

4. AKIŞKANLARDA FAZ DEĞİŞİKLİĞİYLE ISI TRANSFERİ

[\(Ref. e makaleleri\)](#)

Faz değışikliği yoluyla ısı transferi, akışkanlar arasındaki basit ısı değıştirilmesi işleminden daha karmaşıktır. Bir faz değışikliği, sabit (veya sabite yakın) sıcaklıkta bir miktar ısı enerji verilmesi veya alınmasıyla ilgilidir. Faz değışme hızı, ısı transfer hızı ile kontrol edilebilirse de daha çok kabarcıklar, damlalar ve kristallerin oluşum hızları ve oluşan yeni fazın davranışlarıyla yönlendirilir.

a. Yoğunlaşan Buhardan Isı Transferi

Su, hidrokarbon gibi uçucu bileşiklerle çalışıldığında buhar, tüplerin soğutucu yüzeylerinde yoğunlaşır; buharlaşma, distilasyon, kurutma işlemleri gibi.

Yoğunlaşan buhar tek bir madde, yoğunlaşabilen ve yoğunlaşamayan maddeler karışımı, iki veya daha fazla yoğunlaşabilen madde karışımı olabilir. Bir kondenserdeki sürtünme kayıpları küçüktür ve yoğunlaşma sabit basınçta olur. Saf bir (tek) maddenin yoğunlaşma sıcaklığı sadece basınca bağlı olduğundan, işlem izotermaldir; elde edilen kondensat saf bir sıvıdır. Sabit basınçta yoğunlaştırılan karışık buharlar, bir sıcaklık aralığında yoğunlaşır ve tüm buhar akımı yoğunlaşmaya kadar değışken bileşimde bir kondensat akımı toplanır. Yoğunlaşamayan bir maddeyle birarada bulunan bir bileşiğin kondensasyonuna örnek, buhar ve hava karışımından suyun yoğunlaştırılmasıdır.

Damla ve Film Tip Yoğunlaşma

Buhar, soğuk bir yüzeyde damla veya film tip denilen iki yoldan birine göre yoğunlaşır. Film yoğunlaşmada kondensat, tüp yüzeyinden kendi ağırlığı ile akan bir film veya sürekli bir sıvı tabakası oluşturur. Bu film (veya tabaka), buhar ve tüp duvarı arasına girer ve ısı akışına direnç göstererek ısı transfer katsayısını sabit tutar. Film tipi yoğunlaşma uygulaması daha yaygındır.

Damla yoğunlaşmada kondensat mikroskobik nüvelerde başlar. Tipik nüveler ince çukurluklar, çizikler, toz benekleri olabilir. Damlacıklar büyür ve yakınındakilerle birleşerek önce görülebilir ince damlalar şekline, sonra sıvı akımına dönüşür ; kendi ağırlığı ile tüpten aşağı akarken kondensatı süpürür ve yüzeyi temizler. Damla yoğunlaşma sırasında soğuk tüpün büyük bir alanı çıplaktır ve buharla doğrudan te-

mastadır. İnce bir sıvı filmi bulunmadığından, bu çıplak alanda ısı akışına karşı direnç çok düşük ve dolayısıyla ısı transfer katsayısı yüksektir. Damla yoğunlaşmada ortalama katsayı, film tiptekinin 5-8 katı dolayındadır. Uzun tüplerde yüzeyin bir kısmında film yoğunlaşması, kalan kısımda damla yoğunlaşması olabilir.

Damla kondensasyon yöntemi, en fazla buhar ve sıvı metallere uygulanır; etilen glikol, gliserin, nitrobenzen, izoheptan gibi organik buharlarda da kullanılır.

Film Tip Yoğunlaşmada Isı Transfer Katsayıları

Film tip yoğunlaşma ile ilgili ısı transfer hızı eşitlikleri, ilk defa Nusselt tarafından çıkarılmıştır. Bu denklemlerde buhar ve sıvının dengede olduğu ve ısı akışına karşı sadece kondensat direncinin bulunduğu kabul edilmiştir. Teoriye göre, duvardaki sıvı akış hızı sıfırdır; film dışındaki sıvı hızı, buharın hızından etkilenmez ve duvar-buhar sıcaklıkları sabittir. Ayrıca, buharın aşırı ısınma olmadığı ve kondensatın, tüpü yoğunlaşma sıcaklığında terk ettiği kabul edilerek sıvının ortalama film sıcaklığındaki fiziksel özellikleri dikkate alınır.

Nusselt teorisi, yoğunlaşan filmin tüpün üst kısmından başladığını ve ilk birkaç inçlik mesafede hızla kalınlaştığını gösterir; tüpün kalan kısmındaki kalınlaşma oldukça yavaştır. Yoğunlaşan film boyunca ısı, kondüksiyonla akar ve yerel ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklemlerle verilir; δ = yerel film kalınlığıdır. Şekil-16'da h_x ve δ nın tüp tepesinden itibaren değişimi görülmektedir.

$$h_x = \frac{k_f}{\delta} \quad (1)$$

Ortalama ısı transfer katsayısı h ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sa} \cdot ^\circ\text{C}$), dikey tüpler için,

$$h = 0.943 \left(\frac{k_f^3 \rho_f^3 g \lambda}{\Delta T_0 L \mu_f} \right)^{1/2} \quad (2)$$

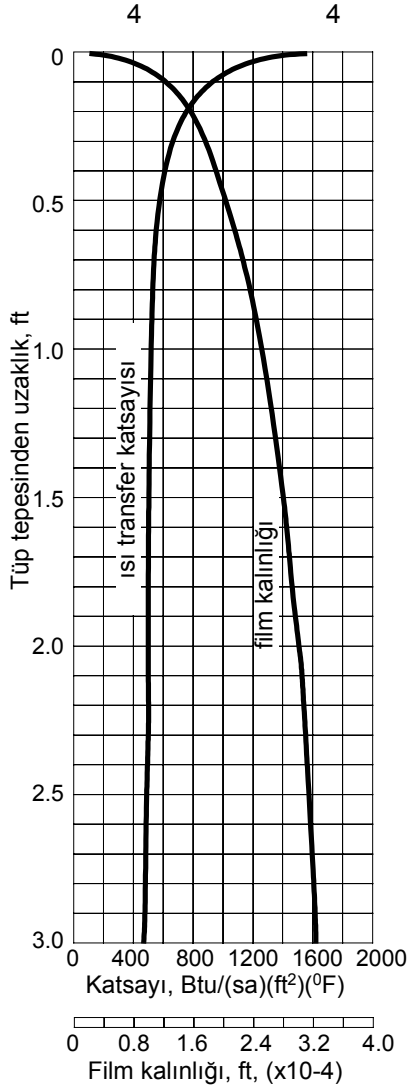
Yatay tüpler için,

$$h = 0.725 \left(\frac{k_f^3 \rho_f^3 g \lambda}{\Delta T_0 D_0 \mu_f} \right)^{1/2} \quad (3)$$

k_f = kondensatın ısı iletkenliği, referans sıcaklıkta ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sa} \cdot ^\circ\text{C}$); μ_f = kondensatın viskozitesi, referans sıcaklıkta ($\text{g/cm} \cdot \text{sa}$); ρ_f = kondensatın yoğunluğu, referans sıcaklıkta (g/cm^3); g = yerçekimi ivmesi ($1.27 \times 10^8 \text{m/sa}^2$); λ = buharlaşma ısısı (cal/g); L = toplam tüp uzunluğu (m); D_0 = tüpün dış çapı (cm); $\Delta T_0 = T_h - T_w$ = yoğunlaşan

buharın sıcaklığı ile tüp duvarının dış yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$) dir. Referans sıcaklığı T_f ,

$$T_f = T_h - \frac{3(T_h - T_w)}{4} = T_h - \frac{3\Delta T_0}{4} \quad (4)$$



Şekil-16: Film kalınlığı ve yerel katsayıların değişimi

Aşırı Isınmış Buharın Yoğunlaştırılması

Bir kondensere giren buhar aşırı ısınmış ise, soğutma yüzeyine hem aşırı ısının ısı, hem de yoğunlaşma gizli (iç) ısısının transfer edilmesi gerekir. Su buharı için, aşırı ısınmış buharın öz ısı düşük ve yoğunlaşma gizli ısı büyük olduğundan, aşırı ısınma ısı, gizli ısıya göre oldukça düşüktür. Örneğin, 100°C lik aşırı ısınma ısı sadece 27.8 cal/g iken, gizli ısı 555.5 cal/g dir. Petrol ürünleri gibi organik buharların yoğunlaştırılmasında aşırı ısınma, gizli ısı yanında önemli olabilir. Bu durumda aşırı ısınma ısı,

(a) aşırı ısınma derecesi, buharın öz ısı ve gizli ısıya ilave edilen ısıdan,

(b) ısı özellikleri veren tablolar kullanılarak, aşırı ısınmış buhardan kondensatın entalpisi çıkarılarak her gram (veya kg) buhar için transfer edilen toplam ısıdan, hesaplanır.

Aşırı ısınmanın ısı transfer hızına etkisi, tüp yüzeyi sıcaklığının, buharın yoğunlaşma sıcaklığından yüksek veya düşük olmasına bağlıdır. Tüp sıcaklığı yoğunlaşma sıcaklığından düşükse, tüp kondensat ile ıslanmıştır (aynı doymun

buharın yoğunlaşmasında olduğu gibi) ve kondensat tabakasının dış sıcaklığı buharın doymunluk sıcaklığına eşittir.

Gizli ısı ve aşırı ısınma ısılarının bulunduğu transfer edilen toplam ısı q (cal/sa), buharla temasta olan ısı transfer yüzeyinin alanı A (cm²), ısı transfer katsayısı h (cal/cm²sa °C), buharın doymunluk sıcaklığı T_h (°C), tüp duvarının sıcaklığı T_w (°C) olduğuna göre,

$$q = h A (T_h - T_w) \quad (5)$$

Buhar çok fazla aşırı ısınmış ve soğutucu akışkanın çıkış sıcaklığı kondensasyon sıcaklığına yakınsa, tüp duvarı buharın doymunluk sıcaklığından daha sıcaktır; bu durumda yoğunlaşma olmaz ve tüp duvarı kurudur. Bu kuruluk tüp duvarı sıcaklığının, buharın yoğunlaşma sıcaklığının altına düşmesini sağlayacak bir aşırı ısınma noktasına inilinceye kadar sürer; bu noktada yoğunlaşma başlar. Bu tip yoğunlaşmalarda kullanılan cihazlar iki bölümden oluşur. Birinci kısım aşırı ısınmayı giderici (de-superheater), ikincisi yoğunlaştırıcıdır. Hesaplamalarda iki bölüm ayrı ayrı yorumlanır. De-süperheater bir gaz soğutucudur. Gaz soğutucudaki bireysel katsayılar düşük olduğundan toplam katsayı da düşük ve ısıtma alanı, uzaklaşan ısı miktarına göre oldukça büyüktür. Böyle bir sistem uygulamada istenmez ve aşırı ısının daha ekonomik yöntemlerle giderilmesine çalışılır: aşırı sınımış buhara doğrudan sıvı injekte edilerek aşırı ısı kaldırılır.

b. Kaynayan Sıvılara Isı Transferi

Kaynayan sıvıya ısı transferi buharlaşma, distilasyon gibi temel operasyonlardan, buhar üretimi, petrol işlenmesi ve kimyasal reaksiyonların sıcaklıklarının kontrol edilmesine kadar pek çok uygulamada kullanılır. Kaynayan sıvıya ısı transferi iki şekilde yapılabilir.

(1) Doymun sıvının kaynaması: Sıvı bir kap içine konulur; kaptaki bulunan yatay ve dikey levhalar veya tüplerden oluşan ısıtma yüzeyi sıvıyı kaynatacak ısıyı sağlar.

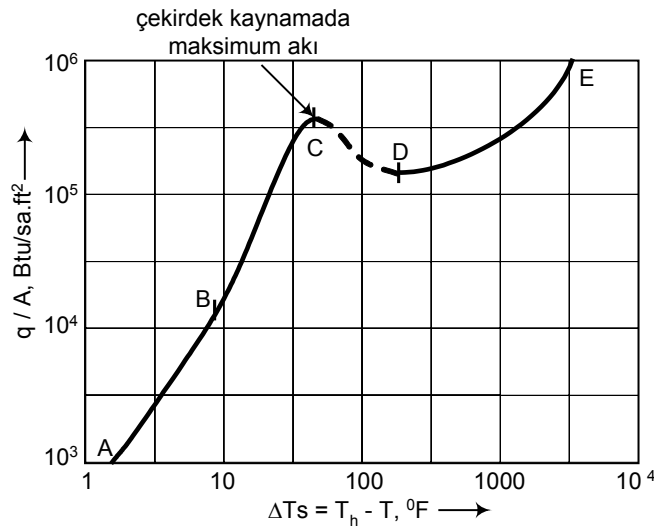
(2) Soğuk sıvının kaynaması: Sıvı ısıtılan tüplerin etrafından, doğal veya zorlamalı konveksiyonla akıtılır; tüp duvarlarından akışkana ısı transfer edilir.

Doymun Sıvının Kaynaması

Sıcak bir yüzey daldırılarak sıvı kaynatıldığında sıvı kütesinin sıcaklığı, bulunduğu basınç altındaki kaynama noktasına eşittir. Buhar kabarcıkları önce ısıtma yüzeyi üzerinde oluşur, sıvı kütlesi içinde yükselir ve sıvı yüzeyinden ayrılır. Buhar

sıvı tabakası üzerindeki boşlukta toplanır ve burada bulunan bir buhar çıkışı yoluyla hemen uzaklaşır. Oluşan buhar, ortamı, sıvı ile dengede olduğu kaynama noktasında terk ettiğinden buna "doğru sıvının kaynaması" denir.

Kaynayan bir sıvının bulunduğu bir kap içine bir tüp daldırılır ve ısı akısı q/A ile, tüp duvarı ve kaynayan sıvının sıcaklıkları arasındaki ΔT farkını izleyelim. Sıcaklık farkı ΔT kademe kademe yükselir ve çok yüksek ΔT değerlerine ulaşıncaya kadar her kademe q/A ve ΔT ölçülür. Elde edilen q/A değerleri ΔT değerlerine karşı logaritmik koordinatlara geçirildiğinde Şekil-17'deki eğri elde edilir.



Şekil-17: 100 °C de kaynayan suyun (1 atm) ısı akısı – sıcaklık düşmesi eğrisi;
AB: doğal konveksiyon, BC: çekirdek kaynaması, CD: ara (geçiş) kaynama, DE:
film kaynaması

Eğri dört parçada yorumlanır.

(1) AB doğrusu; sıcaklık farkının düşük olduğu bölgedir ve eğimi 1.25 olan düz bir doğrudur. Bu doğrunun denklemi (a = sabit)

$$\frac{q}{A} = a \Delta T^{1.25} \quad (6)$$

(2) BC hattı; düz bir doğruya yakındır, fakat eğimi AB den daha büyüktür (3-4 arası). BC parçası, C ile gösterilen maksimum akıda sonlanır. C noktasındaki sıcaklık farkına "kritik sıcaklık düşmesi" denir; bu noktada "tepe (pik) noktası"na ulaşılır.

(3) CD hattı; sıcaklık farkının artmasına karşın akı düşer ve D noktasında minimum olur.

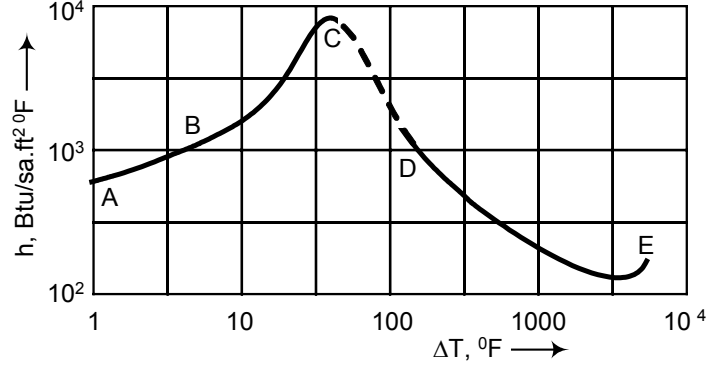
(4) DE hattı; ΔT yükselirken akı da yükselir ve büyük sıcaklık düşmelerinde, C noktasında ulaşılan maksimum değeri aşar.

$h = (q/A)\Delta T$ olduğundan, Şeki-17'deki eğri, h ve ΔT ye göre değiştirilerek Şekil-18'deki eğri elde edilir. Şekil-18'de bir maksimum ve bir minimum katsayı değeri (h) görülmektedir. Bu değerler, Şekil-17'deki maksimum ve minimum akıların olduğu aynı sıcaklık farkında değildir, h Katsayısının maksimum olduğu ΔT değeri, tepe akısından çok az daha yüksek, fakat minimum olduğu ΔT değeri, D akısından oldukça yüksektir. Katsayı, Şekil-18'deki birinci parçada $\Delta T^{0.25}$ ile orantılı, ikinci parçada ise ΔT^2 ve ΔT^3 arasında bulunur.

Şekil-18'deki eğrinin dört parçası da belirli bir kaynama mekanizmasına uyar. Sıcaklık farkının düşük olduğu birinci kısımda (AB), bir sıvıya doğal konveksiyonla ısı transferi mekanizması vardır; kabarcıklar ısıtıcı yüzeyinde oluşur, oradan sıvı yüzeyine yükselir ve sonra buhar bölgesine ayrılır.

Daha büyük sıcaklık farklarında (BC) (Şekil-18'deki 9-45°F arası) kabarcıkların oluşum hızı oldukça yüksektir ve sıvı boyunca yükselen kabarcık akımı, sıvı kütlelerinde sirkülasyon akımını artırır; bu durumda ısı transfer katsayısı bozulmamış doğal konveksiyondakinden daha yüksek olur. ΔT arttıkça kabarcık oluşumu da artar ve katsayı hızla yükselir. Kritik sıcaklık farkının altındaki sıcaklık farklarındaki bu olaya "çekirdek (kabarcık) kaynaması" denir. Çekirdek kaynaması sırasında kabarcıklar tüp yüzeyinin küçük bir kısmını sadece bir an işgal ederler. Yüzeyin büyük kısmı sıvıyla doğrudan temas halindedir. Kabarcıklar, ısıtma yüzeyi üzerindeki küçük çıkıntılar veya girintiler gibi lokalize aktif uçlarda oluşur. Sıcaklık farkı arttığında aktif uçlar çoğalır, sıvının çalkalanması fazlalaşır, ısı akısı ve ısı transfer katsayısı yükselir.

Sıcaklık farkının artmasıyla (CD) kabarcıkların sayısı çok fazlalaşır ve birleşerek ısıtma yüzeyi üzerinde bir izolasyon buhar tabakası oluştururlar. Bu tabaka oldukça kararsız bir yüzeydir, minyatür "patlamalar"la ısıtıcıdan sıvıya buhar parçacıkları gönderilir. Bu harekete "ara (geçiş) kaynama" denir. Bu bölgede sıcaklık farkının artmasıyla buhar filminin kalınlığı artar, belirli bir zaman içindeki patlama sayısı azalır; ısı akısı ve ısı transfer katsayısı ise düşer.



Şekil-18: 100 °C de kaynayan suyun (1 atm)
ısı transfer katsayısı – ΔT ilişkisi

D noktası yakınında mekanizmada başka bir değişiklik daha olur. Sıcak yüzey hareket-siz bir buhar filmiyle kaplanmış, buradan ısı transferi kondüksiyonla ve çok yüksek sıcaklık farklarında radyasyonla olur. Ara kaynamadaki karakteristik rastgele patlamalar yok olur ve yerini sıcak buhar ve sıvı arasındaki yüzeyde oluşan düzgün kabarcıklara bırakır. Sıcaklık farkının artması, ısı akısının önce yavaş ve sonra hızla (radyasyonla ısı transferi önemli olur) yükselmesine neden olur. Bu bölgedeki kaynama hereketine "film kaynaması" denir.

Film kaynama sanayide fazla uygulanmaz, çünkü büyük sıcaklık farklılıklarına karşın elde edilen ısı transfer hızı düşüktür. Isı transfer cihazlarının dizaynında, kaynayan sıvı filmindeki sıcaklık düşmesinin, kritik sıcaklık farkından küçük olmasına dikkat edilir.

Kaynayan bir sıvının sıcaklığı, basıncın değişmesiyle değişir; sıcaklığın değişmesi ise transfer katsayısını, aşağıdaki eşitliğe göre değiştirir.

$$\log \frac{h_a}{h} = b (T_a - T) \quad (7)$$

T_a = sıvının 1atm basınçtaki kaynama sıcaklığı, h_a = T_a sıcaklığındaki katsayı, h = T sıcaklığındaki katsayı, b = sıvıya ve ısıtma yüzeyi koşullarına bağlı bir sabittir.

Maksimum ısı akısı, $(q/A)_{\text{maks}}$, ve kritik sıcaklık düşmesi

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{\text{maks}} = \frac{\pi \lambda}{24} [\sigma g_c g (\rho_L - \rho_V)]^{1/2} \rho_V^{1/2} \left(1 + \frac{\rho_V}{\rho_L}\right)^{1/2}$$

σ : sıvı ve buhar (vapor) arasındaki yüzey gerilim

ρ_V ve ρ_L : buhar ve sıvının yoğunlukları

Minimum ısı akısı, $(q/A)_{\min}$ ve film kaynama

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{\min} = \frac{\pi^2 \lambda \rho_V}{60} \left[\frac{4 \sigma g_c g (\rho_L - \rho_V)}{(\rho_L + \rho_V)^2} \right]^{1/2}$$

Daldırılmalı yatay bir tüp üzerindeki film kaynamada, aşağıdaki eşitlik, farklı koşullarda oldukça doğru sonuç verir. (Bu eşitlik radyasyonla ısı transferini içermez.)

$$h_0 \left[\frac{\lambda_c \mu_V \Delta T}{k_V^3 \rho_V (\rho_L - \rho_V) \lambda' g} \right]^{1/2} = 0.59 + 0.069 \frac{\lambda_c}{D_0}$$

h_0 = ısı transfer katsayısı, Btu/ft².sa.⁰F

μ_V = buharın viskozitesi, lb/ft-sa

ΔT = buhar filmi boyunca sıcaklık düşmesi, ⁰F

k_V = buharın termal iletkenliği, Btu/ft.sa.⁰F

ρ_V ve ρ_L = buhar ve sıvının yoğunlukları, lb/ft³

D_0 = ısıtıcı tüpün dış çapı, ft

λ' = sıvı ve aşırı ısınmış buhar arasındaki entalpi değişikliği,

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{0.34 c_p \Delta T}{\lambda} \right)^2$$

λ = buharlaşma ısısı, Btu/lb

c_p = sabit basınçta buharın spesifik ısısı, Btu/lb.⁰F

λ_c = dalga boyu, ft (düz yatay yüzey arasındaki en küçük dalganın),

$$\lambda_c = 2 \pi \left[\frac{\sigma g_c}{g (\rho_L - \rho_V)} \right]^{1/2}$$

σ : sıvı ve buhar arasındaki yüzey gerilim, lb_f ft

ÖRNEK

Freon 11 (C Cl₂ F) atmosferik basınçta, dış çapı 1.25 inç olan daldırmalı bir ısıtıcı ile kaynatılmaktadır. Freon 11 in normal kaynama noktası 74.8 °F, tüp duvarı 300 °F dir. Freon 11 in özellikler:

$$\rho_L = 91.3 \text{ lb/ft}^3 \quad \lambda = 78.3 \text{ Btu/lb} \quad \mu_V = 0.013 \text{ cP}$$

$$\sigma = 19 \text{ din/cm} \quad c_p = 0.145 \text{ Btu/lb.}^\circ\text{F}$$

$$k_V = 0.00413 + 1.14 \times 10^{-5} T \text{ Btu/ft.sa.}^\circ\text{F} \quad (T, ^\circ\text{F dir})$$

Isı transfer katsayısı h_0 ve ısı akısı q/A değerlerini hesaplayınız.

Çözüm:

Duvar ve sıvı arasındaki sıcaklık farkı çok büyük olduğundan film kaynama eşitliği uygulanır.

$$\mu_V = 0.013 \times 2.42 = 0.0314 \text{ lb/ft-sa} \quad \Delta T = 300 - 74.8 = 225.2 ^\circ\text{F}$$

$$\text{ortalama buhar-film sıcaklığı: } (300 + 74.8) / 2 = 187.4 ^\circ\text{F}$$

$$k_V = 0.00413 + (1.14 \times 10^{-5} \times 187.4) = 0.0627 \text{ Btu/ft.sa.}^\circ\text{F}$$

$$\rho_L = 91.3 \text{ lb/ft}^3 \quad \text{mol ağı.} = 137.5 \quad D_0 = 1.25 / 12 = 0.104 \text{ ft}$$

Ortalama film sıcaklığında,

$$\rho_L = \frac{137.5 \times 492}{359 (187.4 + 460)} = 0.291 \text{ lb/ft}^3$$

Kaynama noktasında,

$$\sigma = 19 \frac{2.248 \times 10^{-5}}{0.0328} = 0.0013 \text{ lb/ft}$$

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{0.34 c_p \Delta T}{\lambda} \right)^2 \quad \text{eşitliğinde değerler yerine konur}$$

$$\lambda' = 78.3 \left(1 + \frac{0.34 \times 0.145 \times 225.2}{78.3} \right)^2 = 102.1 \text{ Btu/lb}$$

$$\lambda_c = 2 \pi \left[\frac{\sigma g_c}{g (\rho_L - \rho_V)} \right]^{1/2} \quad \text{eşitliğinde, } g_c/g = 1 \text{ kabul edilir,}$$

$$\lambda_c = 2 \pi \left(\frac{0.0013}{91.3 - 0.291} \right)^{1/2} = 0.0238 \text{ ft}$$

Aşağıdaki eşitlikten h_0 hesaplanır.

$$h_0 \left[\frac{\lambda_c \mu_V \Delta T}{k_V^3 \rho_V (\rho_L - \rho_V) \lambda' g} \right]^{1/2} = 0.59 + 0.069 \frac{\lambda_c}{D_0}$$

$$h_0 \left[\frac{0.0238 \times 0.0314 \times 225.2}{0.0627^3 \times 0.291 (91.3 - 0.291) \times 102.1 \times 4.17 \times 10^8} \right]^{1/2}$$

$$= 0.59 + \frac{0.069 \times 0.0238}{0.104}$$

$h_0 = 122 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{sa} \cdot ^\circ\text{F}$ bulunur.

$$\text{Isı akısı, } \frac{q}{A} = h_0 \times \Delta T = 122 \times 225.2 = 27470 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{sa}$$

Soğuk Kaynama

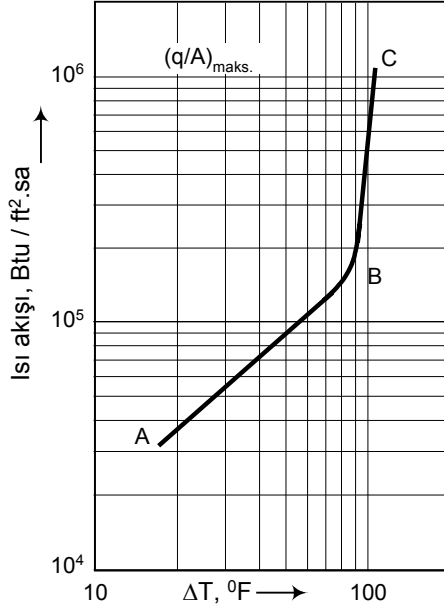
Bir sıvı, dikey bir tüp içinde doğal sirkülasyonla kaynadığında, soğuk sıvı tüpün tabanından girer, ısınır ve yukarı doğru çıkarken bir kısmı buharlaşır. Sıvının sıcaklığı (başlangıçta düşüktür), tüpteki basınca göre kaynama noktasına kadar yükselir. Yatay veya dikey tüpler boyunca olan zorlamalı konveksiyonla, düşük sıcaklıktaki sıvı da akış içine girer, kaynama noktasına kadar ısınır ve tüp çıkışına yakın bir yerde buhar haline dönüşür. Bazen tüpten sonraki çıkış hattı üzerine bir akış-kontrol valfi konularak tüpteki sıvı, tüp içindeki basınca göre kaynama noktasının üzerindeki bir sıcakta ısıtılır. Bu durumda tüp içinde kaynama olmaz; sıvı sadece yüksek sıcaklığa ısınır ve valften geçerken "aniden (flash)" buhar haline dönüştürülür.

Bazı zorlamalı-konveksiyon cihazlarında sıvı kütlesinin sıcaklığı kaynama noktasının altında olduğu halde, ısıtma yüzeyi sıcaklığı sıvının kaynama noktasının üstünde bir değerde tutulur. Bu tip kaynamaya "soğuk kaynama (subcooled boiling)" denir.

Soğuk kaynamada kaynayan sıvı akımı, aktığı kanal içinde hapsedilir; buhar ayrılmayacağından buhar bölgesine ihtiyaç olmaz.

Soğuk kaynamada gaz içerme- yen bir sıvı dik bir dairesel boşluğa pompalanır; burada şeffaf bir çıkış tüpü, ısıtma elementi, ısıtma elementinin sıcaklığı ve ısı akısındaki artışlarda, sıvının durumunun gözlenebildiği bir düzen bulunur. Elementin sıcaklığı belirli bir değeri aştığında (deney koşullarına bağlıdır) kabarcıkların oluştuğu (çe-

kirdek kaynamasında olduğu gibi) ve sonra bitişiğindeki daha soğuk sıvıda yoğunlaştığı görülür. Belirli bir hız ve basınç için ısıl akı q/A ve ısıtma elementi ile sıvı arasındaki sıcaklık farkı ΔT ölçülerek Şekil-19'daki gibi bir eğri elde edilir.



Şekil-19: Soğuk kaynamaya örnek

Şekil-19'daki grafik, gazı giderilmiş distile su için çizilmiştir. Su, dış çapı 1.96 cm olan bir ceket ile 1.4 cm çapındaki elektrikli bir ısıtıcı arasındaki boşluktan 4 atm mutlak basınç altında 122 cm/sn hızla akıtılmaktadır.

Eğride çok kısa bir geçiş bölgesiyle birbirine bağlanmış iki kısım bulunur AB hattı, 80°F (26 °C) altındaki sıcaklık farklarını; kapsar, düz bir doğru şeklindedir ve eğimi 1.0 dir. Bu bölgede akı, ΔT ile orantılıdır ve h katsayısı ΔT ye bağımlı değildir. Sıcaklık farkı 90°F (32 °C) ı aştığında, soğukta kaynama başlarken eğri aniden yukarı doğru keskin bir dönüş yapar ve BC hemen hemen düz bir doğru şeklini alır. Bu kısmın eğimi çok büyüktür, sıcaklık farkındaki küçük bir artış, akıda büyük bir artışa neden olur. Buradaki işlem, bir soğuk kaynama olayıdır.

Eğrinin bükülme noktası, sıvının cihaz başındaki kaynama sıcaklığı değildir. Soğuk kaynama, sıvı sınır tabakası aşırı ısınmış hale gelmedikçe başlamaz, ancak sıvının kendisi kaynama sıcaklığının altındadır.