elimine edecek mertebelerdedir. Bu nedenle sıvı akışı kararsız ve salınımlı olmaya meyillidir. Ancak ortadaki buhar akışı sürekli olarak yukarı doğrudur. Sıvı filminin ortalama hızı yukarı doğru olduğu halde sıvı yukarı-aşağı arada kalan hareket yapar. Bu nedenle bu koşullardaki akış yüksek mertebeden rahatsızlıklar içeren, çok düzensiz bir ara yüzeyle sonuçlanır. Bu salınımlı akış çalkantılı akış (churn flow) olarak bilinir.

Kabarcıklı akış aşaması boyunca ve halka kesitli akış aşamasının çoğunda ısı geçiş katsayısı yükselmeye devam eder. Fakat sonunda, iç yüzey üzerinde kuru noktalar belirir ve bundan sonra ısı taşınım katsayısı azalmaya başlar. Geçiş aşamasında ise kuru noktaların gittikçe büyüdüğü ve sonunda yüzeyin tamamen kuruyup, kalan sıvının, ortadaki buharın içinde damlacıklar halinde sürüklendiği görülür. Bu aşamada, ısı taşınım katsayısı azalmaya devam eder. Tüm damlacıklar buhara dönüşene değin süren sisli akış aşamasında bu katsayıda çok az değişim olur. Daha sonra ise, buhar yüzeyden olan zorlanmış taşınım ile ısı geçişi sonucu kızdırılır. Yukarıda açıklanan iki-fazlı akış aşamalarının nicelendirilmesi için geliştirilen çok sayıdaki bağıntıların değerlendirilmesi kaynaklardan bulunabilir. Kaynamanın yapısı, gerçekleştiği koşullara göre belirgin oranda değişir. Bu koşullar: ısı akışının düzeyi, sıvı-buharın termofiziksel özellikleri, yüzey malzemesi ve yüzey özellikleri, ısıtılan yüzeyin alanıdır.

İki fazlı akışların uygulamaları göz önüne getirilirse, dairesel borular teknolojik uygulamalarda en çok rastlanan geometrilerdir. Ayrıca dikey ya da yatay iki fazlı akışlar en çok kullanılan konfigürasyonlardır. Fakat bazı farklı akış konfigürasyonları ve kanal geometrileri, yeni uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Üzerlerinde yapılan incelemeler sonucu akış rejimleri genellikle dairesel borulara benzemesine rağmen bazı durumlarda akış davranışı üzerinde belirgin farklılıklar meydana getirdikleri gözlenmiştir.

İki fazlı karışım kanal içinde akarken faz değişimi görülüyorsa genellikle değişik akış rejimleri boru boyunca değişik koordinatlarda görülür. Düşey yukarı doğru akış kaynamasında düşük veya orta mertebelerde ısı akısında akış rejimleri şekilde görülmektedir. Akışkan yerel yığın sıcaklığı doyma sıcaklığına ulaşmadan kaynamaya başlayabilir. Bu durumda görülen rejim, yapılan çalışmada görsel olarak izlenen ve sıcaklık ölçümleriyle doğrulanan düşük boşluk oranındaki kabarcıklı akıştır. Ayrıca kabarcıklı kaynamanın başlangıcı (Onset of Nucleate Boiling  $T_{ONB}$ ) civarında genellikle habbecikli kaynama baskın olan kaynama mekanizmasıdır.

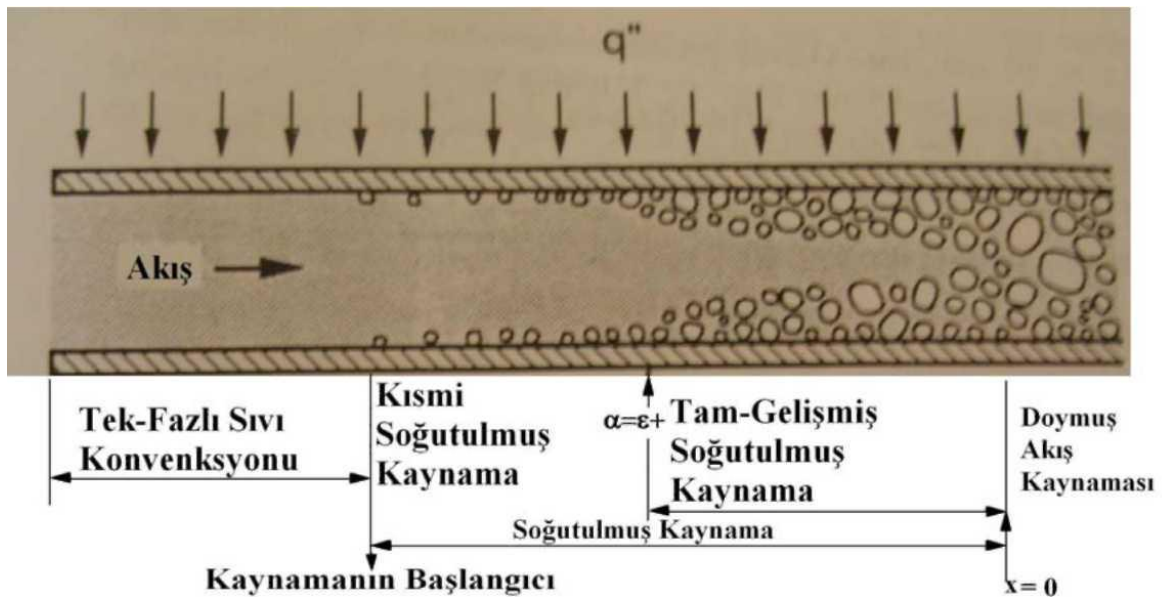


Şekil 6: Düşey Boruda Düşük ısı akısında akış kaynaması rejimleri, kaynama mekanizmaları



Düşük-orta kalitelerde, kabarcıklı kaynama ve kısmi soğutulmuş kaynama mekanizmalarının her ikisi de önemli olabilir. Duvar üzerindeki sıvı incilmesiyle, film kaynaması (film boiling) çok verimli olur ve baskın mekanizmadır. Halkasal akışın (annular flow) son safhalarında merkezde akmakta olan buharın hızlanması sıklıkla sıvı damlacıklarının buhar içinde çözünmesini sağlar. Bu etki filmin direk buharlaşmasıyla birlikte filmin yukarı çığına doğru akmasıyla film kalınlığını indirme meylinindedir. Bu olayın sonucu olarak film boru cidarının bazı bölgelerinde tamamen ortadan kalkabilir. Bu olay kuruma (dryout) veya burada olduğu gibi boru cidarının kısmi kuruması olarak bilinir.

Sisli Buhar Bölgesinde Isı Transferi incelendiğinde, kısmi kuruma olan bölgenin yakınlarda film oldukça ince olduğundan sıvı filmine ısı transferi oldukça etkindir. Bu nedenle, habbecikli kaynama ve film kaynamasının toplu etkisi bu bölgeye yaklaştıkça ısı transferi katsayısının artmasını sağlar. Kısmi kurumaların başlamasıyla, kuruma olan bölgeler, ince film kaynaması olan bölgelere göre ısı transferi bakımından ihmal edilebilir ölçekte kalmaktadır. Dolayısıyla boru boyunca ilerledikçe ıslak bölgenin alanının azalması yüzünden tüm alana göre tariflenen ısı transfer katsayısı düşer. Sisli buhar bölgesinde yüzey tamamen kurudur ancak buhar içerisinde çözülmüş sıvı zerrecikleri hala mevcuttur. Bu bölgede kaynama gazda ısı taşınımı, ışınım ve su zerreciklerinin duvarla veya duvarın çok yakınında çarpışmasıyla sağlanan, diğer kısımlara göre düşük mertebede olan ısı transferi mekanizmalarıyla sağlanır. Isı taşınım katsayısı boru boyunca tek fazlı buhar akışı elde edilinceye kadar düşmeye devam eder. Kuru buhar bölgesinde tek fazlı taşınım bağıntıları geçerlidir.



Şekil 8: Aşırı soğutulmuş kaynama rejimlerinin akış boyunca değişimi

### Aşırı Soğutulmuş Sıvı Akış Kaynaması (Subcooled boiling)

Şekilde sıkıştırılmış sıvının kaynamasıyla ilgili ardışık rejimler şematik olarak gösterilmektedir. Kabarcıklı kaynamanın başlangıcı ( $T_{0NB}$ ) geçilir geçilmez kısmi soğutulmuş kaynama görülür. Bu bölge zorlanmış taşınım ve habbecikli kaynama etkilerinin (akış yönünde habbecikli kaynama mekanizmaları etkisini artırır.) ikisinin de etkili olduğu geçiş bölgesidir.  $T_{0NB}$

yakınında habbecikler az ve aralıktır. Bu bölgedeki habbe oluşumu ve salınımının toplam ısı transferine etkisi küçüktür. İster sabit yüzey sıcaklığında ister sabit ısı akısında olsun akış ilerledikçe habbecik oluşumu daha elverişli bir hal alır. Bu durum kısmi kaynama bölgesinde ilerledikçe habbecik yoğunluğunun artmasına neden olur. Sonuç olarak habbe odağı yoğunluğu çok artar. Habbecikli kaynamanın ısı transferine katkısı doymuş habbecikli havuz kaynamasının etkisine eşitlenir. Böylece akışın tam gelişmiş habbecikli kaynama bölgesine girdiği söylenir. Bu rejimde habbecikli kaynama ısı transferi mekanizmasında tamamen baskın olanıdır. Tam gelişmiş habbecikli kaynamanın baskın olmasıyla ısı transferi debiden ve soğutma derecesinden bağımsız olur. Bu orta ve yüksek kızdırma derecelerinde habbecikli havuz kaynamasının çevresel hareketten ve soğutma derecesinden çok az etkilenmesinin direkt sonucudur.

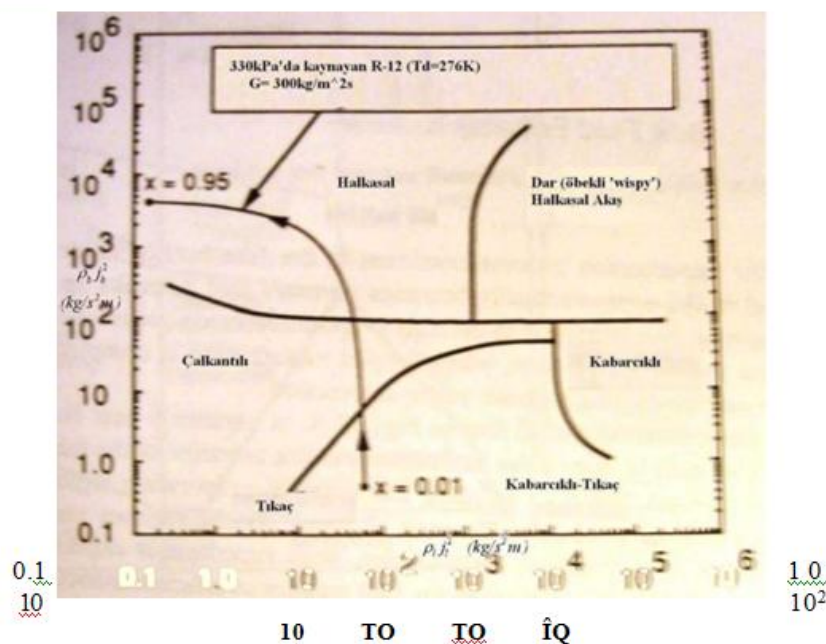
### Akış Rejimi ve Kaynama Mekanizmaları

Akışkan sıkıştırılmış sıvı olarak girip, kızgın buhar olarak çıkarsa mümkün olan en geniş akış koşulları elde edilir. Gözlenen akış rejimlerinin dağılımı, akış karakteristikleri, debi, kanal yönelimi, akışkan özellikleri, duvardaki ısı akısının değeri ve dağılımına bağlıdır. İki fazlı akış rejimi genellikle iki fazın bağlı hızlarına bağlıdır. Akışın ivmelenmesi, ortalama sıvı-buhar hızları arasındaki farkları arttırarak akış rejiminin değişmesine neden olur.

Akış kaynaması akış rejimi değişikliklerine ilave olarak boru boyunca değişik noktalarda değişik kaynama mekanizmalarına neden olabileceğinden çok komplike bir olaydır.

### Akış Rejiminin Tespiti

Yapılan deneysel çalışmada tek fazlı akış, kabarcıklı akış ve tıkaç akış gözlemlenmiştir. Çalışılan akış rejimi ısı transferi üzerinde belirgin etkiler gösterdiğinden saptanması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle Hewitt Roberts akış rejimi haritaları ve Taitel-Duckler analitik ifadeleri kullanılmıştır. İki fazlı akış haritaları genellikle denge halinde, adyabatik, iki fazlı akışlar için türetildiği halde düşük-orta ısı akısında taşınım kaynaması boyunca akış karakteristiklerinin kestirilmesi için genellikle kayda değer kalitede veri sağlarlar.



Şekil 9: Akış kaynaması için akış haritası

Kaynama 2 ye ayrılır:

- a. Havuz kaynama
- b. Zorlanmış taşınım ile kaynama

### 5.2.a. Havuz Kaynama Aşamaları

#### → Doğal Taşınım İle Kaynama;

$\Delta T_{w,A} \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$  olmak üzere  $\Delta T_w \leq \Delta T_{w,A}$  olduğu zaman doğal taşınım ile kaynama olur. Bu aşamada, doyma sıcaklığında kaynamayı sağlamak için, sıvı fazıyla temas eden yeterli miktarda buhar yoktur.

Kızma farkı arttırılırken, kabarcık oluşumu başlar, ancak A noktasının altında (A noktası kabarcıklı kaynamanın başlangıcı) akışkan hareketi temelde, doğal taşınım etkileri ile belirlenir.

**Kızma farkı;** *Isıtıcı yüzey sıcaklığı ile akışkan doyma sıcaklığı arasındaki farktır.*

#### → Kabarcıklı Kaynama;

Kabarcıklı kaynama,  $\Delta T_{w,C} \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$  olmak üzere,  $\Delta T_{w,A} \leq \Delta T_w \leq \Delta T_{w,C}$  aralığında gerçekleşir.

Bu aralıkta, iki farklı akış düzenine rastlanabilir, bu düzende ısı alışverişinin çoğu yüzeyden yükselen buhar kabarcıkları ile değil; yüzeyden yüzey üzerinde hareket eden sıvıya doğrudan aktarım ile gerçekleşir.

#### → Geçiş Kaynaması;

C – D arasında kabarcık oluşumu o denli hızlıdır ki, yüzey üzerinde bir buhar filmi veya örtüsü oluşmaya başlar. Yüzey üzerindeki herhangi bir noktada koşullar, film ve kabarcıklı kaynama düzenleri arasında gidip gelir.

#### → Film Kaynaması;

$\Delta T_w \geq \Delta T_{w,D}$  olduğu zaman, film kaynaması gerçekleşir. *Leidenfrost* noktası olarak adlandırılan, kaynama eğrisinin D noktasında, ısı akısı en küçük değerini alır. Yüzey tümüyle buhar örtüsüyle kaplıdır.

### 5.3. Yoğuşma

Buharın doyma sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta bir yüzey ile teması sırasında buhardan yüzeye ısı geçişi olur. Buhar, doyma sıcaklığında ise ısı geçişi buharın gizli ısısından karşılanır. Gizli ısıyı kaybeden buhar, sabit sıcaklıkta yoğuşur. Isı geçiş mekanizmasında taşınım katsayısı büyüktür. Pratikte buharlaşma bölümünde sıralandığı gibi birçok uygulaması vardır.

İki çeşit yoğuşma türü vardır. Bunlar:

- a. Damlacıklı Yoğuşma
- b. Film Yoğuşması

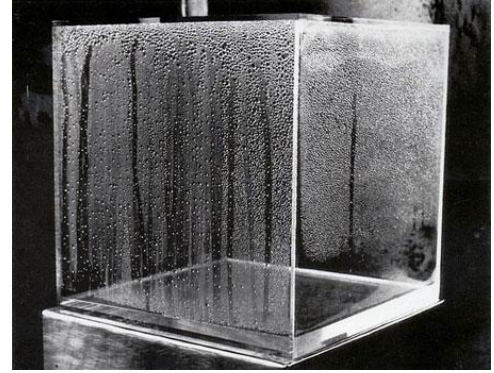
### 5.3.a. Damlacıklı Yoğuşma

Buhar yoğusurken yüzey üzerinde sıvı filmi yerine sıvı damlacıkları meydana gelir. Sıvı filmi oluşmaz. Isı geçisi doğrudan yoğuşan damlacığın üzerinden yapılmaktadır. Buna damlacıklı yoğuşma denir. Bu yoğuşmada taşınım katsayısı, film yoğuşmasındaki taşınım katsayısından daha fazladır.

Buharlaştırma ve yoğuşma ile ısı transferi içeren ısı cihazları çok daha kompaktır. Bu nedenle olayın mekanizmasının iyi anlaşılması için gereklidir

### 5.3.b. Film Yoğuşma

Film, yüzeyin üst kısmında oluşur ve yerçekiminin etkisi altında aşağı doğru akar.



Şekil 10: Yoğuşma Örneği

Yoğuşan sıvı tabakasının hız dağılımı:

$$u = \frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\mu_f} x \left\{ \delta_y - \frac{y^2}{2} \right\} \quad (1)$$

$\delta$ : yoğuşan sıvı tabakasının kalınlığı

$\rho_f$ : doymuş sıvının yoğunluğu

$\rho_g$ : doymuş buharın yoğunluğu

$\mu_f$ : doymuş sıvının viskozitesi

Film, yüzeyin üst kısmında oluşur ve yerçekiminin etkisi altında aşağı doğru akar. Yoğuşan sıvı tabakasının ortalama Nusselt sayısı:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}xL}{k} = 0.943 \left[ \frac{g \cdot \rho_f (\rho_f - \rho_g) h_{fg} \cdot L^3}{\mu_f k_f (T_S - T_W)} \right]^{1/4} \quad (2)$$

Burada akış karakteristiğini belirlemek için Re sayısını da bilmemiz gereklidir. Çünkü akışın laminar veya türbülans oluşu belirlenmelidir.

$$Re = \frac{4\dot{m}_f}{\mu_f P} \quad (3)$$

$$Re = \frac{4}{3} \frac{g \rho_f (\rho_f - \rho_g) \delta^3}{\mu_f^2} \quad (4)$$

**Re Sayısı:**

Re < 1800 → Laminer

Re > 1800 → Türbülanslı

#### 5.4. Soğutma Makineleri ve Isı Pompaları

Isı akışının azalan sıcaklık yönünde, başka bir ifadeyle yüksek sıcaklıktaki ortamlardan düşük sıcaklıklardakine doğru olur. Bu yönde ısı aktarma işlemi doğada herhangi bir cihaza ihtiyaç duymadan oluşur. Diğer taraftan ters yöndeki işlem kendiliğinden oluşamaz.

Düşük sıcaklıktaki ortamdan yüksek sıcaklıktakine ısının aktarılması için soğutma makineleri olarak adlandırılan özel cihazlara gereksinim duyulur. Bu cihazlardaki iş gören akışkanlara da **soğutucu akışkan** ya da **soğutkan** denir.

Düşük sıcaklıktaki ortamdan yüksek sıcaklıktakine ısıyı aktaran cihazda **ısı pompasıdır**. Soğutma makineleri ve ısı pompaları aslında aynı cihazlar olmakla birlikte kullanım amaçları farklıdır. Soğutma makinesinin amacı soğutulan hacimden ısı çekerek onu düşük sıcaklıkta tutmaktır. Diğer taraftan ısı pompasının hedefi ise ısıtılan ortamı yüksek bir sıcaklıkta tutmaktır.

Soğutma makineleri ve ısı pompalarının görevlerini yerine getirmeleri etkinlik katsayısı (COP) ile aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$COP_{SM} = \frac{\text{Elde edilmek istenen}}{\text{Harcanan}} = \frac{\text{Soğutma Etkisi}}{\text{iş girişi}} = \frac{Q_L}{W_{net,g}} \quad (5)$$

$$COP_{IP} = \frac{\text{Elde edilmek istenen}}{\text{Harcanan}} = \frac{\text{Isınma Etkisi}}{\text{iş girişi}} = \frac{Q_L}{W_{net,g}} \quad (6)$$

#### 5.5. CARNOT Çevrimi

Carnot çevrimi iki tersinir izotermal ve iki izantropik hal değişimlerinden oluşan tütmden tersinir bir çevrimdir.

Hal değişimlerindeki tersinmezlikler yok edilmediğinden gerçek uygulamalarda tersinir çevrimler başarılamaz. Bununla birlikte tersinir çevrimler gerçek çevrimlerin verimlerinin üst

sınırlarını belirler.

Tersinir çevrime göre çalışan ısı makineleri ve soğutma makineleri gerçek ısı makineleri ve soğutma makinelerinin karşılaştırılabilecekleri modeller oluştururlar.

Tersinir çevrimler aynı zamanda gerçek çevrimlerin geliştirilmesi aşamasında bir başlangıç noktası oluştururlar ve daha sonra gerektiğinde belirli görevleri yerine getirecek şekilde değiştirilirler.

## **5.6. Hal Değişimleri**

Bir tersinir hal değişimi bir yönde gerçekleştikten sonra çevrede herhangi bir iz bırakmadan tersi yönde gerçekleştirilebilen hal değişimleridir. Bu ancak her iki yöndeki hal değişimleri sonunda sistem ve çevresi arasındaki net ısı ve iş etkileşiminin sıfır olması durumunda olanaklıdır.

Tersinir olmayan hal değişimlere tersinmez hal değişimleri denir. Bir hal değişiminin tersinmez olmasına neden olan etkenlere tersinmezlikler denir.

### **5.6.a. İçten Tersinir Hal Değişimleri**

Hal değişimleri sırasında eğer sistemin sınırları içinde tersinmezlikler meydana gelmiyorsa bu hal değişimlerine içten tersinir hal değişimleri denir.

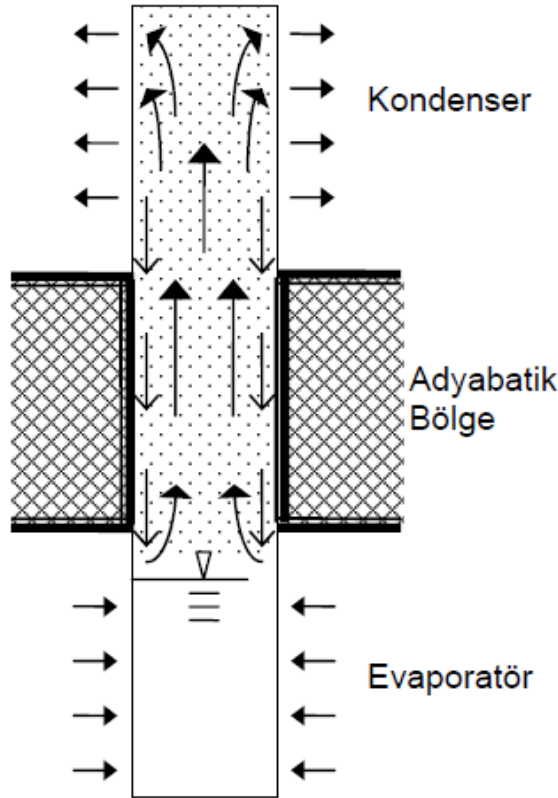
### **5.6.b. Dıştan Tersinir Hal Değişimleri**

Hal değişimleri sırasında eğer sistemin sınırları dışında tersinmezlikler meydana gelmiyorsa bu hal değişimlerine dıştan tersinir hal değişimleri denir.

# 6. ISI BORULU SOĞUTMA

## 6.1. Isı Borusu Nedir?

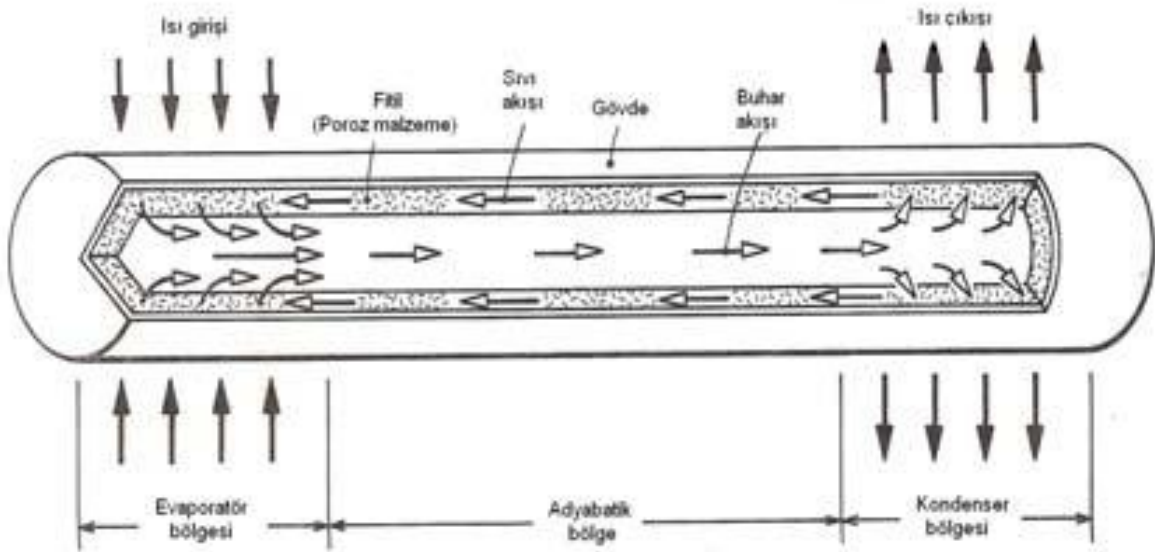
Isı borusu; iki fazlı, kapalı ve yüksek ısı iletibilme özelliğine sahip bir ısı transfer cihazıdır. Temel olarak bir ısı borusu, içerisinde bir miktar çalışma sıvısı bulunan ve havası alınmış kapalı bir hazneden ibarettir. Hazne cidarına, çalışma sıvısının akışını düzenlemek amacıyla uygun bir fitil yerleştirilebilir. Çalışma sırasında buharlaştırıcı (evaporatör) bölgesindeki ısı, çalışma sıvısının bir kısmını buharlaştırmakta ve kısa zamanda haznenin içi saf buharla doymuş hale getirmektedir. Sistemden ısı çekilmesi nedeniyle, yoğuşturucu (kondenser) bölgesinde hazne cidarı nispeten soğuk olacağından bu bölgede yoğuşma başlar. Yoğuşan sıvı zerrecikleri tekrar evaporatöre dönmekte ve çevrim tamamlanmaktadır. Yoğuşmuş akışkanı tekrar evaporatöre geri getirmek için yerçekimi kuvveti veya kılcal, merkezkaç, osmotik, manyetik vs kuvvetler kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem, yerçekimi kuvvetlerini temelde esas alan yöntemdir. Yerçekimi kuvvetleri ile birlikte fitil kullanımı da yaygındır. Yerçekiminin olmadığı durumlarda (uzayda) kılcal kuvvetlerden yararlanır.



Şekil 11: Isı borusunun şematik çalışma sistemi

Bir ısı borusu, ısıyı vakumlu bir metal boruyla bir noktadan diğer bir noktaya taşır. Boru, genelde %90'ı su, geri kalan kısmı ısı transferini optimize edecek maddeler olan bir sıvı içerir. Isı borusu (Heat pipe), ısı iletimini iyileştirmeye yarayan bir yöntemdir. Isı borusu yönteminde, ısı, içinde kimyasal madde olan bir boru aracılığıyla soğutma yapılacak noktaya iletilir. Isı borusu, vakum prosesi uygulanmış, iç yüzeyleri gözenekli kılcal fitil ile kaplanmış kapalı boru

veya farklı şekilli odalardır. Isı borusunun temel elemanları; kapalı bir kap, çalışma akışkanı ve gözenekli kılcal fitildir.



Şekil 12: Isı borusu çalışma sistemi

Isı borusunun bir ucu evaporatör, diğer ucu kondenser olarak işlev görür. Çalışma akışkanı, evaporatörde dış ısı kaynağından alınan ısı vasıtasıyla buharlaşarak kondensere akar. Kondenserde, çalışma akışkanı gizli ısısını dış soğuk ortama vererek yoğunlaşır. Kondensat kılcal hareket yardımıyla fitil boyunca evaporatöre geri döner. Böylece ısı borusu, buharlaşma gizli ısısını evaporatör kısmından kondenser kısmına sürekli olarak transfer eden bir ısı değiştiricidir.

## 6.2. Fitiller

Isı boruları içerisinde, kondenser bölgesinde yoğunlaşan akışkanın evaporatör bölgesine taşınması, termosifonlarda yerçekimi kuvveti ile gerçekleşmektedir. Eğer yerçekimsiz ortamda kullanılan bir ısı borusu ise (örneğin uzayda kullanılan ısı borusu), sıvının taşınması, hazne içerisine yerleştirilen fitilin kılcallığı ile sağlanmaktadır. Bu kılcallık çeşitli tellerden örülmüş fitiller olabileceği gibi ısı borusu içerisine açılan yivler yardımıyla da sağlanabilmektedir (Dunn ve Reay, 1994). Bu fitiller bakır, pirinç ve paslanmaz çelik tellerden örülerek yapılabilirler. Bazı durumlarda da toz metalurjisi ile gözenekli olarak üretilen malzemeler de (Sinterlenmiş malzemeler) kullanılmaktadır (Faghri, 1995).



Şekil 13: Fitil Örneği

Fitil malzemesinden beklenen özellikler şunlardır:

- Yoğuşan iş akışkanının geri dönüşü için gerekli akış kesitini sağlaması,
- Gerektiğinde pompalama basıncının sağlanması için sıvı-buhar ara yüzeyinde gözeneklerin

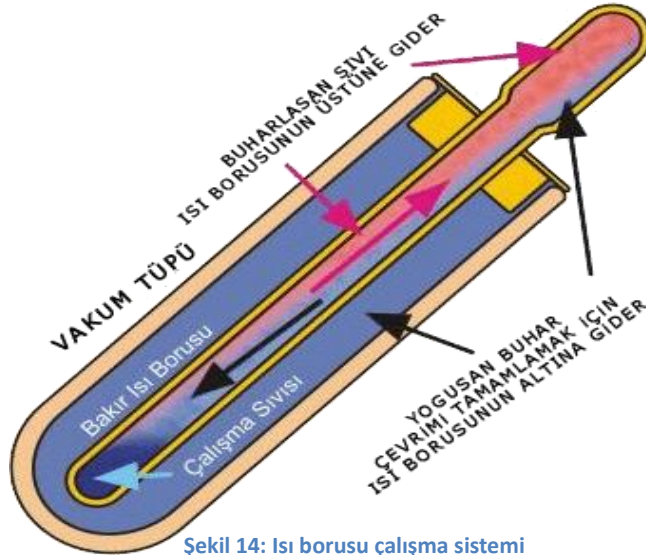
- oluşmasına imkan vermesi,
- Sıvı-buhar ara yüzeyi ve ısı borusu iç yüzeyi arasında iyi bir ısı akışı sağlayabilmesi şeklinde sıralanabilir.

Isı borularında, fitil veya fitil görevini yapacak özel kanallar, yerçekimsiz ortamlarda ve mikro ısı boru uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Bu anlamda, düzlemsel ısı borusu uygulamalarında bakır tozunun kullanılması Leong ve Liu (1997) tarafından incelenmiştir. Örülmüş paslanmaz çelik tellerden (50 Mesh) oluşan fitillerin, küçük ısı yüklerinde yatay konumda kullanıldığı uygulama ise Kadoguchi vd. (1997) tarafından araştırılmıştır. Öte yandan, ısı borusu iç yüzeyine açılan kılcak kanalların kullanımı şeklindeki uygulama ile ilgili çalışma da Stephan ve Buse (1992) ve Passos ve Reinaldo (2000) tarafından yapılmıştır.

Yerçekimi destekli ısı borularında akışkanın kondenserden evaporatöre akışı yerçekimi kuvvetiyle sağlanmaktadır. Bu tür uygulamalarda fitil kullanılması zorunluluğu yoktur. Ancak bazı uygulamalarda fitil kullanılmasının yararlı olacağı bildirilmiştir. Yerçekimi destekli ısı borularında, fitil olarak pamuktan yapılmış lamba fitilinin kullanılması Said ve Bilal (1999) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Fitil kullanılmasının toplam ısı transferi katsayısını artırdığı bildirilmiştir.

Termosifonlarda fitil kullanılmasının nedenleri (Faghri, 1995) şu şekilde sıralanabilir:

- Buhar ile sıvı ara yüzeyinde oluşan taşınmayı azaltmak,
- Eğimli termosifonlarda sıvının dairesel olarak ısı borusu yüzeyine dağılımına yardımcı olmak,
- Evaporatörde çekirdek kaynamasını kolaylaştırmak,
- Kondenser kısmında yoğuşmayla olan ısı transferini artırmak.



Şekil 14: Isı borusu çalışma sistemi

### 6.3. Kapilarite

Kapilarite sıvıların yüzey gerilimi dar tüplerde gözlenen yükselme ve alçalması olayıdır. Kapilarite olayını tam olarak anlayabilmek için kohezyon ve adhezyon gibi bazı kavramların da bilinmesinde fayda vardır. Bir sıvının aynı cins molekülleri arasındaki birbirlerini çekme kuvvetine kohezyon denir. Su ve camdan bir kabın molekülleri gibi farklı cins iki malzemenin

molekülleri arasındaki çekim kuvvetinin adı ise adhezyondur.

*İnce borularda kapilar yükselme formülü:*

$$h = \frac{2\sigma}{gr\rho} \quad (m) \quad (7)$$

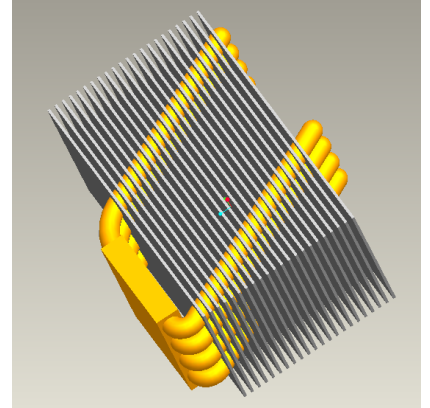
$\sigma$ : Yüzey gerilimi (N/m)

$\rho$ : Sıvının yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

r: Borunun yarıçapı (m)

#### 6.4. Sistem Nasıl Çalışır?

Mantık olarak içeriden bulunan maddenin ısıdan dolayı buharlaşması ve karşı tarafta soğutulup tekrar yoğunlaşarak ısı emilimi için baştaki konumuna dönmesi olarak çalışırlar. Sıvı düşük basınçta tutulur böylece buharlaşma ısı ortalama 30 dereceye çekilir. İki ucun arasındaki ısı farkı aşağı yukarı 8 derecedir. Tabii burada, kullanılan sıvı kadar borunun uzunluğu da önemlidir. Borunun etkinliği için önemli olan bir faktör de borunun yerleşim pozisyonudur: Isıyı dağıtacak olan uç, ısıyı emen uçtan daha yüksekte olmalıdır. Böylece, ısı borusu dikey yerleştirildiğinde (ısıyı emen uç ile dağıtan uç arasında 90 derece olduğunda), %95'lik bir etkinliğe erişilir.



Şekil 15: Isı borulu soğutma bloğu örneği

#### 6.5. Avantajları

- ✓ Hareketli parçaları yoktur, dolayısıyla sessiz çalışır.
- ✓ Her iki gaz tarafında da genişletilmiş yüzeyler kullanılabilir.
- ✓ Konstrüksiyonel olarak basittir.
- ✓ Son derece iyi esnekliğe sahiptir.
- ✓ Düşük sıcaklık düşümüyle önemli mesafeye yüksek miktarda ısı transfer kabiliyetine sahiptir.
- ✓ Kontrol edilebilirliği iyidir.
- ✓ Dış pompa gücü gerektirmez.

#### 6.6. Dezavantajı

- ✗ Düşük basınçlı gazlar için uygundur.

## 6.7. Isı Borusu Seçimi

Isı borularında bakır, çelik, alüminyum, seramik vs gibi malzemeler kullanılabilir. Bu malzemelerin, çalışma şartlarına bağlı olarak iş akışkanı ile uyumlu olarak çalışabilmeleri istenir. Malzeme seçiminde en önemli konu akışkan ile uyumluluğu, yani çalışma esnasında gaz üretiminin olmamasıdır.

Isı borularında kullanılan bazı malzemeler yüksek sıcaklıkta iş akışkanı ile reaksiyona girerek gaz üretimi yaparlar. Eğer çalışma sürecinde gaz üretimi olmuşsa, yoğunlaşmayan gazlar ısı borusunun üst bölgesinde toplanıp bloke ederek, kondenser bölgesinde ısı transfer edilen yüzeyin azalmasına neden olurlar.



Şekil 16: Örnek ısı borusu

## 6.8. Akışkan Seçimi

### 6.8.a. Kullanılacak Akışkanda Aranacak Özellikler

- Buharlaşma gizli ısı yüksek olmalıdır.
- Kritik sıcaklığı ve basıncı yüksek olmalıdır.
- Atmosfer basıncında kaynama sıcaklığı düşük olmalıdır.
- Doyma basıncı genleşme vanası basıncının altında bulunmalıdır.
- Yanıcı ve patlayıcı olmamalıdır.
- Karter yağına ve tesisatı oluşturan devre elemanlarına olumsuz yönde etkilememelidir.
- Zehirleyici olmamalıdır.
- Ucuz ve kolay temin edilebilmelidir.
- Küçük kapasiteli bir kompresörün kullanımına elverişli olmalıdır.
- Kapalı devrelerde sistemdeki kaçaklar kolayca temin edilebilmelidir.

Malzeme	Çalışma Akışkanı			
	Su	Aseton	Amonyak	Metanol
Bakır	ÖG	ÖG	UD	ÖG
Alüminyum	GÜB	ÖL	ÖG	UD
Paslanmaz Çelik	GÜY	UO	ÖG	GÜY
Nikel	UO	UO	ÖG	ÖL

ÖG: Geçmiş uygulamalara göre önerilebilir. UO: Uygun olabilir.  
GÜB: Bütün sıcaklıklarda gaz üretimi. UD: Uygun değil.  
GÜY: Yüksek sıcaklıklarda gaz üretimi. ÖL: Literatüre göre önerilebilir.

Tablo 2: Isı borusu ile çalışma akışkanı uyumluluğu

### 6.8.b. Kullanılacak Akışkan Özellikleri (R-134a)

Termodinamik ve fiziksel özellikleri ile R12'ye en yakın soğutucudur. Halen ozon tüketme katsayısı 0 olan ve diğer özellikleri açısından en uygun soğutucu maddedir. Araç soğutucuları ve ev tipi soğutucular için en uygun olan alternatiftir. Ticari olarak da temini olanaklıdır.90'lı yıllarda ozon tabakasına zararlı olduğu için birçok ülkede kullanımı yasaklanan R12 (diklordiflormetan) gazının yerine kullanılmak üzere üretilmiştir.

Tablo 3: R-134a için Termodinamik Veriler

Temp., $T$ °C	Sat. press., $P_{sat}$ kPa	Specific volume, $m^3/kg$		Internal energy, $kJ/kg$			Enthalpy, $kJ/kg$			Entropy, $kJ/kg \cdot K$		
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Sat. vapor, $u_g$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. vapor, $h_g$	Sat. liquid, $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Sat. vapor, $s_g$
20	572.07	0.0008161	0.035969	78.86	162.16	241.02	79.32	182.27	261.59	0.30063	0.62172	0.92234
22	608.27	0.0008210	0.033828	81.64	160.42	242.06	82.14	180.49	262.64	0.31011	0.61149	0.92160
24	646.18	0.0008261	0.031834	84.44	158.65	243.10	84.98	178.69	263.67	0.31958	0.60130	0.92088
26	685.84	0.0008313	0.029976	87.26	156.87	244.12	87.83	176.85	264.68	0.32903	0.59115	0.92018
28	727.31	0.0008366	0.028242	90.09	155.05	245.14	90.69	174.99	265.68	0.33846	0.58102	0.91948
30	770.64	0.0008421	0.026622	92.93	153.22	246.14	93.58	173.08	266.66	0.34789	0.57091	0.91879
32	815.89	0.0008478	0.025108	95.79	151.35	247.14	96.48	171.14	267.62	0.35730	0.56082	0.91811
34	863.11	0.0008536	0.023691	98.66	149.46	248.12	99.40	169.17	268.57	0.36670	0.55074	0.91743
36	912.35	0.0008595	0.022364	101.55	147.54	249.08	102.33	167.16	269.49	0.37609	0.54066	0.91675
38	963.68	0.0008657	0.021119	104.45	145.58	250.04	105.29	165.10	270.39	0.38548	0.53058	0.91606
40	1017.1	0.0008720	0.019952	107.38	143.60	250.97	108.26	163.00	271.27	0.39486	0.52049	0.91536
42	1072.8	0.0008786	0.018855	110.32	141.58	251.89	111.26	160.86	272.12	0.40425	0.51039	0.91464
44	1130.7	0.0008854	0.017824	113.28	139.52	252.80	114.28	158.67	272.95	0.41363	0.50027	0.91391
46	1191.0	0.0008924	0.016853	116.26	137.42	253.68	117.32	156.43	273.75	0.42302	0.49012	0.91315
48	1253.6	0.0008996	0.015939	119.26	135.29	254.55	120.39	154.14	274.53	0.43242	0.47993	0.91236

### 6.9. Isı Borularının Çalışmasını Sınırlayan Limitler

Isı borusu tasarımındaki en önemli konu, ısı borusunun transfer edebileceği ısı miktarıdır. Isı borusu birkaç W'tan birkaç KW'a kadar ısı taşıyabilecek şekilde tasarlanabilir. Ancak ısı borularının da taşıyabilecekleri bir ısı yükü sınırı vardır. Bu limitler; viskoz, ses, kılcal pompalama, köpürme ve kaynama limitleri olarak sıralanmaktadır. Bu limitlerin her biri fitil yapısına, iş akışkanına, sıcaklığa, ısı borusunun konumuna ve boyutlarına bağlıdır. Isı borularının çalışmalarını kısıtlayan bu faktörlerle ilgili olarak çok sayıda çalışma yapılmıştır. Shatto vd. (1997), El-Genk ve Saber (1997), Hashimoto ve Kaminogo (2002), Ong ve Haider-E-Alalhi (1999), Peterson ve Bage (1991) ve Kim ve Peterson (1994) tarafından yapılan araştırmalar, bu konuda yapılan çalışmalara örnek olarak verilebilir.

#### 6.9.a. Kılcal Limit

Kılcal limit, kılcal pompalama limiti olarak da bilinir. Sözü edilen bu limit, ısı borusunda yoğuşan sıvının, evaporatörden kondensere, fitilde oluşan kılcallıkla taşınmasında karşılaşılan bir limittir. Isı borusu içerisine yerleştirilen fitil, gözenek yapısı ve akışkanın yüzey gerilmesi ile bağıntılı olarak, kılcal basınç oluşturur. Bu kılcal basıncın ısı borusu içerisindeki basınç kayıplarından daha büyük olması gerekir.

Isı borusu içerisindeki basınç düşümü üç farklı şekilde meydana gelir. Bunlar;

- $\Delta P_1$ : Sıvının kondensere evaporatöre dönmesi için gerekli basınç farkı,
- $\Delta P_v$ : Buharın evaporatörden kondensere dönmesi için gerekli olan basınç farkı,
- $\Delta P_g$ : Yerçekimi kuvvetine bağlı olarak ortaya çıkan basınç düşümüdür. Bu değer, sıfıra eşit, sıfırdan büyük veya küçük olabilir.

$$\Delta P_{kılcal} > \Delta P_1 + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (8)$$

Isı borusundaki maksimum kılcal pompalama basıncının, borudaki toplam basınç düşümünden büyük olması gerekir. Eğer kılcal pompalama basıncı küçükse fitilin buharlaştırıcı bölgesi kuru olacaktır. Sonuçta kondensere evaporatöre dönen akışkan miktarı verilen ısıyı taşıyamayacaktır.

### 6.9.b. Viskoz Limit

Düşük sıcaklıktaki çalışmalarda, akışkanın viskoz kuvvetleri, buhar akışında baskın olmaktadır. Bu durumla sadece ısı borusunun ilk çalışmaya başlamasında karşılaşılır. Bu sorunla karşılaşmamak için, ısı borusu içerisindeki toplam basınç düşümünün buhar basıncına oranına bakılır. Bu oranın eşitlikte gösterildiği gibi 0,1'den küçük olması yeterlidir (Dunn ve Reay 1994).

$$\frac{\Delta P_v}{P_v} < 0.1 \quad (9)$$

### 6.9.c. Ses Limiti

Isı borusu içerisinde evaporatörden kondensere doğru buharın akışı düz bir borudaki akıştan farklıdır. Bu ortamdaki akış, daralıp genişleyen bir boğazdaki akışa benzer. Bu akış esnasında, buharın boğazdan geçişinde, buharın geçtiği bölgenin gerisinde kalan bölgede, basınç çok düşerse, tam boğaz kısmındaki hız, ses sınırına ulaşır. Akışta bir boğulma meydana gelir. Bu noktadan sonra evaporatör bölgesinden verilen ısı artırılabilir bile ısı borusu, daha fazla ısı taşıyamayacağı için bu nokta ses sınırı olarak tanımlanır. Ses sınırı yüksek sıcaklıklı ısı borularında karşılaşılan bir sınırdır. Ses sınırına bağlı ısı yükü için, şu eşitlik önerilmiştir;

$$Q_{s,max} = A_v \rho_0 h_{fg} \left[ \frac{Cp_v R_v T_0}{2(Cp_v + 1)} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Burada  $A_v$  buhar kesit alanını,  $\rho_0$  ve  $T_0$  durma noktasındaki yoğunluk ve sıcaklığı tanımlamaktadır.

### 6.9.d. Köpürme Limiti

Isı borusu içerisinde zıt yönlerde akmakta olan buhar ve sıvı akışkanlarından buharın hızı yeterince büyükse, sıvı taneciklerini fitil yüzeyinden koparıp tekrar kondensere doğru taşır. Bu olayın nedeni kesme kuvvetlerinin fazla olmasıdır. Eğer sıvı zerreciklerinden kopartılıp kondensere taşınan sıvı taneciği miktar artarsa, ısı borusundaki akış yavaşlar ve durur. Bu olay evaporatör kısmının fazla ısınmasından ve kondensere sıvı taneciklerinin çarpmasıyla ortaya çıkan seslerden anlaşılabilir. Köpürme sınırını veren eşitlik şu şekildedir:

$$Q_{e,max} = A_v h_{fg} \left[ \frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,1}} \right]^{1/2} \quad (11)$$

Burada  $r_{h,1}$  terimi, buhar-sıvı ara yüzeyi için hidrolik çapı ifade etmektedir. Köpürme limiti Weber sayısı 1'e eşit olduğu zaman ( $We=1$ ) oluşur.

### 6.9.e. Kaynama Limiti

Isı borusunda ısı taşınımı, akışkanın buharlaşım ve yoğuşması ile gerçekleşmektedir. Eğer ısı aktarılan yüzeylerde buhar tabakası birikirse, burada ısı akışına karşı bir direnç meydana gelir. Bu direnç nedeniyle yüzeyden ısı aktarımı yavaşlar. O bölgede aşırı bir sıcaklık artışı meydana gelir. Bunu önlemek için ısı borusu iç yüzeyinde (fitil ile yüzey arasında) buhar birikmesine neden olabilecek seviyede sisteme ısı verilmemelidir. Bu sınır, kaynama limiti olarak tanımlanır. Kaynama sınırını veren eşitlik:

$$Q_{b,max} = \frac{2\pi L_e k_2 T_v}{h_{fg} \rho_v \ln(r_i/r_v)} \left[ \frac{2\sigma}{r_v} - P_c \right] \quad (12)$$

Burada,  $P_c$  kılcal basıncı,  $k_e$  evaporatör iletkenliğini,  $r_i$  ve  $r_v$  boru iç yarıçapını ve buhar akış yarıçapını göstermektedir.

Kaynama limiti, radyal ısı akışı ile oluşan bir yüksek sıcaklık limitidir. Bu limitin sınır değerini daha büyük değerlere çekebilmek için, fitil yüzey alanını büyütme gerekir. Bu çözüm için önerilen en uygun fitil, toz metalden sinterlenerek üretilen fitillerin kullanılmasıdır.

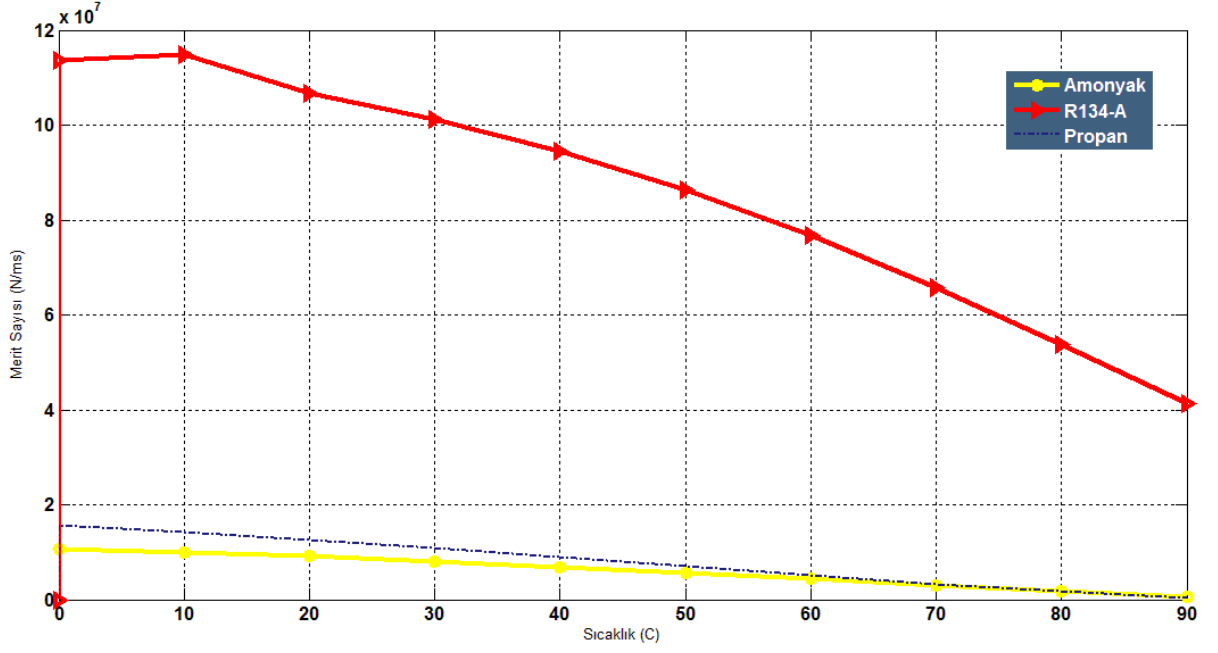
## 6.10. Sistemde Kullanılacak Formüller

### 6.10.a. Merit Sayısı

Akışkan seçiminde sıcaklık aralığına bakmak yeterli olmamaktadır. Aynı zamanda akışkanın yoğunluğu, buharlaşma gizli ısısı, yüzey gerilmesi ve viskozitesini de dikkate alma zorunluluğu vardır. Bu özelliklerin tamamını içeren **Merit sayısı** tanımlanmıştır. Herhangi bir akışkan için Merit sayısının yüksek olması, ısı borusunda iş akışkanı olarak kullanılmasının daha uygun olduğunu gösterir. Isı borularında kullanılacak akışkanlar için Me sayısı:

$$Me = \frac{\rho_1 \sigma_1 h_{fg}}{\mu_1} \quad (13)$$

$\rho$ ,  $\sigma$ ,  $h_{fg}$ ,  $\mu$  sırasıyla sıvı akışkanın yoğunluğu, yüzey gerilim katsayısı, buharlaşma gizli ısısı ve dinamik viskozitesi olarak verilmiştir.



Şekil 17: Amonyak, R134-A ve Propan'ın Merit sayısının sıcaklıkla değişimi

#### 6.10.b. Priming Faktör

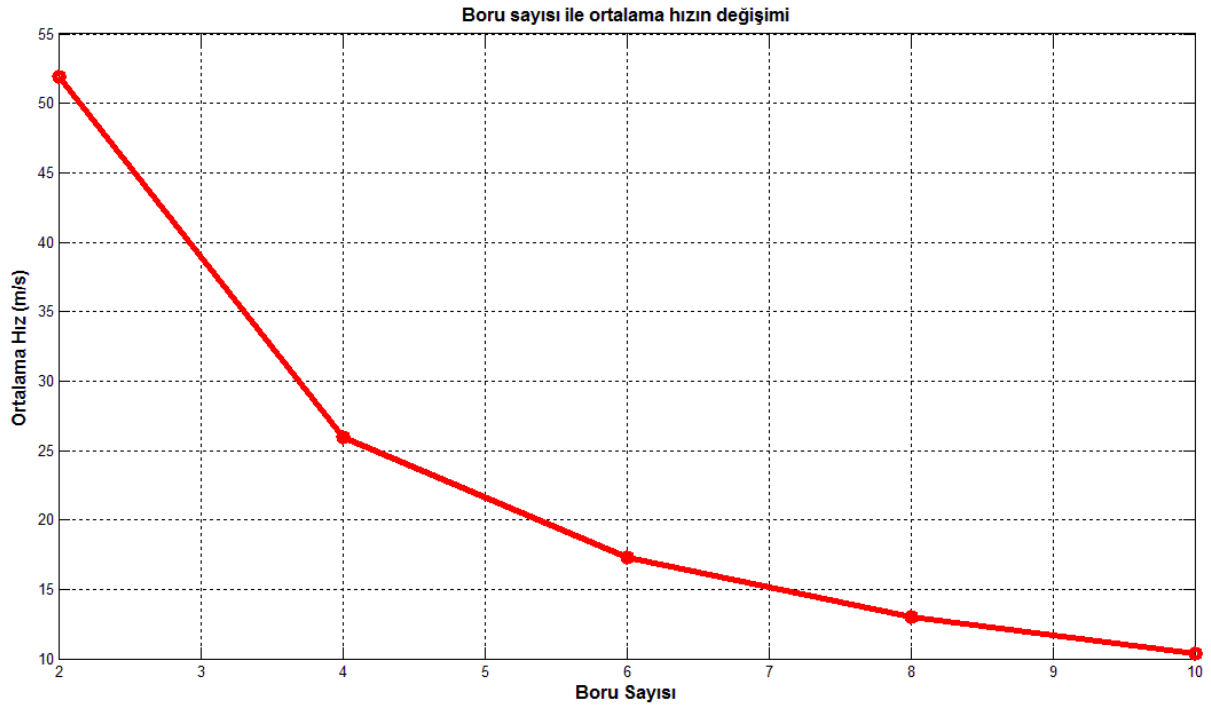
Isı borularında kullanılan akışkanların seçiminde ilk devreye girme kolaylığı da bir ölçüttür. Isı borulu sistemin, ilk çalıştırılmasında ısı borusunun devreye girmesinin hızlı olması istenir. Bu ölçüt, literatürde Priming faktör ( $P_f$ ) olarak adlandırılır ve yüzey gerilmesinin, sıvı yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır.

$$P_f = \frac{\sigma_{sıvı}}{\rho_{sıvı}} \quad (14)$$

#### 6.10.c. Ortalama Hız

$$\bar{V} = \frac{V_{max}}{2} = \frac{a^2}{8\mu} \frac{P_2 - P_1}{l} \quad (15)$$

$a$ : borunun yarıçapı ve  $l$ : ısı borusunun uzunluğu olarak verilmiştir.



Şekil 18: 2-10 arasında ikişerli artan boru sayısına göre ortalama hızın değişimi

#### 6.10.d. Reynolds Sayısı

Akışkanlar mekaniğinde Reynolds sayısı, bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin ( $v_s \rho$ ) nin viskozite kuvvetlerine ( $\mu/d$ ) olan oranıdır ve sonuç olarak bu değer bu iki tip kuvvetin belli bir akış şartı altında birbirine olan göreceli önemini verir. Bundan ötürü, Reynolds sayısı, düzgün akış ve türbülanslı akış gibi değişik akış rejimlerini nitelemek için kullanılır.

Akışkanlar mekaniğinde birlikte kullanıldığı diğer katsayıların en önemlilerinden biridir ve dinamik benzerliği tanımlamak için kullanılır. İki geometrik olarak benzer akış modeli, akış değerleri farklı olan iki farklı sıvı içinde olsalar bile, eğer aynı ilgili katsayıya sahip iseler, bunlara dinamik benzer denir. Örneğin bir sineğin kanadının nasıl çalıştığını anlayabilmek için sinek kanadının büyütülmüş modelleri su içerisinde çalıştırılıp daha yavaş bir hızda aynı olay gerçekleştirilip gözlenebilmektedir. Burada önemli olan suyun ve havanın çalışma koşullarında aynı Re sayısına sahip olmalarıdır. Ele alınan sistemde Re sayısı 2300 den küçük ise laminer akış, büyük ise türbülanslı akış olarak göze alınır. Isı transferinde de Re teoremi farklı oranlarla kullanılmaktadır.

$$Re_r = \frac{\rho_v r_v V}{\mu_v} \quad (16)$$

$$Re = \frac{4Re_r z}{r_v} \quad (17)$$

rv: buhar yüzeyinin yarıçapıdır. z: kondenser bölgesinin evaporatör bölgesine olan dik uzaklığı.

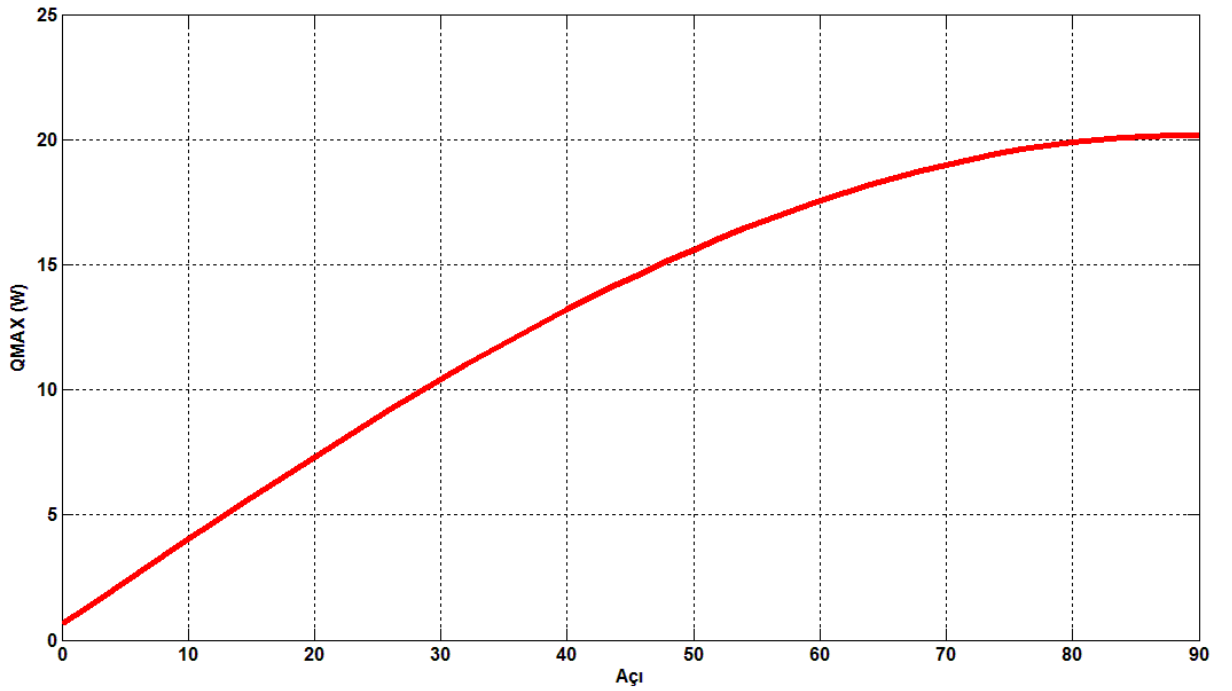
### 6.10.e. Kütlesel Debi ve Isı Yüğü

Maksimum kütlesel debi bulunurken aşağıdaki durumlar göz önüne alınmalıdır. Borudaki sıvının özellikleri boru boyunca değişebilir, boru boyunca fitil malzemesi düzgündür, buhar akısından dolayı damla akışı ihmal edilebilir. Maksimum kütlesel debi:

$$\dot{m}_{max} = \left( \frac{\rho_1 \sigma_1}{\mu_1} \right) \left( \frac{\kappa A}{l} \right) \left( \frac{2}{r_e} - \frac{\rho_1 g l}{\sigma_1} \sin \varphi \right) \quad (18)$$

Geçirgenlik  $\kappa = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  olarak alınmıştır.

$$Q_{max} = \dot{m}_{max} L_{eff} \quad (19)$$



Şekil 19: Açı değişimi ile QMax'ın değişimi

# 7. MATLAB PROGRAMI

---

## 7.1. Ana Program

```
clc
clear all

%% MERİT SAYISI %%
merit();

%% ORTALAMA HIZ %%
[ort_hiz,a1,et,l1,ev_sic,boru_say]=orthiz();

%% REYNOLDS R SAYISI %%
[reynoldsr,rν,ro,sig,nu]=reynoldsr(ort_hiz,a1,et,ev_sic);

%% REYNOLDS SAYISI %%
[reynolds,ld]=reynolds(reynoldsr,rν);

%% EFEKTİF UZUNLUK %%
[leff]=efektif_uzunluk(l1,ld);

%% KÜTLESEL DEBİ %%
[k_debi,aci]=kutlesel_debi(ro,sig,nu,rν,l1);

%% MAXİMUM ISI %%
[qmax]=qmax(k_debi,leff,aci);
```

## 7.2. Merit Sayısını Hesaplayan Alt Program

```
function merit()

clc
clear all

% MERİT SAYISI HESAPLAMA %

veri=[
%% Doymuş Soğutkan R134-a için Tablo değerleri
% Sic Yoğunl B.Ental D.Viskoz Yüzey Ger
0 1295 198.7 2.761*10^-4 0.01156
10 1261 190.8 2.430*10^-4 0.01014
20 1226 182.3 2.142*10^-4 0.00876
30 1188 173.1 1.888*10^-4 0.00742
40 1147 163.0 1.660*10^-4 0.00613
50 1102 151.8 1.453*10^-4 0.00489
60 1053 139.1 1.260*10^-4 0.00372
70 996.2 124.4 1.077*10^-4 0.00261
80 928.2 106.4 9.011*10^-5 0.00160
90 837.7 82.2 7.203*10^-5 0.00071
%% Doymuş Amonyak için Tablo değerleri
0 638.6 1262 1.896*10^-4 0.02676
10 646.6 1226 1.697*10^-4 0.02457
20 610.2 1186 1.519*10^-4 0.02240
30 595.2 1144 1.361*10^-4 0.02024
```

```

40  579.4    1099    1.219*10^-4  0.01810
50  562.9    1051    1.094*10^-4  0.01598
60  545.2    997.4    9.846*10^-5  0.01389
70  526.3    939.0    8.879*10^-5  0.01181
80  505.7    874.1    8.030*10^-5  0.00977
90  482.8    800.6    7.264*10^-5  0.00776
%% Doymuş Amonyak için Tablo değerleri
0   528.7    374.2    1.259*10^-4  0.00996
10  514.7    359.5    1.135*10^-4  0.00872
20  500.0    343.4    1.022*10^-4  0.00751
30  484.2    325.8    9.197*10^-5  0.00633
40  467.1    306.1    8.240*10^-5  0.00518
50  448.5    283.9    7.343*10^-5  0.00408
60  427.5    258.4    6.487*10^-5  0.00303
70  403.2    228.0    5.649*10^-5  0.00204
80  373.0    189.7    4.790*10^-5  0.00114
90  329.1    133.2    3.807*10^-5  0.00037];

%% Hesaplama
% merit sayısı = Yoğunluk x Yüzey Gerilimi x Buharlaştırma Entalpisi / Dinamik
Vizkozite
% merit sayısı = rol x sigl x hfg / nul

%% R134A Hesaplamaları
for j=1:10
MR(j)=veri(j,2)*veri(j,5)*veri(j,3)/veri(j,4);
SR(j)=veri(j,1);
end

fprintf('DOYMUŞ SOĞUTKAN R134-A İÇİN TABLO DEĞERLERİ VE HESAPLANAN MERİT
SAYISI \n')
fprintf('_____ \n')
fprintf(' Sıcaklık | Yoğunluk | B.Entalpisi | Dinamik Vizkozite | Yüzey
Gerilimi | Merit Sayısı\n')
fprintf('      (C) | (kg/m3) | (kJ/kg) | (kg/ms) |
(N/m) | (N/ms) \n')
fprintf('_____ \n')

for i=1:10
fprintf(' %4.2i | %7.2f | %6.2f | %4.8f | %4.5f |
%6.0f \n',veri(i,1),veri(i,2),veri(i,3),veri(i,4),veri(i,5),MR(i))
end

%% Amonyak Hesaplamaları
for t=11:20
MA(t)=veri(t,2)*veri(t,5)*veri(t,3)/veri(t,4);
SA(t)=veri(t,1);
end

fprintf('\n\nDOYMUŞ AMONYAK İÇİN TABLO DEĞERLERİ VE HESAPLANAN MERİT SAYISI
\n')
fprintf('_____ \n')
fprintf(' Sıcaklık | Yoğunluk | B.Entalpisi | Dinamik Vizkozite | Yüzey
Gerilimi | Merit Sayısı\n')
fprintf('      (C) | (kg/m3) | (kJ/kg) | (kg/ms) |
(N/m) | (N/ms) \n')

```

```

fprintf('_____
\n')

for y=11:20
fprintf(' %4.2i | %7.2f | %7.2f | %4.8f | %4.5f |
%6.0f \n',veri(y,1),veri(y,2),veri(y,3),veri(y,4),veri(y,5),MA(y))
end

%% Propan Hesaplamaları
for c=21:30
MP(c)=veri(c,2)*veri(c,5)*veri(c,3)/veri(c,4);
SP(c)=veri(c,1);
end

fprintf('\n\nDOYMUŞ PROPAN İÇİN TABLO DEĞERLERİ VE HESAPLANAN MERİT SAYISI
\n')
fprintf('_____
\n')
fprintf(' Sıcaklık | Yoğunluk | B.Entalpisi | Dinamik Viskozite | Yüzey
Gerilimi | Merit Sayısı\n')
fprintf(' (C) | (kg/m3) | (kJ/kg) | (kg/ms) |
(N/m) | (N/ms) \n')
fprintf('_____
\n')

for v=21:30
fprintf(' %4.2i | %7.2f | %7.2f | %4.8f | %4.5f |
%6.0f \n',veri(v,1),veri(v,2),veri(v,3),veri(v,4),veri(v,5),MP(v))
end

r=plot(SR,MR,'-.or',SA,MA,'-P',SP,MP,'-.');
title('Merit Sayısı ile Sıcaklığın Ddeğişimi Grafiği')
xlabel('Sıcaklık (C)')
ylabel('Merit Sayısı (N/ms)')
set(r,'Color','red','LineWidth',2)
colordef none

```

### 7.3. Ortalama Hızı Hesaplayan Alt Program

```

function [ort_hiz,a1,et,ll,ev_sic,boru_say]=orthiz()

% ORTALAMA HIZ HESAPLAMA %

veri=[
%% Doymuş Soğutkan R134-a için Tablo değerleri
%Sic Basınç D.Viskoz
0 293.0 2.761*10^-4
10 414.9 2.430*10^-4
20 572.1 2.142*10^-4
30 770.6 1.888*10^-4
40 1017.1 1.660*10^-4
50 1318.6 1.453*10^-4
60 1682.8 1.260*10^-4
70 2118.6 1.077*10^-4
80 2635.2 9.011*10^-5
90 3246.9 7.203*10^-5];

%% Tablo Değerlerini yazdırma

```

```

fprintf('\n\nDOYMUŞ SOĞUTKAN R134-A İÇİN TABLO DEĞERLERİ\n')
fprintf(' \n')
fprintf(' Sıcaklık | Doyma Basıncı | Dinamik Vizkozite \n')
fprintf(' (C) | (kPa) | (kg/ms) \n')
fprintf(' \n')

for i=1:10
fprintf(' %4.2i | %6.1f | %4.8f \n', veri(i,1), veri(i,2), veri(i,3))
end

%% Bilgi Girişi
fprintf('\n\n')
al=input('# Boru çapını giriniz [mm] =');
et=input('# Boru et kalınlığını giriniz [mm] =');
l1=input('# Isı borusu uzunluğunu giriniz [mm] =');
ko_sic=input('# Kondenser sıcaklığını giriniz (Yalnızca tablodaki değerlerden)=');
ev_sic=input('# Evaporatör sıcaklığını giriniz (Yalnızca tablodaki değerlerden)=');

if ko_sic==0
p1=veri(1,2);
elseif ko_sic==10
p1=veri(2,2);
elseif ko_sic==20
p1=veri(3,2);
elseif ko_sic==30
p1=veri(4,2);
elseif ko_sic==40
p1=veri(5,2);
elseif ko_sic==50
p1=veri(6,2);
elseif ko_sic==60
p1=veri(7,2);
elseif ko_sic==70
p1=veri(8,2);
elseif ko_sic==80
p1=veri(9,2);
elseif ko_sic==90
p1=veri(10,2);
else
disp('Hatalı kondenser sıcaklık değeri seçtiniz!!')
end
if ev_sic==0
p2=veri(1,2); nu=veri(1,3);
elseif ev_sic==10
p2=veri(2,2); nu=veri(2,3);
elseif ev_sic==20
p2=veri(3,2); nu=veri(3,3);
elseif ev_sic==30
p2=veri(4,2); nu=veri(4,3);
elseif ev_sic==40
p2=veri(5,2); nu=veri(5,3);
elseif ev_sic==50
p2=veri(6,2); nu=veri(6,3);
elseif ev_sic==60
p2=veri(7,2); nu=veri(7,3);
elseif ev_sic==70
p2=veri(8,2); nu=veri(8,3);
elseif ev_sic==80

```

```

    p2=veri(9,2); nu=veri(9,3);
    elseif ev_sic==90
    p2=veri(10,2); nu=veri(10,3);
else
    disp('Hatalı evaporatör sıcaklık değeri seçtiniz!!')
end

%% Hesaplama
% Ortalama Hız = (Boru yarıçapı / 8xDinamik Viskozite) x (Evaporatör
Basıncı - Kondenser Basıncı) / Boru Uzunluğu
% Ortalama Hız = (a / 8 x nu) x (P2 - P1) / l
a=((a1-et)/(2*1000)); %m cinsinden bulundu.

for boru=1:5
    l=l1*boru*2/1000; %m cinsinden bulundu.
    ort_hiz(boru)=(a^2)*(p2-p1)/(8*nu*l); %m/s
    boru_say(boru)=2*boru;
end

t=plot(boru_say,ort_hiz,'-.or');
title('Boru sayısı ile ortalama hızın değişimi')
xlabel('Boru Sayısı')
ylabel('Ortalama Hız (m/s)')
set(t,'Color','red','LineWidth',2)
colordef none

```

## 7.4. Reynolds R Sayısını Hesaplayan Alt Program

```

function [reynoldsr,rv,ro,sig,nu]=reynoldsr(ort_hiz,a1,et,ev_sic)

% REYNOLDS R DEĞERİNİ HESAPLAMA %

veri=[
    %% Doymuş Soğutkan R134-a için Tablo değerleri
    %Sic Yoğunl D.Viskoz(bhr) Y.Geril
    0 1295 7.571*10^-6 0.01156
    10 1261 9.081*10^-6 0.01046
    20 1226 1.075*10^-5 0.00876
    30 1188 1.244*10^-5 0.00742
    40 1147 1.408*10^-5 0.00613
    50 1102 1.634*10^-5 0.00489
    60 1053 1.704*10^-5 0.00372
    70 996.2 1.839*10^-5 0.00261
    80 928.2 1.982*10^-5 0.00160
    90 837.7 2.187*10^-5 0.00071];

%% Tablo Değerlerini yazdırma
fprintf('\n\nDOYMUŞ SOĞUTKAN R134-A İÇİN TABLO DEĞERLERİ\n')
fprintf('_____ \n')
fprintf(' Sıcaklık | Yoğunluk | Dinamik Viskozite \n')
fprintf(' (C) | (kg/m3) | (kg/ms) \n')
fprintf('_____ \n')

for i=1:10

```

```

fprintf(' %4.2i | %6.1f | %4.8f\n', veri(i,1), veri(i,2), veri(i,3))
end

%% Bilgi Girişi
fprintf('\n\n')
fital=input('# Fital kalınlığını giriniz [mm] =');

if ev_sic==0
    ro=veri(1,2); nu=veri(1,3); sig=veri(1,4);
elseif ev_sic==10
    ro=veri(2,2); nu=veri(2,3); sig=veri(2,4);
elseif ev_sic==20
    ro=veri(3,2); nu=veri(3,3); sig=veri(3,4);
elseif ev_sic==30
    ro=veri(4,2); nu=veri(4,3); sig=veri(4,4);
elseif ev_sic==40
    ro=veri(5,2); nu=veri(5,3); sig=veri(5,4);
elseif ev_sic==50
    ro=veri(6,2); nu=veri(6,3); sig=veri(6,4);
elseif ev_sic==60
    ro=veri(7,2); nu=veri(7,3); sig=veri(7,4);
elseif ev_sic==70
    ro=veri(8,2); nu=veri(8,3); sig=veri(8,4);
elseif ev_sic==80
    ro=veri(9,2); nu=veri(9,3); sig=veri(9,4);
elseif ev_sic==90
    ro=veri(10,2); nu=veri(10,3); sig=veri(10,4);
else
    disp('Hatalı evaparatör sıcaklık değeri seçtiniz!!')
end

rv=(a1-et-fital)/(2*1000);
reynoldsr=(ro*rv*ort_hiz/nu);

```

## 7.5. Reynolds Sayısını Hesaplayan Alt Program

```

function [reynolds, ld]=reynolds(reynoldsr, rv)

% REYNOLDS DEĞERİNİ HESAPLAMA %
aci=input('# Isı borusu yerleşim açısını giriniz (Hesaplanan qmax değerine etki etmeyecek, sadece Reynolds sayısı hesabı için)=');
ld=input('# Borunun dışta kalan uzunluğu [mm] ='); % Adyabatik + Kondenser
reynolds=(4*reynoldsr*ld*cosd(aci))/(rv*1000);

```

## 7.6. Efektif Uzunluğu Hesaplayan Alt Program

```

function [leff]=efektif_uzunluk(l1, ld)

% EFEKTİF BÖLGE UZUNLUĞUNU HESAPLAMA %

lc=input('# Kondenser bölge uzunluğu giriniz [mm] =');
le=l1-ld;
la=l1-le-lc;

leff=la+(le+lc)/2;

```

## 7.7. Kütleli Debiyi Hesaplayan Alt Program

```
function [k_debi,aci]=kutlesel_debi(ro,sig,nu,rv,l1)

% KÜTLESEL DEBİ HESAPLAMA %

aci=0:2:90;
k_debi=(ro*sig/nu)*((1.8*10^-8)*(pi*rv^2)*1000/l1)*(2*1000/0.12-
ro*9.81*l1*sind(360-aci)/(1000*sig));
```

## 7.8. Çekilen Maksimum Isıyı Hesaplayan Alt Program

```
function [qmax]=qmax(k_debi,leff,aci)

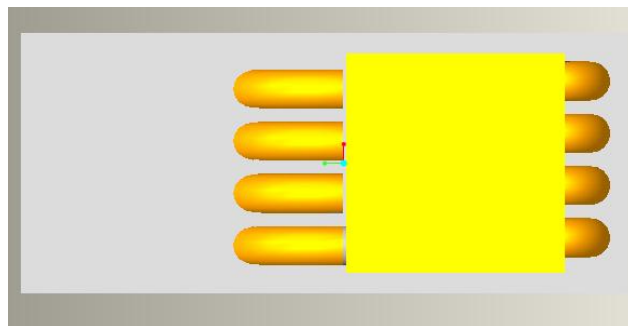
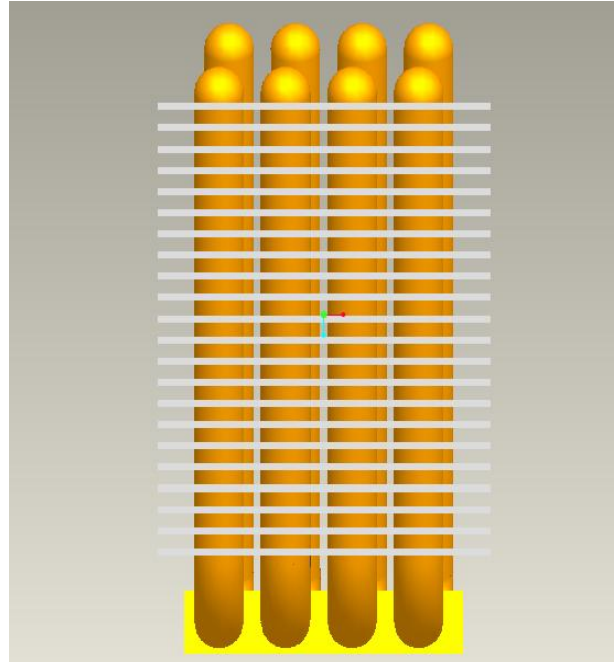
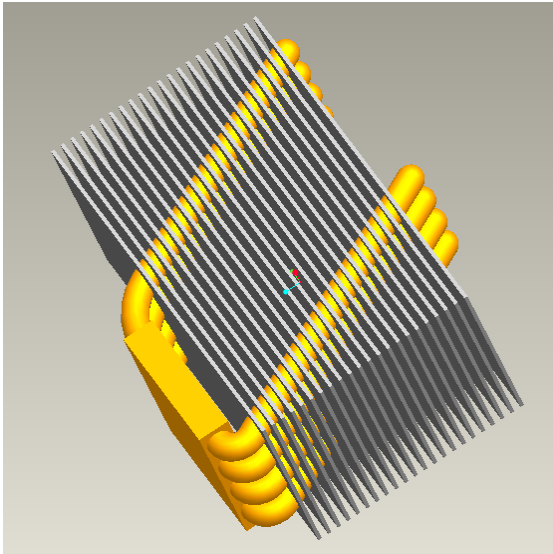
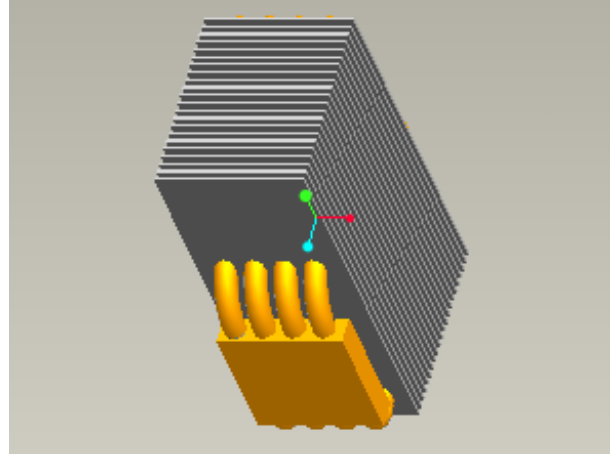
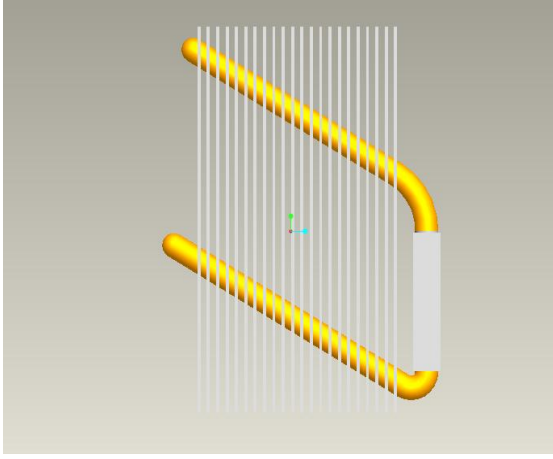
% MAKSİMUM ÇEKİLEN ISI MİKTARI HESAPLAMA %

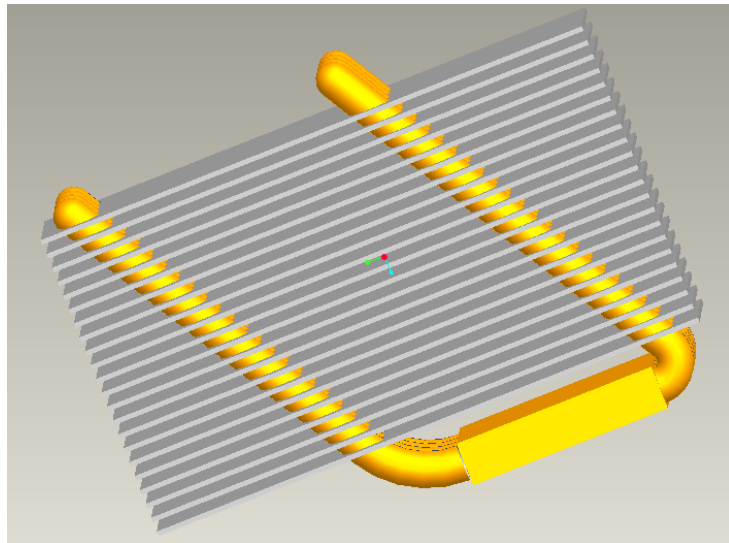
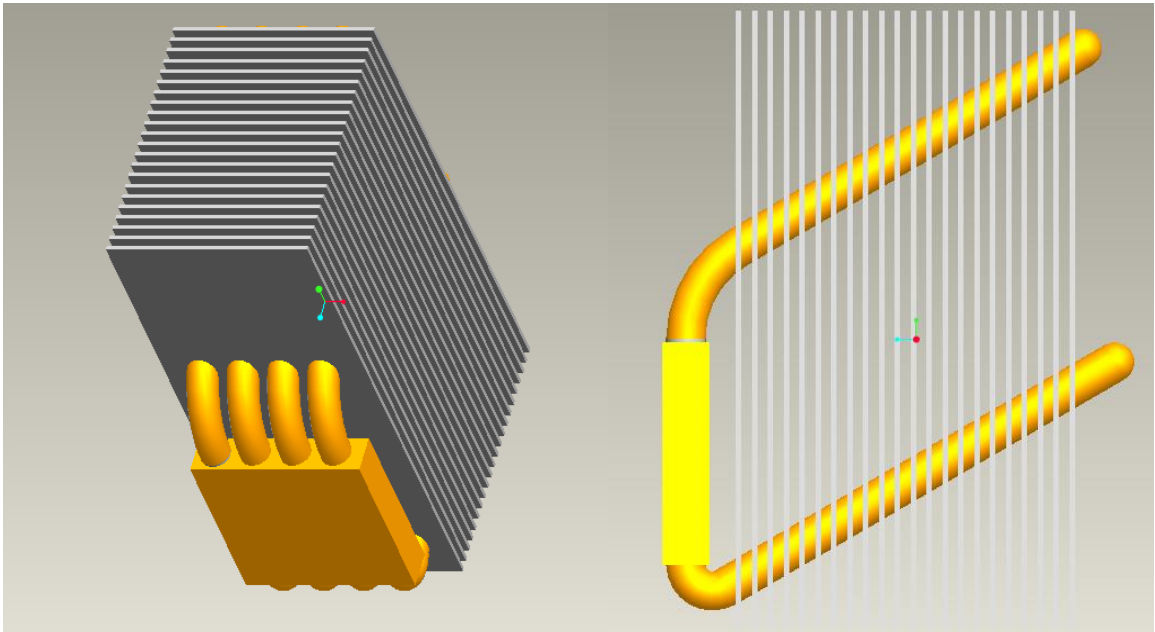
qmax=k_debi*leff;

c=plot(aci,qmax);
title('Açı ile QMaxın Değişimi Grafiği')
xlabel('Açı')
ylabel('QMAX (W)')
set(c,'Color','red','LineWidth',2)
colordef none
```

## 8. TEKNİK ÇİZİMLER

---





# KAYNAKLAR

---

- Termodinamik, Y. Çengel, M. Boles, 2009.
- Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, F. P. Incropera, D.P. DeWitt, 2007.
- Temel Isı Transferi, H. Yüncü, S. Kakaç, Bilim Yayıncılık, 1999.
- Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Y.A. Çengel, J.M. Cimbala, 2008.
- The CRC Handbook of Thermal Engineering, Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.
- Isıtma Sistemlerinden Isı Geri Kazanımında Isı Borularının Uygulanabilirliği, Ekserji ve Ekonomik Analizi, A. ÖZSOY, Doktora Tezi, Isparta, 2005.
- Megep Yayınları, Bilgisayar Bilişim Sistemleri, Ankara, 2007.
- <http://www.pclabs.com.tr/2008/01/02/su-sogutma-hakkinda-genel-bilgiler>
- <http://www.kimmuh.com/wp-content/uploads/2008/04/isi-borusu.ppt>
- <http://www.fizikogretmeni.com/kilcallik-etkisi-kapilarite>
- <http://www.frostytech.com/articleview.cfm?articleID=2466>