



T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDSİLİK FAKÜLTESİ

Makina Mühendisliği Bölümü

MAK 315 ISI TRANSFERİ

Isı Değiştiricilerin Türleri, Toplam Isı
Geçiş Katsayısı, LMTD Yöntemiyle Isı
Değiştiricilerin Çözümlemesi

12. Hafta

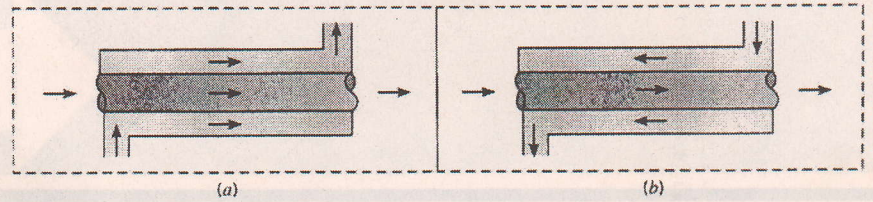
Farklı sıcaklıkta ve birbirinden katı bir cidar ile ayrılan iki akışkan arasındaki ısı geçişi, birçok mühendislik uygulamasında önem taşır. Bu tür bir ısı geçişini gerçekleştirmek için kullanılan cihaz, *ısı değiştiricisi* olarak adlandırılır ve hacim ısıtmasında, iklimlendirme tesislerinde, termik santrallarda, atık ısının geri kazanılmasında ve kimyasal işlemlerde uygulama alanı bulur. Bu bölümde, bir ısı değiştiricisinin tasarımı veya performans değerlendirmesi için gerekli olan ısı geçişi ilkeleri incelenecektir.

11.1

Isı Değiştiricilerinin Türleri

Isı değiştiricileri genelde, *akış düzenlemelerine* ve *konstrüksiyon tiplerine* göre sınıflandırılırlar. En basit bir ısı değiştiricisi konstrüksiyonu, *iç içe eş eksenli iki boru* (veya *çift boru*) içinde, sıcak ve soğuk akışkanların birbirine göre aynı veya ters doğrultuda hareket etmesi ile gerçekleştirilebilir. Şekil 11.1a'da görülen *paralel-akışlı* düzenlemede, sıcak ve soğuk akışkanlar, ısı değiştiricisinin aynı ucundan girerler, aynı doğrultuda akarlar ve ısı değiştiricisinin diğer ucundan ısı değiştiricisini terk ederler. Şekil 11.1b'de görülen *ters-akışlı* düzenlemede ise, sıcak ve soğuk akışkanlar, ısı değiştiricisinin birbirine göre ters uçlarından girerler, ters doğrultuda akarlar ve birbirlerine göre ters uçlardan ısı değiştiricisini terk ederler.

Diğer bir ısı değiştiricisi konstrüksiyonu ise, Şekil 11.2'de gösterilmiştir. *Kanatlı* ve *kanatsız* borulu ısı değiştiricilerinde, akışkanlar *çapraz* (birbirlerine göre dik) olarak akabilir. Bu şekilde verilen iki düzenleme, akışkanın boruya dik olarak akması sırasında, *karışmayan* ve *karışan* olmak üzere birbirinden farklı iki biçimde olabilir. Şekil 11.2a'da kullanılan kanatlar, akışın ana doğrultusu olan (x) yönüne dik olan (y) doğrultusunda akışkanın hareketine engel olduğundan, akışkan karışmamış olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda, akışkan sıcaklığı x ve y doğrultularının her ikisine göre değişir. Bu düzenlemenin tersi olan, Şekil 11.2b'de kanatsız boru demetinde, ana akış doğrultusuna dik yönde gerçekleşen karışma sonucunda, akışkandaki ana sıcaklık değişimi sadece akış doğrultusunda olur. Boru içindeki akışkan karışmadığından, buradaki kanatlı ısı değiştiricisi her iki akışkanın



ŞEKİL 11.1 İç içe eş eksenli boru türü ısı değiştiricileri. (a) Paralel akış. (b) Ters akış.

*dairese*l kesitli olabilir. Şekil 11.5a, b ve 11.5c'de görüldüğü gibi, kullanılan kanatlar ise sırasıyla *levha* veya *dairese*l olabilir. Paralel levhali ısı değıştiricileri düz veya dalgalı kanatlı olabilir ve tek-geçişli (Şekil 11.5d) veya çok geçişli (Şekil 11.e) olarak kullanılabilir. Kompakt ısı değıştiricilerinde akış kesitleri çok küçüktür ($D_h \leq 5 \text{ mm}$) ve içlerindeki akış çoğunlukla laminardır.

11.2

Toplam Isı Geçiş Katsayısı

Herhangi bir ısı değıştiricisi çözümlemesinin en temel ve çoğunlukla en belirsiz bölümü, *toplam ısı geçiş katsayısının* bulunmasıdır. İki akışkan arasındaki ısı geçişinde, toplam ısıl dirençler yardımı ile tanımlanan, Denklem 3.19 yeniden göz önüne alınsın. İki akışkanın, katmanlı düzlem veya silindirik bir duvar ile birbirinden ayrıldığı durumlar için iletim ve taşınım dirençleri, sırasıyla 3.18 ve 3.31 numaralı denklemlerle verilmiştir. Bu bağınların, temiz cidarlar ve kanatsız yüzeyler için uygulanabileceği hatırlanmalıdır.

Bir ısı değıştiricisinin normal çalışması sırasında, akışkan içindeki yabancı maddeler, paslanmalar veya akışkan ile cidar arasındaki diğer başka reaksiyonlar nedeniyle, yüzeylerde çoğunlukla bir kirlenme olur. Yüzey üzerinde biriken bu film veya tabaka, akışkanlar arasındaki ısı geçiş direncini çok artırır. Bu etki, R_f *kirlilik faktörü* olarak adlandırılan ek bir ısıl direnç tanımı ile göz önüne alınabilir. Bu faktörün değeri, çalışma sıcaklığına, akışkan hızına ve ısı değıştiricisinin işletmede kaldığı süreye bağlıdır.

Diğer taraftan, çoğu zaman bir akışkana veya her iki akışkana ait yüzeylere eklenen kanatların, yüzey alanını artırdıkları için ısı taşınımında ısıl direnci azalttıkları bilinmektedir. Bu nedenle, kanat ve yüzey kirliliği etkileri göz önüne alındığında, toplam ısı geçiş katsayısı,

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h}$$

$$= \frac{1}{(\eta_o h A)_c} + \frac{R_{f,c}}{(\eta_o A)_c} + R_w + \frac{R_{f,h}}{(\eta_o A)_h} + \frac{1}{(\eta_o h A)_h} \quad (11.1)$$

biçiminde yazılabilir. Burada c ve h indisleri, sırasıyla soğuk ve sıcak akışkanları göstermektedir. Dikkat edilirse, UA çarpımının sıcak veya soğuk yüzeyle ilişkili olduğunu belirtmeye gerek yoktur ($U_c A_c = U_h A_h$). Ancak, $A_c \neq A_h$ ise, $U_c \neq U_h$ olacağı için toplam ısı geçiş katsayısının sıcak ve soğuk taraftaki yüzeylerden hangisine göre hesaplandığını belirtmek gerekir. Isı iletim direnci R_w , düzlemsel cidar için Denklem 3.6'dan, silindirik cidar için Denklem 3.28'den bulunabilir. Her ne kadar Tablo 11.1'de kirlilik faktörleri ile ilgili bazı değerler verilmiş ise de bu faktörler (temiz yüzey üzerine

11.3

Isı Değiştiricisi Çözümlemesi: Ortalama Logaritmik Sıcaklık Farkının Kullanılması

Bir ısı değiştiricisinin tasarımı veya performansının belirlenebilmesi için, ısı değiştiricisindeki toplam ısı geçişi ile akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları, toplam ısı geçiş katsayısı ve ısı geçişi toplam yüzey alanı arasında bir bağıntı bulmak gereklidir. Şekil 11.6 göz önüne alınarak, sıcak ve soğuk akışkanlarda toplam enerji dengesinin yazılması ile iki bağıntı elde edilebilir. Sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki toplam ısı geçişi q ise ve ısı değiştiriciden çevre ortama bir ısı kaybı yoksa, potansiyel ve kinetik enerjilerin göz ardı edilmesi durumunda, enerjinin korunumu, Denklem 1.11a

$$q = \dot{m}_h (i_{h,i} - i_{h,o}) \quad (11.6a)$$

ve

$$q = \dot{m}_c (i_{c,o} - i_{c,i}) \quad (11.7a)$$

bağıntılarını verir. Bu bağıntılarda i akışkan entalpisini gösterirken, h ve c indisleri, sıcak ve soğuk akışkanları, i ve o indisleri ise giriş ve çıkış koşullarını belirtir. Akışkanlarda bir faz değişimi yoksa ve özgül ısıları sabit kabul edilebilirse, bu eşitlikler yerine

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (11.6b)$$

ve

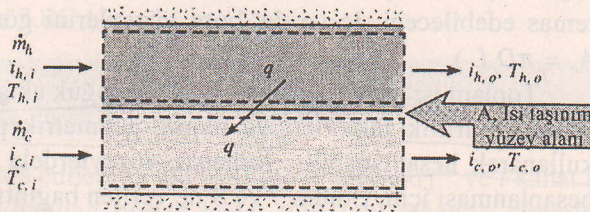
$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (11.7b)$$

yazılabilir. Buradaki sıcaklıklar, belirli konumlardaki ortalama akışkan sıcaklıklarını göstermektedirler. Dikkat edilirse, Denklem 11.6 ve 11.7 ısı değiştiricisinin türünden bağımsızdır.

Diğer bir yararlı bağıntı, sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki

$$\Delta T \equiv T_h - T_c \quad (11.8)$$

sıcaklık farkı ile toplam ısı geçişi q arasında bir ilişki kurularak elde edilebilir. Böyle bir bağıntı, Newton'un soğuma yasasında, ısı taşınım



ŞEKİL 11.6 İki akışkanlı bir ısı değiştiricisinde, sıcak ve soğuk akışkanlar için toplam enerji dengesi.

katsayısı h yerine toplam ısı geçiş katsayısı U 'yu yazarak bulunabilir. Bu durumda, ΔT ısı değiştiricisi içinde değiştiğinden, bu bağıntıyı

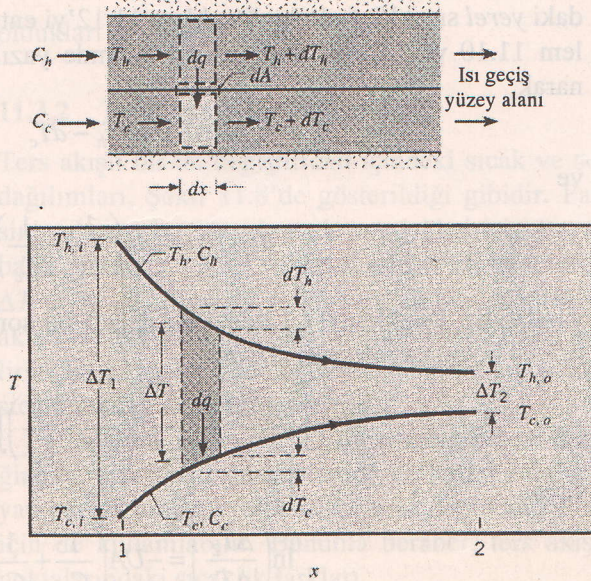
$$q = UA \Delta T_m \quad (11.9)$$

biçiminde yazmak gerekir. Burada ΔT_m uygun bir ortalama sıcaklık farkı anlamındadır. Bir ısı değiştiricisinin çözümlemesinde, Denklem 11.9, Denklem 11.6 ve 11.7 ile birlikte kullanılabilir. Ancak, bu işlemi yapmadan önce, ΔT_m akışkan sıcaklıkları cinsinden elde edilmelidir. İlk olarak paralel akışlı bir ısı değiştiricisi göz önüne alınsın.

11.3.1 Paralel Akışlı Isı Değiştiricisi

Paralel akışlı bir ısı değiştiricisi içindeki sıcak ve soğuk akışkanların sıcaklık dağılımları, Şekil 11.7'de gösterildiği gibidir. Başlangıçta ΔT sıcaklık farkı büyüktür, fakat x arttıkça hızla azalır ve asimtotik olarak sıfıra ulaşır. Böyle bir ısı değiştiricisinde, soğuk akışkanın çıkış sıcaklığının hiçbir zaman sıcak akışkan sıcaklığından daha fazla olamayacağını, burada belirtmekte yarar vardır. Şekil 11.7'de 1 ve 2 indisleri, ısı değiştiricisinin iki zıt ucunu belirlemektedir. Bu gösterim, diğer bütün ısı değiştiricilerinde de kullanılacaktır. Paralel akışlı ısı değiştiricileri için $T_{h,i} = T_{h,1}$, $T_{h,o} = T_{h,2}$, $T_{c,i} = T_{c,1}$ ve $T_{c,o} = T_{c,2}$ olmaktadır.

Sıcak ve soğuk akışkanlardaki diferansiyel hacim elemanlarına enerji korunumunun uygulanması ile ΔT_m ifadesi elde edilebilir. Şekil 11.7'de görüldüğü gibi, her bir elemanın uzunluğu dx ve ısı geçiş yüzey alanı dA değerlerindedir. Enerji korunumu ve daha sonraki çözümlemeler için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.



ŞEKİL 11.7
Paralel akışlı bir ısı değiştiricisinde sıcaklık dağılımları.

1. Isı değiştiricisi çevreye karşı ısıl olarak yalıtılmış olup, ısı geçişi sadece sıcak ve soğuk akışkanlar arasında olmaktadır.
2. Borular boyunca eksenel ısı iletimi gözardı edilmektedir.
3. Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri gözardı edilmektedir.
4. Akışkanların özgül ısıları sabittir.
5. Toplam ısı geçiş katsayısı sabittir.

Gerçekte ısı değiştiricisi içindeki sıcaklık değişimi nedeniyle, özgül ısı değişecektir. Ayrıca akış koşulları ile akışkan özelliklerinin değişimi nedeniyle de toplam ısı geçiş katsayısı bir ölçüde değişecektir. Ancak, birçok ısı değiştiricisi uygulamasında bu değişimler önemsizdir ve $c_{p,c}$, $c_{p,h}$ ve U için ortalama değerler almak, oldukça doğru sonuçlar verir.

Şekil 11.7'deki her bir diferansiyel eleman için enerji dengesi ayrı ayrı yazılırsa,

$$dq = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h \equiv -C_h dT_h \quad (11.10)$$

ve

$$dq = \dot{m}_c c_{p,c} dT_c \equiv C_c dT_c \quad (11.11)$$

eşitlikleri elde edilebilir. Bu eşitliklerde C_h ve C_c , sırasıyla sıcak ve soğuk akışkanların ısı kapasite debilerini göstermektedir. Denklem 11.6b ve 11.7b'de verilen birinci yasa bağıntılarını elde edebilmek için, yukarıdaki denklemlerin ısı değiştiricisi boyunca integrali alınabilir. dA yüzey alanından geçen ısı,

$$dq = U \Delta T dA \quad (11.12)$$

olarak da yazılabilir. Burada $\Delta T = T_h - T_c$, sıcak ve soğuk akışkan arasındaki yerel sıcaklık farkıdır. Denklem 11.12'yi entegre edebilmek için, Denklem 11.10 ve 11.11b, diferansiyel biçimde yazılmış Denklem 11.8'e taşınarak,

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c \quad (11.13)$$

ve

$$d(\Delta T) = -dq \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

yazılabilir. Denklem 11.12'deki dq değeri bu son eşitliğe taşınıp, ısı değiştiricisi boyunca integrali alınır,

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA$$

veya

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (11.13)$$

elde edilir. Denklem 11.6b ve 11.7b'den C_h ve C_c değerleri çekilip, Denklem 11.13'e taşınırsa,

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA \left(\frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{q} + \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{q} \right) \\ = -\frac{UA}{q} [(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})]$$

bulunur. Şekil 11.7'deki paralel akışlı ısı değiştiricisi için $\Delta T_1 = (T_{h,i} - T_{c,i})$ ve $\Delta T_2 = (T_{h,o} - T_{c,o})$ tanımları kullanılırsa,

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

sonucuna ulaşılır. Bu sonuç, Denklem 11.9 ile karşılaştırılırsa, uygun ortalama sıcaklık farkı için ΔT_{lm} ortalama logaritmik sıcaklık farkı tanımı yapılabilir. Bu durumda,

$$q = UA \Delta T_{lm} \quad (11.14)$$

elde edilir. Bu bağtıda,

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (11.15)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Paralel akışlı ısı değiştiricileri için,

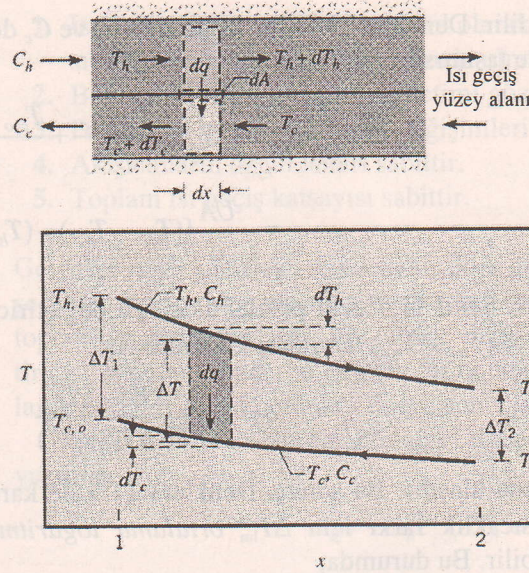
$$\left[\begin{array}{l} \Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,i} \\ \Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,o} \end{array} \right] \quad (11.16)$$

oldukları unutulmamalıdır.

11.3.2 Ters Akışlı Isı Değiştiricisi

Ters akışlı bir ısı değiştiricisi içindeki sıcak ve soğuk akışkanların sıcaklık dağılımları, Şekil 11.8'de gösterildiği gibidir. Paralel akışlı ısı değiştiricisinin aksine, bu düzenlemede, ısı değiştiricisi boyunca sıcaklık farkı ve buna bağlı olarak ısı geçişi yaklaşık eşittir. Bu nedenle, x değişimine göre verilen $\Delta T = T_h - T_c$ sıcaklık farkı, ters akımlı düzenlemede hiçbir yerde, paralel akışlı ısı değiştiricinin giriş bölümündeki kadar büyük değildir. Dikkat edilirse, bu düzenlemede soğuk akışkanın çıkış sıcaklığı, sıcak akışkanın çıkış sıcaklığından daha fazla olabilir.

Denklem 11.6b ve 11.7b herhangi bir ısı değiştiricisine uygulanabildiğinden, ters akışlı düzenlemede de kullanılabilir. Ayrıca, Bölüm 11.3.1'de yapılan çözümlemeye benzer olarak, Denklem 11.14 ve 11.15 bu düzenleme için de kullanılabilir. Bununla beraber, ters akışlı ısı değiştiricilerinin uç noktalarındaki sıcaklık farkları,



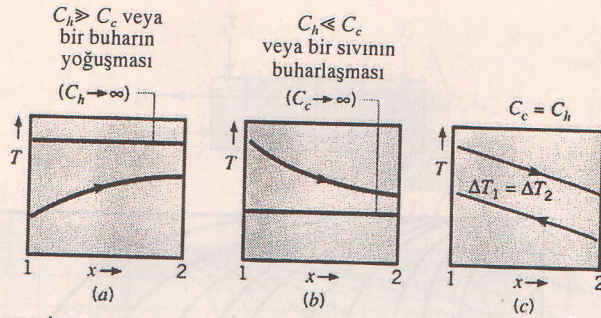
ŞEKİL 11.8 Ters akışlı bir ısı değiştiricisinde sıcaklık dağılımları.

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &\equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 &\equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i} \end{aligned} \quad (11.17)$$

biçiminde tanımlanmalıdır. Dikkat edilirse, aynı giriş ve çıkış sıcaklıkları için, ters akışlı düzenlemede ortalama logaritmik sıcaklık farkı, paralel akışlı düzenlemeden daha büyüktür, $\Delta T_{lm,ters} > \Delta T_{lm,paralel}$. Bu nedenle, aynı U toplam ısı geçiş katsayısı ve belirli bir ısı geçişi q için, ters akışlı ısı değiştiricisinin ısı geçiş alanı, paralel akışlı ısı değiştiricisinden daha küçüktür. Ayrıca, ters akışlı düzenlemede soğuk akışkanın ısı değiştiricisinden çıkış sıcaklığı, $T_{c,o}$ sıcak akışkanın çıkış sıcaklığından $T_{h,o}$ daha fazla olabilir, oysa bu durum paralel akışlı ısı değiştiricilerinde hiçbir zaman olamaz.

11.3.3 Özel Çalışma Koşulları

Burada ısı değiştiricilerinin çalışabileceği bazı özel koşullardan söz etmek yararlı olabilir. Şekil 11.9a'da, $C_h \equiv \dot{m}_h c_{p,h}$ sıcak akışkan ısıl kapasite debisinin, $C_c \equiv \dot{m}_c c_{p,c}$ soğuk akışkan ısıl kapasite debisinden çok büyük olması durumunda, ısı değiştiricisi içindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Bu durumda sıcak akışkanın sıcaklığı, ısı değiştiricisi boyunca yaklaşık olarak sabit kalırken, soğuk akışkanın sıcaklığı artmaktadır. Aynı durum, sıcak akışkanın yoğunlaşması halinde de görülür. Yoğuşma işlemi, sabit sıcaklıkta olur ve uygulamada, $C_h \rightarrow \infty$ alınabilir. Bu işlemin tersi olarak, bir buharlaştırıcıda veya bir buhar kazanında (Şekil 11.9b), soğuk akışkan bir faz değişimine uğrar ve sıcaklığı yaklaşık olarak sabit kalır ($C_c \rightarrow \infty$). Faz değişimi olmamasına rağmen, eğer $C_h \ll C_c$ ise aynı durumla karşılaşılır.



ŞEKİL 11.9 Isı değiştiricisi özel çalışma koşulları. (a) $C_h \gg C_c$ veya bir buharın yoğunlaşması. (b) Bir sıvının buharlaşması veya $C_h \ll C_c$. (c) Isıl kapasite debilerinin eşit olduğu ters akışlı ısı değiştiricisi ($C_h = C_c$).

Dikkat edilirse, yoğunlaşma veya buharlaşma halinde ısı geçişi Denklem 11.6a veya 11.7a ile hesaplanabilir. Üçüncü bir özel durum (Şekil 11.9c), ısı kapasitelerin birbirine eşit olduğu ters akışlı ısı değiştiricisini belirtmektedir. ($C_h = C_c$). Bu durumda, $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_{lm}$ olduğundan, ısı değiştiricisi boyunca ΔT sıcaklık farkı sabittir.

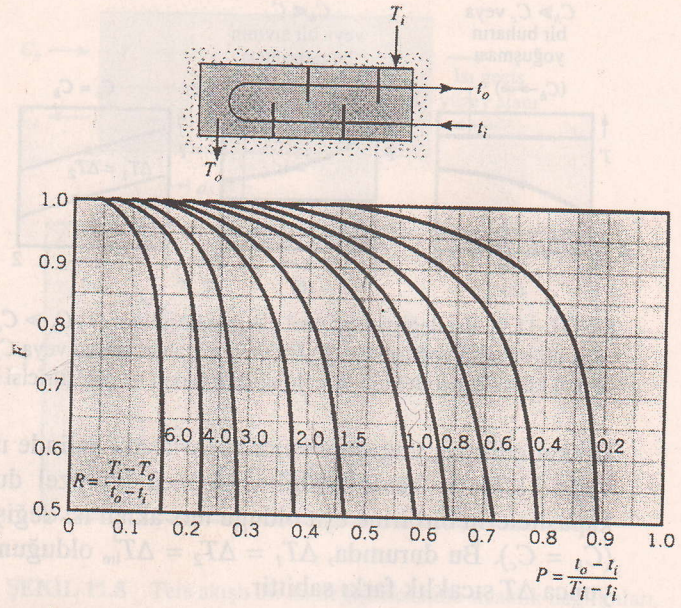
11.3.4 Çok Geçişli ve Çapraz-Akışlı Isı Değiştiricileri

Her ne kadar çok geçişli ve ters akışlı ısı değiştiricilerindeki akışlar çok karmaşık olsa da, ortalama logaritmik sıcaklık farkında

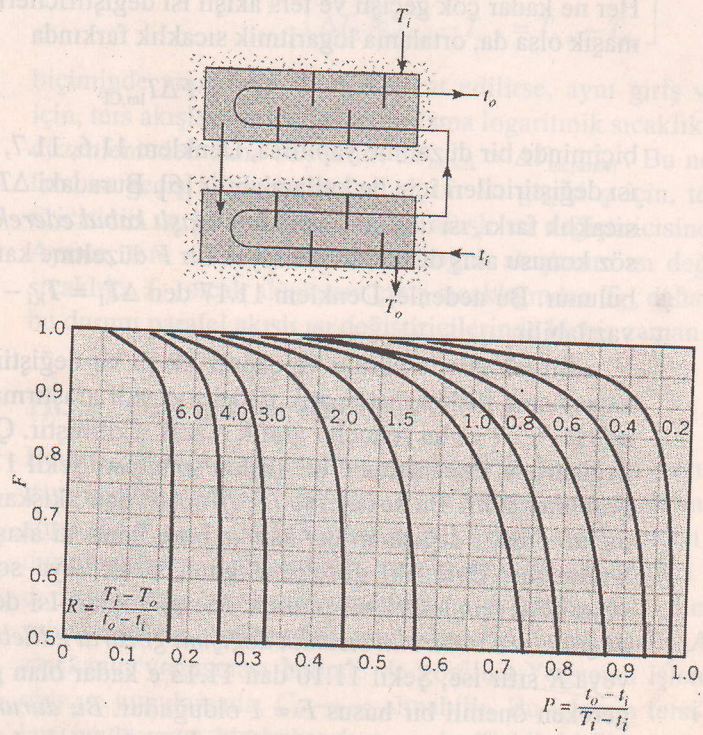
$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CF} \quad (11.18)$$

biçiminde bir düzeltme yapılırsa, Denklem 11.6, 11.7, 11.14 ve 11.15, bu tür ısı değiştiricileri için de kullanılabilir [6]. Buradaki ΔT_{lm} ortalama logaritmik sıcaklık farkı, ısı değiştiricisini *ters akışlı kabul ederek* hesaplanan $\Delta T_{lm,CF}$ ile söz konusu akış düzenini belirleyen bir F düzeltme katsayısının çarpımından bulunur. Bu nedenle, Denklem 11.17'den $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}$ ve $\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$ yazılabilir.

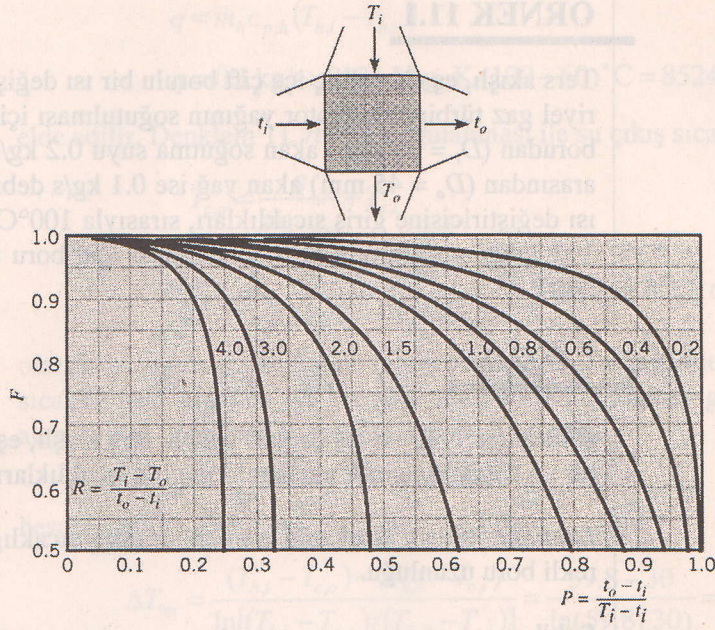
Birçok gövde-borulu ve çapraz akışlı ısı değiştiricisi için, F düzeltme katsayısına ilişkin matematik ifadeler çeşitli araştırmacılar tarafından verilmiş [1, 6, 7] ve bu sonuçlar grafik olarak çizilmiştir. Çok karşılaşılan bazı ısı değiştiricisi düzenlemelerine ilişkin sonuçlar, Şekil 11.10 ile 11.13 arasında görülmektedir. Bu şekillerde (T , t) notasyonu akışkan sıcaklıklarını göstermekte olup, t değişkeni her zaman boru içindeki akışkan sıcaklığı için kullanılmıştır. Buradaki gösterime göre, sıcak veya soğuk akışkanın, gövde veya boru içinden akmasının bir önemi yoktur. Isı değiştiricisi içinde, *eğer akışkanlardan birinin sıcaklık değişimi gözardı edilebilecek düzeyde ya da P veya R sıfır ise*, Şekil 11.10'dan 11.13'e kadar olan grafiklerde belirtilmesi gereken önemli bir husus $F = 1$ olduğudur. *Bu durumda ısı değiştiricisinin davranışı, ısı değiştiricisinin düzenlemesinden bağımsızdır.* Eğer akışkanlardan birinde faz değişimi varsa (buharlaşma veya yoğunlaşma), bu durum gerçekleşir.



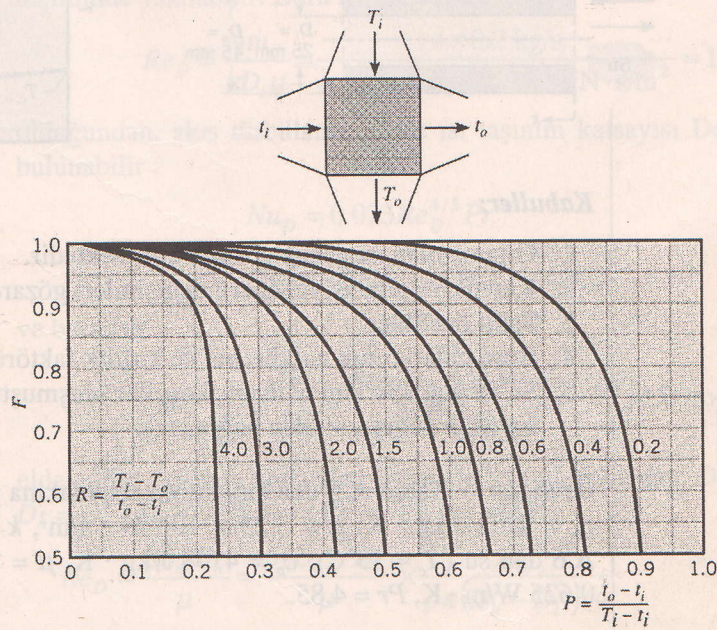
ŞEKİL 11.10 Gövde-borulu bir ısı değiştiricisinde, bir gövde geçişi ve ikinin katları (iki, dört, vb.) boru geçişinin olması durumunda düzeltme katsayısı.



ŞEKİL 11.11 Gövde-borulu bir ısı değiştiricisinde, iki gövde geçişi ve dördün katları (dört, sekiz, vb.) boru geçişinin olması durumunda düzeltme katsayısı.



ŞEKİL 11.12 Her iki akışkanın da karışmadığı, tek-geçişli, çapraz-akışlı bir ısı değiştiricisinde düzeltme katsayısı.



ŞEKİL 11.13 Bir akışkanın karıştığı, diğer akışkanın karışmadığı, tek-geçişli, çapraz-akışlı bir ısı değiştiricisinde düzeltme katsayısı.