

Sıvı Kristal Yöntemiyle İki Silindir Arasındaki Akımda Isı Geçişinin İncelenmesi

Kemal KUVVET, Tahir YAVUZ
KTÜ, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon-TURKEY

Geliş Tarihi: 02.12.1996

Özet: Bu çalışmada, aynı eksenli yatay iki silindirin oluşturduğu halka aralıklarındaki bir akımda iç silindir yüzeyindeki zorlanmış taşınım ile ısı geçişi deneysel olarak incelenmiştir. Sıvı kristal yöntemi kullanılarak, yerel ve ortalama ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir. Deneyler, 0.5, 0.667 ve 0.778 olmak üzere üç farklı çap oranında ve 7000 ile 35000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler literatür değerleriyle karşılaştırılmış ve ortalama Nusselt sayısı için çap oranına ve Reynolds sayısına bağlı olarak deneysel bir bağıntı geliştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Aynı Eksenli İki Silindir Arasındaki Akış, Isı Taşınım Katsayısı, Sıvı Kristal Yöntemi, Isı Değiştiriciler

Study of Heat Transfer in Concentric Annulus Flow by Liquid-Crystal Technique

Abstract: In this, forced convection heat transfer on the inner surface in horizontal concentric annular duct flow was experiments were carried out for three different diameter ratios, 0.5, 0.667 and 0.778 in the Reynolds number range from 7000 to 35000. Experimental data obtained were compared with the data in the literature and the average Nusselt number was correlated as function of diameter ratio and Reynolds numbers.

Key Words: Horizontal Concentric Annular Flow, Heat Transfer Coefficient, Liquid-Crystal Technique, Heat Exchangers.

Giriş

Aynı eksenli yatay iki silindir arasındaki (halka) akım problemleriyle enerji santrallerinde, kimya endüstrisinde, nükleer reaktörlerde, iklimlendirme santrallerinde, soğutma ve ısıtma mekanizmalarında, alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde, endüstri kuruluşlarının atık su ve baca gazlarıyla meydana gelen kayıp enerjinin geri kazanılmasında sıkça karşılaşılmaktadır.

Halka bir pasajda ilk kez Lamb (1982), Navier-Stokes denklemlerini çözüme akım ortamında gelişmiş hız profillerini elde etmiştir. Jakob ve Rees, halka bir pasajda akım problemini aynı anda hidrodinamik ve ısı olarak incelemişlerdir. Reynolds ve arkadaşları (1963) birim hacim elemanı için elde edilen ve enerji korunumunu ifade eden diferansiyel denklem için, iç ve dış yüzeylerin farklı durumlarında, analitik, sayısal ve deneysel çözüm önerileri yapmışlardır. Lumbert ve arkadaşları (1963), bu önerileri dikkate alarak, laminer akım için çözümleri elde etmişlerdir. Kays ve Leung (1963) ise hidrodinamik olarak gelişmiş türbülanslı akımda, halka aralığının iç ve dış yüzeylerinin yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarında, farklı çap oranları ve Prandtl sayıları için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimini belirlemişlerdir. Shumway ve McEligot (1971), akım alanı ve ısı geçişi için akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişimini dikkate alarak akım alanı ve ısı geçişi karakteristiklerini, uygun kabuller

yaparak ve akışkanın fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimlerini de dikkate alarak sayısal olarak incelemişlerdir.

Isı transferi ile ilgili yapılan çalışmalarda ısı taşınım katsayısı (h), farklı deneysel metodlar kullanılarak belirlenebilmektedir. Son yıllarda, özellikle karmaşık sistemlerde ve düzgün olmayan yüzeylerde, kondüksiyon çözüm yönteminin farklı bir uygulama şekli olan sıvı kristal yöntemi sıkça kullanılmaktadır.

İki ergime noktasına sahip olan sıvı kristal bileşimi, ara faz olarak adlandırılan bu iki ergime sıcaklıkları arasında üzerine gelen ışığı, sıcaklığına bağlı olarak farklı renklerde yansıtır. Bu özelliğinden yararlanılarak, sıvı kristal ısı geçişi ile ilgili yapılan çalışmalarda sıcaklık ölçüm elemanı olarak kullanılır. Uygulamalarda sıvı kristal, akışkanın etkisine maruz kalan veya akışkanı sınırlayan yüzeye sürülür. Sıvı kristal sürülü yüzey, sıcak veya soğuk akışkanın etkisine bırakılır. Akışkanla yüzey arasında meydana gelen ısı geçişi nedeniyle yüzey sıcaklığı değişime uğrar. Sıvı kristal, renk gösterim sıcaklığına eriştiğinde, yüzeyde mavi, yeşil, kırmızı gibi renkler ardarda görünür ve belli bir sıcaklık değerinden sonra tekrar renksiz duruma döner. Akım karakteristiklerine ve geometrik şartlara bağlı olarak, oluşan renk bandının akım yönündeki zamanla hareketi bir video kamera ile izlenir. Renk bandının konum ve zaman değerleri kullanılarak, akışkanı

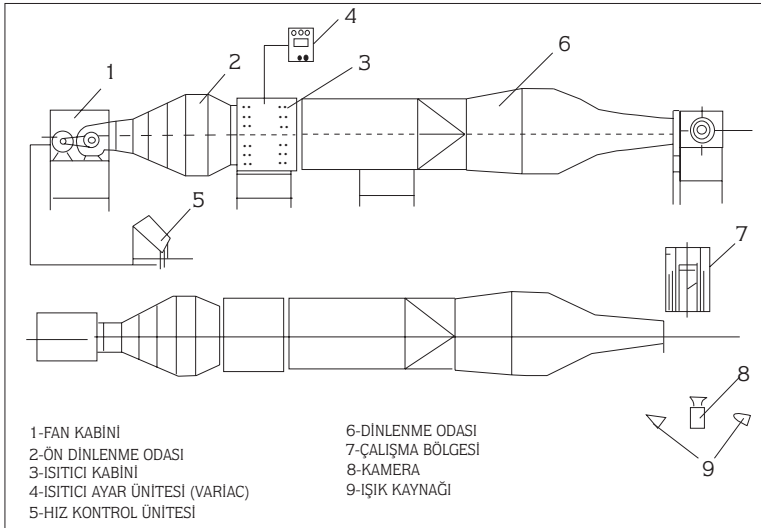
sınırlayan deney elemanındaki ısı geçişini ifade eden difransiyel denklemin sayısal çözümünden, ısı taşınım katsayısı belirlenir.

Sıvı Kristal Metodu

Isı taşınım katsayısının belirlenebilmesi için öncelikle sıvı kristalin kalibre edilmesi gerekir. Farklı tekniklerin kullanıldığı kalibrasyon işleminde öncelikle üniform sıcaklıkta düzgün bir yüzey elde edilir. Bunun için, sıcak su banyosundan yararlanılır ve su banyosunun bir yüzeyi deney düzlemi olarak kullanılır. Su sıcaklığının kısa sürede algılanabilmesi için deney düzlemi kalınlığı çok küçük seçilir ve yüksek ısı iletimli malzemeden imal edilir. Deney düzlemi, sıvı kristal renk geçişlerinin sağlıklı tespit edilebilmesi için mürekkep formunda bir boya ile siyaha boyanır. Deney düzleminin yüzeyine, şeffaf malzemeden imal edilen bir vakum haznesi yerleştirilerek doğal taşınımın kalibrasyona etkisi giderilir. Su banyosu sıcaklığı

değiştirilerek, sıvı kristal sürülü deney düzlemindeki renk oluşumları izlenir ve sıvı kristalin renk-sıcaklık ilişkisi belirlenir, Bilen (1994).

Bu çalışmada kalibrasyon işlemi için su banyosuna girecek boyutlarda ve 1 mm kalınlığında bakır bir plaka deney düzlemi olarak kullanılmıştır. Yüzeyi siyaha boyalı ve sıvı kristal sürülü deney düzlemi, sıcaklığı bakır-konstantan termoeleman çifti ve sayısal göstergeli multimetre aracılığıyla milivolt (mV) olarak okunan su banyosuna daldırılarak kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Su sıcaklığının değişimiyle deney düzlemindeki renk oluşumları izlenerek sıvı kristal renk-sıcaklık ilişkisi belirlenmiştir. Elde edilen sıvı kristal renk-sıcaklık ilişkisi Tablo 1'de gösterilmiştir. Rengin görünmeye başladığı ve sona erdiği sıcaklıkların farkı renk aralığı bu sıcaklıkların aritmetik ortalamasıdır. Deneylerde, en canlı ve en küçük aralığa sahip yeşil renk, ölçüm sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Yeşil renk aralığı 0.8°C'dir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Tablo 1. Sıvı kristal renk-sıcaklık ilişkisi.

Renk	Sıcaklık Sınırları (°C)	Renk Aralığı (°C)	Ortalama Renk Sıcaklığı (°C)
Mavi	45.1÷42.7	2.4	43.9
Yeşil	42.7÷41.9	0.8	42.3
Kırmızı	41.9÷41.0	0.9	41.45

Isı Geçiş Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Deneyler üfleme sıcak rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Fan motorunun devri, hız ayar ünitesi ile kontrol edilerek, farklı debilerde çalışma imkanı sağlanmıştır.

Rüzgar tüneline geçen hava akımı, herbiri 1000 W ısıtma gücüne sahip olan, 24 adet yaprak şeklindeki elektrikli dirençler kullanılarak ısıtılmıştır. Isıtıcıların akışkana vermiş oldukları ısı, 24 kW'lık varyak aracılığıyla kontrol edilmiştir. Dikdörtgen kesitli ısıtıcı kabini ile daire-

sel kesitli dinlenme odasının bağlantısı, geçiş borusu kullanılarak sağlanmıştır.

İki silindirik borunun merkezlenmesi ile elde edilen çalışma bölgesindeki dış boru, ısı taşınım katsayısının belirlenmesinde kullanılan iç borunun (deney elemanının) yüzeyindeki sıvı kristal renk oluşumlarının izlenebilmesi için, şeffaf pleksiglas malzemeden imal edilmiştir.

Deney elemanının yüzeyindeki sıvı kristal renk değişiminin net izlenebilmesi ve sayısal çözüm esnasında kaynaklanabilecek hataları azaltmak için, sıvı kristal sürülür deney elemanın ısı iletim katsayısının küçük olması istenir, Bilen (1994). Bu nedenle deney elemanı olarak da pleksiglas malzeme kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

Çapları farklı iki borunun, içiçe merkezlenmesi ile elde edilen halka akımda yerel ısı taşınım katsayısını belirleyebilmek için, halka geometriyi oluşturan iç borudaki (deney elemanındaki) ısı geçişinden yararlanılmıştır.

Deneylerde, Şekil 2a'da gösterilen çalışma bölgesi bir anda rejime erişmiş sıcak rüzgar tüneli önüne indirilmiştir. Sıcak hava akımı iç silindirin içerisinden ve dışarisından geçerek çalışma bölgesini terk etmiştir. Böylece, T_h sıcaklığındaki akışkan ile başlangıçta ortam sıcaklığında olan deney eleman arasında, iç ve dış yüzeylerinden taşınım ile ısı geçişi olmuştur. Deney elemanının boyu (320 mm), cidar kalınlığı (10 mm) yanında çok büyük olması nedeniyle aksel yöndeki ısı iletimi ihmal edilerek, yüzeylerden taşınım ile geçen ısının deney elemanının iç

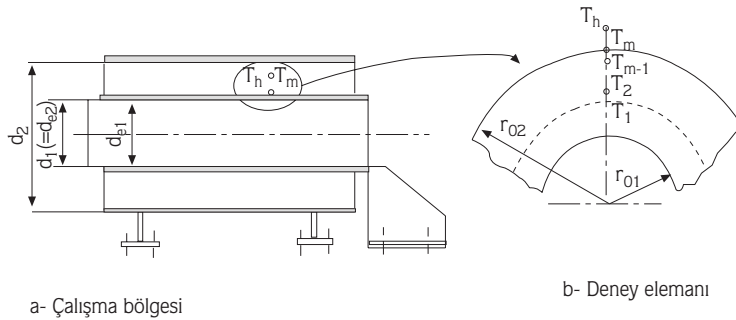
enerjisinde zamanla meydana gelen değişime karşılık geldiği kabulü yapılmıştır. Başlangıçta T_0 ortam sıcaklığındaki deney eleman ile T_h sıcaklığındaki akışkan arasında zamanla meydana gelen ısı geçişini ifade eden diferansiyel denklemin sayısal çözümü, akım doğrultusunda farklı konumlarda deneysel ölçümlerle belirlenen deney elemanın dış yüzey sıcaklığının sıvı kristal yeşil renk sıcaklığına erişme süreleri ve yeşil renk sıcaklığı ($42.3\text{ }^\circ\text{C}$) kullanılarak yapılmış ve halka aralıkta iç silindir yüzeyindeki ısı taşınım katsayıları belirlenmiştir.

Deney elemanında (1) eşitliğiyle ifade edilen ısı geçişi denklemi, (2), (3) ve (4) eşitlikleriyle ifade edilen başlangıç ve sınır koşulları kullanılarak çözülmüştür. Çözümde deney elemanının içinden ve dışından aynı özellikte akışkanın geçmesi ($T(r_{e1}) \cong T(r_{e2})$), deney elemanının cidar kalınlığının ($r_{e2}-r_{e1}$) deney elemanı iç çapına göre (r_{e1}) küçük olması nedeniyle türev sınır koşulu, deney elemanın cidar kalınlığının orta noktasında tanımlanmıştır. Çözümde kullanılan sonlu fark tanımları Şekil 2b'de gösterilmiştir.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (r_{e1}+r_{e2})/2 \leq r \leq r_{e2}, \quad t > 0 \quad (1)$$

$$t=0, \quad (r_{e1}+r_{e2})/2 \leq r \leq r_{e2}, \quad T=T_0 \quad (2)$$

$$r=(r_{e1}+r_{e2})/2, \quad t > 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$



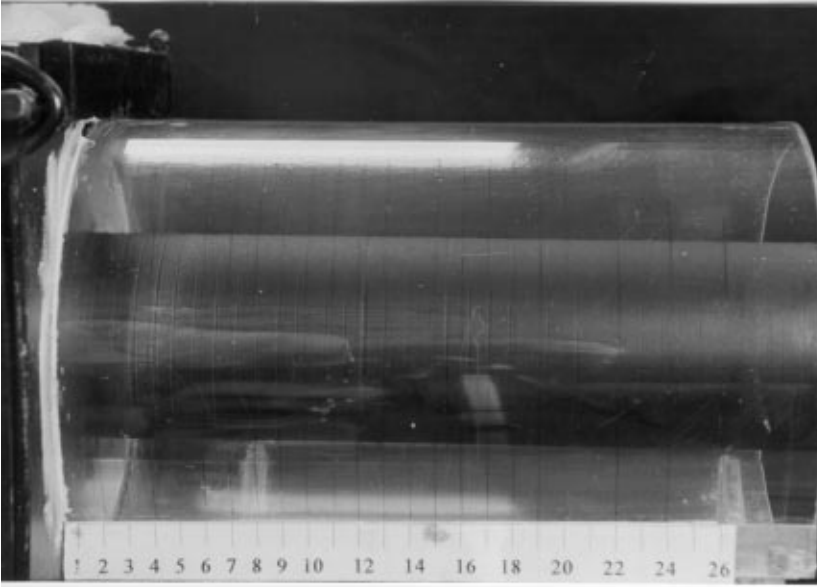
Şekil 2. Problemin şematik gösterimi.

$$r=r_{e2}, \quad t > 0, \quad k \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_h - T_m) \quad (4)$$

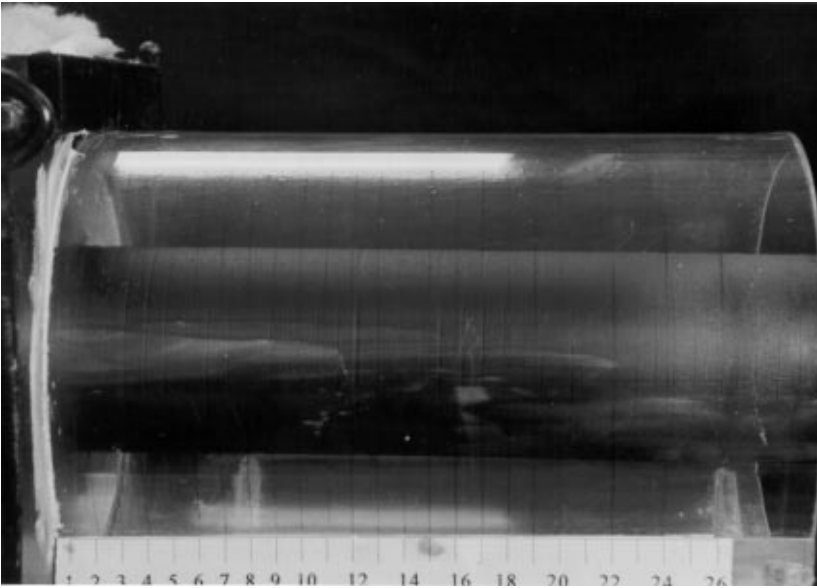
Çözüm için, Crank-Nicolson sonlu fark yöntemi kullanılmıştır. (1) eşitliği ayrıklaştırılarak, düğüm paroyrut başı noktaları için aşağıdaki cebirsel ifadeler elde edilmiştir;

$n=1$ düğüm noktası için;

$$\left(1 + \text{Fo} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_1}\right)\right) T_1^{i+1} - \text{Fo} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_1}\right) T_2^{i+1} = \text{Fo} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_1}\right) (T_2^i - T_1^i) + T_1^i \quad (5)$$



Şekil 3. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=165$ s'deki sıvı kristal renk bandı ($x/d_e=0.333$).



Şekil 4. $d^*=0.5$, $Re=20513$ değerlerinde, $t=364$ s'deki sıvı kristal renk bandı ($x/d_e=2.667$).

$n=2$, $N-1$ düğüm noktaları için;

$$\begin{aligned} & -\frac{Fo}{2} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_n}\right) T_{n-1}^{i+1} + (1+Fo) T_n^{i+1} - \frac{Fo}{2} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_n}\right) T_{n+1}^{i+1} \\ & = \frac{Fo}{2} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_n}\right) T_{n-1}^i + (1-Fo) T_n^i + \frac{Fo}{2} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_n}\right) T_{n+1}^i \end{aligned} \quad (6)$$

$n=N$ düğüm noktası için;

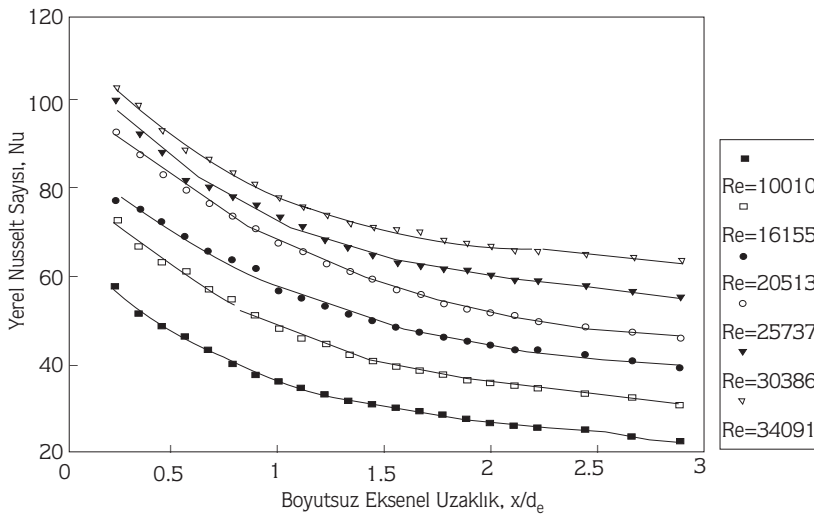
$$\begin{aligned} & -Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_m}\right) T_{m-1}^{i+1} + \left[1 + Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_m} + Bi\right)\right] T_m^{i+1} \\ & = Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_m}\right) T_{m-1}^i + \left[1 - Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_m} + Bi\right)\right] T_m^i + 2FoBiT_h \end{aligned} \quad (7)$$

(5), (6) ve (7) ifadeleri kullanılarak, her bir zaman adımı için m bilinmeyenli, m adet denklem takımı elde edilmiştir. Matris formunda (8) eşitliğiyle ifade edilen bu

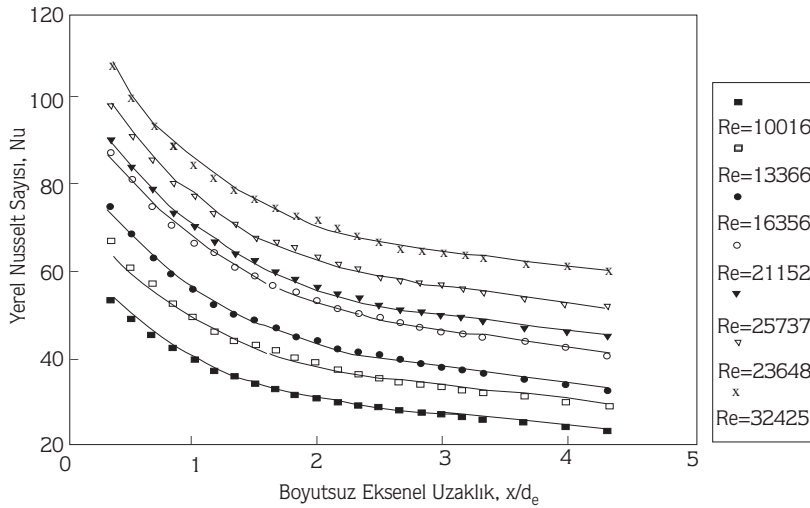
denklemler, Thomas çözüm algoritması kullanılarak deney elemandaki sıcaklık dağılımı belirlenmiştir.

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & a_{m-1} & b_{m-1} & c_{m-1} & \dots \\ \dots & \dots & 0 & a_m & b_m & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_{m-1} \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_{m-1} \\ F_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

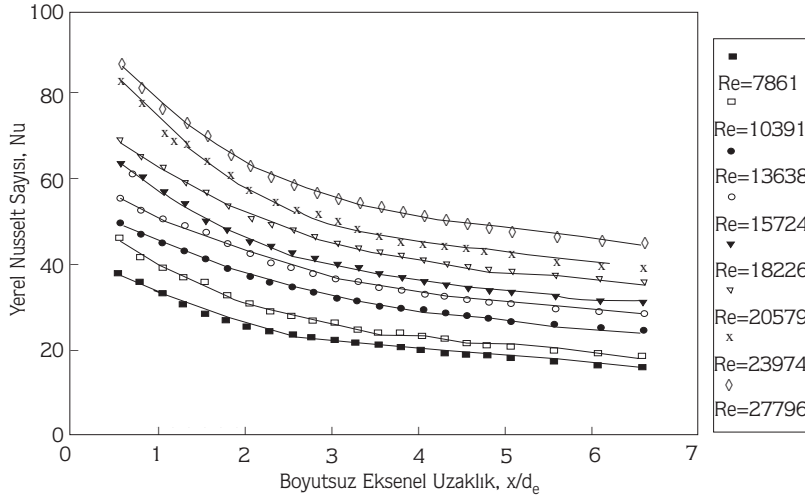
Renk bandının ölçülen her konumunda, başlangıç olarak, küçük bir h değeri seçilerek, deney elemandaki sıcaklık dağılımı hesaplanmış ve hesaplanan yüzey sıcaklığı T_m , sıvı kristalin deneylerde kullanılan yeşil renk sıcaklığı $T_{\text{Yeşil}}$ ile karşılaştırılmıştır. Yüzey sıcaklığı ile yeşil renk sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak ısı taşınım katsayısının değeri artırılarak veya azaltılarak elemandaki sıcaklık dağılımı yeniden hesaplanmıştır. $|T_{\text{Yeşil}} - T_m| \leq 0.01$ hata değerine erişilinceye kadar hesaplar tekrarlanmıştır.



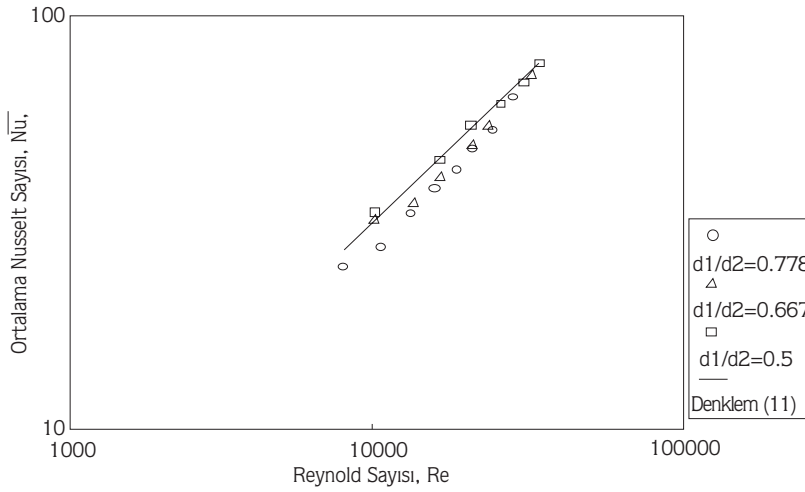
Şekil 5. $d=0.5$ için yerel Nusselt sayılarının değişimi.



Şekil 6. $d=0.667$ için yerel Nusselt sayılarının değişimi.



Şekil 7. $d=0.778$ için yerel Nusselt sayılarının değişimi.



Şekil 8. Farklı çap oranları için ortalama Nusselt sayılarının değişimi.

Elde edilen son h değeri, gerçek ısı taşınım katsayısı olarak belirlenmiştir.

Renk bandının akım yönünde ölçülen her konum-zaman değerlerinde hesaplar tekrarlanarak, yerel ısı taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak;

$$Nu = \frac{h \cdot d_e}{k_a} \quad (9)$$

ifadesiyle yerel Nusselt sayıları elde edilmiştir. Burada k_a , havanın ısı iletim katsayısı olup, atmosfer basıncında ve $T_f = (T_{y_{eş}} + T_h)/2$ şeklinde tanımlanan film sıcaklığındaki değeri alınmıştır.

Bulgular

Elde edilen sonuçlar, öncelikle yerel Nusselt sayılarının (Nu) dağılımı şeklinde gösterilmiştir. Farklı Re değerlerinde elde edilen yerel Nu değerleri kullanılarak, ortalama Nusselt sayılarının (\bar{Nu}) değişimleri verilmiştir.

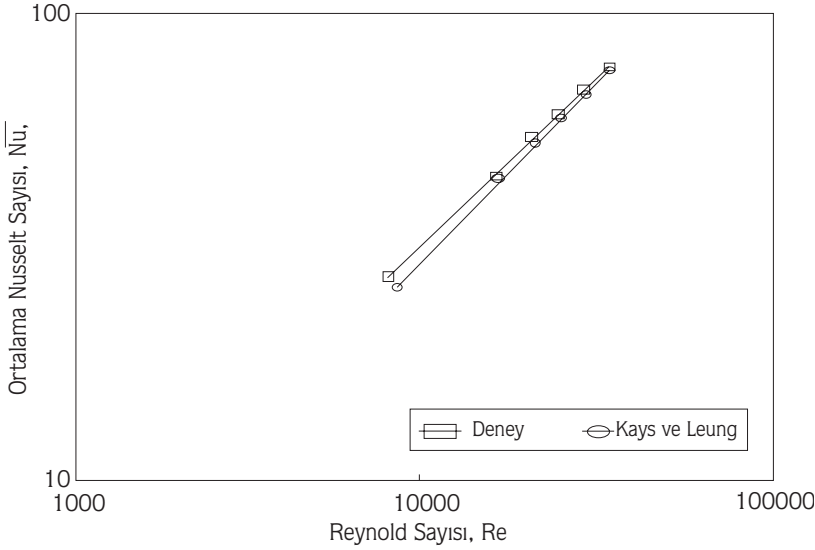
Deneyler 0.5, 0.667 ve 0.778 çap oranlarında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Reynolds sayısının (Re) 7000÷35000 değerleri arasında, 60 (± 0.5) °C hava sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ($Pr=0.7$). Farklı Re değerlerinde ölçülen yerel Nusselt sayılarının dağılımı, boyutsuz eksenel uzaklığa (x/d_e) göre verilmiştir. Burada d_e , hidrolik çap olup, $d_e = d_1 - d_2$ şeklinde ifade edilmiştir.

Isı taşınım katsayılarının hesaplanmasında, deneysel veri olarak bilgisayar programına girilen ve deneyler esnasında video kamerayı kayıt edilen sıvı kristal renginin,

Reynolds sayısının 20513 değeri için konum ve zaman ilişkisi, Şekil 3. ve Şekil 4.'de fotoğraflarla gösterilmiştir. 0.5 çap oranında yerel Nusselt sayılarının değişimi Şekil 5.'de 0.667 çap oranındaki yerel Nusselt sayılarının değişimi Şekil 6.'da ve 0.778 çap oranındaki yerel Nusselt sayılarının değişimi Şekil 7.'de gösterilmiştir.

Nusselt sayısının yerel değerleri kullanılarak, ortalama Nusselt sayısı;

$$\overline{Nu} = \frac{1}{\overline{x}_n - \overline{x}_1} \int_{\overline{x}_1}^{\overline{x}_n} Nu(\overline{x}) d\overline{x} \quad (10)$$



Şekil 9. 0.5 çap oranı için ortalama Nusselt sayısının literatür değerlerle karşılaştırılması.

ifadesiyle hesaplanmıştır. Farklı çap oranları için elde edilen Nu değerlerinin Re ile değişimi, Şekil 8.'de verilmiştir. 0.5 çap oranı için elde edilen Nu ile Kays ve Leung'in (1963) türbülanslı akımda, iç ve dış silindirin yalıtımsız durumlarında elde ettikleri değerlerle birlikte Şekil 9.'da gösterilmiştir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, 0.5, 0.667 ve 0.778 çap oranlı aynı eksenli iki silindir arasında oluşan halka aralıklar için $7000 < Re < 35000$ Reynolds değerlerinde, iç silindir yüzeyindeki ısı geçiş karakteristiklerinin değişimi, sıvı kristal yöntemi kullanarak incelenmiştir. Şekil 5-7'de görüldüğü gibi, yerel Nusselt sayılarının akım yönünde logaritmik olarak azaldığı, Re sayısının artan değerlerinde ise Nusselt sayılarının değerleri artarak, değişimin şeklini koruduğu görülmüştür.

Şekil 8'de görüldüğü gibi ortalama Nusselt sayısı değerlerinin çap oranı küçüldükçe, başka bir ifadeyle halka akım aralığı büyüdükçe arttığı görülmüştür. Şekil 9.'dan görüldüğü gibi sonuçlar literatürle iyi bir uyum göstermiştir.

Aynı eksenli iki silindir arasındaki halka akımda ortalama Nusselt sayısı (Nu) için, elde edilen veriler kullanılarak en küçük kareler yöntemi yardımıyla;

$$\overline{Nu} = 0.04118 Re^{0.71864} Pr^{0.42} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-0.24466} \quad (11)$$

deneySEL bağıntı elde edilmiştir. Burada $Pr=0.7$ sabit olup, $Pr^{0.42}$ ifadesi, Stephan'ın (Dağsöz, 1989) ısı yalıtımsız durum için vermiş olduğu eşitlik dikkate alınarak kabul yapılmıştır.

Sembol Listesi

- Bi : Biot sayısı,
- C_p : Havanın sabit basınçtaki özgül ısısı
- d_1 : İç silindir dış çapı ($=d_{e1}$)
- d_2 : Dış silindir iç çapı
- d_e : Hidrolik çap (eşdeğer çap), d_2-d_1
- d_{e1} : Deney elemanı iç çapı

d_{e2}	: Denev elemanı dış çapı
Fo	: Fourier sayısı,
h	: Isı taşıınım katsayısı
k	: Denev elemanın ısı iletim katsayısı
k_a	: Akışkanın ısı iletim katsayısı
Nu	: Nusselt sayısı, h. d_e/k_a
\overline{Nu}	: Ortalama Nusselt sayısı
Pr	: Prandtl sayısı,
r	: Çapsal koordinat
Re	: Reynolds sayısı,
t	: Zaman
T_0	: Denev elemanın başlangıç sıcaklığı (çevre sıcaklığı)

T_f	: Film sıcaklığı,
T_h	: Akışkan sıcaklığı
T_m	: Denev elemanın yüzey sıcaklığı
$T_{\text{Yeş}}$: Sıvı kristal yeşil renk sıcaklığı
\overline{V}	: Halka aralıktaki ortalama akış hızı
\overline{x}	: Boyutsuz aksnel uzaklık, x/d_e
α	: Isı yayılım katsayısı
Δr	: Test elemanda, sonlu fark çözümünde kullanılan radyal yöndeki düğüm noktası aralığı
Δt	: Zaman adım miktarı
μ	: Havanın dinamik viskozitesi
ν	: Havanın kinematik viskozitesi

Kaynaklar

Akino, N., Kunugi, T., Ichimiya, K., Mitsushiro, K. ve Ueda, M., "Improved Liquid-Crystal Thermometry Excluding Human Color Sensation", Transactions of the ASME-Journal of Heat Transfer, 111, 558-565, 1989.

Bilen, K., Isıtılan Düzlem Bir Plakaya Dik ve Eğik Hava Jeti Çarpmasında Isı Transfer Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.

Dağsöz, A.K., Isı Geçişi, Dördüncü Baskı, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul, 1989.

Kays, W.M. ve Leung, E.Y., "Heat Transfer in Annular Passages. Hydrodynamically Developed Turbulent Flow with Arbitrarily Prescribed Heat Flux", International Journal of Heat and Mass Transfer, 6, 537-557, 1963.

Lamb, H., Hydrodynamiccs, Sixth Edition, Dover Publication, Dover Publications, New York, 1982.

Lundberg, R.E., Mccuen, P.A. ve Reynolds, W.C., "Heat Transfer in Annular Passages. Hydrodynamically Developed Laminar Flow With Arbitrarily Prescribed Wall Temperatures or Heat Fluxes", International Journal of Heat and Mass Transfer, 6, 495-529, 1963.

Reynolds, W.C., Lundberg, R.E. ve Mccuen, P.A., "Heat Transfer in Annular Passages. General Formulation of The Problem for Arbitrarily Prescribed Wall Temperatures or Heat Fluxes", International Journal of Heat and Mass Transfer, 6, 483-493, 1963.

Shumway, R.W. ve McEligot, D.C., Heated Laminar Gas Flow in Annuli with Temperatur-Dependent Transport Properties, Nuclear Science and Engineering, 46, 394-407, 1971.

Yavuz, T. ve Özkılıç, S., Annular Bir Boru İçerisinde Akım Alanı ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Nümerik Analizi, Isı Bilimi ve Tekniğı 6. Ulusal Kongresi, Ankara, Bildiriler Kıtabı, 192-201, 1987.