



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ**

MÜHENDSİLİK FAKÜLTESİ

Makina Mühendisliği Bölümü

MAK 315 ISI TRANSFERİ

Taşınım İle Isı Transferinde Genel Kavramlar, Hız ve Sıcaklık Dağılımları, Laminer ve Türbülanslı Akımda Isı Transferi ve Sınır Tabaka Etkisi

10. Hafta

özenilen üniversite

Önceki bölümlerde iletimle ısı geçişi üzerinde duruldu ve taşınım yalnızca iletim problemleri için sınır koşullarını oluşturmak için incelendi. Bölüm 1.2.2’de “taşınım” terimi bir yüzeyle üzerindeki akış arasındaki enerji aktarımını açıklamak için kullanıldı. Her ne kadar yayılım (akışkan moleküllerinin gelişigüzel hareketi) bu aktarımı etkilese de, üstün olan etki genellikle akışkan parçacıklarının yığın veya bütünüyle hareket etmesidir.

Taşınımı ele alırken, iki ana amacımız olacaktır. Taşınımın ısı geçişinin arkasındaki, fiziksel mekanizmayı anlamının yanı sıra, taşınımın ısı geçişini hesaplamaları için yöntemler geliştirilecektir. Bu bölüm öncelikle ilk amacı gerçekleştirmeye yöneliktir. Özellikle temel bilgilerin çoğu bir yerde toplanmış, fiziksel kökenler tartışılmış, ilgili boyutsuz parametreler, önemli benzeşimler geliştirilmiştir.

Bu bölümün bir özelliği, taşınımın ısı transferinin benzeşimi yoluyla taşınımın kütle transferi etkilerini incelemektir. Taşınımın kütle geçişinde yayılımla birlikte akışkan hareketi, derişiklik gradyanı olan bir maddenin aktarımını hızlandırır. Bu kitapta, yüzey üzerinde bir gaz akışı nedeniyle buharlaşabilen bir katı veya sıvı yüzeyinde oluşan, taşınımın kütle transferi üzerinde yoğunlaşmıştır.

Temel bilgiler verildikten sonra taşınım etkilerinin hesaplanabilmesi için yöntemler geliştirilecektir. Bölüm 7 ve 8’de sırasıyla *dış ve iç akış* için *zorlanmış taşınım* ile ilgili katsayıların hesaplanması ele alınmaktadır. Bölüm 9’da, *doğal taşınım* için bu katsayıların çözüm yöntemleri açıklanmaktadır. Bölüm 10 *faz değişimi (kaynama ve yoğunlaşma)* ile ilgili taşınım problemlerini ele almaktadır. Bölüm 11’de *ısı değiştiricilerinin* etkinlik ölçüleri tanımlanmakta ve tasarım yöntemleri açıklanmaktadır. Isı değiştiricileri mühendislik uygulamalarında akışkanlar arasında ısı geçişini gerçekleştirmede yaygın olarak kullanılmaktadır.

6.1

Taşınım Problemi

Şekil 6.1a’da gösterilen akış ele alınsın. V hızında ve T_∞ sıcaklığında bir akışkan yüzey alanı A_s olan, rastgele biçimli bir cisim üzerinden akmaktadır. Yüzeyin T_s sıcaklığında olduğu varsayılmaktadır ve $T_s \neq T_\infty$ ise taşınımın ısı geçişi olacaktır. *Yerel ısı akısı* q'' aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (6.1)$$

Burada h *yerel taşınım katsayısı*’dır. Yüzey üzerinde akış koşullarının noktadan noktaya değişmesi nedeniyle, yüzey boyunca q'' ve h değişir. *Toplam ısı geçişi* q , yerel ısı akısının bütün yüzey üzerinde integrasyonu ile edilebilir. Bu ise,

$$n'_A = M_A N'_A = 128 \text{ kg/kmol} \times 1.57 \times 10^{-8} \text{ kmol/s} \cdot \text{m}$$

$$n'_A = 2.01 \times 10^{-6} \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

olur.

6.2

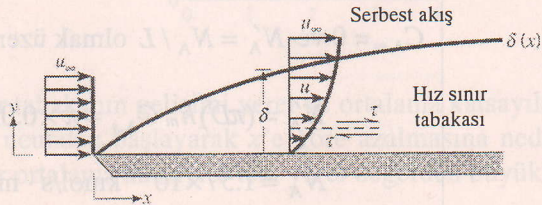
Taşınım Sınır Tabakaları

6.2.1 Hız (Hidrodinamik) Sınır Tabakası

Sınır tabaka kavramını açıklamak için Şekil 6.3'de gösterilen düz levha üzerindeki akış ele alınsın. Akışkan parçacıkları yüzeyle temas ettiklerinde hızları sıfır olur. Bu parçacıklar bitişik akışkan tabakaları içindeki parçacıkların hareketini yavaşlatır ve bu etki azalarak, $y = \delta$ uzaklığında gözardı edilebilir değere gelir. Akışkan hareketinin bu yavaşlaması akışkan hızına paralel (Şekil 6.3) düzlemlerde etkili olan *kayma gerilmesi* τ ile ilgilidir. Yüzeyden y uzaklığının artışıyla akışkan hızının x hız bileşeni u , serbest akış değeri u_∞ 'a ulaşmaya kadar artar. ∞ alt indisi sınır tabaka dışında serbest akış içindeki koşulları göstermek için kullanılmaktadır.

δ büyüklüğü *sınır tabaka kalınlığı* olarak adlandırılır ve genellikle $u = 0.99 \cdot u_\infty$ değerine ulaşıldığı y değeri olarak tanımlanır. *Sınır tabaka hız profili*, sınır tabaka içinde u hızının y ile değişimini gösterir. Buna göre akış iki farklı bölgeye ayrılabilir: İnce bir akışkan tabakası (sınır tabaka); bu tabaka içinde hız gradyanı ve kayma gerilmeleri büyüktür ve sınır tabaka dışındaki bölge: bu tabaka içinde hız gradyanı ve kayma gerilmeleri gözardı edilebilir. Levha giriş ucundan başlayarak x arttıkça sürtünmenin etkisi serbest akış içinde daha ötelere taşınır ve sınır tabaka büyür (δ, x ile artar).

Akışkan hızı ile ilgili olması nedeniyle, önceden sınır tabaka olarak belirtilen bölge daha açık bir biçimde *hız (hidrodinamik) sınır tabakası* olarak adlandırılır. Bir yüzey üzerinde akış olduğunda sınır tabaka gelişir ve taşınım ile ilgili problemlerde büyük önem taşır. Akışkanlar mekaniklerinde mühendisler için önemi, yüzey kayma gerilmesi τ_s ile ilişkisinden, başka bir



ŞEKİL 6.3 Bir düz levha üzerinde hız (hidrodinamik) sınır tabakasının gelişimi.

değişle yüzey sürtünmesi ile ilişkisinden kaynaklanır. Dış akışlar için yerel sürtünme katsayısı kayma gerilmesi ile gösterilebilir:

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_\infty^2 / 2} \quad (6.14)$$

Yerel sürtünme katsayısı önemli bir boyutsuz parametre olup yüzey sürtünme kaybını hesaplamak için kullanılır. *Newton akışkanı* varsayımı ile yüzey kayma gerilmesi, yüzeydeki hız gradyanından belirlenebilir:

$$\tau_s = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (6.15)$$

Burada μ *dinamik viskozite* olarak bilinen bir akışkan özeliğidir.

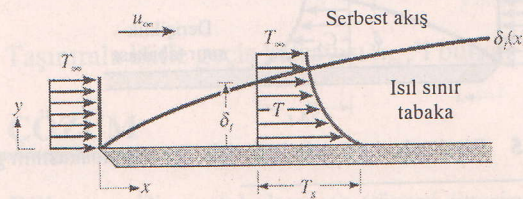
6.2.2 Isıl Sınır Tabaka

Bir yüzey üzerinde akış olduğunda nasıl bir hız sınır tabakası gelişirse, akışkan sıcaklığı yüzey sıcaklığından farklı olduğunda da *ısıl sınır tabaka* gelişir. Sabit sıcaklıkta bir düz levha üzerinde akışı inceleyelim (Şekil 6.4). Levha giriş ucunda *sıcaklık profili* düzgün dağılımlı olup $T(y)=T_\infty$ 'dur. Bununla beraber akışkan parçacıkları levha ile temas ettiklerinde levha ile aynı sıcaklığa ulaşır. Bu parçacıkların komşu akışkan tabakası ile enerji değişimi akışkan içinde sıcaklık gradyanlarına yol açar. Akışkanın sıcaklık gradyanlarının olduğu bu bölge ısıl sınır tabakadır ve bu tabakanın kalınlığı δ_t , genellikle $[(T_s - T)/(T_s - T_\infty)] = 0.99$ oranını sağlayan y değeri olarak tanımlanır. Giriş ucundan uzaklaştıkça ısı geçişi serbest akışı daha fazla etkiler ve ısıl sınır tabaka büyür.

Sınır tabaka içindeki koşullar ile taşınım katsayısı arasındaki ilişki kolaylıkla gösterilebilir. Giriş ucundan x uzaklıkta *yerel* ısı akısı, $y = 0$ da akışkana Fourier yasası uygulanarak belirlenebilir:

$$q_s'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (6.16)$$

Bu bağıntının kullanımı uygundur, çünkü *yüzeyde akışkan hareketi yoktur ve enerji aktarımı yalnızca iletimle gerçekleşir*. Denklem 6.16 ile Newton'un soğuma yasası (Denklem 6.1) birleştirilirse



ŞEKİL 6.4 Sabit sıcaklıktaki düz levha üzerinde ısıl sınır tabakanın gelişimi.

6.2.4 Sınır Tabakaların Önemi

Özet olarak, hız sınır tabakasının kalınlığı $\delta(x)$ olup, içinde hız gradyanı ve kayma gerilmelerinin varlığıyla tanımlanır. Isıl sınır tabakasının kalınlığı $\delta_t(x)$ olup, içinde sıcaklık gradyanı ve ısı aktarımı vardır. Son olarak derişiklik sınır tabakasının kalınlığı $\delta_c(x)$ olup, içinde derişiklik gradyanı ve kütle geçişi vardır. Mühendis için bu üç sınır tabakanın en önemli etkileri sırasıyla, yüzey sürtünmesi, taşınım ile ısı geçişi ve taşınım ile kütle geçiştir. Herhangi bir yüzey üzerinde akış için, bir hız sınır tabakası ve sonucunda yüzey sürtünmesi her zaman olacaktır. Ancak, bir ısıl sınır tabaka ve böylece taşınım ile ısı geçişi yalnızca yüzey ve serbest akışın sıcaklıkları farklıysa vardır. Benzer şekilde derişiklik sınır tabakası ve taşınım ile kütle geçişi yalnızca bir maddenin yüzey derişikliği, serbest akışın derişikliğinden farklıysa vardır. Her üç sınır tabakanın birarada olduğu durumlar gerçekleşebilir. Böyle durumlarda sınır tabakalar çok seyrek olarak aynı hızda gelişir ve belirli bir x noktasında δ , δ_t , δ_c kalınlıkları eşit değildir.

6.3

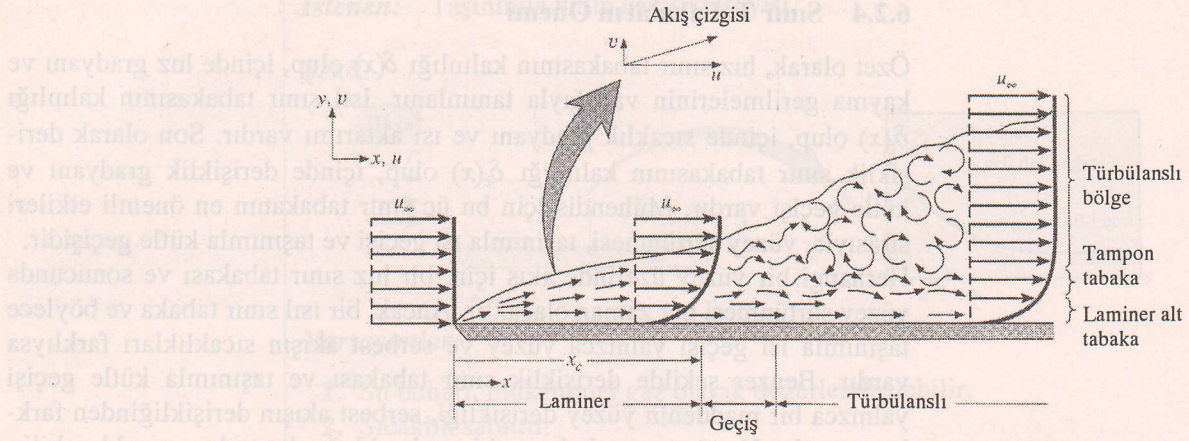
Laminer ve Türbülanslı Akış

Herhangi bir taşınım probleminin incelenmesinde ilk adım sınır tabakanın *laminer* veya *türbülanslı* olduğunun belirlenmesidir. Yüzey sürtünmesi ve taşınım ile ısı geçişi akışın laminer veya türbülanslı olmasına büyük ölçüde bağlıdır.

Şekil 6.6'da gösterildiği gibi laminer ve türbülanslı akış arasında keskin farklılıklar vardır. Laminer sınır tabaka içinde, akışkan hareketi çok düzenlidir ve parçacıkların akış çizgileri boyunca hareket ettikleri gözlenir. Bir akış çizgisi boyunca akışkan hareketi x ve y yönlerinde hız bileşenleri ile tanımlanabilir. v hız bileşeni yüzeye dik yöndeki bileşendir ve bu bileşen sınır tabakada momentum, enerji veya kütle geçişine önemli katkıda bulunur. Yüzeye dik yönde akışkan hareketi, sınır tabakanın x yönündeki gelişiminin bir sonucudur.

Buna karşılık, türbülanslı sınır tabaka içinde akışkan hareketi çok düzensizdir ve akış içinde ani hız değişimleri gözlenir. Bu düzensiz değişimler momentum, enerji ve kütle geçişini artırır ve bundan dolayı taşınım ile geçiş hızı gibi yüzey sürtünmesi de artar. Düzensiz değişimlerin sonucu akışkanın karışması türbülanslı sınır tabaka kalınlığını artırır ve sınır tabaka profilleri (hız, sıcaklık ve derişiklik) laminer akıştakine oranla daha düzdür.

Bir düz levha üzerinde hız sınır tabakasının gelişimi Şekil 6.6'da şematik olarak gösterilmiştir. Sınır tabaka başlangıçta laminerdir, fakat giriş ucundan biraz ötede, küçük çalkalanmalar başlar, bunlar şiddetlenir ve türbülanslı akışa geçiş olur. Akışkan içindeki çalkalanmalar geçiş bölgesinde

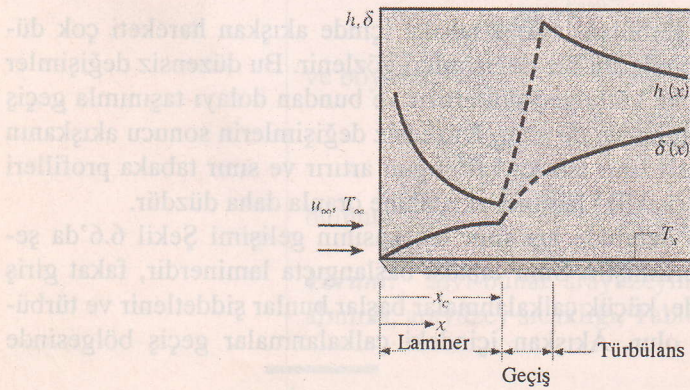


ŞEKİL 6.6 Bir düz levha üzerinde hız (hidrodinamik) sınır tabakanın gelişimi.

gelişmeye başlar ve sınır tabaka sonunda tümüyle türbülanslı olur. Tam türbülanslı bölge içinde, akışkan kitlelerinin üç boyutlu gelişigüzel hareketleri söz konusudur ve beklendiği gibi türbülansa geçişte sınır tabaka kalınlığında, yüzey kayma gerilmesinde ve taşınım katsayısında önemli artışlar olur. Bu etkiler Şekil 6.7’de hız sınır tabaka kalınlığı δ ve yerel taşınım katsayısı h için gösterilmiştir. Türbülanslı sınır tabaka içinde üç ayrı bölge tanımlanabilir. *Laminer alt tabaka*’da aktarım yayılımla olur ve hız profili hemen hemen doğrusaldır. Buna bitişik olan tampon tabakada yayılım ve kütle taşınımı karşılaştırılabilir düzeydedir. En üstteki türbülanslı bölgede ise aktarım gelişigüzel kitle hareketleri ile gerçekleşir.

Sınır tabaka hesaplarında laminlerden türbülanslı akışa geçişin, bir x_c noktasında başladığı varsayılır. Bu nokta *Reynolds sayısı* olarak adlandırılan bir boyutsuz değişkenin aldığı değerle belirlenir:

$$Re_x \equiv \frac{\rho u_\infty x}{\mu} \quad (6.23)$$



ŞEKİL 6.7

Sabit sıcaklıkta bir düz levha üzerinde akış için hız sınır tabaka kalınlığı δ ve yerel ısı transfer katsayısı h ’nın değişimi.

6.63 - 6.65 denklemlerinden üç tane benzerlik parametresi çıkarılabilir. Benzerlik parametreleri, belirli koşullarda bir yüzeyden elde edilen sonuçları, geometrik olarak benzer olan ama tamamen farklı koşullara sahip yüzeylere uygulamamızı sağladığı için önemlidir. Bu koşullar, akışkanın türü, hızı ve/veya yüzeyin L ile belirlenen boyutu ile değişebilir.

6.63 eşitliği ele alınırsa, tersi Reynolds sayısı olarak tanımlanmış olan v/VL değerinin boyutsuz bir grup olduğu görülür.

Reynolds Sayısı:

$$Re_L \equiv \frac{VL}{\nu} \quad (6.69)$$

6.64 eşitliğinden, α/VL teriminin, $(v/VL)(\alpha/\nu) = (Re_L)^{-1}(\alpha/\nu)$ olarak yazılabilen boyutsuz bir grup olduğu görülür. α/ν özelliklerinin oranı boyutsuzdur ve tersi Prandtl sayısı olarak adlandırılır.

Prandtl Sayısı:

$$Pr \equiv \frac{\nu}{\alpha} \quad (6.70)$$

Son olarak madde süreklilik denklemi, 6.65'den D_{AB}/VL teriminin (v/VL) $(D_{AB}/\nu) = (Re_L)^{-1}(D_{AB}/\nu)$ 'ye eşit olduğu görülür. (D_{AB}/ν) oranı boyutsuzdur ve tersi Schmidt sayısı olarak adlandırılır.

Schmidt Sayısı:

$$Sc \equiv \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (6.71)$$

6.69'dan 6.71'e kadar olan tanımların kullanılması ile, sınır tabaka denklemleri (6.63-6.65) ve süreklilik denkleminin (6.54) boyutsuz biçimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (6.72)$$

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{dp^*}{dx^*} + \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \quad (6.73)$$

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Re_L Pr} \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \quad (6.74)$$

$$u^* \frac{\partial C_A^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial C_A^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Re_L Sc} \frac{\partial^2 C_A^*}{\partial y^{*2}} \quad (6.75)$$

hızına, L uzunluğuna ve yüzeyin geometrisine bağlı olabileceğini söyleyebiliriz. Bunun yanısıra, 6.74 numaralı denklem bu bağımlılığın nasıl basitleştirilebileceğini göstermektedir. Bu denklemin çözümü şu şekilde gösterilebilir:

$$T^* = f_3\left(x^*, y^*, Re_L, Pr, \frac{dp^*}{dx^*}\right) \quad (6.79)$$

Burada dp^*/dx^* 'e bağımlılık, akışkanın hareketinin (u^* ve v^*) ısı koşulları üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. dp^*/dx^* terimi, bir kez daha yüzey geometrisinin etkisini göstermektedir. Taşınım katsayısının tanımından (6.17), boyutsuz değişkenlerden ve 6.59 ile 6.61 eşitliklerinden,

$$h = -\frac{k_f}{L} \left(\frac{T_\infty - T_s}{T_s - T_\infty} \right) \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = +\frac{k_f}{L} \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0}$$

elde edilir. Bu bağıntı, Nusselt sayısı olarak adlandırılan boyutsuz bir bağımlı parametrenin tanımını kolaylaştırır.

Nusselt Sayısı:

$$Nu \equiv \frac{hL}{k_f} = + \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} \quad (6.80)$$

Bu parametre, yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyanına eşittir ve yüzeyde oluşan taşınım ile ısı geçişinin bir ölçüsünü verir. 6.79 denkleminde, verilen bir geometri için,





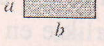
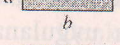
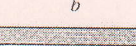


$$Nu = f_4(x^*, Re_L, Pr) \quad (6.81)$$

yazılabilir. Sürtünme katsayısının, hız sınır tabakasında taşıdığı önem, ısı sınır tabakada Nusselt sayısı tarafından yüklenilir. 6.81 eşitliğine göre, verilen bir geometri için Nusselt sayısı x^* , Re_L ve Pr 'nin *genelleştirilmiş fonksiyonu* olmalıdır. Eğer bu fonksiyon biliniyorsa, Nu sayısının değişik akışkanlar, farklı V ve L değerleri için hesaplanmasında kullanılabilir. Nu sayısı bulunduğundan sonra yerel taşınım katsayısı h ve 6.1 denkleminde de yerel ısı akısı hesaplanabilir. Bunun yanısıra, *ortalama* ısı taşınım katsayısı cismin yüzeyi üzerinde integrasyon ile hesaplandığı için, x^* 'den bağımsız olmalıdır. Buradan *ortalama* Nusselt sayısının fonksiyonel bağımlılığı,

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k_f} = f_5(Re_L, Pr) \quad (6.82)$$

biçiminde gösterilebilir. Benzer olarak, buharlaşmakta olan bir sıvı veya süblimleşen bir katı üzerindeki gaz akışı için kütle geçişi, kütle taşınım katsayısı h_m ; D_{AB} 'ye, ρ ve μ özelliklerine, V hızına ve L 'nin karakteristik uzunluğuna bağlıdır. Ayrıca, 6.75 numaralı denklem bu bağımlılığın nasıl basitleştirilebileceğini göstermektedir. Denklemin çözümü şöyle olmalıdır,

TABLO 8.1 Farklı kesitlerdeki borularda tam gelişmiş laminar akışta Nusselt sayıları ve sürtünme faktörleri

Kesit	$\frac{b}{a}$	$Nu_D \equiv \frac{hD_h}{k}$		$f Re_{D_h}$
		(Sabit q_s'')	(Sabit T_s)	
	—	4.36	3.66	64
	1.0	3.61	2.98	57
	1.43	3.73	3.08	59
	2.0	4.12	3.39	62
	3.0	4.79	3.96	69
	4.0	5.33	4.44	73
	8.0	6.49	5.60	82
	∞	8.23	7.54	96
	—	3.11	2.47	53

İzin alınarak kullanılmıştır. W.M. Kays ve M.E. Crawford, Convection Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1980.

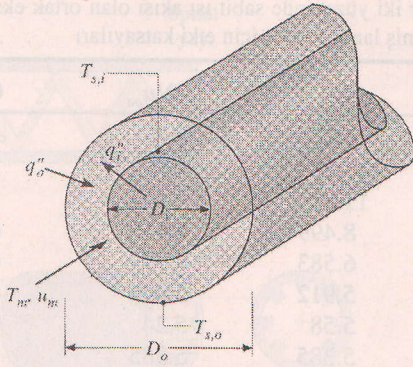
ÖRNEK 8.6

Problem 3.114'deki kanatlı hava ısıtıcısını düşünün. Bu kez her iki uç levhanın $T_o = T_L = T_s = 400$ K eşit sıcaklıkta olduğu, simetrik koşullar gözönüne alınsın. Baca genişlik ve derinliği sırasıyla $W = 200$ mm ve $B = 100$ mm'dir. Alüminyum kanatlar ($k = 240$ W/m · K) $t = 1$ mm kalınlığında olsun. Atmosferik havanın bacadaya, $T_{m,i} = 300$ K sıcaklık ve $u_{m,i} = 5$ m/s hızla girdi varsayılınsın. Kanat uzunluğu ve aralığı sırasıyla $L = 15$ mm ve $S = 3$ mm ise bacadaki ısı geçişini, q , ve hava çıkış sıcaklığını, $T_{m,o}$, hesaplayın.

ÇÖZÜM

Bilinen: Alüminyum kanatlı ısı değiştiricinin boyutları. Isı değiştirici levhalarının sıcaklığı. Havanın giriş sıcaklığı ve hızı.

İstenen: Hava çıkış sıcaklığı ve ısı geçişi.



ŞEKİL 8.10
Ortak Eksenli borular arasındaki halkasal bölge.

boru yüzeylerine veya yüzeylerinden olabilir. Bu yüzeylerin her biri için sıcaklık veya ısı akısı bağımsız olarak belirlenebilir. Yüzeylerden ısı akıları,

$$q''_i = h_i(T_{s,i} - T_m) \quad (8.68)$$

$$q''_o = h_o(T_{s,o} - T_m) \quad (8.69)$$

bağıntılarıyla hesaplanabilir.

İç ve dış yüzeylerde taşınım katsayıları genellikle farklıdır. Bu durumda ilgili Nusselt sayıları,

$$Nu_i \equiv \frac{h_i D_h}{k} \quad (8.70)$$

$$Nu_o \equiv \frac{h_o D_h}{k} \quad (8.71)$$

olur. Burada Denklem 8.67'den yararlanarak hidrolik çap D_h ,

$$D_h = \frac{4(\pi/4)(D_o^2 - D_i^2)}{\pi D_o + \pi D_i} = D_o - D_i \quad (8.72)$$

olarak bulunur.

TABLO 8.2 Bir yüzeyi yalıtılmış ve diğeri sabit sıcaklıkta olan ortak eksenli borular arasındaki halkasal bölgede tam gelişmiş laminar akış için Nusselt sayısı

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0	—	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

İzin alınarak kullanılmıştır. W. M. Kays ve H. C. Perkins, Editörler W. M. Rohsenow ve J. P. Hartnett, Handbook of Heat Transfer, Bölüm 7, McGraw-Hill, New York, 1972.

TABLO 8.3 Her iki yüzeyinde sabit ısı akısı olan ortak eksenli borular arasındaki halkasal bölgede tam gelişmiş laminar akış için etki katsayıları

D_i/D_o	Nu_{ii}	Nu_{oo}	θ_i^*	θ_o^*
0	—	4.364	∞	0
0.05	17.81	4.792	2.18	0.0294
0.10	11.91	4.834	1.383	0.0562
0.20	8.499	4.833	0.905	0.1041
0.40	6.583	4.979	0.603	0.1823
0.60	5.912	5.099	0.473	0.2455
0.80	5.58	5.24	0.401	0.299
1.00	5.385	5.385	0.346	0.346

İzin alınarak kullanılmıştır. W. M. Kays ve H. C. Perkins, Editörler W. M. Rohsenow ve J. P. Hartnett, Handbook of Heat Transfer, Bölüm 7, McGraw-Hill, New York, 1972.

Bir yüzeyi yalıtılmış, diğer yüzeyi sabit sıcaklıkta tam gelişmiş laminar akış durumu için Nu_i veya Nu_o Tablo 8.2'den elde edilebilir. Böyle durumlarda sadece sabit sıcaklıktaki yüzeyin taşınım katsayısının bulunması söz konusu olacaktır.

Her iki yüzeyde sabit ısı akısı koşulları varsa, Nusselt sayıları

$$Nu_i = \frac{Nu_{ii}}{1 - (q_o'' / q_i'')\theta_i^*} \quad (8.73)$$

$$Nu_o = \frac{Nu_{oo}}{1 - (q_i'' / q_o'')\theta_o^*} \quad (8.74)$$

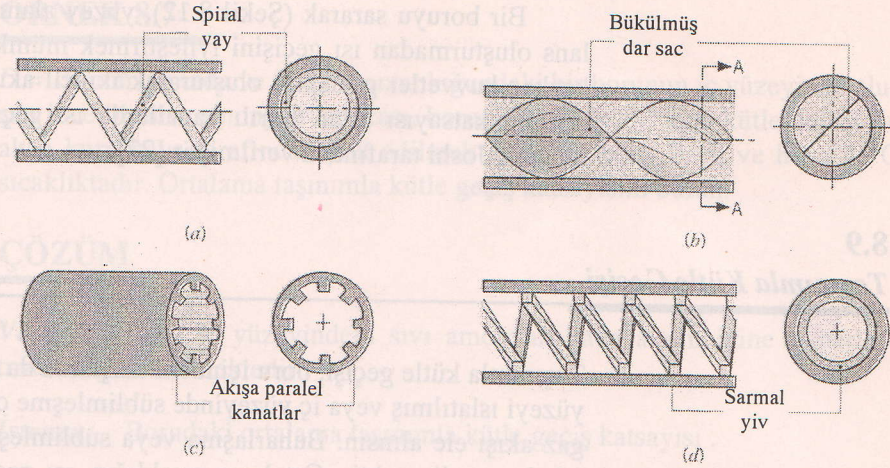
bağıntılarından hesaplanabilir. Bu eşitliklerde yer alan etki katsayıları (Nu_{ii} , Nu_{oo} , θ_i^* ve θ_o^*) Tablo 8.3'ten bulunabilir. Isı geçişinin akışkandan veya akışkana doğru olmasına bağlı olarak sırasıyla q_o'' ve q_i'' nin eksi veya artı olabileceğine dikkat edin. Ayrıca h_i ve h_o değerlerinin eksi olduğu durumlar ortaya çıkabilir. Bu sonuçlar, Denklem 8.68 ve 8.69'da varsayılan işaret notasyonu ile kullanıldığında T_s ve T_m 'nin bağıl büyüklüklerini açıklar.

Tam gelişmiş türbülanslı akış için, etki katsayıları Reynolds ve Prandtl sayılarının fonksiyonudur [23]. Bununla beraber ilk yaklaşım olarak iç ve dış taşınım katsayılarının eşit olduğu varsayılabilir ve 8.60 ile verilen Dittus-Boelter denklemi ile 8.72 ile tanımlanan hidrolik çap kullanılarak hesaplanabilir.

8.8

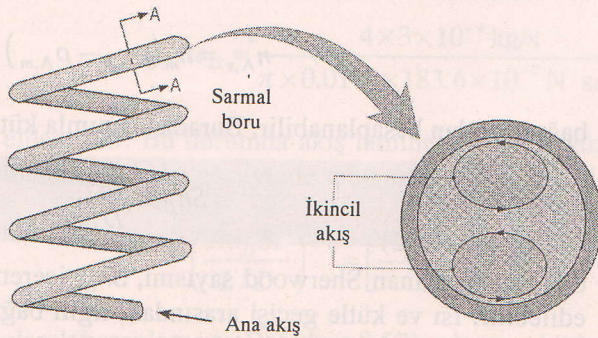
Isı Geçişinin İyileştirilmesi

İç akışa ait ısı geçişi değişik yollarla iyileştirilebilir. İyileştirme taşınım yüzey alanını artırarak ve/veya taşınım katsayısını artırarak başarılabılır. Örneğin, spiral yay yerleştirilmesi (Şekil 8.11a) veya iç yüzeyin işlenmesi yüzey pürüzlülüğünü artırarak türbülans oluşturur, böylece h artar.



ŞEKİL 8.11 İç akışta ısı geçişini iyileştirme yolları: (a) spiral yay telinin akışa paralel ve dik kesitlerden görünüşü, (b) bükülmüş dar sacın akışa paralel ve dik kesitlerden görünüşü, (c) akışa paralel kanatlar, (d) sarmal yivin akışa paralel ve dik kesitlerden görünüşü.

Diğer bir seçenekte ise bükülmüş dar sac yerleştirerek akışın dönmesi sağlanır ve taşınım katsayısı artırılabilir. (Şekil 8.11b). Eklenen eleman belirli aralıklarla 360° bükülen ince bir şerittir. Teğetsel bir hız bileşeninin oluşturulması, özellikle boru cidarı yakınında akışın hızını artırır. Spiral kanatlar ve yiv kullanarak hem taşınım katsayısı hem de alan artırılabilirken, ısı geçiş alanı iç yüzeye kanat ekleyerek de artırılabilir. Isı geçişi iyileştirilirken, basınç düşümündeki artış ve buna bağlı olarak fan ve pompa güç gereksinimi göz önüne alınmalıdır. Isı geçişinin iyileştirilmesi kaynaklarda ayrıntılı bir biçimde işlenmiştir [24–26] ve Journal of Enhanced Heat Transfer aracılığıyla son gelişmelere ulaşılabilir.



ŞEKİL 8.12 Sarılmış borunun şematik görünümü ve büyütülmüş kesitte ikincil akış.

TABLO 8.4 Dairesel borularda akış için taşınım bağıntılarının özeti^{a,b,e}

Bağıntı	Koşullar
$f = 64 / Re_D$	(8.19) Laminer, tam gelişmiş
$Nu_D = 4.36$	(8.53) Laminer, tam gelişmiş, sabit q_s'' , $Pr \geq 0.6$
$Nu_D = 3.66$	(8.55) Laminer, tam gelişmiş, sabit T_s , $Pr \geq 0.6$
$Nu_D = 3.66 + \frac{0.0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0.04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}}$	(8.56) Laminer, ısı giriş uzunluğu ($Pr \gg 1$ veya ısıtılmamış başlangıç uzunluğu), sabit T_s
veya $Nu_D = 1.86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	(8.57) Laminer, birleşik giriş uzunluğu, $\left\{ [Re_D Pr / (L/D)]^{1/3} (\mu / \mu_s)^{0.14} \right\} \geq 2$, sabit T_s , $0.48 < Pr < 16,700$, $0.0044 < (\mu / \mu_s) < 9.75$
$f = 0.316 Re_D^{-1/4}$	(8.20a) ^c Türbülanslı, tam gelişmiş, $Re_D \leq 2 \times 10^4$
$f = 0.184 Re_D^{-1/5}$	(8.20b) ^c Türbülanslı, tam gelişmiş, $Re_D \geq 2 \times 10^4$
veya $f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2}$	(8.21) ^c Türbülanslı, tam gelişmiş, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$
$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$	(8.60) ^d Türbülanslı, tam gelişmiş, $0.6 \leq Pr \leq 160$, $Re_D \geq 10000$, $(L/D) \geq 10$, $T_s > T_m$ için $n = 0.4$ ve $T_s < T_m$ için $n = 0.3$
veya $Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$	(8.61) ^d Türbülanslı, tam gelişmiş, $0.7 \leq Pr \leq 16700$, $Re_D \geq 10,000$, $L/D \geq 10$
veya $Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	(8.63) ^d Türbülanslı, tam gelişmiş, $0.5 < Pr < 2000$, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$, $(L/D) \geq 10$
$Nu_D = 4.82 + 0.0185(Re_D Pr)^{0.827}$	(8.65) Sıvı metaller, türbülanslı, tam gelişmiş, sabit q_s'' , $3.6 \times 10^3 < Re_D < 9.05 \times 10^5$, $10^2 < Pe_D < 10^4$
$Nu_D = 5.0 + 0.025(Re_D Pr)^{0.8}$	(8.66) Sıvı metaller, türbülanslı, tam gelişmiş, sabit T_s , $Pe_D > 100$

^a Kütle transfer bağıntıları, Nu_D ve Pr yerine sırasıyla Sh_D ve Sc konmasıyla elde edilebilir.

^b Denklem 8.53, 8.55, 8.60, 8.61, 8.63, 8.65 ve 8.66'daki özellikler, T_m ; Denklem 8.19, 8.20 ve 8.21'deki özellikler $T_f = (T_s + T_m)/2$; Denklem 8.56 ve 8.57'deki özellikler ise $\bar{T}_m = (T_{m,i} + T_{m,o})/2$ 'de hesaplanır.

^c Denklem 8.20 ve 8.21 pürüzsüz borularla ilgilidir. Pürüzlü borular için Denklem 8.63, Şekil 8.3'ün sonuçlarıyla kullanılmalıdır.

^d İlk yaklaşım olarak, Denklem 8.60, 8.61 veya 8.63, $(L/D) \geq 10$ ise tüm boru uzunluğundaki ortalama Nusselt sayısını Nu_D hesaplamak için kullanılabilir. Özellikler $\bar{T}_m = (T_{m,i} + T_{m,o})/2$ ortalama sıcaklığında hesaplanmalıdır.

^e Dairesel kesitli olmayan borular için, $Re_D = D_h u_m / \nu$, $D_h = 4 A_c / P$, ve $u_m = \dot{m} / \rho A_c$. Tam gelişmiş laminar akış sonuçları Tablo 8.1'de verilmiştir. Türbülanslı akış için, Denklem 8.60 ilk yaklaşım olarak kullanılabilir.