DÜŞEY KANALLARDA TÜRBÜLANSLI AKIŞTA SERBEST KONVEKSİYONUN ZORLANMIŞ KONVEKSİYONA ETKİSİ

Orhan BÜYÜKALACA
Çukurova Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 01330 ADANA

ÖZET

Bu çalışmada, ısıtılmış bir borudan suyun yukarıya ve aşağıya doğru türbülanslı akışında birleşik konveksiyonda ısı transferi deneysel olarak araştırılmıştır. Her iki durum için elde edilen ısı transferi katsayıları, birbirleriyle ve saf zorlanmış konveksiyon için geçerli olan bir eşitlik ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca birleşik konveksiyonda ısı transferi katsayısı için eşitlikler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Isı transferi, Birleşik konveksiyon, Kaldırma kuvvetleri

GİRİŞ

Literatürde mevcut, türbülanslı akışta zorlanmış konveksiyon için geliştirilmiş eşitlikler ancak akış debisinin yeterince büyük ve ısı akım şiddetinin yeterince küçük olduğu ısı transferi problemlerinde güvenle kullanılabilirler. Tersi koşullarda bu eşitliklerin kullanımı kabül edilemeyecek oranlarda hatalara sebep olabilir. Bunun nedeni ise akım alanı içerisinde sıcaklık farkından ortaya çıkan yoğunluk değişimi ve buna bağlı olarak oluşan kaldırma kuvvetlerinin ısı transferini etkilemesidir. Bu durumda serbest konveksiyonun etkisi de dikkate alınmalıdır. Serbest konveksiyonun zorlanmış konveksiyon yanında ihmal edilemiyeceği ısı transferi problemlerine birleşik konveksiyon adı verilmektedir.

Düşey kanallarda serbest konveksiyonun ısı transferine etkisi, serbest konveksiyonun zorlanmış akışla aynı veya zıt yönde olmasına göre değişmektedir. Birinci durum ısıtılmış kanallarda yukarıya doğru akış veya soğutulmuş kanallarda aşağıya doğru akışta, ikincisi ise ısıtılmış kanallarda aşağıya doğru akış veya soğutulmuş kanallarda yukarıya doğru akışta meydana gelir. Ayrıca akış türü de (laminar veya türbülanslı) bir diğer belirleyici unsurdur. Birleşik konveksiyonda ısı transferi katsayısı genellikle aynı akım koşullarında kaldırma kuvvetlerinin

etkisinin ihmal edilmesi durumunda elde edilecek olan saf zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayısı temel alınarak verilir ($Nu = C \times Nu_0$). C kaldırma kuvvetlerinin ısı transferine etkisini dikkate alan bir çarpan olup Re, Gr ve Pr sayılarının bir fonksiyonudur.

Düşey kanallarda, türbülanslı akışta, zorlanmış ve serbest konveksiyon arasındaki etkileşim çok sayıda araştırmaya konu olmuştur [1]. [2-7] serbest konveksiyonun zorlanmış akışla zıt yönde, [6-11] ise aynı yönde olması durumunda deneyler yapmışlardır. Aynı konu teorik-sayısal olarak ta bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardan şu ortak sonucu çıkarmak mümkündür : Serbest konveksiyon zorlanmış akışla zıt yönde ise ısı transferi saf zorlanmış konveksiyon halinde hesaplanan ısı transferi katsayısına göre daima daha iyi olmakta, tersi durumda ise kaldırma kuvvetlerinin büyüklüğüne göre daha kötü veya daha iyi olabilmektedir. Ayrıca son durumda, ısı transferi katsayısında ve cidar sıcaklıklarında belirli eksenel mesafelerde ani düşmeler ve ani artışlar oluşmaktadır. Bu araştırmaların bazılarında birleşik konveksiyonda ısı transferi katsayısının hesabı için eşitlikler önerilmekle birlikte bu eşitlikler genel (ve bazıları kullanışlı) değildir.

Pratik açıdan serbest konveksiyonun hangi şartlarda ihmal edilip hangi şartlarda ihmal edilemeyeceğinin ve eğer serbest konveksiyon etkisi ihmal edilemeyecek düzeyde ise, bu etkinin ne yönde ve ne oranda olduğunun belirlenmesi önemlidir. Bu çalışmada kaldırma kuvvetlerinin hem zorlanmış akışla zıt yönde hem de aynı yönde olması durumlarında yani ısıtılmış, düşey bir boru içerisinde aşağıya ve yukarıya doğru türbülanslı akışta ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir.

DENEY DÜZENEĞİ

Bu çalışmada sunulan sonuçlar, Şekil 1 de şematik resmi görülen deney düzeneği kullanılarak elde edilmiştir. Deney düzeneğinin ana elemanı iç ve dış çapları sırasıyla 98.3 mm ve 101.6 mm, uzunluğu 5.2 m olan paslanmaz çelikten imal edilmiş bir borudur. Üst depodan sırasıyla test borusu, debi kontrol valfi ve debi ölçerden geçen su alt depoya gelir. Buradan da tekrar üst depoya pompalanır. Bir bilgisayar yardımıyla hem debi kontrol valfi kontrol edilmiş hem de debi ölçer sinyalleri okunmuştur. Test borusunun merkezi 2.5 m uzunluğundaki kısmı alternatif elektrik akımı yardımıyla doğrudan ısıtılmıştır. Test borusundan geçen elektrik akımı ve ısıtılmış kısım boyunca meydana gelen voltaj düşümü ölçülerek ısı akım şiddeti hesaplanmıştır. Test borusunun dış yüzeyine 100 mm aralıklarla kaynatılan ısıl eleman çiftleri yardımı ile boru cidar sıcaklıkları, boru içerisine yerleştirilen problar yardımı ile de test borusuna giriş ve çıkışta suyun sıcaklıkları ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümü için kullanılan bütün ısıl elemanlar mineral yalıtımlı kromel-alümel ısıl elemanlardır. Isıl eleman elektromotor kuvvetleri ikinci bir bilgisayar

tarafından kontrol edilen veri toplama sistemi yardımıyla ölçülmüştür.

Deneylerde 3 ana değişkenden ikisi, ısı akım şiddeti ve su akış debisi sistematik olarak değiştirilmiştir. Üçüncü parametre, su giriş sıcaklığı ise bütün deneylerde 20±0.1 °C de sabit tutulmuştur. Deneyler iki gurup halinde yapılmıştır. İlk gurup deneylerde su debisi sabit tutulmuş (Re_g = $1.6x10^4$), ısı akım şiddeti herbir deneyde değiştirilmiştir ($0.27x10^4$ W/m^2 ile $1.5x10^4$ W/m^2 arasında). İkinci gurup deneylerde ise ısı akım şiddeti sabit tutulurken (q_d = $1.5x10^4$ W/m^2), debi deneyden deneye değiştirilmiştir. Bu durumda, Re_g $0.25x10^4$ ile $2.5x10^4$ arasında değişmiştir. Her deney en az 3 defa suyun hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarıya akışı için tekrarlanmıştır.

DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Isı akım şiddetini sabit tutup ($1.5x10^4$ W/m^2), debiyi değiştirmenin boru cidar sıcaklığı üzerine etkisi Şekil 2 de gösterilmiştir. Şekilde ayrıca hesaplanan ortalama akışkan sıcaklık değerleri de verilmiş olup Şekil 2-a dan Şekil 2-e ye gidildikce debi azalmaktadır. Yüksek debi durumunda (Şekil 2-a), her iki akış yönü için ölçülen sıcaklıklar arasında dikkate değer bir fark yoktur. Debinin azalmasıyla profiller önce birbirlerinden ayrılırken (Şekil 2-b) daha sonra tekrar yaklaşırlar (Şekil 2-d). Şekil 2-e den de görülebileceği gibi en düşük debide giriş bölgesi hariç ($x/d < 5$) her iki profil tekrar üst üste gelir. Şekillerden bütün debilerde aşağıya doğru akışta duvar sıcaklığı profillerinin düzgün olduğu, yukarıya doğru akışta ise sıcaklık tepelerinin oluştuğu ve bu tepelerin debinin azalması ile giriş bölgesine doğru kaydığı görülmektedir.

Şekil 3 te ise, Şekil 2 de verilen sıcaklık profillerine karşılık gelen ısı transferi katsayıları gösterilmiştir. Şekilde ayrıca aynı akım koşullarında (Re ve Pr eşit) Petukhov-Kirillov eşitliğinden hesaplanan saf zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayıları da verilmiştir. Ancak kaldırma kuvvetlerinin etkisinin ihmal edilebileceği koşullarda yapılan deney sonuçları ile Petukhov-Kirillov eşitliğinin karşılaştırılması sonucunda, bu eşitliğin %4 daha büyük değerler verdiği görülmüştür. Bu nedenle zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayıları Petukhov-Kirillov eşitliğinin verdiği değerin 0.96 ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir.

Yüksek debi koşullarında, ilk 5 çap mesafesinden sonra aşağıya doğru akış, yukarıya doğru akış ve Petukhov-Kirillov eşitliğinden elde edilen ısı transferi katsayıları arasında çok iyi bir uyum vardır (Şekil 3-a). Debinin azalmasıyla büyüyen kaldırma kuvvetleri ısı transferini yukarıya ve aşağıya doğru akışta farklı şekillerde etkilerler : Aşağıya doğru akışta, kaldırma kuvvetlerinin ısı transferine, daima aynı koşullardaki zorlanmış konveksiyon ısı transferine göre iyileştirici yönde bir etkisinin olduğu Şekil 3 ten açıkca görülmektedir. Debi küçüldükce ikisi arasındaki fark büyümektedir. Yukarıya doğru akışta ise durum biraz daha karmaşıktır. Debinin

azalmasıyla birleşik konveksiyondaki ısı transferi zorlanmış konveksiyona göre kötüleşmektedir (Şekil 3-b). Yukarıya doğru akışta, akış gelişimi karmaşık bir yapıya sahip olduğundan ısı transferi katsayısı boru ekseni boyunca değişmekte ve belirli eksenel mesafelerde minimumlar oluşmaktadır. Debinin daha da azalmasıyla bu kötüleşme durmaktadır. Birleşik konveksiyon ısı transferi katsayısı önce zorlanmış konveksiyon ısı transferi katsayısını yakalamakta (Şekil 3-c) daha sonra ise onu geçerek (Şekil 3-d) aşağıya doğru akışta bulunan değerlerle ilk 5 çap mesafesinden sonra hemen hemen aynı olmaktadır (Şekil 3-e). Kaldırma kuvvetlerinin büyük olduğu bu bölgede ısı transferinde serbest konveksiyon belirleyici olmaktadır.

1. gurup deneylerden de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Debinin sabit tutulup ısı akım şiddetinin arttırılması durumunda da kaldırma kuvvetleri büyüyerek ısı transferini yukarıda verilen şekilde etkilemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, debinin azalması veya ısı akım şiddetinin artması halinde ısı transferinde serbest konveksiyon etkisinin ihmal edilemeyecek mertebede olduğunu ve hatta tamamen belirleyici olabileceğini göstermektedir. Bu etkiyi sayısal olarak ortaya koyabilmek için serbest konveksiyonun büyüklüğünü ifade eden karakteristik büyüklüğün (Gr veya Ra) zorlanmış akışın büyüklüğünü ifade eden karakteristik büyüklüğe (Re) oranına bakmak gerekir. Bu oran genellikle Gr/Re^a, Gr/Re^aPr^b veya $GrPr/Re^a$ şeklinde ifade edilmiştir. Bu parametreler [12] tarafından ısı transferi verisini ilişkilendirmesi açısından, kaldırma kuvvetlerinin zorlanmış akışla zıt yönde olması durumu için test edilmiş ve bunlardan bazılarının diğerlerine göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarını kullanarak, tüm eksenel mesafelerden elde edilen ısı transferi katsayılarının saf zorlanmış konveksiyon halinde hesaplanan ısı transferi katsayılarına oranının $Gr/Re^{3.425}Pr^{0.8}$ parametresiyle değişimi Şekil-4 te verilmiştir. Bu parametre aşağıya doğru akışta başarılı olurken, ısı transferi katsayısında görülen eksenel mesafe ile değişmeyi dikkate alacak bir büyüklük içermediğinden yukarıya doğru akışta elde edilen veriyi iyi ilişkilendirememektedir. Ancak literatürde de bu etkiyi dikkate alan bir parametreye rastlanmamıştır. Her iki akışta da $Gr/Re^{3.425}Pr^{0.8} < 1x10^{-6}$ olması halinde serbest konveksiyonun etkisi ihmal edilebilir mertebededir. Bu parametrenin büyümesiyle aşağıya doğru akış durumunda ısı transferi zorlanmış konveksiyona göre daima artarken, yukarıya doğru akışta önce bir azalma ve bunu bir artmanın takip ettiği görülür. En kötü durumda azalma oranı %50 olabilmektedir. Parametrenin daha büyük değerlerinde ($Gr/Re^{3.425}Pr^{0.8} > 1x10^{-1}$) ise yukarıya ve aşağıya doğru akış arasında bir fark kalmamaktadır. Bu bölgede ısı transferinde serbest konveksiyon etkili olup, ısı transferi katsayısı saf zorlanmış konveksiyon halinde hesaplanan ısı transferi katsayısının üç katından daha büyüktür. Isı transferi katsayısının bu şekildeki değişimi literatürde mevcut verilerle iyi bir uyum içerisindedir.

Şekil 4-a ve 4-b de ayrıca [13] ün modelinden yola çıkılarak üretilen

$$Nu/Nu_0 = \left[\left| 1 + s\,(Gr/Re^{3.425}\,Pr^{0.8})\,(Nu/Nu_0)^{-2} \right| \right]^{0.46} \qquad (1)$$

eşitliğinden elde edilen değerler de gösterilmiştir. Bu eşitlikte artı işareti aşağıya, eksi işareti ise yukarıya doğru akış için geçerlidir. Modelden s sabitesi 8.3×10^{4} olarak ortaya çıkmakla birlikte, (1) eşitliğinin bu çalışmada elde edilen veriyi s'nin 7.5×10^{4} olması durumunda en iyi temsil ettiği görülmüştür. Aşağıya doğru akış durumunda eşitlikle deneysel sonuçlar arasındaki uyum oldukca iyidir (Şekil 4-b). Yukarıya doğru akış durumunda ise eşitlik Nu/Nu_0'ın parametre ile değişimini genel olarak ifade etmekle birlikte sayısal olarak farklar mevcuttur (Şekil 4-a). Bunun sebebi ise deneylerden elde edilen Nu/Nu_0 oranı eksenel mesafe ile değişirken eşitlikte bu değişimi ifade edecek bir terimin bulunmamasıdır. Literatürde Nu/Nu_0'ın eksenel mesafe ile değişimini dikkate alan iki araştırma [8, 9] bulunmakla birlikte, bu eşitliklerin mevcut verilerden çok farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Yukarıya doğru akışta ısı transferini eşitlikle ifade etmekteki zorluktan dolayı bazı araştırmacılar en kötü durum için yani ısı transferi katsayısının en küçük olduğu eksenel mesafelerdeki ısı transferi katsayıları için eşitlikler elde etme yoluna gitmişlerdir. Bu çalışmanın verileri ile, en düşük ısı transferi katsayısı için

$$Nu_{cd} / Nu_0 = 17 \left(Gr / Re^{3.425} Pr^{0.8}\right)^{0.28} \qquad (2)$$

ve bu en düşük ısı transferi katsayısının oluştuğu eksenel mesafeler için

$$x_t / d = 0.062 \left(Gr / Re^{3.425} Pr^{0.8}\right)^{-0.52} \qquad (3)$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlikler [6] tarafından bulunan eşitlikler ile çok iyi bir uyum içerisindedir.

Birleşik konveksiyonda ısı transferinin zorlanmış konveksiyondan farklı olmasının sebebi kaldırma kuvvetlerinin akım alanında meydana getirdiği değişikliklerdir. Bunlardan birincisi akışın hız profilinde ikincisi ve daha önemlisi de kayma gerilmesi profilinde meydana gelen değişmelerdir. Aşağıya doğru akışta kaldırma kuvvetleri boru cidarı bölgesinde kayma gerilmesinin artmasına buna bağlı olarak ta türbülans üretiminin ve sonuçta ısı transferinin iyileşmesine sebep olurlar. Yukarıya doğru akışta ise durum biraz daha karmaşıktır. Kaldırma kuvvetlerinin oluşmasıyla kayma gerilmesi küçülür bunu da türbülans üretiminin ve ısı transferinin azalması takip eder. Daha büyük kaldırma kuvvetlerinin ortaya çıkması ile boru ekseni bölgesinde kayma gerilmesi önce sıfır daha sonrada negatif işaret alarak tekrar büyümeye başlar. Bu durumda ısı transferinde tekrar iyileşme görülür. Eğer kaldırma kuvvetleri artmaya devam ederse, ters yönde büyüyen kayma gerilmesinden dolayı ısı transferi artmaya devam ederek saf zorlanmış konveksiyondan daha yüksek değerlere ulaşır.

SONUÇ

Aşağıya doğru akışta, birleşik konveksiyonda ısı transferi katsayısı saf zorlanmış konveksiyon halinde hesaplanan ısı transferi katsayısına göre daima daha yüksek olmakta ve bu durumda ısı

transferi katsayısı Eşitlik (1) ile hesaplanabilmektedir. Yukarıya doğru akışta ise serbest konveksiyonun büyüklüğüne göre önce bir azalma daha sonra ise iyileşme gözlenmekte ve bu durumda Eşitlik (1) ısı transferi katsayısını yaklaşık olarak vermektedir. Ayrıca yukarıya akış durumunda cidar sıcaklığında ve ısı transferi katsayısında belirli eksenel mesafelerde tepeler ve çukurlar oluşmaktadır. Bu mesafe ve bu noktalardaki ısı transferi katsayıları sırasıyla (3) ve (2) numaralı eşitliklerden hesaplanabilir.

SEMBOLLER

d	: Boru çapı	*Alt İndisler*	
Gr	: Grashof sayısı [$=(g\beta d^4q)/(k\nu^2)$]	ed	: en düşük
Nu	: Nusselt sayısı	g	: boru girişinde
Pr	: Prandtl sayısı	t	: tepe
q	: Isı akım şiddeti	0	: zorlanmış konveksiyon
Re	: Reynolds sayısı		
T	: Sıcaklık		
x	: Isıtma başlangıcından ölçülen eksenel mesafe		

KAYNAKLAR

[1] Jackson, J.D., Cotton, M.A. ve Axcell B.P., "Studies of Mixed Convection in Vertical Tubes", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 10 (1), 2-15, 1989.

[2] Jackson, J.D. ve Fewster, J., "Enhancement of Turbulent Heat Transfer Due to Buoyancy for Downward Flow of Water in Vertical Tubes", Heat Transfer and Turbulent Bouyant Convection, (Ed : Spalding, D.B. and Afgan, N.), Hemisphere Publishing Co., Washington D.C., 1977.

[3] Swanson, L.W., "Mixed Turbulent Convective Heat Transfer in Vertical Ducts", Doktora tezi, California University, 1987.

[4] Axcell, B.P. ve Hall, W.B., "Mixed Convection to Air in a Vertical Pipe", Proc. of 6th Int. Heat Transfer Conference, paper MC-7, 1978.

[5] Easby, J.P., "The Effect of Buoyancy on Flow and Heat Transfer for a Gas Passing Down a Vertical Pipe at Low Reynolds Numbers", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 21, 1978.

[6] Rouai, N.M., "Influences of Buoyancy and Imposed Flow Transients on Turbulent Convective Heat Transfer in a Tube", Doktora tezi, University of Manchester, 1987.

[7] Herbert, L.S. ve Sterns, U.J., "Heat Transfer in Vertical Tubes-Interaction of Forced and Free Convection", Chem. Eng. J., Vol. 4, 46-52, 1972.

[8] Kapinos, G.A. ve Remizov, O.V., "The Effect of Free Convection on Heat Transfer with

Turbulent Flow of Liquid in Vertical Tubes", Thermal Engineering, Vol. 35 (2), 104-106, 1988.

[9] Kaupas, V.E ve Poskas, P.S., "Heat Transfer in Transition Flow of Air at High Heat Fluxes", Heat Transfer-Soviet Research, Vol. 23 (1), 21-37, 1991.

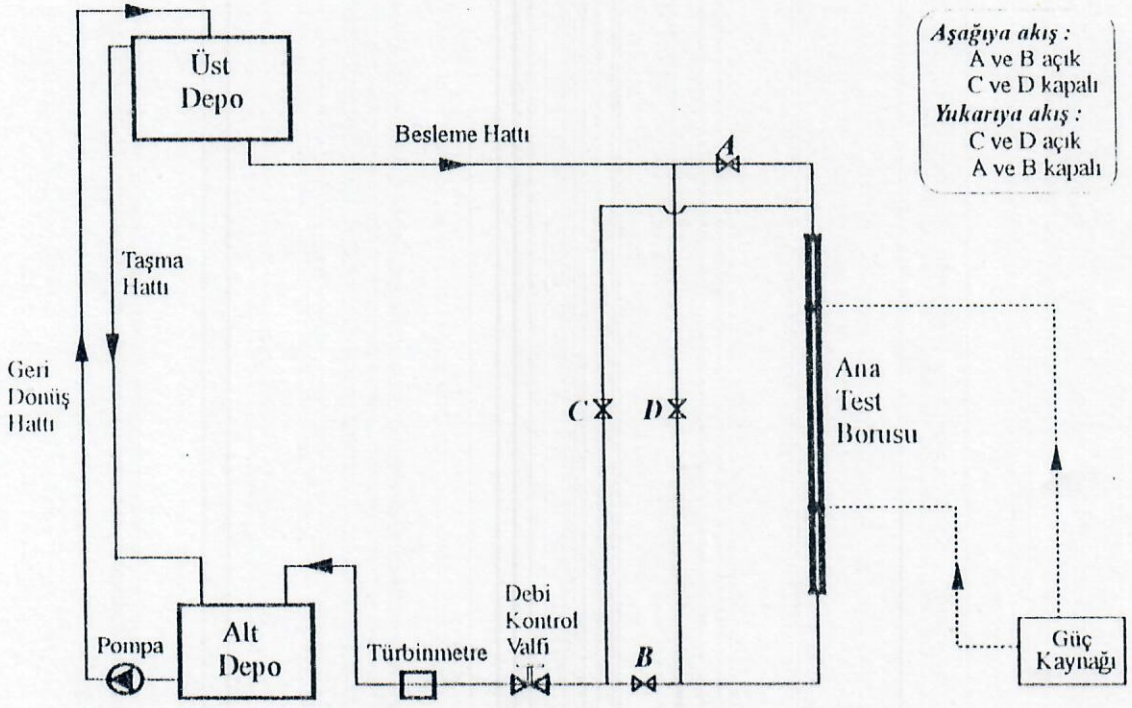
[10] Polyakov, A.F. ve Shindin, S.A., "Development of Turbulent Heat Transfer over the Length of Vertical Tubes in the Presence of Mixed Air Convection", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31 (5), 987-992, 1988.

[11] Tanaka, H., Maruyama, S. ve Hatano, S., "Combined Forced and Natural Convection Heat Transfer for Upward Flow in a Uniformly Heated Vertical Pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30 (1), 165-174, 1987.

[12] Jackson, J.D., Büyükalaca, O., "Correlation of Heat Transfer Data for Buoyancy-Opposed Turbulent Mixed Convection in a Vertical Tube", Proc. of Eurotherm Meeting No. 32, Heat Transfer in Single Phase Flows, Oxford University, 1993.

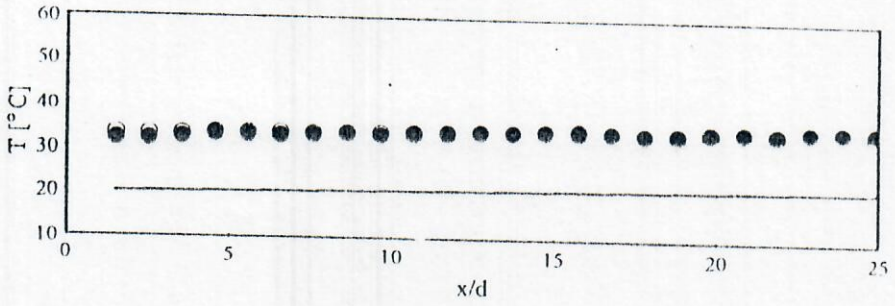
[13] Jackson, J.D. ve Hall, W.B., "Influences of Buoyancy on Heat Transfer to Fluids Flowing in Vertical Tubes Under Turbulent Conditions", Turbulent Forced Convection in Channels and Bundles, Vol.2, Advanced Study Institute Book, (Ed : Kakaç, S. ve Spalding, D.B.), 1979.

ŞEKİLLER

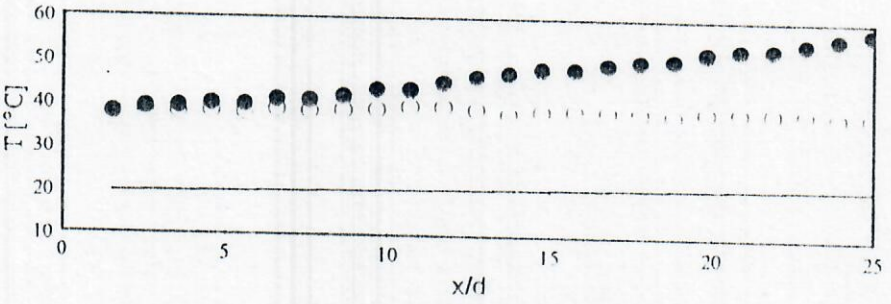


Şekil 1. Deney düzeneği.

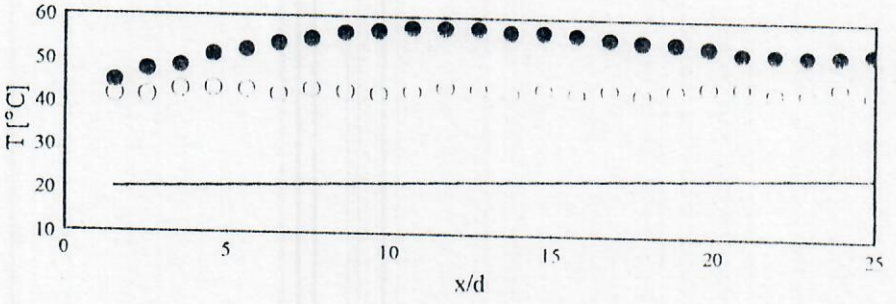
a) $Re_g = 2.5x10^4$



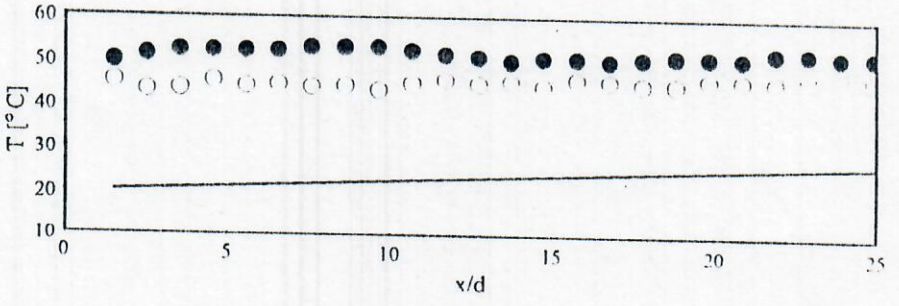
b) $Re_g = 1.6x10^4$



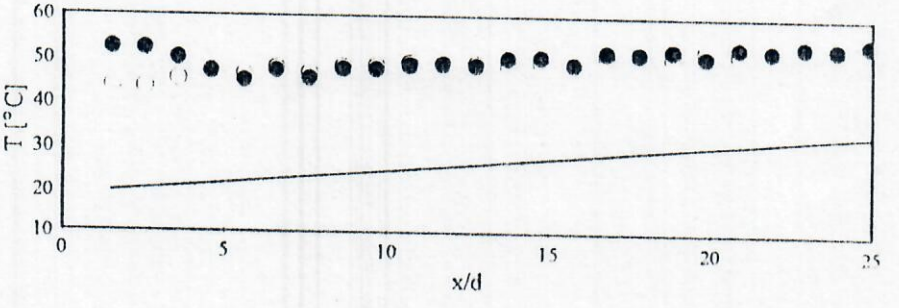
c) $Re_g = 0.8x10^4$



d) $Re_g = 0.6x10^4$

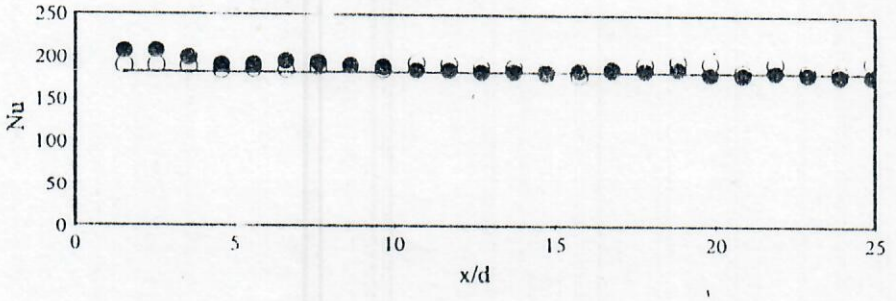


e) $Re_g = 0.25x10^4$

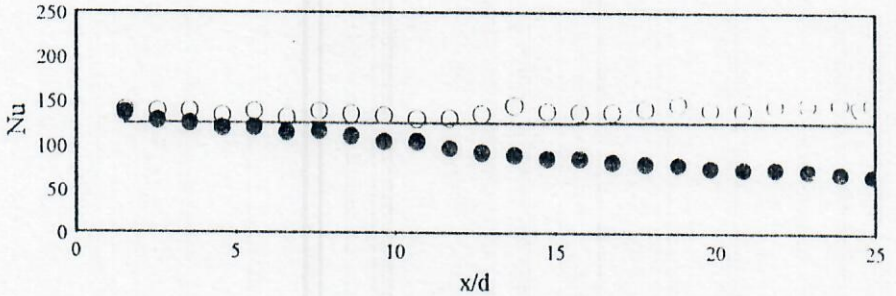


Şekil 2. Boru dış cidar sıcaklığının (aşağıya doğru akışta = boş semboller, yukarıya doğru akışta = dolu semboller) ve ortalama akışkan sıcaklığının (çizgiler) eksenel mesafe ile değişimi.

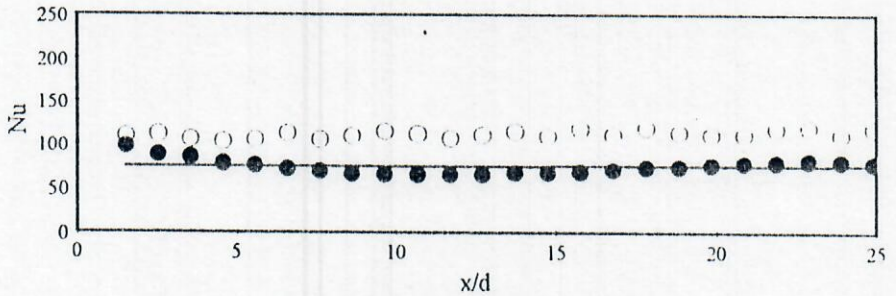
a) $Re_g = 2.5x10^4$



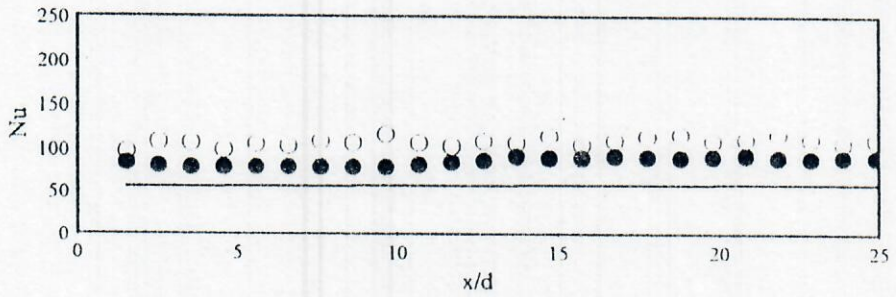
b) $Re_g = 1.6x10^4$



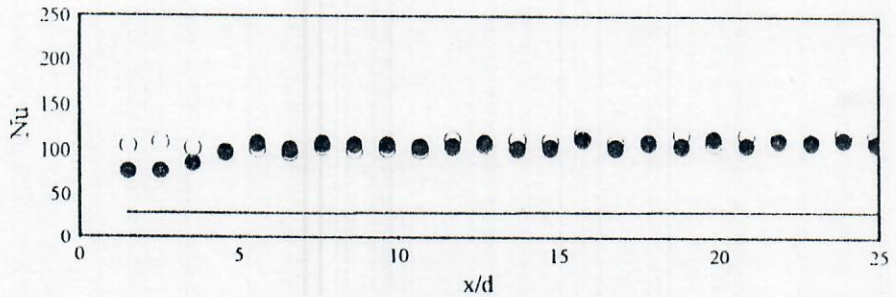
c) $Re_g = 0.8x10^4$



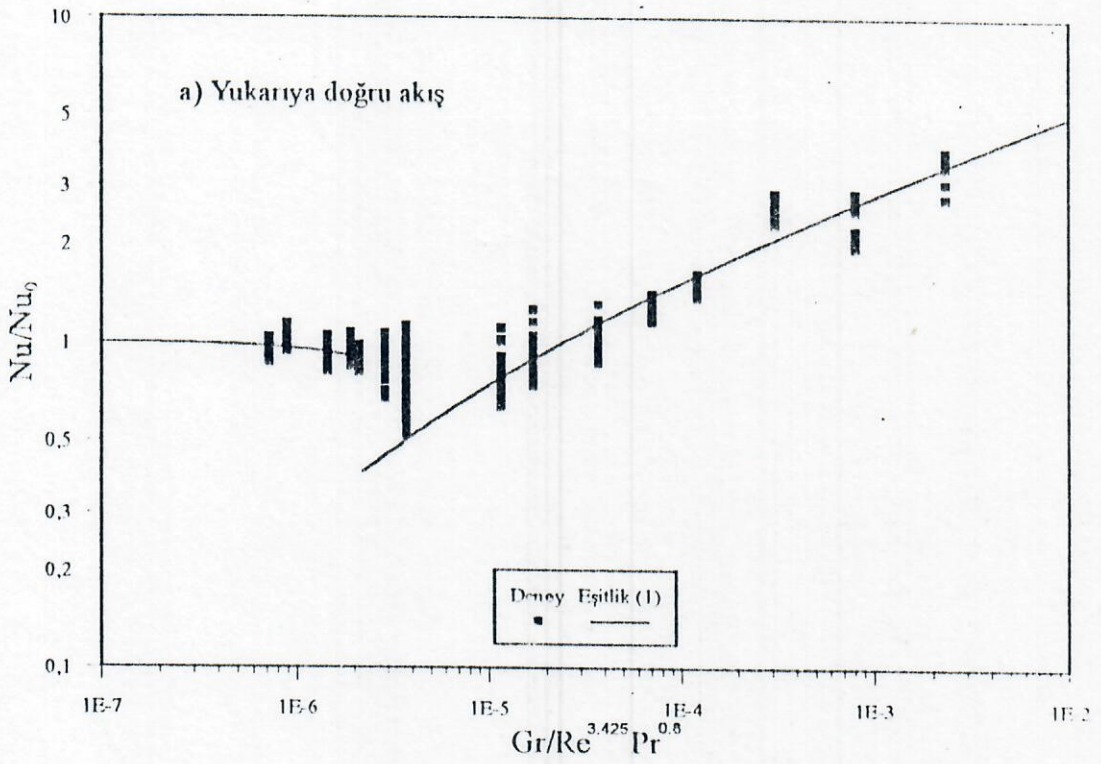
d) $Re_g = 0.6x10^4$

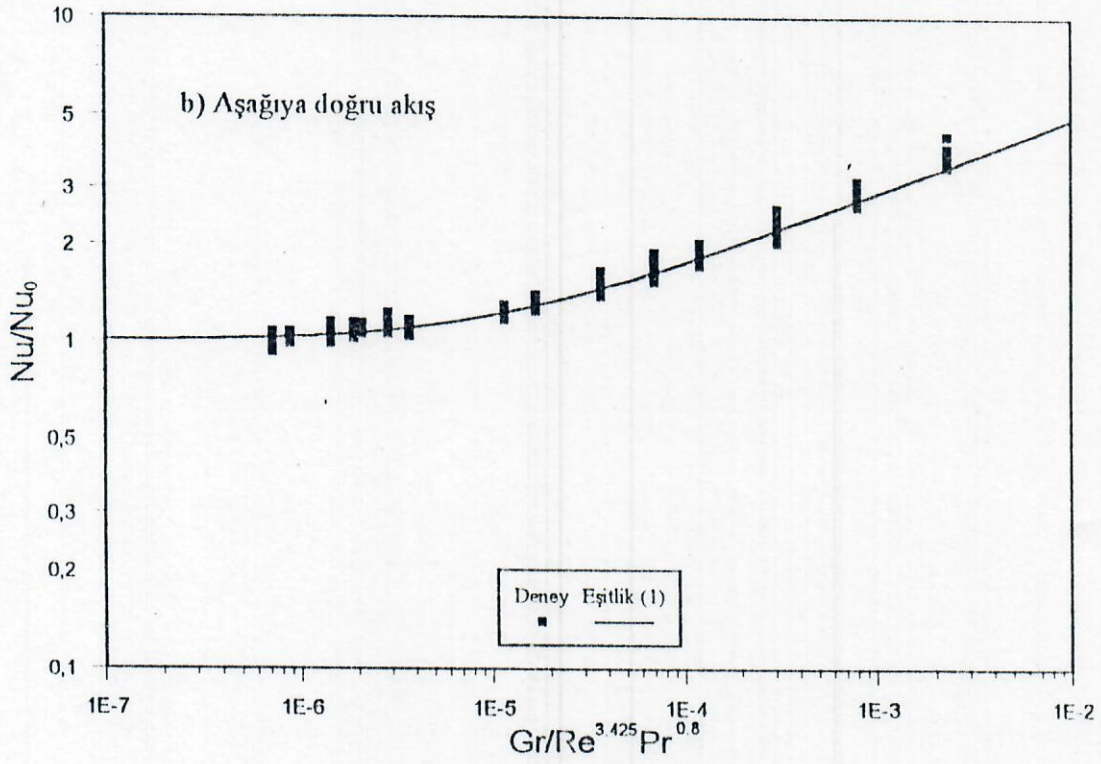


e) $Re_g = 0.25x10^4$



Şekil 3. Deneylerden (aşağıya doğru akış = boş semboller, yukarıya doğru akış = dolu semboller) ve Petukhov-Kirillov eşitliğinden (çizgiler) elde edilen ısı transferi katsayısının eksenel mesafe ile değişimi.





Şekil 4. Isı transferi katsayısı oranının serbest konveksiyonun zorlanmış konveksiyona göre büyüklüğünü ifade eden parametre ile değişimi.