

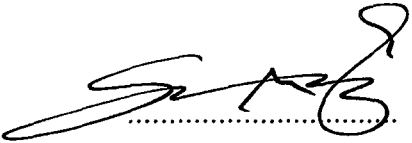
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BORULARDA AKIŞ TIKANMASININ TÜRBÜLANSLI
ISI TRANSFERİNE ETKİLERİ**

Selçuk DARICI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA ANABİLİM DALI

Bu tez 15/01/1998 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.



Doç.Dr. Şefik BİLİR

Danışman



Yrd.Doç.Dr. Yüksel KAPLAN

Üye



Yrd.Doç.Dr. Saim KOÇAK

Üye

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORULARDA AKIŞ TIKANMASININ TÜRBÜLANSLI ISI TRANSFERİNE ETKİLERİ

Selçuk DARICI

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Anabilim Dalı

Danışman : Doç.Dr. Şefik BİLİR

1998, 62 Sayfa

Jüri : Doç.Dr.Şefik BİLİR

Yrd.Doç.Dr.Yüksel KAPLAN

Yrd.Doç.Dr.Saim KOÇAK

Bu çalışmada, cidarları direnç olarak kullanılarak ısıtılan bir boruda, sabit yüzey ısı akısı sınır şartında ve türbülanslı hava akışında, girişe yerleştirilen orifis şeklindeki bir tıkama elemanının ısı transferine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Alt akış tarafında, ayrılma, yeniden tutunma ve yeniden gelişme bölgelerindeki yerel ısı transferi karakteristikleri belirlenerek, tıkanmasız boş boru deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneyler, orifis plakalarının geometrik boyutları değiştirilerek ve farklı Reynolds sayılarında tekrarlanmış ve iki parametrenin, tıkanma oranı ve Reynolds sayısı, etkileri incelenmiştir.

Deneyler, Reynolds sayısının 6500-26400 aralığında üç farklı tıkanma oranı, 1/4, 1/2 ve 3/4 için tekrarlanmıştır. Sonuçlar, ayrılma ve yeniden tutunma bölgelerinde yerel taşınım katsayılarının, tam gelişmiş bölge değerlerine göre önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: akış tıkanması, akış ayrılması, borularda türbülanslı ısı transferi

ABSTRACT
Master Thesis

**THE EFFECTS OF FLOW BLOCKAGE ON TURBULENT
HEAT TRANSFER IN PIPES**

Selçuk DARICI
Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assoc.Prof.Dr. Şefik BİLİR
1998, 62 page

Jury : Assoc.Prof.Dr.Şefik BİLİR
Assist.Prof.Dr.Yüksel KAPLAN
Assist.Prof.Dr.Saim KOÇAK

The effects of flow blockage on heat transfer with turbulent air flow in pipes under constant wall heat flux boundary condition is investigated experimentally. The pipe is heated electrically using its wall as resistance, and the blockage is induced by an orifice plate attached at the entrance of the heated section. Downstream of the element, local heat transfer characteristics are calculated in the separation, reattachment and redevelopment regions and compared with the results of flow with no blockage. Changing the dimensions of the orifice plates and flow velocity, the effects of two parameters, blockage ratio and Reynolds number, are analysed.

Three different blockage ratios, $1/4$, $1/2$ and $3/4$ are used in the experiments with Reynolds number range of 6500-26400. From the results it is observed that, the local heat transfer coefficients in the separation and reattachment regions are increased a few several times as the values of fully developed region.

Key words : flow blockage, flow separation, turbulent heat transfer in pipes

ÖNSÖZ

Çalışmalarım esnasında değerli fikirleri ile bana yardımcı olan Sayın Hocam Doç.Dr.Şefik BİLİR'e ve deney düzeneğinin hazırlanmasında tecrübelerinden yararlandığım Öğr.Gör. Osman Sami GÜVEN'e teşekkür eder, saygılar sunarım.

OCAK 1998

Selçuk DARICI

Mak. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SEMBOLLER	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
3. MATERYAL VE METOD	4
3.1 Akış Ayrılması	4
3.2 Deney Düzenegi	7
3.2.1 Deneylerin Yapılışı	11
3.2.2 Isıl Çift Kalibrasyonu	11
3.3 Hesaplamalar	13
3.3.1 Data Analizi Uygulaması	17
3.4. Belirsizlik Analizi	19
4. DENEY SONUÇLARI	24
5. TARTIŞMA	36
6. ÖNERİLER	38
7. KAYNAKLAR	39
8. EKLER	41

SEMBOLLER

A	alan
a	orifis iç çapı
b	orifis dış çapı
C	ventüri katsayısı
C_p	sabit basınçta özgül ısı
D	çap
f	sürtünme katsayısı
h	ısı taşınım katsayısı
I	elektrik akımı
K	faktör (denklem 20)
k	ısı iletkenlik katsayısı
L	boru uzunluğu
Nu	Nusselt sayısı
P	ısıtıcı gücü
Pr	Prandtl sayısı
Q	ısı transferi
q	ısı akısı
\dot{q}	iç ısı üretimi
R	elektriksel direnç
Re	Reynolds sayısı
r	radyal koordinat
T	sıcaklık
t	orifis genişliği
U	akış hızı
V	voltaj
\dot{V}	hacimsel debi
w	belirsizlik
x	eksenel koordinat
ρ	yoğunluk
ν	kinematik viskozite

Δh manometre kolları arasındaki fark

μ dinamik viskozite

Alt İndisler

a açık

b yığık

f akışkan

fd tam gelişmiş

i boru iç yüzeyinde

o boru dış yüzeyinde

m ortalama

t toplam

w boru cidarında

x x aksenal konumunda

∞ ortam

1 giriş

2 çıkış

Üst İndisler

' yalıtım dış yüzeyinde

- ortalama

1. GİRİŞ

Boru ve kanal içi akıflarda türbülanslı ısı transferi, yıllardan beri bu alanda yapılan bilimsel araştırmaların konusunu oluşturmaktadır. Henüz türbülans tam anlamıyla anlaşılamamış olmasına karşın, çeşitli iç akış türleri için ısı transferi karakteristikleri belirlenmiştir. Boru ve kanalların dış kısımlarında yapılan çeşitli düzenlemeler vasıtasıyla akış ayrılması hakkında yapılmış çok sayıda araştırma literatürde mevcuttur. Ancak iç akış konusu üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça azdır.

Boru ve kanallarda akış tıkanması sıkça karşılaşılan bir durumdur. Ani genişleme veya daralma, keskin giriş ve dönüşler ve hızlı genişleyen kanallarda olduğu gibi, yüzeye tutturulmuş yönlendirici levhalar, vanalar, orifisler, türbülötörler ve karıştırıcılar gibi çeşitli uygulamalarda sözkonusu olan kısmi tıkanma da akışın yüzeyden ayrılmasına neden olur. Akış ayrılması, özellikle ayrılma ve yeniden tutunma bölgelerinde meydana gelen çalkantı, girdap ve ilave türbülans nedeniyle bu bölgelerde ısı transferini önemli ölçüde arttırır.

Bu çalışmada, borularda türbülanslı hava akışında, orifis şeklindeki plakalar ile oluşturulan akış tıkanmasının, sabit yüzey ısı akısı sınır şartında ısı transferine etkileri incelenmiştir. Cidarları direnç olarak kullanılarak elektrik ile ısıtılan bir boruda, ısıtılan bölgenin girişine yerleştirilen elemanın alt akış tarafında oluşan ayrılma, yeniden tutunma ve yeniden gelişme bölgelerinde yerel taşınım katsayıları belirlenmiş ve tıkanmasız boş boru deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca farklı boyutlardaki orifis plakaları ile ve farklı akış hızları ile deneyler tekrarlanarak iki parametrenin, tıkanma oranı ve Reynolds sayısı, etkileri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Konu ile doğrudan ilgili olarak literatürde karşılaşılan az sayıdaki çalışmalardan ilki Boelter, Young ve Iverson (1948) tarafından gerçekleştirilendir. Bu geniş kapsamlı deneysel çalışmanın bir bölümünde, sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı oluşturulan bir boruda hava akışında orifis plakaları kullanılarak tıkanma ve akış ayrılmasının etkileri incelenmiştir.

Williams ve Knudsen (1963) içiçe geçmiş borularda, dıştaki boru yüzeyine tutturulan bir orifis ile oluşturulan akış ayrılması etkilerini su ile incelemiştir.

Krall ve Sparrow (1966) tarafından yapılan deneysel çalışmada, boru içi türbülanslı akışta girişe yerleştirilen orifis şeklindeki elemanların oluşturduğu akış ayrılmasının, ayrılma, yeniden tutunma ve yeniden gelişme bölgelerinde ısı transferi karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Deney borusu elektrikle ısıtılmış, akışkan olarak su kullanılmıştır. Reynolds sayısı 10000-130000 aralığında, Prandtl sayısı ise 3-6 arasında değiştirilmiştir. Ölçümler sonunda yeniden tutunma noktasında ısı taşınım katsayısının tam gelişmiş bölgedeki değerinden bir kaç kat büyük olduğu görülmüştür.

Filetti ve Kays (1967) tarafından gerçekleştirilen benzer bir çalışmada dikdörtgen kesitli kanallarda, kanal kesitinin iki tarafında simetrik ani genişleme halinde akış ayrılmasının ısı transferine etkileri incelenmiştir. Akışkan olarak hava kullanılmış, Reynolds sayısı 70000-205000 aralığında değiştirilmiştir. Çalışma sonucu yeniden tutunma noktasındaki yerel Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi bir bağıntı halinde verilmiştir.

Zemanic ve Dougal (1970) tarafından yapılan bir çalışmada, dairesel kesitli borularda ani genişleme ile oluşan akış ayrılması incelenmiştir.

Koram ve Sparrow (1978) çalışmalarında bir borunun iç duvarlarına monte edilmiş dairesel segman şeklindeki kanatçıklar ile benzer deneyler yapmışlardır. Deneylerde akışkan olarak su kullanılmış, Reynolds sayısı 10000-60000 aralığında değiştirilmiştir. Tıkama, boru kesit alanını 1/4 ten 3/4' e kadar kapatacak şekilde değiştirilmiştir. Isı transfer katsayıları sabit yüzey ısı akışı ile ısıtılan borunun hem çevresi hem de uzunluğu boyunca belirlenmiştir. Çevresel ortalama Nusselt sayısının

başlangıçta yükseldiği ve bir maksimum değere ulaştığı, daha sonra tam gelişmiş bölgeye doğru asimptotik olarak azaldığı görülmüştür.

Sparrow, Koram ve Charmchi (1980) gene simetrik olmayan ancak bu kez pervaz şeklindeki tıkanma elemanları ile problemi incelemişlerdir. Çalışmada akışkan olarak su kullanılmış ve Reynolds sayısı 10000-60000 aralığını kapsamıştır. Farklı tıkanma oranlarında ve farklı Reynolds sayılarında akış ayrılmasının tutunma noktalarında en fazla ısı transferine neden olduğu belirlenmiştir.

Son iki çalışmada elde edilen bir diğer bulgu da, asimetrik tıkanma etkisinin girişten 2-3 çap mesafe sonrasında ortadan kalkıyor olmasıdır. Bu mesafeden sonra ısı taşınım katsayılarının çevresel yönde değişmediği görülmüştür.

Türbülanslı akışın boru ve kanal girişinde ayrılma, tutunma ve yeniden gelişme bölgelerinde ısı transferine etkilerini belirleyen tüm çalışmaların ortak yönü deneysel olması, boru veya kanal içi akışın türbülanslı olması, deney akışkanı olarak ise hava veya su kullanılmasıdır. Gene çalışmaların tümünde akış ayrılmasının ısı transferine etkisi, farklı Reynolds sayılarında ve farklı tıkanma oranlarında incelenmiştir. Ayrıca çalışmaların bazılarında ısı transferinin yanı sıra, tıkanmanın neden olduğu basınç kaybı da incelenmiştir.

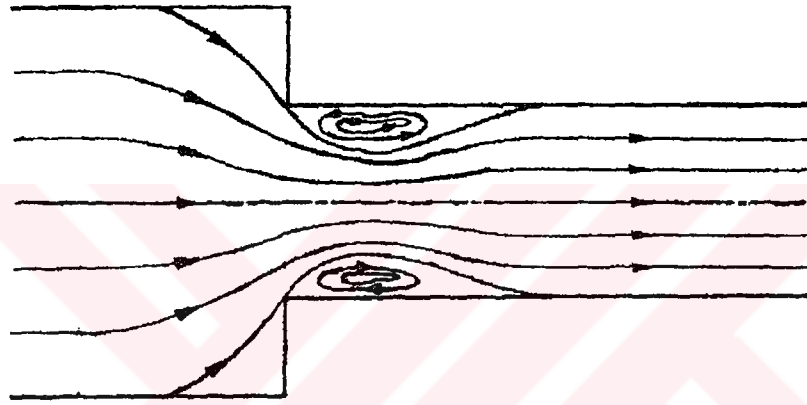
Çalışmaların tümünden çıkan ortak sonuç ise, en fazla ısı transferinin yeniden tutunma bölgesinde görüldüğü ve bu bölgede Nusselt sayılarının tam gelişmiş bölge Nusselt sayısından, problem parametrelerine bağlı olarak 3-10 kat daha büyük olduğudur. Yeniden tutunma bölgesinin genellikle tıkanmadan sonra 2-3 çap eksenel mesafede olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, borularda türbülanslı hava akışında, sabit yüzey ısı akısı ile ısıtılan boruların girişine yerleştirilen orifis plakalarının ısı transferine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

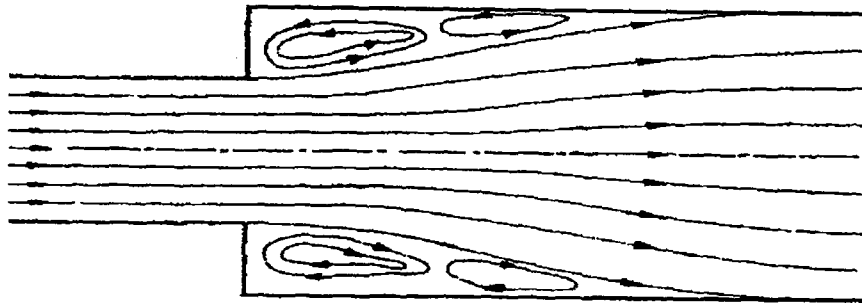
3. MATERYAL VE METOD

3.1 Akış Ayrılması

Boru ve kanallarda ani daralma veya genişleme halinde ortaya çıkan akış ayrılması şematik olarak Şekil 3.1 ve 3.2’ de gösterilmiştir. Her iki durumda da akış belirli bir bölge içerisinde yüzeyden ayrılmaktadır. Akışın yüzeyden ayrılıp kesit değişikliğinden sonra tekrar yüzeye temas etmeye başladığı yere kadar olan bölgeye “ayrılma bölgesi” adı verilir. Akışkanın yüzeye ilk temas ettiği noktaya “yeniden tutunma noktası”, bu noktadan sonraki bölgeye ise “yeniden gelişme bölgesi” denir (Filetti 1967).



Şekil 3.1 Boru veya kanallarda ani daralma halinde akış geometrisi



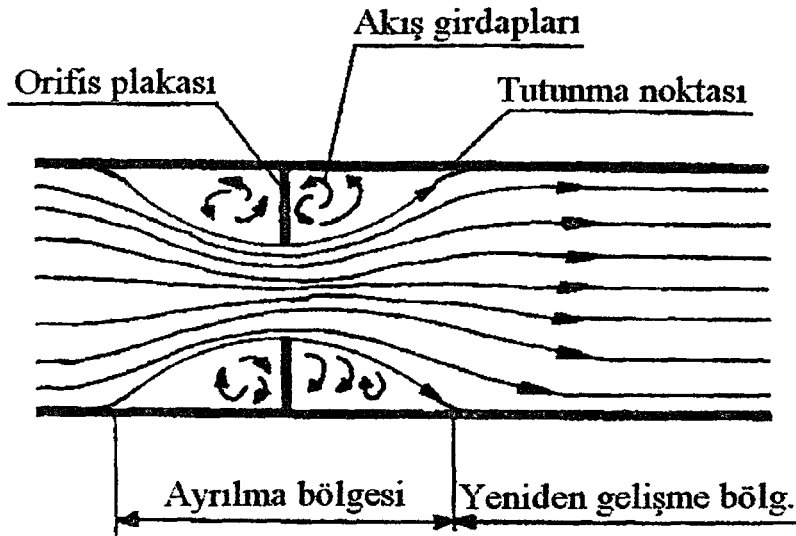
Şekil 3.2 Boru veya kanallarda ani genişleme halinde akış geometrisi

Ayrılma bölgesinde, cidara yakın kısımlarda meydana gelen girdaplar ve ilave türbülans veya çalkantılar, yerel olarak bu bölgede ve ortalama olarak ısı transferini arttırmaktadır.

Ani daralmalı bir tıkama elemanı ile karşılaşan akışkan, elemana yaklaşırken sapmaya başlar ve daralan kesitten hızlanarak geçer. Ayrılma bölgesi içerisinde tıkama elemanının ön ve arka kısmında sürekli sirkülasyon görülen bir akış bölgesi vardır ve akışkan bu bölgelerde boru veya kanal cidarıyla temas halindedir. Bu bölgenin biraz ilerisinde sirkülasyon sona erer ve akış cidara yeniden tutunur. Bu noktadan sonra akış yeniden gelişmeye başlar ve tam gelişmiş halde devam eder.

Boru veya kanal içerisindeki akışkan ani bir genişlemeye maruz kaldığı zaman, akış yüzeyden ayrılır ve genişleyerek devam eder. Kesit değişikliğinden itibaren belirli bir mesafe sonra akış karşılaştığı yeni yüzeye temas etmeye başlar. Kesit değişiminin olduğu yerle akışkanın yüzeye ilk temas etmeye başladığı nokta arasındaki bölge “ayrılma bölgesi” olarak nitelendirilir. Bu bölgede, ani daralma halinde olduğu gibi, sürekli sirkülasyon görülen bir bölüm vardır.

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi orifis plakaları, en basit şekliyle ortasında delik bulunan ince düz bir plakadan oluşur. Standart geometriye sahip olan orifis, akış yönünde bir engel oluşturarak boru kesitinde daralma meydana getirmektedir. Akış orifisten geçtiği zaman, orifis cidarından ayrılarak gittikçe kesiti daralan hüzmeye oluşturur. Belirli bir mesafeden sonra hüzmeyin kesiti genişleyerek, boru hacminin tamamını kaplar. Akış orifisi terkettikten sonra, oluşan hüzmeye ile boru cidarı arasında ayrılmış akış bölgesini oluşturur.

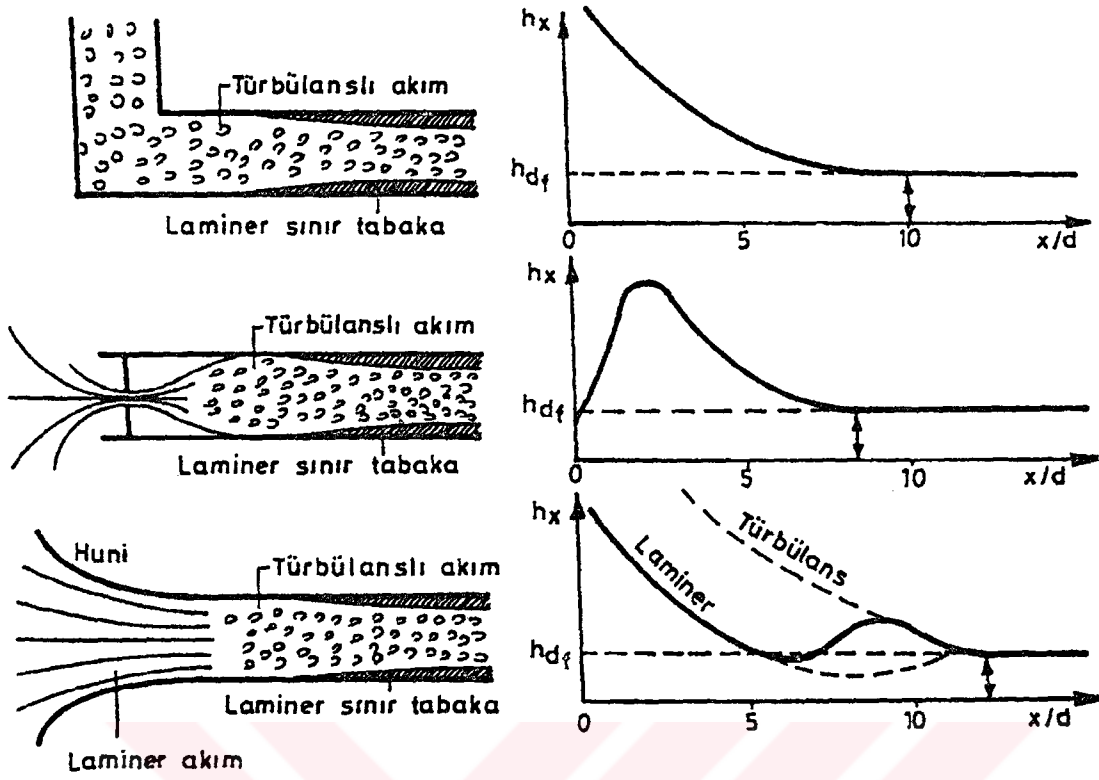


Şekil 3.3 Orifis etrafında oluşan akış bölgeleri

Tıkanmalı akış halinde ısı transfer katsayıları tıkanmasız akışa nazaran daha büyüktür. Bunun yanında akış ayrılması sonucu oluşan ilave sürtünme kayıpları nedeniyle basınç düşüşü önemli oranda artmaktadır.

Akış ayrılması olan sistemlerde akışkanın boru veya kanala giriş kısmında ısı taşınım katsayısı genellikle girişten itibaren $x/D=10$ mesafesine kadar yüksektir. Bu noktadan sonra akış gelişmeye başlar. Isı taşınım katsayısı da asimptotik olarak tam gelişmiş bölge değerine düşer.

Isı taşınım katsayısının giriş bölgesinin geometrisine göre değişimi Şekil 3.4' de verilmiştir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere giriş bölgesinin başlangıcında akış ayrılması ve yeniden tutunma noktalarında ısı taşınım katsayısı nihai değerinin 2-2.5 katı civarında olmaktadır (Dağsöz 1990).



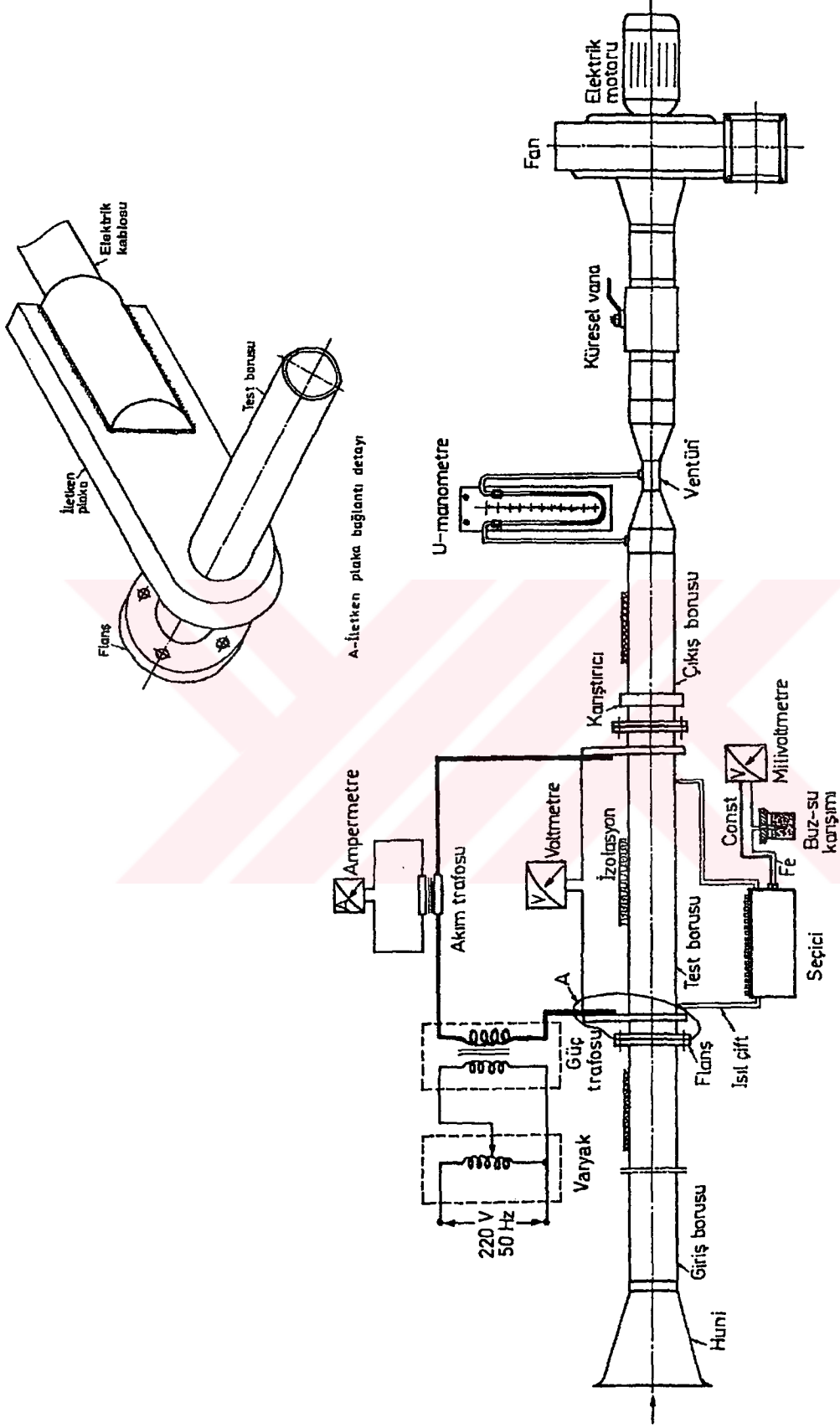
Şekil 3.4. Giriş bölgesinde ısı taşınım katsayısının değişimi (Dağsöz 1990)

3.2 Deney Düzenegi

Çalışmada kullanılan deney düzenegi şematik olarak Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Genel olarak bir ısı transferi devresi olan düzenek, giriş, test ve çıkış olmak üzere üç bölümlü bir akış borusu ve üzerindeki çeşitli ölçme cihazlarından oluşmaktadır.

Giriş bölgesi, havanın darbesiz bir şekilde emilmesini sağlayan toplayıcı huni ve 2 m (60 çap) uzunluğundaki bakır borudan oluşmaktadır. Boru uzunluğu hidrodinamik olarak gelişmiş akış elde etmek için yeterlidir (Krall ve Sparrow 1966).

İç çapı 33 mm, et kalınlığı 1 mm olan bakır borular, flanşlarla birbirlerine aynı merkezli olarak bağlanmıştır. Test borusunun giriş ve çıkışında ısı kaybını azaltmak ve hava sızdırmazlığını sağlamak amacıyla flanşlar arasına bakalit contalar yerleştirilmiştir.



A-İletken plaka bağlantı detayı

Şekil 3.5 Deneysel düzenek

Test borusunun uzunluğu 1 m (30 çap) dir. Bu mesafe ısı gelişme için yeterlidir. Isıtılan test borusu ile birlikte giriş ve çıkış borusu da yalıtılmıştır.

50 cm uzunluğundaki çıkış borusu üzerinde karıştırıcı kutu, debi ölçmek için bir ventüri-U manometre düzeneği ve debi ayar vanası bulunmaktadır. Fanın çıkış borusuna bağlantısı esnek kauçuk malzemedden yapılmış bir hortum ile sağlanmaktadır.

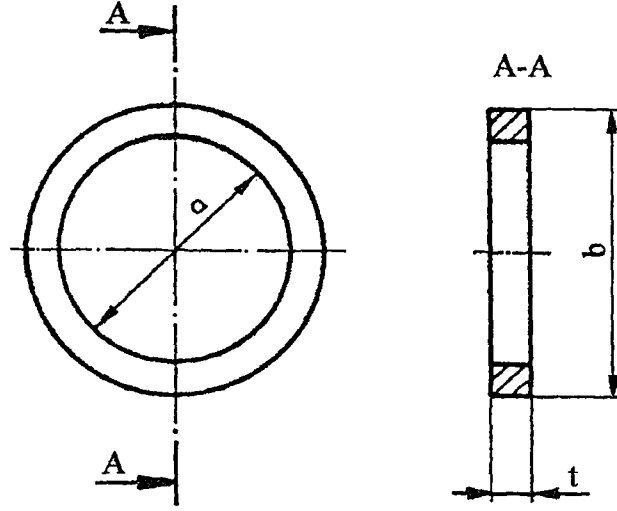
Deney düzeneği temel olarak, laboratuvar ortamından emilen havanın sabit ısı akısı altında test borusundan geçerken ısınması ve dış ortama atılması prensibi ile çalışmaktadır.

Test borusu, boruya doğrudan elektrik enerjisi verilmek suretiyle ısıtılmaktadır. Isıtıcı devresinde 5000 W kapasiteli bir varyak ve 0-1000 A ve 0-0.5 V aralıklarında çalışabilen bir transformatör ile voltmetre ve ampermetre bulunmaktadır. Akım test borusuna, borunun başlangıç ve bitiş kesitlerine tutturulan kalın iletken plakalar ile verilmektedir. Bu plakaların kalınlığı, boru cidarındaki ısı iletimini en az etkilemesi ve yüksek akıma dayanıklı olması gözönünde tutularak belirlenmiştir. Akımın çevresel olarak düzgün dağılımını sağlamak için, plakalar boru dış çapına eşit çapta açılan deliklerden boruya geçirildikten sonra temas yüzeyleri çevresel olarak gümüş kaynağı ile doldurulmuştur.

Isıtılan test borusunun dış yüzey sıcaklıkları, 27 adet kalibre edilmiş Fe-Constantan ısı çifti ile ölçülmektedir. Isıl çiftler boru yüzeyine aynı çevresel konumda ve test bölgesi giriş kısmında sık (0.25 çap), çıkışa doğru ise artan aksel aralıklar ile (en fazla 3 çap) yerleştirilmiştir. Test bölgesi giriş kısmına yerleştirilen ısı çiftleri arasındaki mesafenin küçük alınmasındaki gaye, buralarda meydana gelen akış ayrılmasının etkisini daha hassas olarak gözleyebilmektir. Isıl çiftler bir seçici anahtar ile sıcaklık ölçüm devresine bağlanmıştır. Referans sıcaklık olarak buz-su karışımı kullanılmıştır. Test borusu yalıtım dış yüzey sıcaklıkları 5 ayrı noktadan ve havanın test borusuna giriş ve çıkış sıcaklıkları gene ısı çiftleriyle ölçülmektedir. Ortam sıcaklığı ise bir termometre ile ölçülmektedir.

Deneylerde tıkama elemanı olarak kullanılan orifis plakaları Şekil 3.6'da ve bunların tıkanma oranına göre boyutları Tablo 3.1'de verilmiştir. Plakalar 5 mm kalınlığında ve bakalit malzemedden imal edilerek test borusunun hemen girişine yerleştirilmiştir. Deneylerde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Reynolds sayısı 6500-

26400 aralığında değiştirilmiş, 1/4, 1/2 ve 3/4 oranlarda tıkanma uygulanmıştır. Bu oranlar, akış kesit alanının tıkanma elemanları ile kapatılan kısmını ifade etmektedir.



şekil 3.6 Orifis plakası

Tablo 3.1 Orifis plaka boyutları

Tıkanma Oranı	A_a (m ²)	a (m)	b (m)	t (m)
1/4	$6.40 \cdot 10^{-4}$	0.0285	0.033	0.005
1/2	$4.27 \cdot 10^{-4}$	0.0233	0.033	0.005
3/4	$2.13 \cdot 10^{-4}$	0.0164	0.033	0.005

3.2.1 Deneylerin Yapılışı

Deneyler, üç farklı tıkanma oranına sahip orifis plakalarının test borusunun girişine yerleştirilerek yapılmıştır. Ayrıca kıyaslama yapmak amacıyla tıkanmasız boş boru için de deneyler yapılmıştır. Deneylerin aynı ortam şartlarında gerçekleştirilmesine özen gösterilmiştir. Ölçmelere, deney düzeneğinin sürekli rejime erişmesinden sonra başlanmıştır. Deney düzeneğinin ilk çalıştırılması durumunda sistemin sürekli rejime ulaşması yaklaşık 1.5 saat sürmüştür. Ancak bundan sonra yapılan debi değişimleri sonucunda sistemin rejime ulaşma süresi kısalmıştır.

Tıkanmasız boş boru ve üç farklı tıkanma oranı 1/4, 1/2 ve 3/4 ile aynı debi için ölçmeler yapılmıştır. Ayrıca boş boru ya da herhangi bir tıkanma oranı için fan kapasitesine bağlı olarak 7-8 farklı debide ölçmeler yapılmıştır.

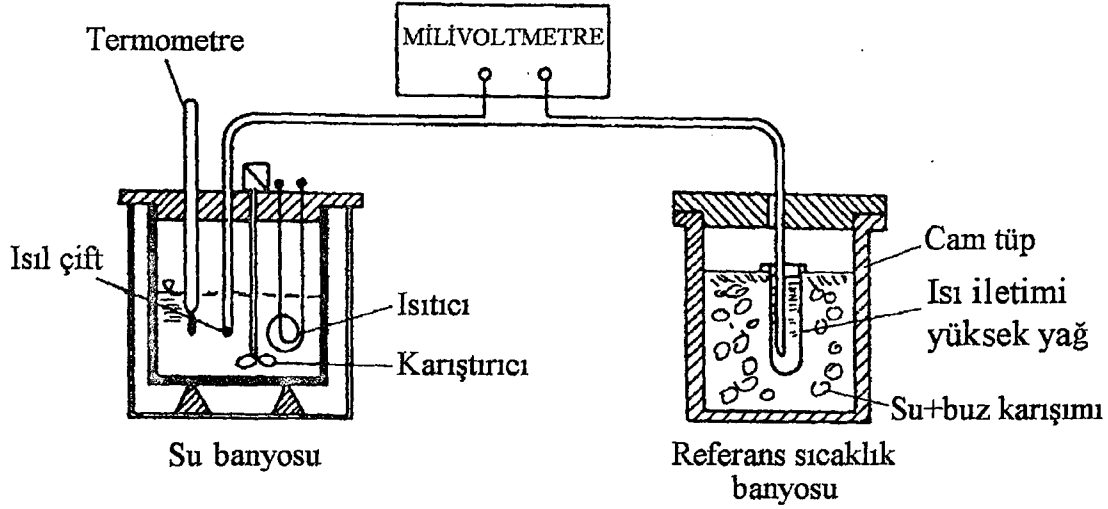
Deneylerde ölçülen büyüklükler şunlardır:

- Borudan geçen hava debisinin bir göstergesi olan ventürideki statik basınç farkı (Δh) mmSS olarak U-manometre ile,
- Havanın test bölgesine giriş, çıkış ve test borusu yalıtım dış yüzey sıcaklıkları (T_{b_1}, T_{b_2}, T') mV olarak multimetre ile,
- Isıtılan test borusunun dış yüzey sıcaklıkları (T_{wo}) mV olarak multimetre ile,
- Ortam sıcaklığı (T_{∞}) °C olarak termometre ile,
- Test borusu üzerindeki gerilim (V) mV olarak hassas bir multimetre ile,
- Gene test borusu üzerinden geçen akım (I) A olarak pens ampermetre ile ölçülmüştür.

3.2.2 Isıl Çift Kalibrasyonu

Isıl çiftler proses sanayiinde sıcaklık ölçülmesi, kaydedilmesi ve kontrol edilmesi işlemlerinde geniş çapta kullanılmaktadır. Ancak, öncelikle ölçme devresini güvenli olarak kullanabilmek için ısı çiftlerinin önceden kalibre edilmiş olması gerekir.

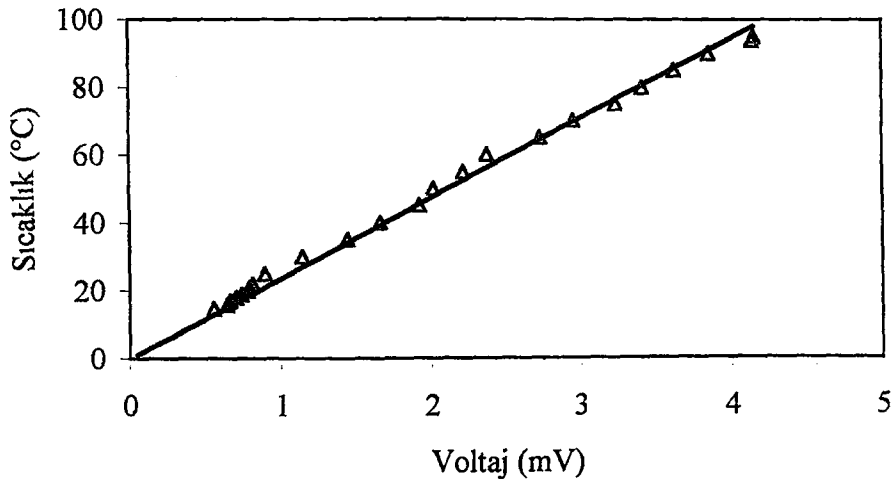
Bu amaçla hazırlanan ve ısı çiftlerinin kalibre edilmesinde kullanılan düzenek şematik olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Isıl çift kalibrasyon düzeneği

Şekilde görüldüğü gibi, su sıcaklığı elektrikli bir ısıtıcı ile belirli aralıklarla arttırılmıştır. Sıcaklıklar banyo içerisine yerleştirilen bir termometreden okunur. Okunan sıcaklıklara karşılık gelen voltaj değerleri ise milivoltmetreden okunur (Ayhan 1982).

Ölçüm değerleri voltaj (mV)-sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) diyagramında çizilerek kullanılan ısı çiftleri için sıcaklık ölçüm kalibrasyonu elde edilir. Bu çalışmada kullanılan Fe-Constantan ısı çifti için elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Isıl çift kalibrasyon eğrisi

3.3 Hesaplamalar

Yerel taşınım katsayıları ve yerel Nusselt sayıları aşağıdaki denklemler ile belirlenebilir.

$$h_x = \frac{q_w}{T_{wi_x} - T_{bx}} \quad (1)$$

$$Nu_x = \frac{2h_x r_{wi}}{k} \quad (2)$$

Denklem (1) deki yüzey ısı akısı, q_w ,

$$q_w = \frac{P}{2\pi r_{wi} L} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir ki, burada ısıtıcı net gücü, P ,

$$P = P_t - Q' \quad (4)$$

dir. Isıtıcı toplam gücü, P_t ,

$$P_t = VI = I^2 R \quad (5)$$

ve yalıtım dış yüzeyinden çevreye transfer edilen ısı, Q' ,

$$Q' = \bar{h}' A' (\bar{T}' - T_\infty) \quad (6)$$

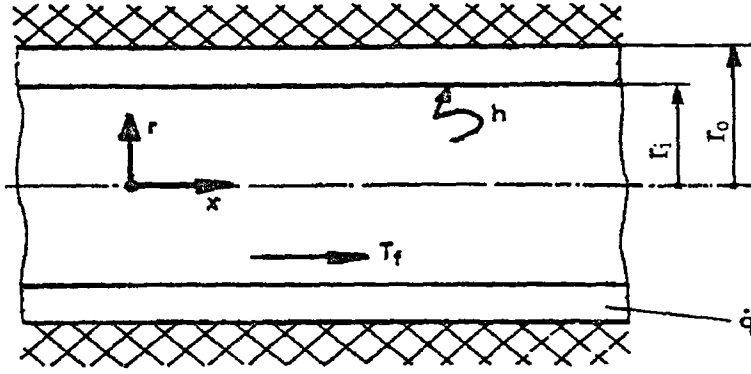
ile hesaplanabilir. Yalıtım dış yüzeyinde ortalama taşınım katsayısı, \bar{h}' ,

$$\bar{h}' = 1.24(\bar{T}' - T_\infty)^{1/3} \quad (7)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir (Holman 1976).

Test borusu boyunca herhangi bir aksenal konumda ölçülen dış yüzey sıcaklıklarına, T_{wo_x} , karşılık gelen iç yüzey sıcaklıkları, T_{wi_x} , aşağıdaki gibi bir analizle bulunabilir.

Şekil 3.9'daki gibi içi boş, uzun, içerisinde düzgün dağılmış biçimde ısı üretilen, aksenal simetrik, ısı iletkenlik katsayısı sabit bir silindir içerisinde sürekli rejimde ısı iletimi aşağıdaki diferansiyel denklemle karakterize edilir (Kakaç ve Yener 1979).



Şekil 3.9 Boru cidarında ısı iletimi

$$\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_w}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k_w} = 0 \quad (8)$$

Bu denklemdaki $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ terimi cidardaki aksel iletim terimidir. İnce cidarlı ve uzun bir boru için aksel iletim radyal ilettime nazaran ihmal edilecek düzeydedir. Böylece problem tek boyutlu hale dönüşür.

$$\frac{d^2 T_w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_w}{dr} + \frac{\dot{q}}{k_w} = 0 \quad (9)$$

Denklem (9) şu şekilde de ifade edilebilir,

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_w}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k_w} r = 0 \quad (10)$$

Denklem (10) iki kez. integre edilirse, genel çözüm

$$T_w(r) = c_1 \ln r + c_2 - \frac{\dot{q}r^2}{4k_w} \quad (11)$$

elde edilir.

Borunun dış yüzeyinin yalıtılmış, iç yüzeyinden ise h ısı taşınım katsayısı ile T_f sıcaklığındaki akışkana ısı transfer edildiği varsayımı ile sınır şartları aşağıdaki gibi yazılabilir.

1. sınır şartı: $r = r_i$ 'de $k_w \frac{dT_w}{dr} = h(T_w - T_f)$ (12)

2. sınır şartı: $r = r_o$ 'da $\frac{dT_w}{dr} = 0$ (13)

1. ve 2. sınır şartı sırası ile uygulanırsa integral sabitleri

$$c_1 = \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2k_w} \quad (14)$$

$$c_2 = \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2r_{wi}h} - \frac{\dot{q}r_{wi}}{2h} - \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2k_w} \ln r_{wi} + \frac{\dot{q}r_{wi}^2}{4k_w} + T_f \quad (15)$$

olarak bulunurlar. c_1 ve c_2 denklem (11)' de yerlerine konulursa genel cidar sıcaklığı ifadesi,

$$T_w(r) = \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2k_w} \left(\ln \frac{r}{r_{wi}} \right) + \frac{\dot{q}}{4k_w} (r_{wi}^2 - r^2) + \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2r_{wi}h} - \frac{\dot{q}r_{wi}}{2h} + T_f \quad (16)$$

elde edilir. Denklem (16)'da $r = r_{wi}$ ve $r = r_{wo}$ yazılarak iç ve dış yüzey sıcaklık farkı,

$$T_{wo} - T_{wi} = \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2k_w} \left(\ln \frac{r_{wo}}{r_{wi}} \right) + \frac{\dot{q}}{4k_w} (r_{wi}^2 - r_{wo}^2) \quad (17)$$

ölçülen dış yüzey sıcaklığına karşılık gelen iç yüzey sıcaklığı ise,

$$T_{wi} = T_{wo} - \frac{\dot{q}r_{wo}^2}{2k_w} \left[\ln \left(\frac{r_{wo}}{r_{wi}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_{wi}^2}{r_{wo}^2} \right) \right] \quad (18)$$

bulunur. Denklem (18) şöyle de ifade edilebilir.

$$T_{wi_x} = T_{wo_x} - K\dot{q} \quad (19)$$

Bu denklemdeki faktör, K ,

$$K = \frac{r_{wo}^2}{2k_w} \left[\ln \left(\frac{r_{wo}}{r_{wi}} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_{wi}^2}{r_{wo}^2} \right) \right] \quad (20)$$

dir.

Denklem (19)'daki iç ısı üretim terimi, \dot{q} , ise

$$\dot{q} = \frac{P}{2\pi(r_{wo}^2 - r_{wi}^2)L} \quad (21)$$

ile hesaplanabilir.

Denklem (1)'deki yığık sıcaklıklar, test borusu boyunca doğrusal olarak değiştiği varsayımı ile,

$$T_{b_x} = T_{b_1} + \frac{P(x/L)}{\rho \dot{V} C_p} \quad (22)$$

şeklinde hesaplanabilir (Krall ve Sparrow 1966, Koram ve Sparrow 1978 , Sparrow, Koram ve Charmchi 1980).

Deneysel verileri kıyaslamak amacıyla gelişmiş bölge Nusselt sayıları için sırasıyla Dittus-Boelter, Drexel-McAdams, Sieder-Tate ve geçiş bölgesi Reynolds sayıları (2300-10000) için önerilen Gnielinski bağıntısı (Incropera 1990) kullanılmıştır.

$$Nu_{fd} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (23)$$

$$Nu_{fd} = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (24)$$

$$Nu_{fd} = 0.027 Re^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (25)$$

$$Nu_{fd} = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}, f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (26)$$

Hesaplarda kullanılan Reynolds sayısı, Re,

$$Re = \frac{U_m D_i}{\nu} \quad (27)$$

ortalama akış hızı, U_m ,

$$U_m = \frac{\dot{V}}{A_i} \quad (28)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Hacimsel debi, ventüri - manometre düzeneği ile belirlenen basınç farkı , ΔP , Bernoulli ve süreklilik bağıntıları ile,

$$\dot{V} = C \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (29)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada C, ventüri katsayısı olup hesaplarda gözönüne alınmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan tüm akışkan özelliklerinin ortalama yığık sıcaklıktaki değerleri alınmıştır.

3.3.1 Data Analizi Uygulaması

Deneyde ölçülen büyüklükler ile yerel taşınım katsayıları ve yerel Nusselt sayılarının bulunmasında izlenen yöntem “hesaplamalar” başlığı altında verilmişti. Burada ise herhangi bir ölçüme ait veriler ile boru eksenini boyunca herhangi bir noktadaki yerel taşınım katsayısı ve yerel Nusselt sayısı sayısal olarak hesaplanacaktır.

Örnek olarak 1/2 tıkanma oranı ve $x/2r_{wi} = 2$ noktasını gözönüne alalım. 1/2 tıkanmalı boru için girdi olarak aşağıdaki veriler ölçülmüştür.

- Havanın test borusuna giriş ve çıkış sıcaklığı $T_{b_1} = 15.10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{b_2} = 24.30 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Test borusunun $x/2r_{wi} = 2$ noktasındaki yüzey sıcaklığı $T_{wox} = 26.65 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Ortam sıcaklığı $T_\infty = 19.8 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Test borusu yalıtım dış yüzey ortalama sıcaklığı $\bar{T}' = 19.99 \text{ } ^\circ\text{C}$
- U-manometre kolları arasındaki fark $\Delta h = 89.82 \text{ mmSS}$
- Test borusu üzerindeki akım ve gerilim $I = 600 \text{ A}$, $V = 0.1656 \text{ Volt}$

Test borusu içerisindeki havanın ortalama yığık sıcaklığı,

$$\bar{T}_b = \frac{T_{b_1} + T_{b_2}}{2} = 19.70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

dır. Havanın bu sıcaklıktaki fiziksel özellikleri ve U-manometredeki suyun yoğunluğu Ek 20 ve 21'deki Tablolardan alınmıştır.

$$\rho_h = 1.2057 \text{ kg/m}^3, C_p = 1004.577 \text{ J/kgK}, k = 0.0257 \text{ W/m}^\circ\text{C},$$

$$\nu = 1.508 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \text{Pr} = 0.713, \rho_{su} = 998.2 \text{ kg/m}^3 (T_{su} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ kabulü ile})$$

Test borusu ısı iletim katsayısı, k_w , cidarda sıcaklık değişimi çok büyük olmadığından tüm deneyler için sabit kabul edilmiş ve $k_w = 350 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır.

Ventüride kesit değişimi nedeniyle oluşan basınç farkı,

$$\Delta P = (\rho_{su} - \rho_h)g\Delta h = (998.2 - 1.2057) \cdot 9.806 \cdot 0.08982 = 878.128 \text{ N/m}^2$$

bulunur.

Test borusundan geçen havanın hacimsel debisi, ventüri - manometre düzeneği ile belirlenen basınç farkı ΔP , Bernoulli ve süreklilik bağıntıları ile,

$$\dot{V} = C \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_h}} = 0.97 \frac{(\pi/4) * 0.0173^2}{\sqrt{1 - (17.3/32.3)^2}} \sqrt{\frac{2 * 878.128}{1.2057}} = 0.01032 \text{ m}^3 / \text{s}$$

bulunur. Burada ventüri katsayısı, C, ventüri boyutları ve Reynolds sayısına bağlı olarak Ek 22'deki Şekil 1'den alınmıştır.

Ortalama akış hızı,

$$U_m = \frac{\dot{V}}{A_i} = \frac{0.01032}{(\pi/4) * 0.033^2} = 12.066 \text{ m/s}$$

Reynolds sayısı,

$$Re = \frac{U_m D_i}{\nu} = \frac{12.066 * 0.033}{1.508 * 10^{-5}} \cong 26400$$

bulunur.

Toplam ısıtıcı gücü,

$$P_t = VI = 0.01656 * 600 = 99.36 \text{ W}$$

yalıtım dış yüzeyinden çevreye ısı transferi,

$$Q' = \bar{h}' A' (\bar{T}' - T_\infty) = 1.24 \pi D' L (\bar{T}' - T_\infty)^{4/3} = 1.24 \pi * 0.09 * 0.96 (19.99 - 19.8)^{4/3}$$

$$Q' = 0.038 \text{ W}$$

ısıtıcı net gücü ise,

$$P = P_t - Q' = 99.36 - 0.038 = 99.322 \text{ W}$$

bulunur.

Test borusu yüzeyindeki ısı akışı,

$$q_w = \frac{P}{2\pi r_{wi} L} = \frac{99.322}{2\pi * 0.0165 * 0.96} = 997.954 \text{ W/m}^2$$

olarak hesaplanır.

Test borusu boyunca herhangi bir aksel konumda ölçülen dış yüzey sıcaklığına, T_{wo_x} , karşılık gelen iç yüzey sıcaklığı, T_{wi_x} , aşağıdaki bağıntı ile hesaplanacaktır.

$$T_{wi_x} = T_{wo_x} - Kq$$

Bu denklemdeki faktör, K,

$$K = \frac{r_{wo}^2}{2k_w} \left[\ln \frac{r_{wo}}{r_{wi}} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_{wi}^2}{r_{wo}^2} \right) \right] = \frac{0.0175^2}{2 * 350} \left[\ln \frac{0.0175}{0.0165} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{0.0165^2}{0.0175^2} \right) \right] = 1.457 * 10^{-9}$$

olarak bulunur.

İç ısı üretim miktarı, \dot{q} ,

$$\dot{q} = \frac{P}{2\pi(r_{wo}^2 - r_{wi}^2)L} = \frac{99.322}{2\pi(0.0175^2 - 0.0165^2) * 0.96} = 484301.08 \text{ W / m}^3$$

bulunur. Test borusunun $x/2r_{wi}=2$ noktasında ölçülen dış yüzey sıcaklığı

$T_{wo_x} = 26.65^\circ C$ olup buna karşılık iç yüzey sıcaklığı,

$$T_{wi_x} = T_{wo_x} - K\dot{q} = 26.65 - 1.457 * 10^{-9} * 484301.08 = 26.649^\circ C$$

olarak bulunur. Dış ve iç yüzey sıcaklıkları arasındaki fark,

$$T_{wo_x} - T_{wi_x} = 0.001^\circ C$$

olarak bulunur ki, bu fark ihmal edilebilecek düzeydedir.

Test borusu boyunca yığık sıcaklıkların doğrusal değiştiği varsayımı ile, $x/2r_{wi}=2$ noktasındaki yığık sıcaklık,

$$T_{b_x} = T_{b_1} + \frac{P(x/L)}{\rho\dot{V}C_p} = 15.10 + \frac{99.322 * (0.066/0.96)}{1.2057 * 0.01032 * 1004.577} = 15.64^\circ C$$

bulunur.

Aynı noktadaki yerel taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı,

$$h_x = \frac{q_w}{T_{wi_x} - T_{b_x}} = \frac{997.954}{26.65 - 15.64} = 90.64 \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ C$$

$$Nu_x = \frac{2h_x r_{wi}}{k} = \frac{2 * 90.64 * 0.0165}{0.0257} = 116.38$$

olarak bulunur.

3.4 Belirsizlik Analizi

Son yıllarda analitik çalışmaların yanında daha ucuz ve daha kolay olması nedeniyle sayısal çalışmalar ağırlık kazanmasına rağmen, bu çalışmalardan elde edilen sonuçların deneysel olarak desteklenmesi, deneysel çalışmaların önemini arttırmaktadır. Bununla birlikte deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçlar kadar önemli olan bir başka nokta, ölçülen değerlerin doğruluğudur. Doğruluğu etkileyen en önemli etken ise, deneyler sırasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalardır (Asan ve Namlı 1997).

Standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde elde edilen verilerde iki farklı şekilde hata ortaya çıkabilir. Bunlardan biri, deney düzeneğinin ve ölçü araçlarının yapısından kaynaklanan kaçınılmaz hatalar, diğeri ise deneyi yapan kişinin yaptığı ihmallerden kaynaklanan hatalardır. İkinci tür hataların, yetenekli bir kişinin deneyleri yapması ile kısmen giderilmesi mümkündür. Fakat birinci tür hataların giderilmesi veya belirlenmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bunun nedeni, hataların doğrudan deneyde kullanılan araç ve gereçlerin yapısından kaynaklanmasıdır. Bu hatalar, genliklerinin genellikle belli olmaması nedeniyle literatürde *belirsizlik* olarak adlandırılmaktadır. Belirsizlik analizi ise ölçmeler esnasında oluşan hataların belirlenerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır.

Belirsizlik analizi sadece sonuçların yorumlanmasında değil, aynı zamanda uygun ölçüm metodunun ve ölçü aracının seçiminde de önemli rol oynamaktadır. Ölçülecek büyüklük ve ölçü araçlarının seçiminden önce belirsizlik analizinin yapılması ve buna uygun büyüklük ve ölçüm aracının seçilmesi, sonuçların içinde yer alabilecek belirsizliğin en aza indirilmesine yardımcı olacaktır (Holman 1984). Diğer taraftan, ölçülen büyüklüklerden hangisinin toplam belirsizlik üzerinde en etkin rol oynadığının belirlenmesi, bu ölçümlerin daha hassas yapılması için önlem almayı gerektireceğinden sonuçların belirsizliğinin azalmasına ayrıca katkıda bulunacaktır.

Bu bölümde nihai parametre olarak Nusselt sayısının belirsizlik analizi yapılmıştır. Ölçülen büyüklüklerin belirsizlik değerleri yapılan kalibrasyon çalışmalarından ve tecrübî olarak belirlenmiştir. Bunun yanında deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatı sırasında yapılmış herhangi bir hatanın olmadığı kabul edilmiştir.

Yerel Nusselt sayısı, ölçülen değerler cinsinden

$$Nu_x = \frac{2h_x r_{wi}}{k}$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Nusselt sayısı için belirsizlik ifadesi ise,

$$w_{Nu_x} = \left[\left(\frac{\partial Nu_x}{\partial h_x} w_{h_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_x}{\partial r_{wi}} w_{r_{wi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu_x}{\partial k} w_k \right)^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

şeklinde belirlenebilir. Yerel taşınım katsayısındaki belirsizlik, w_h , hesaplama prosedürü takip edilerek sırasıyla ısıtıcı net gücü, ısı akısı, iç ısı üretimi, test borusu iç yüzey sıcaklığı, ventürideki basınç farkı, akış debisi ve yığık sıcaklık için belirsizlikler belirlendikten sonra bulunmuştur. Bu belirsizlik ifadeleri, türevleri alınmış ve gerekli kısaltmalar yapılmış halde sırasıyla aşağıda verilmiştir. Bu ifadelerden de anlaşılacağı üzere, sadece ölçümü yapılan büyüklüklerin belirsizliği dikkate alınmış, diğer belirsizlikler bu çalışmada ihmal edilmiştir.

Isıtıcı net gücündeki belirsizlik,

$$w_P = \left[\left(I w_V \right)^2 + \left(V w_I \right)^2 + \left(-1.24 * (4/3) \pi D' L (\bar{T}' - T_\infty)^{1/3} w_{T'} \right)^2 + \left(1.24 * (4/3) \pi D' L (\bar{T}' - T_\infty)^{1/3} w_{T_\infty} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (31)$$

sabit ısı akısındaki belirsizlik,

$$w_{q_w} = \frac{w_P}{2\pi r_{wi} L} \quad (32)$$

iç ısı üretimindeki belirsizlik,

$$w_{\dot{q}} = \frac{w_P}{2\pi (r_{wo}^2 - r_{wi}^2) L} \quad (33)$$

test borusu iç yüzey sıcaklığındaki belirsizlik,

$$w_{T_{wi,x}} = \left[\left(w_{T_{wo,x}} \right)^2 - \left(K w_{\dot{q}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (34)$$

ventüride oluşan basınç farkındaki belirsizlik,

$$w_{\Delta P} = g(\rho_{su} - \rho_h) w_h \quad (35)$$

akış debisindeki belirsizlik,

$$w_{\dot{V}} = \frac{CA_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \frac{1}{\rho} \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^{-1/2} w_{\Delta P} \quad (36)$$

yığık sıcaklıktaki belirsizlik,

$$w_{T_{b,x}} = \left[\left(w_{T_{b1}} \right)^2 + \left(\frac{x/L}{\rho \dot{V} C_p} w_P \right)^2 + \left(\frac{-P(x/L)}{\dot{V}^2 \rho C_p} w_{\dot{V}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (37)$$

taşınım katsayısındaki belirsizlik,

$$w_{h_x} = \left[\left(\frac{w_{q_w}}{T_{w_i} - T_{b_x}} \right)^2 + \left(\frac{-q_w}{(T_{w_i} - T_{b_x})^2} w_{T_{w_i}} \right)^2 + \left(\frac{-q_w}{(T_{w_i} - T_{b_x})^2} w_{T_{b_x}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (38)$$

Nusselt sayısındaki belirsizlik,

$$w_{Nu_x} = \frac{2r_{wi}}{k} w_{h_x} \quad (39)$$

ifadeleri ile belirlenmiştir.

Nusselt sayısı için toplam belirsizlik,

$$\frac{w_{Nu_x}}{Nu_x} = \frac{\frac{2r_{wi}}{k} w_{h_x}}{\frac{2h_x r_{wi}}{k}} = \frac{w_{h_x}}{h_x} \quad (40)$$

ifadesi ile bulunmuştur.

Ölçülen büyüklükler için belirsizlik değerleri, yapılan kalibrasyon çalışmaları ve deneysel tecrübeler ile belirlenmiş ve bunlar aşağıda verilmiştir.

- Havanın test bölgesine giriş, çıkış sıcaklığı ile test borusu ve yalıtım dış yüzey sıcaklıklarının ölçülmesinde yapılan belirsizlik; ± 0.22 °C
- Ortam sıcaklığının ölçülmesinde yapılan belirsizlik; ± 0.2 °C
- Manometrenin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik; ± 1 mm SS
- Test borusu üzerinden geçen akımın ölçülmesinden kaynaklanan belirsizlik; ± 0.1 A
- Test borusu üzerindeki gerilimin ölçülmesinden kaynaklanan belirsizlik; $\pm 10^{-4}$ Volt

Yukarıda verilen ifadeler ve belirsizlik değerleri ile yapılan belirsizlik analizi ile toplam belirsizliğe, deneyde ölçülen büyüklüklerden gelen belirsizliklerin katkıları Tablo 3.2’de verilmiştir. Tabloda birinci sütunda ölçülen büyüklüklere ait belirsizlikler, ikinci sütunda ise bu büyüklüklerin Nusselt sayısındaki toplam belirsizliğe katkıları yer almaktadır. Nusselt sayısı için toplam belirsizlik mutlak olarak ± 3.29 , yüzde olarak ise $\pm \% 2.83$ bulunmuştur. Bu sonuç, deney sırasında kullanılan ölçme cihazlarının ve ölçme sisteminin oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir.

Nusselt sayısındaki toplam belirsizliğe diğer belirsizliklerin katkıları belirlenirken, ilgili belirsizliğin tabloda belirtilen değerinin sıfır olduğu kabulünden hareketle, Nu_x için belirsizlik değerleri yeniden belirlenmiştir. Tabloda verilen sonuçlar

incelenirse, Nusselt sayısındaki belirsizliğe en büyük katkıyı yaklaşık % 29.33 ile hava giriş sıcaklığı ve test borusu dış yüzey sıcaklığının yapmakta olduğu görülür.

Tablo 3.2 Ölçülen her bir bağımsız değişkenin toplam belirsizlik üzerindeki etkisi

	Nusselt sayısı w_{Nu_x} (%)
Toplam belirsizlik	± 2.83
Havanın giriş sıcaklığı ($w_{T_1} = \pm\%1.45$)	± 2.00
Havanın çıkış sıcaklığı ($w_{T_{b_2}} = \pm\%0.91$)	± 2.83
Test borusu dış yüzey sıcaklığı ($w_{T_{w_x}} = \pm\%0.83$)	± 2.00
Yalıtım dış yüzey ort. sıcaklığı ($w_{\bar{T}_r} = \pm\%1.1$)	± 2.83
Ortam sıcaklığı ($w_{T_\infty} = \pm\%1.01$)	± 2.83
Elektrik akımı ($w_I = \pm\%0.016$)	± 2.83
Voltaj ($w_V = \pm\%0.06$)	± 2.83
Manometre kolları arasındaki fark ($w_h = \pm\%1.11$)	± 2.83

Görüldüğü gibi, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılacak bir büyüklük olan Nusselt sayısındaki belirsizliğe en büyük katkıyı, havanın giriş sıcaklığı ve test borusu dış yüzey sıcaklığından gelen belirsizlik değerleri yapmaktadır. Bunun yanında, diğer belirsizliklerin Nusselt sayısındaki belirsizliğe etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu durum, toplam belirsizlik üzerinde, ölçülecek hava giriş sıcaklığı ve test borusu dış yüzey sıcaklığının etkisinin belirlenmesi ile, bu iki değer için daha hassas bir ölçüm ile belirlenmesinin gerektiği ortaya çıkmaktadır.

4. DENEY SONUÇLARI

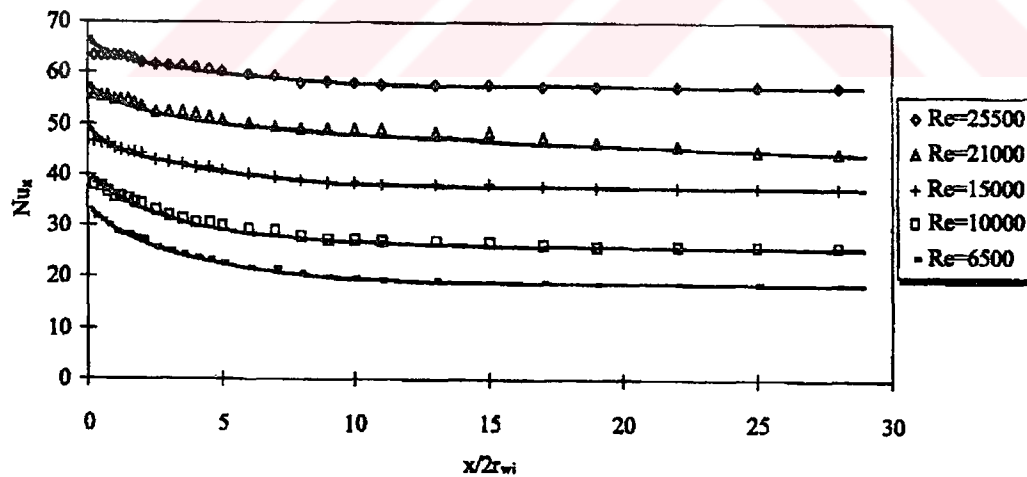
Akış tıkanmasının etkilerini karşılaştırmalı olarak görebilmek için deneylerin bir kısmı tıkanmasız boş borular ile yapılmıştır. Tıkanmasız boru için deney sonuçları ısı gelişme bölgesi ısı transferini karakterize edeceği için, aynı zamanda mevcut deney koşullarının ve sınır şartlarının ne ölçüde sağlanabildiği ve genel olarak uygulanan ölçme ve hesaplama yönteminin güvenilirliğini değerlendirme olanağı sağlayabilir. Nitekim elde edilen sonuçlar Sparrow, Hallman ve Seigel'in ısı gelişme bölgesi için elde ettikleri ve sonuçları (Kays 1966) tarafından verilen analitik çözüm ile karşılaştırılmış ve oldukça iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Diğer taraftan yerel Nusselt sayılarının tam gelişmiş bölgedeki asimptotik değerleri, Dittus-Boelter, Drexel-McAdams, Sieder-Tate ve geçiş bölgesi Reynolds sayıları (2300-10000) için önerilen Gnielinski bağıntısı (Incropera 1990) gibi çeşitli korelasyonlarla kıyaslandığında, genellikle ve %10'a varan ölçüler içerisinde küçük çıkmıştır.

Deneyler esnasında, tam gelişmiş bölge için iç yüzey sıcaklıkları ile yığık sıcaklıklar arasındaki fark büyük tutulduğu takdirde, ortalama yığık sıcaklığa kıyasla daha büyük akışkan sıcaklığı ve gazlar için daha yüksek viskozite, deneysel Nusselt sayılarının herhangi bir korelasyon ile elde edilen değerinden daha küçük bulunmasına neden olur. Viskozite değişimini dikkate alan düzeltme faktörleri kullanılsa bile, korelasyon değerindeki genellikle %3-4 civarındaki azalma aradaki uyumsuzluğu kapatacak düzeyde değildir. Bu nedenle ısıtıcı gücünün düşük ve sıcaklık farkının olabildiğince küçük tutulması gerekir. Ancak bu da sıcaklık ölçümlerinin çok hassas olmasını gerektirir ki; mevcut imkânlar buna elvermemiştir. Öte yandan, farklı ısıtıcı güçlerinde deneylerin tekrarlanması yöntemin güvenilirliğini değerlendirmenin bir başka yoludur. Bu yapıldığında da görülmüştür ki; ısıtıcı gücü çok düşük tutulduğunda makul olmayan sonuçlar çıkabilmekte, büyük tutulduğunda ise yukarıda bahsedilen nedenler ile, asimptotik Nusselt sayılarının deneysel sonuçları ile korelasyon karşılıkları arasındaki fark artmaktadır. Bu iki hususun birlikte değerlendirilmesi deneyler için bir anlamda bir en uygun ısıtıcı gücü belirlenmesini gerektirir ki; bu yapılan denemeler ile yaklaşık 100 W olarak belirlenmiş ve tüm deneylerde ısıtıcı devresinde akım 600 A değerinde sabit tutularak gücün öngörülen

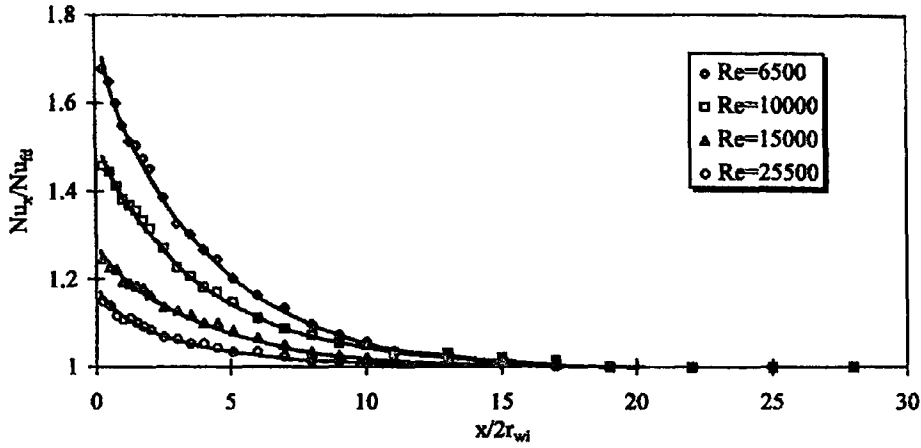
değer civarında olması sağlanmıştır. Ancak bu ısıtıcı gücü tam gelişmiş bölgedeki iç yüzey-yığık sıcaklık farkının 20-30 °C lara kadar artmasına neden olmuştur ki; bu genellikle önerilen 5-8 °C lık farklardan bir hayli büyüktür. Öte yandan, sonuçların tam gelişmiş bölge değerlerine oranlanarak Nu_x/Nu_{fd} şeklinde verilmesi tam gelişmiş bölge yerel Nusselt sayılarındaki uyumsuzluğu göreceli olarak ortadan kaldırır ki bu bir çok çalışmada, (Krall ve Sparrow 1966, Koram ve sparrow 1978, Sparrow, Koram ve Charmchi 1980), olduğu gibi bu çalışmada da böyle yapılmıştır.

Bu araştırmanın iki bağımsız parametresi akış tıkanma oranı ve Reynolds sayısıdır. Deneyler üç farklı tıkanma oranı 1/4, 1/2 ve 3/4, kullanılan fan kapasitesine bağlı olarak da 6500 ila 26400 arasındaki Reynolds sayıları için tekrarlanmıştır.

Şekil 4.1 ve 4.2'de tıkanmasız boş boruda Reynolds sayıları parametrize edilmiş biçimde yerel Nusselt sayılarının boru boyunca değişimi verilmektedir. Bu şekillerden anlaşılacağı gibi, yerel Nusselt sayıları, borunun ısıtılan kısmına girişten itibaren giderek azalmış ve bu azalma tüm deneylerde $x/2r_{wi} \approx 17$ civarında sona ererek, hemen hemen sabit kalmıştır. Bu noktadan sonrası tam gelişmiş bölge olarak isimlendirilir ve literatürdeki mevcut korelasyonlar genellikle bu bölge için geliştirilmiştir.



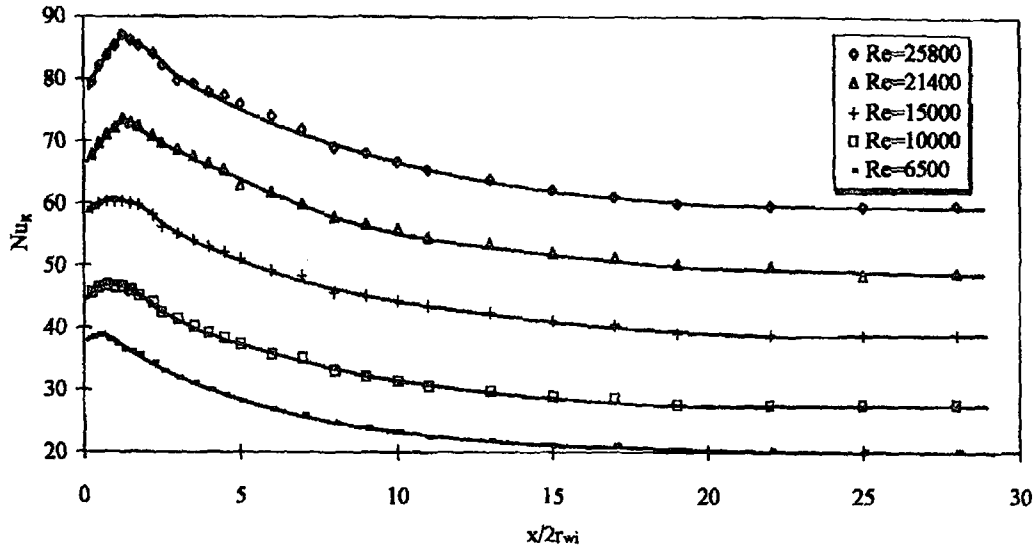
Şekil 4.1 Boş boru için yerel Nusselt sayıları



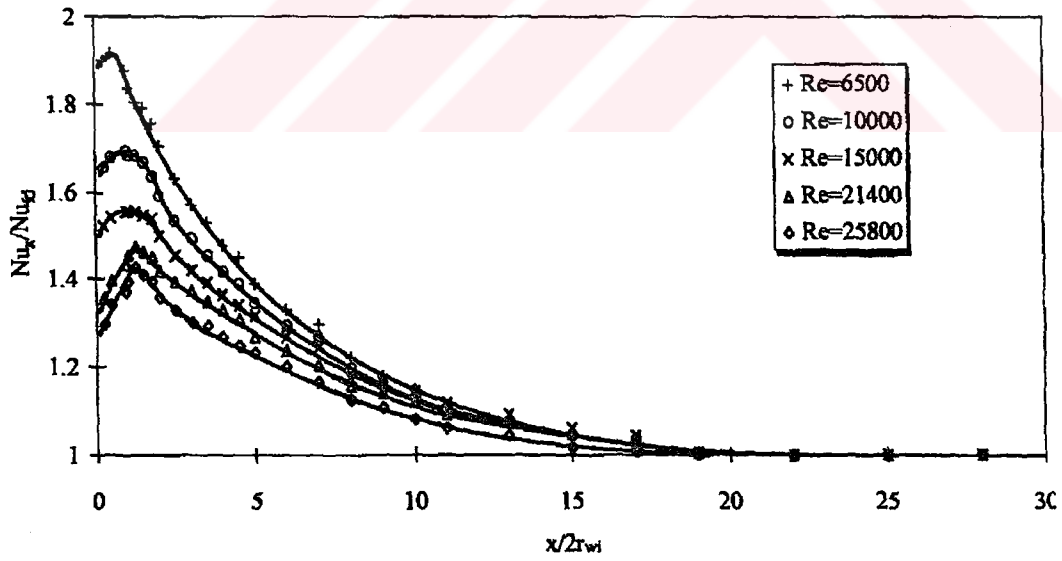
Şekil 4.2 Boş boru için yerel Nusselt sayıları

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, Reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısı daha yüksek değerlerden başlayarak düzgün olarak azalmakta ve tam gelişmiş bölge değerine düşmektedir. Şekil 4.2'de yerel Nusselt sayılarının tam gelişmiş bölge değerine oranı, Nu_x / Nu_{fd} 'nin boru boyunca değişimi görülmektedir. Burada Şekil 4.1'deki durumun tersine, Reynolds sayısı arttıkça Nu_x / Nu_{fd} 'nin değeri azalmaktadır. Bunun nedeni, düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısının tam gelişmiş bölge değerinin daha küçük olmasıdır. Bu şekil yardımıyla tam gelişmiş bölgenin başlangıç konumu aksenal olarak kolaylıkla belirlenebilmektedir.

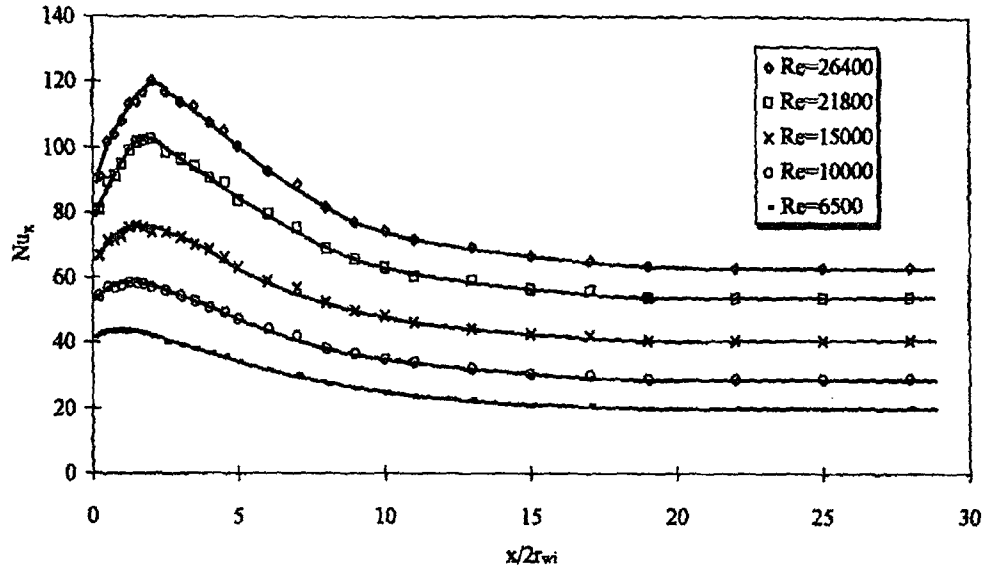
Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de sırasıyla 1/4, 1/2 ve 3/4 akış tıkanma oranları için yerel Nusselt sayılarının aksenal olarak değişimi görülmektedir. Bu şekillerde Nusselt sayıları hem sayısal değerleri ile ve hem de tam gelişmiş bölge değerine oranlanmış haliyle, Nu_x / Nu_{fd} , verilmektedir. Deneysel veriler şekiller üzerinde değişik geometrik sembollerle belirtilmiştir. Belirlenen bu noktalar uygun bir eğri ile birleştirilmiştir.



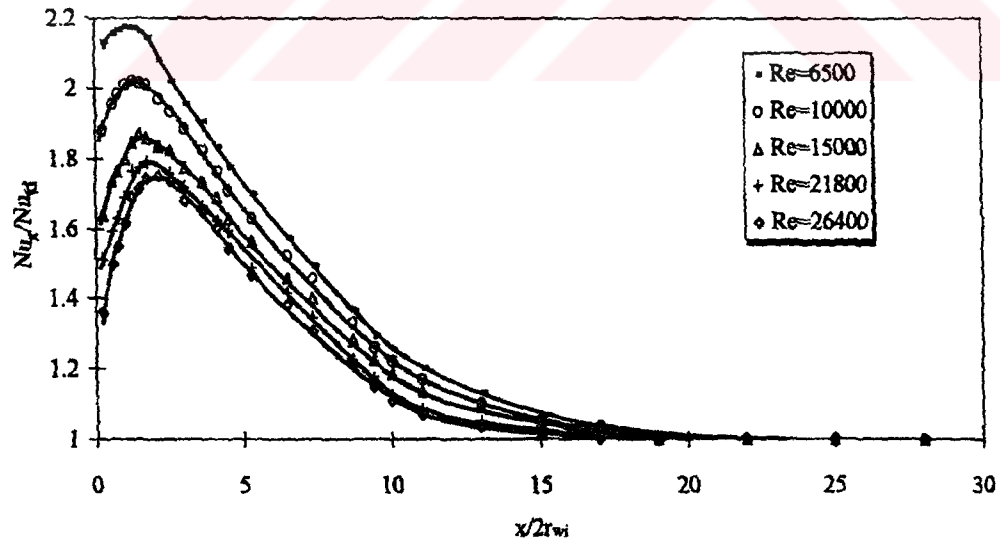
Şekil 4.3 1/4 tıkanma için yerel Nusselt sayıları



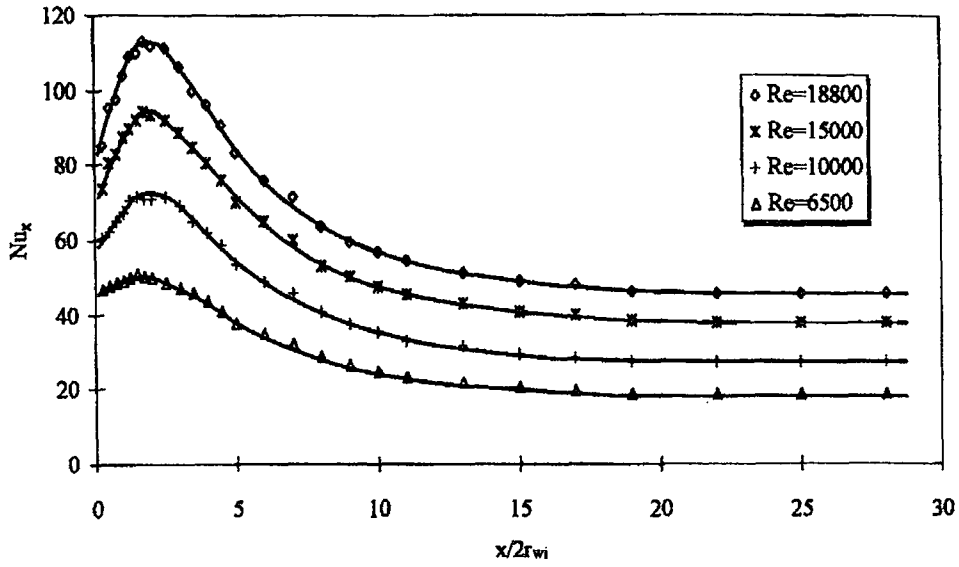
Şekil 4.4 1/4 tıkanma için yerel Nusselt sayıları



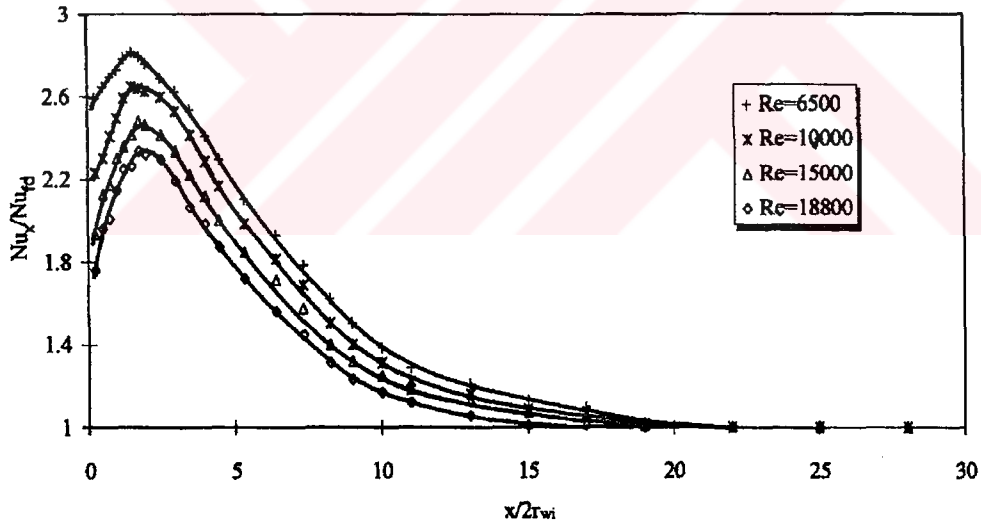
Şekil 4.5 1/2 tıkanma için yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.6 1/2 tıkanma için yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.7 3/4 tıkanma için yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.8 3/4 tıkanma için yerel Nusselt sayıları

Şekillerin incelenmesiyle görülür ki, Nusselt eğrileri tıkanma kesitinden sonra başlangıçta gittikçe artarak bir maksimum değere ulaşmakta ve sonra tam gelişmiş

bölge değerine düzenli bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, esasen başlangıçtan itibaren düzgün olarak azalan normal ısı giriş bölgesi karakteristiğinden farklıdır. Genellikle tıkanmadan sonraki 1-2.5 çap mesafe içerisinde gerçekleşen bu maksimum değerlerin yüzeye yeniden tutunma noktası civarında gerçekleştiği, bunun üst akış tarafının ayrılma, alt akış tarafının ise yeniden gelişme bölgesi olduğu kabul edilir (Krall ve Sparrow 1966).

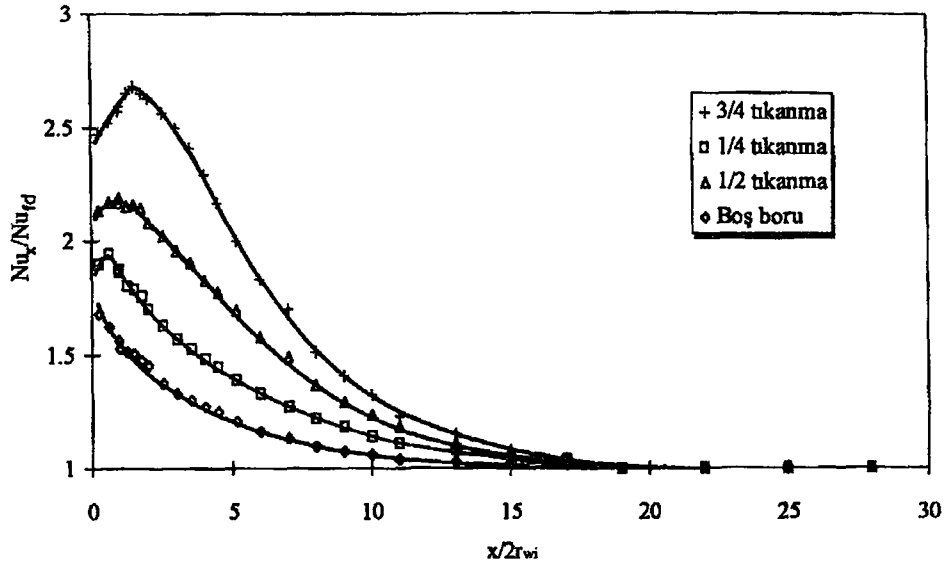
Şekillerin incelenmesinden çıkarılabilecek bir diğer sonuç, akış tıkanmasının ısı taşınım katsayılarını, ayrılma, yeniden tutunma ve yeniden gelişme bölgelerinde ısı gelişme bölgesi ve tam gelişmiş bölge değerlerine göre bir hayli arttırdığıdır.

Akış ayrılması nedeniyle Nusselt sayılarındaki artış düşük Reynolds sayılarında daha fazla olmakta ve Reynolds sayısı azaldıkça etkisi de artmaktadır. Diğer taraftan, Reynolds sayısının etkisinin tıkanma oranı arttıkça da azaldığı görülmektedir ki; bu tıkanma oranının problemdeki daha belirleyici parametre olduğunu göstermektedir. Örneğin; 1/4 akış tıkanması durumunda Reynolds sayısı 15000'den 6500'e düşerken, Nu_x / Nu_{fd} 'nin maksimum değeri 1.57'den 1.90'a yükselmektedir. Bunun yanında 3/4 akış tıkanması durumunda Reynolds sayısı 15000'den 6500'e düştüğünde Nu_x / Nu_{fd} 'nin tepe değeri 2.44'den 2.84'e yükselmektedir.

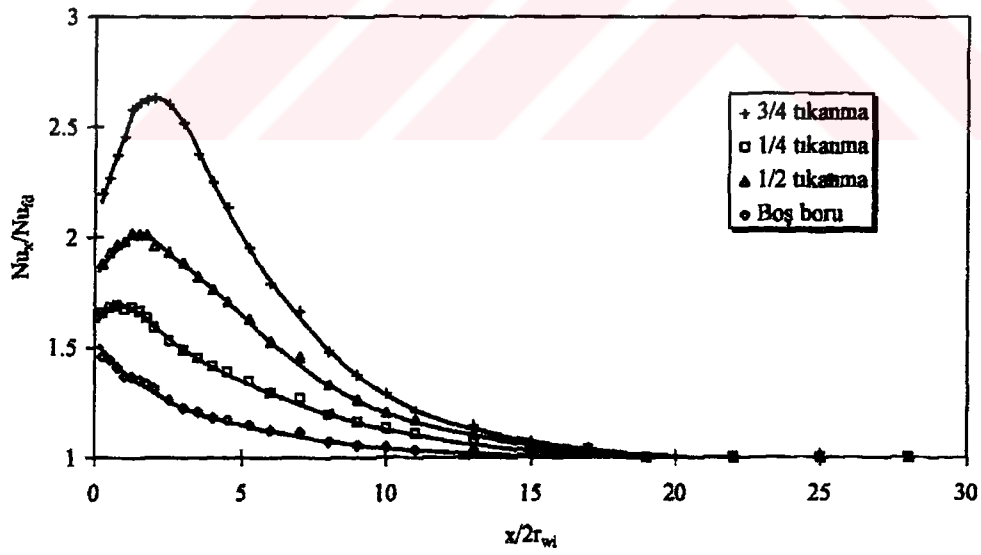
Şekillerden çıkarılan bir diğer sonuç, yüksek Reynolds sayılarında Reynolds sayısının artmasının, Nu_x / Nu_{fd} 'nin maksimum değerine etkisinin az olmasıdır. Örneğin; 3/4 akış tıkanması durumunda Reynolds sayısı 18800'den 6500'e düşerken Nu_x / Nu_{fd} 'nin en büyük değeri 2.32'den 2.82'ye yükselmekte, Reynolds sayısı 18800'den 15000'e düşerken ise 2.32'den 2.43'e yükselmektedir.

Ayrılma bölgesi içerisinde Nusselt sayıları yeniden tutunma noktasına kadar düzgün olarak artmaktadır. Bu bölgede Nusselt sayılarının tam gelişmiş bölge değerlerine nazaran birkaç kat büyük olması dikkat çekicidir. Bu nedenle, bazan "ölü su bölgesi" olarak belirtilen ayrılma bölgesinin, öyle olmadığı anlaşılmaktadır.

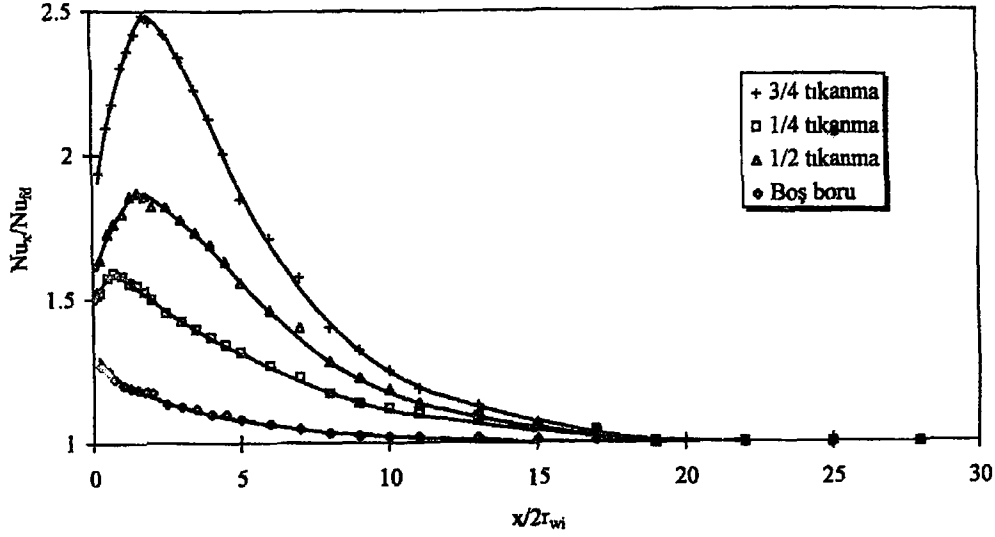
Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de sonuçlar herhangi bir Reynolds sayısı, fakat farklı tıkanma oranları için verilmiştir. Tıkanma ve akış ayrılmasının ısı transferi üzerindeki etkilerini daha net bir biçimde görebilmek için aynı şekillerde tıkanmasız boru deney sonuçları da aynı Reynolds sayıları için verilmiştir.



Şekil 4.9 $Re=6500$ için yerel Nusselt sayıları



Şekil 4.10 $Re=10000$ için yerel Nusselt sayıları

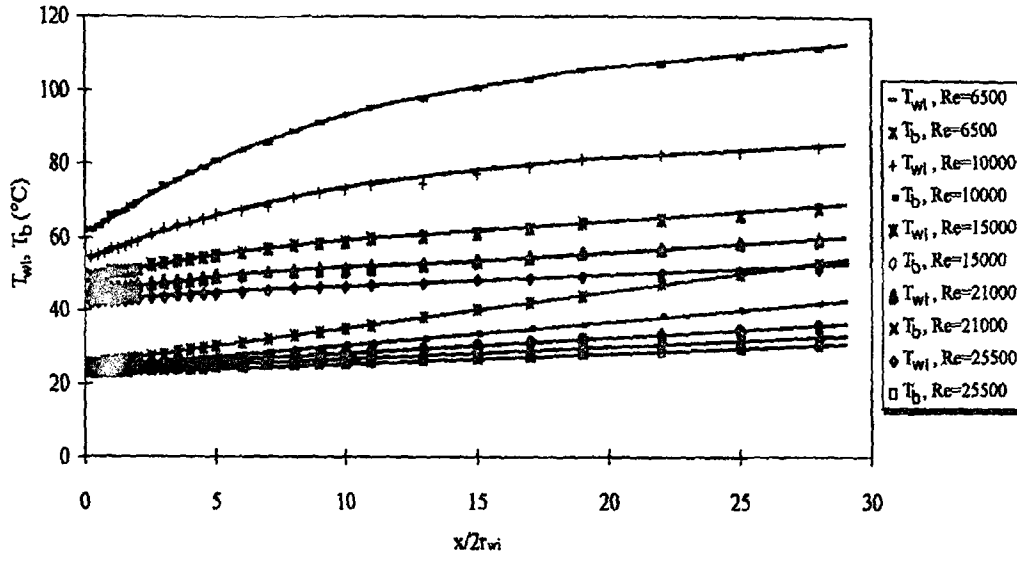


Şekil 4.11 Re=15000 için yerel Nusselt sayıları

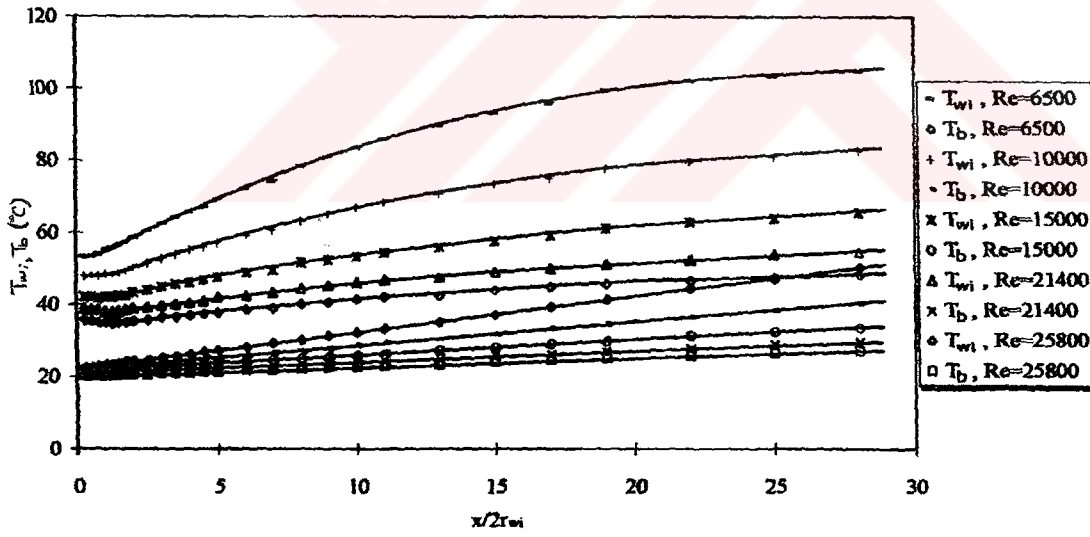
Şekillerin incelenmesiyle farklı akış ayrılma derecesi için elde edilen sonuçların kıyaslanması sonucu, tam gelişmiş duruma göre ısı taşınım katsayısındaki artışın tıkanma oranı ile ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre, tıkanma oranı ve buna bağlı olarak akış ayrılma derecesi arttıkça Nusselt sayılarındaki artış beklenildiği gibi daha büyük olmaktadır.

Maksimum Nusselt sayılarının, yani yeniden tutunmanın gerçekleştiği eksenel konum, hem tıkanma oranı hem de Reynolds sayısı arttıkça hafifçe alt akış tarafına doğru kaymaktadır. Gene, her iki parametredeki artış eğrilerde maksimum Nusselt sayılarının gerçekleştiği bölgenin genişlemesine, dolayısıyla yeniden tutunma bölgesinin daha geniş bir alana yayılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, en küçük akış tıkanması durumunda tutunma noktasının yerinin oldukça iyi belirlenmesi gerekir. Büyük akış tıkanması ve akış ayrılmasında yeniden tutunma noktasının geniş bir alana yayılmasının nedeni, şiddetli çarpmaların etkisinden kaynaklanan dışarı doğru bir yayılma olabilir.

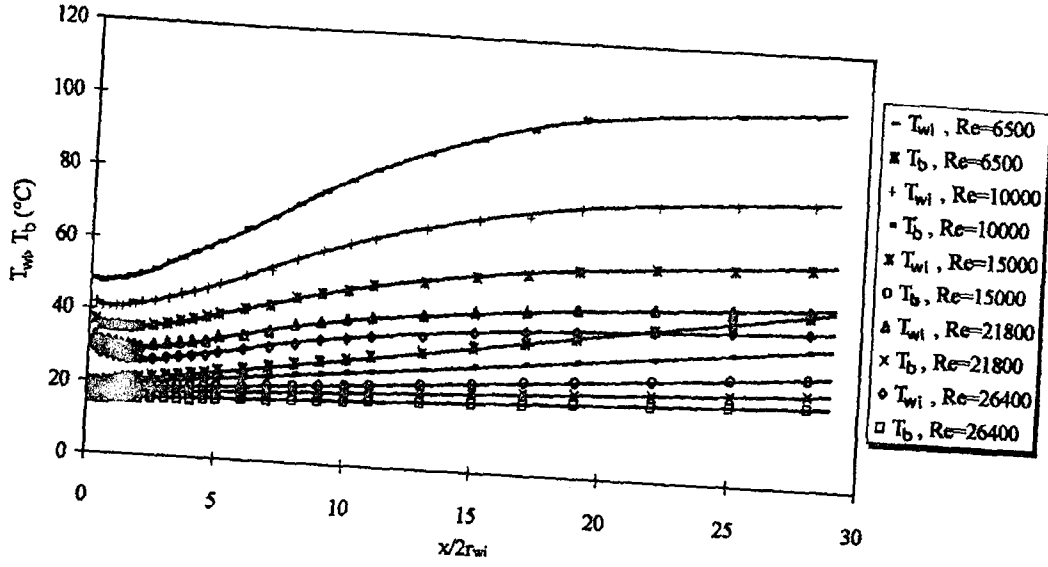
Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'de sırasıyla boş boru ve üç farklı akış tıkanma durumu için iç yüzey ve yığık sıcaklıkların eksenel dağılımı Reynolds sayısı parametrize edilmiş biçimde verilmektedir.



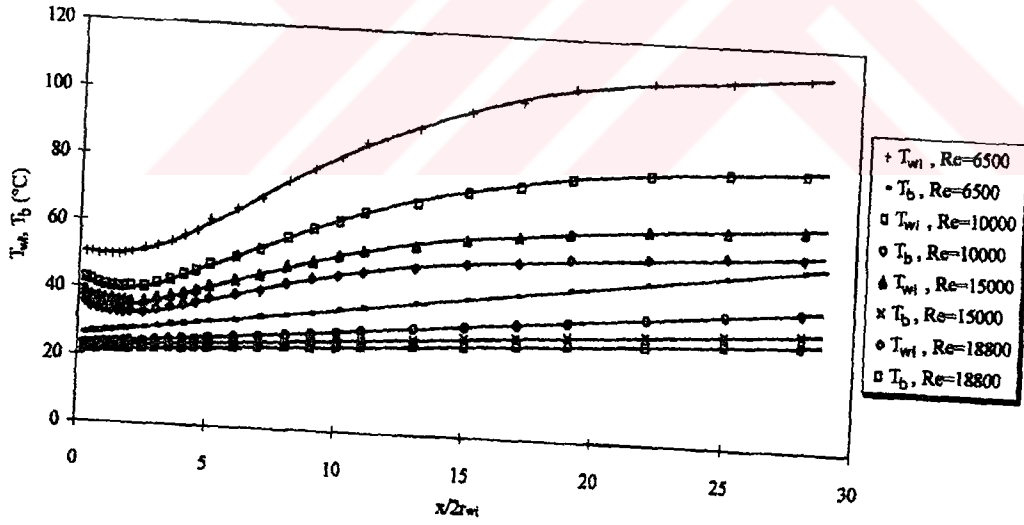
Şekil 4.12 Boş boru için iç yüzey ve yığık sıcaklıklar



Şekil 4.13 1/4 tıkanma için iç yüzey ve yığık sıcaklıklar



Şekil 4.14 1/2 tıkanma için iç yüzey ve yığık sıcaklıklar



Şekil 4.15 3/4 tıkanma için iç yüzey ve yığık sıcaklıklar

Şekil 4.12 dikkatle incelenirse, boş boruda yığık sıcaklık, T_b , değerleri doğrusal olarak artarken, iç yüzey sıcaklığı, T_{wi} , değerlerinin başlangıçta belirli bir bölgede doğrusal olarak sonra yavaş bir şekilde artmakta olduğu görülür. İç yüzey sıcaklığı ve yığık sıcaklık arasındaki fark başlangıçta artmakta ve belirli bir eksenel konumdan itibaren itibaren sabit bir değere ulaşmaktadır.

Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'de görüldüğü üzere, ayrılma bölgesi içerisinde iç yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklıklar arasındaki fark başlangıçta azalarak yeniden tutunma noktasında bir minimum değere düşmektedir. Sıcaklık farkı daha sonra artmakta ve sabit bir değere ulaşmaktadır. Ayrıca her iki sıcaklığın da doğrusal olarak artmaya devam etmesi, tam gelişmiş bölgeye ulaşıldığının göstergesidir.

Sıcaklık dağılımı için çizilen tüm grafiklerde iç yüzey sıcaklığı ile yığık sıcaklık arasındaki fark, $(T_{wi} - T_b)$ 'nin tam gelişmiş bölgedeki değerleri 20 ile 61 °C arasında değişmektedir. Yeniden tutunma noktasında sıcaklık farkı değerleri ise, akış tıkanma oranı ve Reynolds sayısına bağlı olarak 10.61-30.5 °C arasında değişmektedir. Re=10000 için üç ayrı tıkanma oranı sıcaklık farkına göre kıyaslanmış ve 1/4 tıkanma için $T_{wi} - T_b = 25.78$ °C, 1/2 tıkanma için bu fark 21.16 °C ve 3/4 tıkanma için 15.56 °C olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yeniden tutunma noktasında en küçük sıcaklık farkı, en büyük akış ayrılması durumunda ortaya çıkmaktadır.

O halde genel olarak, büyük akış ayrılması durumunda yeniden tutunma noktasındaki sıcaklık farkı daha küçük olmaktadır. Öte yandan herhangi bir tıkanma oranı için, Reynolds sayısı arttıkça yeniden tutunma noktasında daha küçük sıcaklık farkları ortaya çıkmaktadır.

5. TARTIŞMA

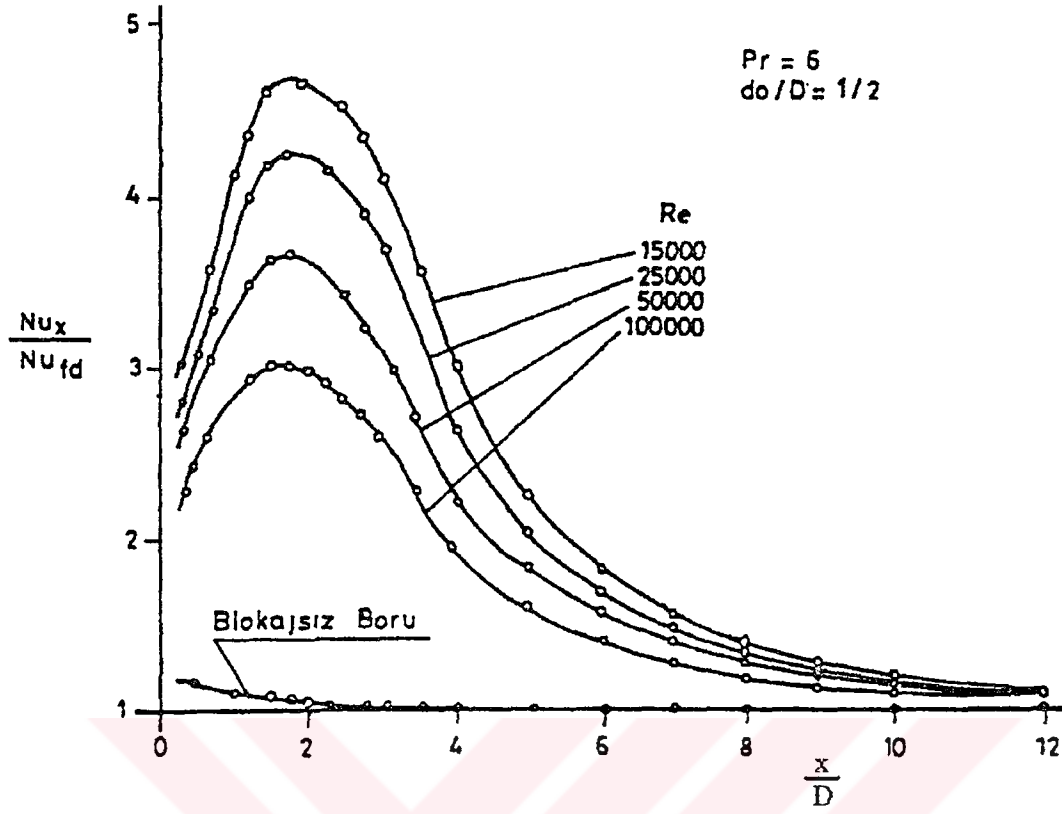
Bu çalışmada sabit yüzey ısı akısı ile ısıtılan bir borunun girişine yerleştirilen orifis şeklindeki tıkanma elemanlarının türbülanslı akışta ısı transferine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Boru girişine yerleştirilen orifis plakalarının neden olduğu akış ayrılması, ısıl gelişme bölgesinde yerel Nusselt sayılarının artmasına neden olmaktadır.
2. Uygulanan tıkanma oranı arttıkça ısı transferindeki artış da daha fazla olmaktadır.
3. Akış ayrılması nedeniyle Nusselt sayılarındaki artış düşük Reynolds sayılarında daha fazla olmakta ve Reynolds sayısı azaldıkça etkisi de artmaktadır. Ayrıca tıkanma oranı arttıkça Reynolds sayısının etkisi azalmaktadır. Bu da tıkanma oranının problemdeki daha etkili bir parametre olduğunu göstermektedir.

Tıkanmasız boş boru için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Sparrow, Hallman ve Seigel'in ısıl gelişme bölgesi için elde ettikleri ve sonuçları (Kays 1966) tarafından verilen analitik çözüm ile kıyaslanmış ve oldukça iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Boş boru deneylerinde tam gelişmiş bölge değerine doğru düzgün olarak azalan eğriler elde edilmiştir. Öte yandan Nusselt sayılarının tam gelişmiş bölgedeki asimptotik değerleri, Dittus-Boelter, Drexel-McAdams, Sieder-Tate ve geçiş bölgesi Reynolds sayıları (2300-10000) için önerilen Gnielinski bağıntısı (Incropera 1990) gibi çeşitli korelasyonlar ile kıyaslandığında, genellikle ve %10'a varan ölçüler içerisinde, küçük çıkmıştır.

Benzer bir çalışmada farklı tıkanma oranları için yapılan deneylerde (Krall 1966) Şekil 5.1'de görülen, önce bir maksimum değere artan ve daha sonra tam gelişmiş bölgedeki asimptotik değere doğru azalan aynı karakterde eğriler elde edilmiştir. Bu durum, kullanılan deney düzeneği ve ölçme yöntemlerinin yerel özellikleri belirlemede yeterli hassasiyete sahip olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 5.1 Yerel Nusselt sayılarının aksenal dağılımı (Krall 1966)

6. ÖNERİLER

Deneylerde akışkan olarak hava kullanılması ve havanın Prandtl sayısı nispeten küçük ($Pr \cong 0.7$) bir akışkan olması, daha hassas sonuçlar alınmasını engellemiş olabilir. Daha büyük kapasiteli bir fan ile ve daha yüksek Prandtl sayısına sahip bir akışkan ile örneğin su ($Pr \cong 4 - 6$) ile yapılacak deneylerden daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Çünkü Nusselt sayısı hem Reynolds sayısı ve hem de Prandtl sayısı ile artmaktadır. Literatürde karşılaşılan benzer çalışmaların çoğunda ısı transferi deneylerinde su kullanılmış, Reynolds sayısı ise oldukça yüksek değerlere (150000-200000) kadar arttırılmıştır.

Bu çalışmada eksik kalan bir husus, basınç kaybı deneylerinin yapılamamış olmasıdır. Isı transferini, deneylerde kullanılan orifis plakaları ile ya da benzer bir yöntem ile meydana getirilen ilave türbülans ile arttırmak basınç kaybını da büyük ölçüde arttıracaktır. Bu fan ya da pompa gücünün artması demektir. Basınç kaybındaki artışın tıkanma oranının artması ile artacağı da beklenir. Gene Reynolds sayısı, dolayısıyla akışkanın hızı arttıkça basınç kaybı da büyüyecektir. Isı transferindeki artış ile basınç kaybındaki artış kıyaslanarak, herhangi bir Reynolds sayısı aralığında, hangi oranda tıkanma uygulamak gerektiğini belirlemek yönünde gerçekleştirilecek bir çalışma, bu çalışmayı tamamlayacak nitelikte olacaktır.

7. KAYNAKLAR

- ASAN, H. ve NAMLI, L. 1997. Deneysel Isı Transferi ve Basınç Kaybı Çalışmalarında Belirsizlik Analizi. Bildiri No.2D-4, *11.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Bildiriler Kitabı*, Cilt 1, s.369-378,17-19 Eylül, Edirne.
- AYHAN, T. 1982. Sabit Isı Akısı Altında Borular İçindeki Akış İçin Yerel ve Ortalama Nusselt Sayılarının Tayini İçin Deneysel Bir Yöntem. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, Cilt 5, Sayı 3.
- BOELTER, L.M.K., YOUNG, G. Ve IVERSON, H:W: 1948. An investigation of aircraft heaters, XXVII-Distribution of heat transfer rate in the entrance section of a circular tube. *NACA TN 1451*.
- DAĞSÖZ, A.K. 1990. Isı Transferi, İTÜ, İstanbul.
- FILETTI, E.G. ve KAYS, W.M. 1967. Heat transfer in seperated, reattached and redevelopment regions behind a double step and entrance to a flat duct. *Trans. ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.89, pp,163-168.
- HOLMAN, J.P. 1976. Heat Tansfer, p.273, McGraw-Hill, Kogakusha.
- HOLMAN, J:P: 1984. Experimental Methods for Engineers, 4th ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- INCROPERA, P:P: ve DEWITT, D:P: 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, p.497, John Wiley.
- KAKAÇ, S. 1970. Örneklerle Isı Transferi, ODTÜ, Yayın No.27, Ankara.
- KAKAÇ, S. Ve YENER, S. 1979. Heat Conduction, METU Pub.No.60, Ankara.

KAYS, W:M. 1966. Convective Heat and mass Transfer, pp.186-191, McGraw-Hill.

KORAM, K:K: ve SPARROW, E:M: 1978. Turbulent Heat Transfer Downstream of an Unsymmetric Blockage in a Tube. *Trans. ASME J. of Heat Tr.*, Vol.100, 588-594.

KRALL, K:M: ve SPARROW, E:M: 1966. Turbulent Heat Transfer in the Separated, Reattached and Redevelopment Regions of a Circular Tube. *Trans. ASME J. of Heat Tr.*, Vol.87, 131-136.

SPARROW, E:M., KORAM, K:K. ve CHARMCHI, M. 1980. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics Induced by a Slat Blockage in a Circular Tube *Trans. ASME J. of Heat Tr.*, Vol.102, 64-70.

WILLIAMS, P.S. ve KNUDSEN, J.G. 1963. Local rates of heat transfer and pressure losses in the vicinity of annular orifices. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.41, pp.56-61.

ZEMANIC, P.P. ve DOUGAL, R.S. 1970. Local heat transfer downstream of abrupt circular channel expansion. *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.92, pp.53-60.

8. EKLER

Ek 1. Tıkanmasız Boş Boru Deney Verileri

Re=6500

 $T_1=24.98\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=56.20\text{ }^\circ\text{C}$ $U_m=3.337\text{ m/s}$ $A_i=0.000855\text{ m}^2$ $P_i=108.84\text{ W}$ $P=94.032\text{ W}$ $q_w=944.799\text{ W/m}^2$ $C_p=1008.95\text{ J/kg}^\circ\text{C}$ $k=0.0271\text{ W/m}^\circ\text{C}$ $\rho=1.1244\text{ kg/m}^3$ $\nu=1.702*10^{-5}$

Pr=0.7109

$x/2r_{wi}$	T_{wi} ($^\circ\text{C}$)	T_b ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	h_x ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)	Nu_x
0.25	61.59	25.23	36.36	25.98	31.64
0.50	62.49	25.48	37.01	25.52	31.08
0.75	63.84	25.73	38.11	24.79	30.18
1	65.86	25.98	39.88	23.69	28.85
1.25	66.54	26.23	40.31	23.44	28.49
1.50	66.98	26.47	40.51	23.32	28.35
1.75	68.11	26.72	41.39	22.83	27.76
2	69.01	26.97	42.04	22.47	27.33
2.5	71.93	27.47	44.46	21.25	25.84
3	73.95	27.97	45.98	20.55	24.98
3.5	75.29	28.47	46.82	20.17	24.53
4	77.09	28.97	48.12	19.63	23.87
4.5	78.44	29.47	48.97	19.29	23.45
5	80.69	29.97	50.72	18.63	22.64
6	83.38	30.97	52.41	18.02	21.91
7	84.96	31.96	53.00	17.83	21.68
8	88.55	32.96	55.59	16.99	20.66
9	90.79	33.96	56.83	16.62	20.21
10	92.59	34.96	57.63	16.39	19.93
11	94.84	35.96	58.88	16.04	19.51
13	97.09	37.95	59.14	15.98	19.42
15	99.78	39.95	59.83	15.79	19.20
17	102.03	41.95	60.08	15.72	19.12
19	104.94	43.94	61.00	15.48	18.83
22	107.94	46.94	61.00	15.48	18.83
25	110.93	49.93	61.00	15.48	18.83
28	113.93	52.93	61.00	15.48	18.83

Ek 2. Tıkanmasız Boş Boru Deney Verileri

$Re=10000$

$T_1=23.41\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=44.75\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=4.494\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_t=105.6\text{ W}$

$P=94.32\text{ W}$

$q_w=947.691\text{ W/m}^2$

$C_p=1007.586\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0267\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1497\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.642\cdot 10^{-5}$

$Pr=0.7116$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	54.40	23.57	30.83	30.74	38.01
0.50	54.85	23.73	31.12	30.45	37.66
0.75	55.75	23.90	31.85	29.75	36.79
1	56.87	24.06	32.81	28.88	35.72
1.25	57.10	24.23	32.87	28.83	35.65
1.50	57.55	24.39	33.16	28.58	35.35
1.75	58.22	24.56	33.66	28.15	34.81
2	58.90	24.73	34.17	27.73	34.29
2.5	60.96	25.06	35.90	26.39	32.88
3	62.04	25.39	36.65	25.85	31.97
3.5	62.94	25.72	37.22	25.46	31.48
4	64.06	26.05	38.01	24.93	30.83
4.5	64.74	26.38	38.36	24.71	30.55
5	65.86	26.71	39.15	24.21	29.93
6	67.43	27.37	40.06	23.65	29.25
7	68.33	28.03	40.30	23.52	29.08
8	70.58	28.69	41.89	22.62	27.98
9	71.93	29.36	42.57	22.26	27.53
10	72.83	30.02	42.81	22.14	27.37
11	74.17	30.68	43.49	21.79	26.94
13	75.52	32.00	43.52	21.77	26.93
15	77.32	33.32	44.00	21.54	26.63
17	78.89	34.64	44.25	21.42	26.48
19	80.91	35.97	44.94	21.08	26.07
22	82.89	37.95	44.94	21.08	26.07
25	84.88	39.94	44.94	21.08	26.07
28	86.86	41.92	44.94	21.08	26.07

Ek 3. Tıkanmasız Boş Boru Deney Verileri

Re=15000

$T_1=23.41\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=38.23\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=7.378\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_i=102.9\text{ W}$

$P=94.667\text{ W}$

$q_w=951.184\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.905\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0265\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1624\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.611*10^{-5}$

$Pr=0.7119$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	49.02	23.52	25.50	37.30	46.53
0.50	49.24	23.63	25.61	37.14	46.32
0.75	49.46	23.74	25.72	36.98	46.11
1	50.14	23.85	26.29	36.18	45.12
1.25	50.36	23.96	26.40	36.03	44.93
1.50	50.47	24.07	26.40	36.17	44.70
1.75	50.58	24.18	26.40	36.01	44.50
2	51.04	24.28	26.76	35.56	44.35
2.5	52.16	24.51	27.65	34.39	42.90
3	52.61	24.73	27.88	34.11	42.55
3.5	53.06	24.95	28.11	33.84	42.21
4	53.73	25.17	28.56	33.30	41.53
4.5	53.96	25.39	28.57	33.29	41.53
5	54.63	25.61	29.02	32.77	40.88
6	55.53	26.05	29.48	32.26	40.24
7	56.43	26.49	29.94	31.77	39.63
8	57.33	26.93	30.40	31.29	39.03
9	58.00	27.37	30.63	31.05	38.73
10	58.45	27.81	30.64	31.04	38.72
11	59.12	28.25	30.87	30.81	38.43
13	60.02	29.13	30.89	30.79	38.35
15	60.92	30.02	30.90	30.77	38.20
17	62.04	30.89	31.15	30.54	38.09
19	63.40	31.78	31.62	30.08	37.53
22	64.72	33.10	31.62	30.08	37.53
25	66.04	34.42	31.62	30.08	37.53
28	67.36	35.74	31.62	30.08	37.53

Ek 4. Tıkanmasız Boş Boru Deney Verileri

$Re=21000$

$T_1=23.86\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=34.86\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=10.211\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_i=101.1\text{ W}$

$P=94.469\text{ W}$

$q_w=949.195\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.599\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0264\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1681\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.598*10^{-5}$

$Pr=0.7121$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	45.19	23.94	21.25	44.64	55.89
0.50	45.42	24.01	21.41	44.34	55.52
0.75	45.60	24.09	21.51	44.14	55.17
1	45.87	24.17	21.70	43.74	54.77
1.25	45.9	24.25	21.65	43.60	54.50
1.50	46.01	24.33	21.68	43.20	54.00
1.75	46.09	24.41	21.68	42.85	53.56
2	46.77	24.49	22.28	42.60	53.25
2.5	47.22	24.65	22.57	42.05	52.65
3	47.44	24.80	22.64	41.93	52.49
3.5	47.67	24.96	22.71	41.80	52.34
4	47.89	25.12	22.77	41.68	52.19
4.5	48.34	25.28	23.06	41.15	51.53
5	48.79	25.44	23.35	40.64	50.89
6	49.46	25.75	23.71	40.03	50.12
7	50.14	26.07	24.07	39.43	49.38
8	50.50	26.38	24.11	39.58	49.35
9	50.84	26.70	24.14	39.37	49.29
10	51.30	27.02	24.28	39.32	49.15
11	51.67	27.33	24.34	39.30	49.12
13	52.38	27.97	24.41	38.87	48.67
15	53.06	28.60	24.46	38.80	48.59
17	54.18	29.23	24.95	38.04	47.63
19	55.31	29.86	25.45	37.31	46.72
22	56.65	30.81	25.84	36.73	45.99
25	58.23	31.76	26.47	35.86	44.91
28	59.35	32.71	26.64	35.63	44.62

Ek 5. Tıkanmasız Boş Boru Deney Verileri

$Re=25500$

$T_1=22.96\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=32.4\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=12.21\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_f=101.1\text{ W}$

$P=95.653\text{ W}$

$q_w=961.092\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.247\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0262\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1746\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.582*10^{-5}$

$Pr=0.7122$

$x/2r_{wi}$	T_{wi} (°C)	T_b (°C)	ΔT (°C)	h_x (W/m ² °C)	Nu_x
0.25	42.05	23.02	19.03	50.51	63.53
0.50	42.10	23.09	19.01	50.45	63.50
0.75	42.19	23.16	19.03	50.35	63.45
1	42.27	23.22	19.05	50.25	63.35
1.25	42.35	23.29	19.06	50.10	63.25
1.50	42.50	23.36	19.14	49.85	63.14
1.75	42.73	23.42	19.31	49.79	62.62
2	42.95	23.49	19.46	49.38	62.12
2.5	43.17	23.62	19.55	49.15	61.83
3	43.40	23.76	19.64	48.93	61.54
3.5	43.62	23.89	19.73	48.70	62.25
4	43.85	24.02	19.83	48.47	60.97
4.5	44.07	24.15	19.92	48.25	60.69
5	44.29	24.29	20.00	48.03	60.41
6	44.75	24.55	20.20	47.59	59.86
7	45.19	24.82	20.37	47.17	59.33
8	45.87	25.09	20.78	46.24	58.16
9	46.09	25.35	20.74	46.15	58.28
10	46.32	25.62	20.70	46.09	58.15
11	46.77	25.88	20.89	46.02	57.89
13	47.22	26.42	20.80	45.95	57.80
15	47.89	26.95	20.94	45.89	57.73
17	48.56	27.48	21.08	45.59	57.34
19	49.24	28.02	21.22	45.56	57.30
22	50.04	28.82	21.22	45.56	57.30
25	50.84	29.62	21.22	45.56	57.30
28	51.64	30.42	21.22	45.56	57.30

Ek 6. 1/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=6500

$T_1=22.06\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=52.38\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=3.318\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_i=107.7\text{ W}$

$P=96.014\text{ W}$

$q_w=964.716\text{ W/m}^2$

$C_p=1008.245\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0269\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1375\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.671*10^{-5}$

$Pr=0.7113$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	53.06	22.31	30.75	31.37	38.48
0.50	53.06	22.56	30.50	31.15	38.25
0.75	53.96	22.82	31.14	30.98	37.99
1	55.31	23.07	32.24	29.93	36.71
1.25	55.75	23.33	32.42	29.75	36.48
1.50	56.20	23.58	32.62	29.57	36.27
1.75	57.10	23.83	33.27	28.99	35.56
2	58.45	24.08	34.37	28.07	34.43
2.5	60.47	24.59	35.88	26.88	32.98
3	62.27	25.10	37.17	25.95	31.83
3.5	63.84	25.61	38.23	25.23	30.95
4	65.64	26.12	39.52	24.41	29.94
4.5	66.98	26.62	40.36	23.90	29.31
5	69.23	27.13	42.10	22.91	28.10
6	72.15	28.14	44.01	21.92	26.88
7	74.17	29.16	45.01	21.43	26.28
8	78.22	30.17	48.05	20.08	24.63
9	80.69	31.18	49.51	19.48	23.90
10	83.16	32.19	50.97	18.93	23.22
11	85.86	33.21	52.65	18.32	22.47
13	89.45	35.24	54.21	17.79	21.83
15	93.27	37.27	56.00	17.23	21.13
17	95.74	39.29	56.45	17.09	20.96
19	99.78	41.32	58.46	16.50	20.24
22	102.83	44.37	58.46	16.50	20.24
25	105.87	47.41	58.46	16.50	20.24
28	108.91	50.45	58.46	16.50	20.24

Ek 7. 1/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

$Re=10000$

$T_1=21.61\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=42.51\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=4.933\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_i=105.12\text{ W}$

$P=96.38\text{ W}$

$q_w=968.394\text{ W/m}^2$

$C_p=1007.163\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0265\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1576\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.623*10^{-5}$

$Pr=0.7118$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	48.12	21.78	26.34	36.76	45.71
0.50	47.89	21.95	25.94	37.32	46.40
0.75	47.89	22.11	25.78	37.56	46.70
1	48.34	22.28	26.06	37.16	46.60
1.25	48.34	22.45	25.89	37.40	46.50
1.50	48.79	22.62	26.17	37.00	46.00
1.75	49.46	22.79	26.67	36.30	45.13
2	50.36	22.96	27.40	35.33	43.93
2.5	51.71	23.29	28.42	34.07	42.36
3	52.83	23.63	29.20	33.16	41.22
3.5	53.96	23.96	30.00	32.29	40.14
4	55.08	24.30	30.78	31.46	39.12
4.5	55.98	24.64	31.34	30.90	38.42
5	57.33	24.98	32.35	29.93	37.22
6	59.35	25.65	33.70	28.74	35.73
7	60.69	26.32	34.37	28.17	35.03
8	63.39	26.99	36.40	26.61	33.08
9	65.19	27.67	37.52	25.81	32.09
10	66.76	28.34	38.42	25.21	31.34
11	68.33	29.02	39.31	24.63	30.62
13	70.81	30.36	40.45	23.95	29.77
15	73.50	31.71	41.79	23.17	28.81
17	75.07	33.06	42.01	23.05	28.65
19	78.00	34.41	43.59	22.22	27.62
22	80.02	36.43	43.59	22.22	27.62
25	82.04	38.45	43.59	22.22	27.62
28	84.06	40.47	43.59	22.22	27.62

Ek 8. 1/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

$Re=15000$

$T_1=21.16\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=35.54\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=7.349\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_f=105.36\text{ W}$

$P=97.305\text{ W}$

$q_w=977.687\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.388\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0263\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.172\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.588*10^{-5}$

$Pr=0.7122$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	42.05	21.27	20.78	47.05	59.07
0.50	41.83	21.38	20.45	47.83	60.05
0.75	41.60	21.50	20.10	48.09	60.38
1	42.05	21.61	20.44	47.83	30.38
1.25	42.05	21.72	20.33	48.09	30.38
1.50	42.28	21.84	20.44	47.83	60.05
1.75	42.50	21.95	20.55	47.53	59.73
2	43.17	22.06	21.11	46.31	58.14
2.5	44.07	22.29	21.78	44.88	56.34
3	44.75	22.51	22.24	43.97	55.21
3.5	45.42	22.74	22.68	43.10	54.12
4	46.09	22.96	23.13	42.27	53.07
4.5	46.77	23.19	23.58	41.46	52.06
5	47.44	23.42	24.02	40.69	51.08
6	48.79	23.87	24.92	39.23	49.25
7	49.69	24.32	25.37	38.53	48.38
8	51.71	24.77	26.94	36.29	45.56
9	52.38	25.22	27.16	35.99	45.18
10	53.28	25.67	27.61	35.41	44.45
11	54.41	26.12	28.29	34.57	43.39
13	55.98	27.03	28.95	33.77	42.39
15	57.77	27.93	29.84	32.75	41.12
17	59.12	28.83	30.29	32.27	40.52
19	61.15	29.73	31.42	31.12	39.07
22	62.72	31.08	31.64	30.91	38.80
25	64.08	32.44	31.64	30.91	38.80
28	65.44	33.79	31.64	30.91	38.80

Ek 9. 1/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

$Re=21400$

$T_1=20.71\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=31.73\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=10.162\text{ m/s}$

$A_i=0.000855\text{ m}^2$

$P_i=100.8\text{ W}$

$P=96.703\text{ W}$

$q_w=971.644\text{ W/m}^2$

$C_p=1005.941\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0261\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1803\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.568*10^{-5}$

$Pr=0.7124$

$x/2r_{wi}$	T_{wi} ($^\circ\text{C}$)	T_b ($^\circ\text{C}$)	ΔT ($^\circ\text{C}$)	h_x ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)	Nu_x
0.25	38.91	20.79	18.12	53.64	67.72
0.50	38.46	20.87	17.59	55.25	69.77
0.75	38.23	20.95	17.28	56.23	70.99
1	38.01	21.03	16.98	57.24	72.27
1.25	37.78	21.11	16.67	58.28	73.59
1.50	38.01	21.19	16.82	57.78	72.97
1.75	38.23	21.27	16.96	57.29	72.35
2	38.68	21.35	17.33	56.07	70.81
2.5	39.13	21.52	17.61	55.16	69.65
3	39.58	21.68	17.90	54.27	68.53
3.5	40.03	21.84	18.19	53.41	67.44
4	40.48	22.00	18.48	52.58	66.39
4.5	40.93	22.16	18.77	51.77	65.37
5	41.83	22.32	19.51	49.81	62.90
6	42.50	22.64	19.86	48.93	61.78
7	43.40	22.96	20.44	47.55	60.04
8	44.52	23.29	21.23	45.76	57.77
9	45.19	23.61	21.58	45.01	56.83
10	45.87	23.93	21.94	44.29	55.92
11	46.77	24.25	22.52	43.16	54.49
13	47.67	24.89	22.78	42.67	53.88
15	49.02	25.54	23.48	41.39	52.26
17	50.14	26.18	23.96	40.57	51.22
19	51.26	26.83	24.43	39.77	50.22
22	52.38	27.79	24.59	39.52	49.89
25	53.35	28.76	24.59	39.52	49.89
28	54.32	29.73	24.59	39.52	49.89

Ek 10. 1/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

$Re=25800$

$T_1=19.81\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=29.02\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=12.15\text{ m/s}$

$A_f=0.000855 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$

$P_f=100.2\text{ W}$

$P=97.52\text{ W}$

$q_w=979.853\text{ W/m}^2$

$C_p=1005.565\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0260\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1873\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.552 \cdot 10^{-5}$

$Pr=0.7126$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	35.54	19.88	15.66	62.58	79.40
0.50	35.09	19.90	15.19	64.72	82.11
0.75	34.86	20.02	14.84	65.99	83.73
1	34.64	20.08	14.56	67.32	85.41
1.25	34.41	20.15	14.26	68.69	87.16
1.50	34.64	20.22	14.42	67.95	86.21
1.75	34.86	20.29	14.57	67.21	85.28
2	35.31	20.35	14.96	65.50	83.10
2.5	35.76	20.49	15.27	64.15	81.39
3	36.21	20.62	15.59	62.86	79.75
3.5	36.44	20.76	15.68	62.50	79.29
4	36.88	20.89	15.99	61.27	77.74
4.5	37.11	21.03	16.08	60.93	77.31
5	37.56	21.16	16.40	59.76	75.83
6	38.23	21.43	16.80	58.33	74.00
7	38.68	21.70	16.98	57.71	73.22
8	40.03	21.98	18.05	54.27	68.17
9	40.48	22.25	18.23	53.73	66.70
10	41.15	22.52	18.63	52.57	65.29
11	41.83	22.79	19.04	51.46	64.83
13	42.50	23.33	19.17	51.09	62.21
15	43.89	23.87	20.02	49.03	61.22
17	44.75	24.41	20.34	48.17	61.20
19	45.29	24.95	20.34	48.17	61.20
22	46.10	25.76	20.34	48.17	61.20
25	46.91	26.57	20.34	48.17	61.20
28	47.72	27.38	20.34	48.17	61.20

Ek 11. 1/2 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=6500

$T_1=19.14\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=49.92\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=3.303\text{ m/s}$

$A_i=0.000855*10^{-4}\text{ m}^2$

$P_f=106.8\text{ W}$

$P=97.50\text{ W}$

$q_w=982.162\text{ W/m}^2$

$C_p=1007.681\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0267\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1480\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.646*10^{-5}$

$Pr=0.7115$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	47.89	19.39	28.50	34.46	42.57
0.50	47.66	19.65	28.02	35.06	43.30
0.75	47.89	19.91	27.98	35.10	43.35
1	48.56	20.16	28.40	34.58	43.28
1.25	48.56	20.42	28.14	34.90	43.20
1.50	48.79	20.68	28.11	34.94	43.16
1.75	49.24	20.94	28.30	34.70	42.86
2	50.36	21.19	29.17	33.67	41.59
2.5	51.71	21.71	30.00	32.74	40.44
3	53.28	22.22	31.06	31.62	39.06
3.5	54.63	22.73	31.90	30.79	38.04
4	56.43	23.25	33.18	29.60	36.56
4.5	58.00	23.76	34.24	28.69	35.43
5	60.02	24.28	35.74	27.48	33.94
6	63.84	25.30	38.54	25.48	31.48
7	66.98	26.33	40.65	24.16	29.84
8	71.70	27.36	44.34	22.15	27.36
9	75.30	28.39	46.91	20.94	25.86
10	78.67	29.42	49.25	19.94	24.63
11	81.81	30.45	51.36	19.12	23.62
13	86.98	32.50	54.48	18.03	22.27
15	92.15	34.56	57.58	17.06	21.07
17	95.29	36.61	58.68	16.74	20.67
19	99.34	38.67	60.66	16.19	20.00
22	102.42	41.76	60.66	16.19	20.00
25	105.50	44.84	60.66	16.19	20.00
28	108.58	47.92	60.66	16.19	20.00

Ek 12. 1/2 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=10000

$T_1=18.91\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=39.59\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=4.911\text{ m/s}$

$A_i=0.000855*10^{-4}\text{ m}^2$

$P_f=103.5\text{ W}$

$P=98.254\text{ W}$

$q_w=987.228\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.576\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0263\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1685\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.597*10^{-5}$

$Pr=0.7121$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	41.83	19.08	22.75	43.41	54.37
0.50	40.93	19.25	21.68	43.55	57.05
0.75	40.80	19.42	21.38	45.44	56.70
1	40.90	19.59	21.31	45.80	57.36
1.25	40.93	19.77	21.16	46.65	58.43
1.50	41.15	19.94	21.21	46.54	58.29
1.75	41.38	20.11	21.27	46.42	58.14
2	42.05	20.28	21.77	45.35	56.78
2.5	42.72	20.62	22.10	44.67	55.94
3	43.62	20.96	22.66	43.57	54.57
3.5	44.75	21.30	23.45	42.12	52.75
4	45.87	21.65	24.22	40.76	51.05
4.5	46.99	21.99	25.00	39.48	49.45
5	48.56	22.33	26.23	37.63	47.13
6	51.04	23.01	28.03	35.23	44.13
7	53.06	23.70	29.36	33.63	42.12
8	56.43	24.38	32.05	30.81	35.59
9	58.90	25.07	33.83	29.18	36.55
10	61.15	25.75	35.40	27.89	34.93
11	62.94	26.43	36.51	27.04	33.87
13	66.54	27.80	38.74	25.48	31.92
15	69.68	29.17	40.51	24.37	30.52
17	71.70	30.54	41.16	23.98	30.04
19	74.62	31.90	42.72	23.11	28.94
22	76.67	33.95	42.72	23.11	28.94
25	78.73	36.01	42.72	23.11	28.94
28	80.78	38.06	42.72	23.11	28.94

Ek 13. 1/2 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=15000

$T_1=17.79\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=39.39\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=7.311\text{ m/s}$

$A_f=0.000855\text{ m}^2$

$P_f=101.88\text{ W}$

$P=99.216\text{ W}$

$q_w=996.887\text{ W/m}^2$

$C_p=1005.766\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0261\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1847\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.558*10^{-5}$

$Pr=0.7125$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	36.88	17.90	18.98	52.52	66.52
0.50	35.76	18.02	17.74	56.18	71.16
0.75	35.76	18.13	17.63	56.55	71.62
1	35.54	18.25	17.29	57.66	73.02
1.25	35.08	18.36	16.72	59.60	75.49
1.50	35.08	18.48	16.60	60.02	76.01
1.75	35.31	18.59	16.72	59.62	75.50
2	35.76	18.70	17.06	58.45	74.02
2.5	35.98	18.93	17.05	58.46	74.04
3	36.66	19.16	17.50	56.97	72.16
3.5	37.33	19.39	17.94	55.56	70.37
4	38.01	19.62	18.39	54.22	68.88
4.5	38.90	19.85	19.05	52.31	66.25
5	40.03	20.08	19.95	49.97	63.28
6	41.83	20.54	21.29	46.82	59.30
7	43.17	20.99	22.18	44.94	56.92
8	45.64	21.45	24.19	41.20	52.18
9	47.22	21.91	25.31	39.39	49.88
10	48.56	22.37	26.19	38.05	48.19
11	50.14	22.83	27.31	36.49	46.22
13	52.16	23.74	28.42	35.08	44.42
15	54.18	24.66	29.52	33.76	42.76
17	55.53	25.57	29.96	33.27	42.14
19	57.55	26.48	31.07	32.09	40.64
22	58.92	27.86	31.06	32.09	40.64
25	60.29	29.23	31.06	32.09	40.64
28	61.67	30.61	31.06	32.09	40.64

Ek 14. 1/2 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=21800

$T_1=16.89\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=27.67\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=10.101\text{ m/s}$

$A_f=0.000855*10^{-4}\text{ m}^2$

$P_t=100.2\text{ W}$

$P=98.967\text{ W}$

$q_w=994.386\text{ W/m}^2$

$C_p=1005.118\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0259\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1956\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.532*10^{-5}$

$Pr=0.7128$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	32.62	16.97	15.65	63.57	81.12
0.50	31.27	17.05	14.22	69.96	89.28
0.75	31.04	17.14	13.90	71.50	91.25
1	30.59	17.22	13.37	74.34	94.87
1.25	30.14	17.30	12.84	77.42	98.79
1.50	30.14	17.38	12.76	77.91	99.43
1.75	30.14	17.46	12.68	78.42	100.07
2	29.92	17.55	12.37	80.36	102.55
2.5	30.59	17.71	12.88	77.18	98.49
3	31.04	17.87	13.17	75.51	96.35
3.5	31.49	18.04	13.45	73.90	94.31
4	32.17	18.20	13.97	71.20	90.86
4.5	32.61	18.36	14.25	69.78	89.04
5	33.74	18.53	15.21	65.37	83.43
6	34.86	18.86	16.00	62.13	79.28
7	35.98	19.18	16.80	59.18	75.53
8	38.01	19.51	18.50	53.76	68.61
9	39.13	19.84	19.29	51.55	65.78
10	40.25	20.17	20.08	49.50	63.17
11	41.38	20.49	20.89	47.62	60.77
13	42.72	21.15	21.57	46.09	58.82
15	44.30	21.81	22.49	44.21	56.42
17	45.19	22.46	22.73	43.74	55.81
19	46.54	23.12	23.42	42.44	54.16
22	47.67	24.10	23.57	42.19	53.84
25	48.65	25.08	23.57	42.19	53.84
28	49.63	26.06	23.57	42.19	53.84

Ek 15. 1/2 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=26400

$T_1=15.10\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=24.30\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=12.066\text{ m/s}$

$A_i=0.000855 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$

$P_i=99.36\text{ W}$

$P=99.322\text{ W}$

$q_w=997.959\text{ W/m}^2$

$C_p=1004.577\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0257\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.2057\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.508 \cdot 10^{-5}$

$Pr=0.713$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	29.25	15.16	14.09	70.86	91.06
0.50	27.90	15.23	12.67	78.78	101.24
0.75	27.67	15.30	12.37	80.64	103.63
1	27.22	15.37	11.85	84.16	108.16
1.25	26.77	15.43	11.34	88.00	113.09
1.50	26.27	15.50	10.77	88.54	113.78
1.75	26.55	15.57	10.98	90.90	116.81
2	26.65	15.64	11.01	90.64	116.38
2.5	26.77	15.77	11.00	90.73	116.60
3	27.22	15.91	11.31	88.23	113.38
3.5	27.45	16.05	11.40	87.54	112.50
4	28.12	16.18	11.94	83.60	107.44
4.5	28.60	16.32	12.28	81.47	104.69
5	29.25	16.46	12.79	78.05	100.29
6	30.59	16.73	13.86	71.99	92.52
7	31.49	17.01	14.49	68.89	88.53
8	33.06	17.28	15.78	63.22	81.24
9	34.19	17.55	16.64	59.98	77.09
10	35.08	17.82	17.26	57.81	74.29
11	35.98	18.10	17.88	55.79	71.69
13	37.11	18.65	18.46	54.08	69.46
15	38.46	19.19	19.27	51.80	66.57
17	39.35	19.74	19.61	50.87	65.37
19	40.48	20.28	20.20	49.42	63.50
22	41.38	21.11	20.27	49.22	63.26
25	42.27	21.92	20.35	49.03	63.01
28	43.09	22.74	20.35	49.03	63.01

Ek 16. 3/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

$Re=6500$

$T_1=26.10\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=57.78\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=3.345\text{ m/s}$

$A_i=0.000855 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$

$P_f=106.8\text{ W}$

$P=93.773\text{ W}$

$q_w=942.195\text{ W/m}^2$

$C_p=1009.232\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0272\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1192\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.715 \cdot 10^{-5}$

$Pr=0.7108$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	50.81	26.35	24.46	38.52	46.67
0.50	50.59	26.60	23.99	39.28	47.59
0.75	50.36	26.85	23.51	40.07	48.55
1	50.36	27.10	23.26	40.50	49.07
1.25	50.14	27.35	22.79	41.34	50.09
1.50	50.14	27.59	22.55	41.80	50.65
1.75	50.58	27.85	22.73	41.43	50.20
2	51.04	28.09	22.95	41.07	49.76
2.5	52.16	28.60	23.56	39.98	48.64
3	53.28	29.09	24.19	38.95	47.19
3.5	54.63	29.59	25.04	37.63	45.59
4	56.43	30.09	26.34	35.77	43.34
4.5	58.45	30.59	27.86	33.82	40.97
5	61.59	31.09	30.50	30.88	37.42
6	64.96	32.08	32.88	28.66	34.72
7	68.56	33.09	35.47	26.56	32.18
8	73.95	34.08	39.87	23.63	28.63
9	77.99	35.08	42.91	21.95	26.60
10	81.81	36.08	45.73	20.60	24.96
11	86.30	37.07	49.23	19.14	23.18
13	91.47	39.07	52.40	17.98	21.78
15	96.86	41.06	55.80	16.88	20.46
17	100.91	43.06	57.85	16.28	19.73
19	105.40	45.06	60.34	15.61	18.92
22	108.39	48.05	60.34	15.61	18.92
25	111.38	51.04	60.34	15.61	18.92
28	114.37	54.03	60.34	15.61	18.92

Ek 17. 3/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

$Re=10000$

$T_1=22.73\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=44.75\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=4.946\text{ m/s}$

$A_i=0.000855*10^{-4}\text{ m}^2$

$P_i=103.2\text{ W}$

$P=94.953\text{ W}$

$q_w=954.052\text{ W/m}^2$

$C_p=1007.516\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0267\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.151\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.638*10^{-5}$

$Pr=0.7116$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	42.50	22.90	19.60	48.67	60.24
0.50	42.05	23.06	18.99	50.25	62.19
0.75	41.38	23.23	18.15	52.57	65.07
1	40.93	23.40	17.53	54.42	67.36
1.25	40.25	23.56	16.69	57.16	70.75
1.50	40.25	23.73	16.52	57.73	71.46
1.75	40.48	23.90	16.58	57.53	71.21
2	40.70	24.06	16.64	57.33	70.96
2.5	40.93	24.40	16.53	57.70	70.42
3	41.83	24.73	17.10	55.79	69.06
3.5	43.17	25.06	18.11	52.67	65.19
4	44.52	25.39	19.13	49.87	61.73
4.5	45.87	25.73	20.14	47.36	58.62
5	48.12	26.06	22.06	43.25	53.53
6	50.81	26.72	24.09	39.60	49.02
7	53.28	27.39	25.89	36.84	45.60
8	57.10	28.05	29.05	32.84	40.65
9	60.02	28.72	31.30	30.48	37.72
10	62.72	29.39	33.33	28.62	35.42
11	65.64	30.05	35.59	26.81	33.18
13	69.04	31.38	37.66	25.35	31.38
15	72.83	32.71	40.12	23.78	29.43
17	75.30	34.04	41.26	23.12	28.62
19	78.44	35.37	43.07	22.15	27.41
22	80.44	37.37	43.07	22.15	27.41
25	82.43	39.36	43.07	22.15	27.41
28	84.43	41.36	43.07	22.15	27.41

Ek 18. 3/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=15000

$T_1=22.51\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=38.01\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=7.371\text{ m/s}$

$A_i=0.000855*10^{-4}\text{ m}^2$

$P_t=101.4\text{ W}$

$P=95.5\text{ W}$

$q_w=959.551\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.787\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0264\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1646\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.606*10^{-5}$

$Pr=0.712$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	38.90	22.62	16.28	58.91	73.59
0.50	37.56	22.73	14.83	64.71	80.83
0.75	37.33	22.84	14.49	66.20	82.70
1	36.66	22.95	13.71	69.99	87.44
1.25	36.43	23.06	13.37	71.75	89.63
1.50	36.21	23.17	13.04	73.60	91.94
1.75	35.98	23.28	12.70	75.55	94.37
2	36.21	23.39	12.82	74.88	93.53
2.5	36.66	23.62	13.04	73.57	91.90
3	37.33	23.84	13.49	71.11	88.82
3.5	38.23	24.06	14.17	67.71	84.58
4	39.13	24.28	14.85	64.63	80.73
4.5	40.25	24.50	15.75	60.93	76.11
5	41.83	24.73	17.10	56.12	70.10
6	43.62	25.17	18.45	52.00	64.96
7	45.64	25.61	20.03	47.91	59.84
8	48.56	26.06	22.50	42.63	53.26
9	50.36	26.50	23.86	40.22	50.24
10	52.16	26.95	25.21	38.06	47.54
11	53.95	27.39	26.56	36.12	45.12
13	56.20	28.28	27.92	34.36	42.92
15	58.67	29.17	29.50	32.52	40.62
17	60.25	30.06	30.19	31.78	39.70
19	62.27	30.95	31.32	30.63	38.26
22	63.84	32.28	31.56	30.40	37.97
25	65.17	33.61	31.56	30.40	37.97
28	66.50	34.94	31.56	30.40	37.97

Ek 19. 3/4 Tıkanmalı Boru Deney Verileri

Re=18800

$T_1=21.61\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=34.41\text{ }^\circ\text{C}$

$U_m=9.038\text{ m/s}$

$A_i=0.000855*10^{-4}\text{ m}^2$

$P_t=100.2\text{ W}$

$P=95.087\text{ W}$

$q_w=955.404\text{ W/m}^2$

$C_p=1006.317\text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$k=0.0263\text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho=1.1733\text{ kg/m}^3$

$\nu=1.585*10^{-5}$

$Pr=0.7122$

$x/2r_{wi}$	$T_{wi}\text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_b\text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T\text{ (}^\circ\text{C)}$	$h_x\text{ (W/m}^2\text{}^\circ\text{C)}$	Nu_x
0.25	35.76	21.70	14.06	67.94	85.37
0.50	34.41	21.79	12.62	75.67	95.09
0.75	34.19	21.88	12.31	77.60	97.52
1	33.51	21.97	11.54	82.73	103.96
1.25	33.06	22.06	11.00	86.78	109.05
1.50	33.06	22.14	10.92	87.49	109.95
1.75	32.84	22.23	10.61	90.08	113.20
2	33.06	22.32	10.74	88.95	111.78
2.5	33.29	22.50	10.79	88.58	111.31
3	33.96	22.68	11.28	84.69	106.42
3.5	34.86	22.86	12.00	79.61	100.04
4	35.54	23.00	12.54	76.46	96.08
4.5	36.43	23.22	13.21	72.29	90.85
5	37.78	23.40	14.38	66.42	83.47
6	39.58	23.76	15.82	60.38	75.88
7	40.93	24.12	16.81	56.83	71.41
8	43.40	24.47	18.93	50.48	63.44
9	44.97	24.83	20.14	47.44	59.61
10	46.32	25.19	21.13	45.21	56.82
11	47.67	25.25	22.19	43.19	54.28
13	49.69	26.27	23.42	40.78	51.25
15	51.48	26.98	24.50	38.98	48.99
17	52.61	27.70	24.91	38.35	48.19
19	54.40	28.41	25.99	36.75	46.19
22	55.75	29.49	26.26	36.37	45.70
25	56.87	30.56	26.31	36.30	45.62
28	57.95	31.64	26.31	36.30	45.62

Ek 20. Kuru havanın 760 mm Hg basıncında özellikleri (Kakaç 1970)

T : Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

c_p : Özgül ısı ($\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$)

k' : Isı iletim kat. ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

k : Isı iletim kat. ($\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$)

β : Isıl genişleme kat. ($1/^{\circ}\text{K}$)

μ : Dinamik viskozite (kg/ms)

μ' : Dinamik viskozite (kg/s/m^2)

ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

a : Isıl yayınma (m^2/s)

Pr: Prandtl sayısı $\left(\frac{c_p \mu}{k} = \nu / a \right)$

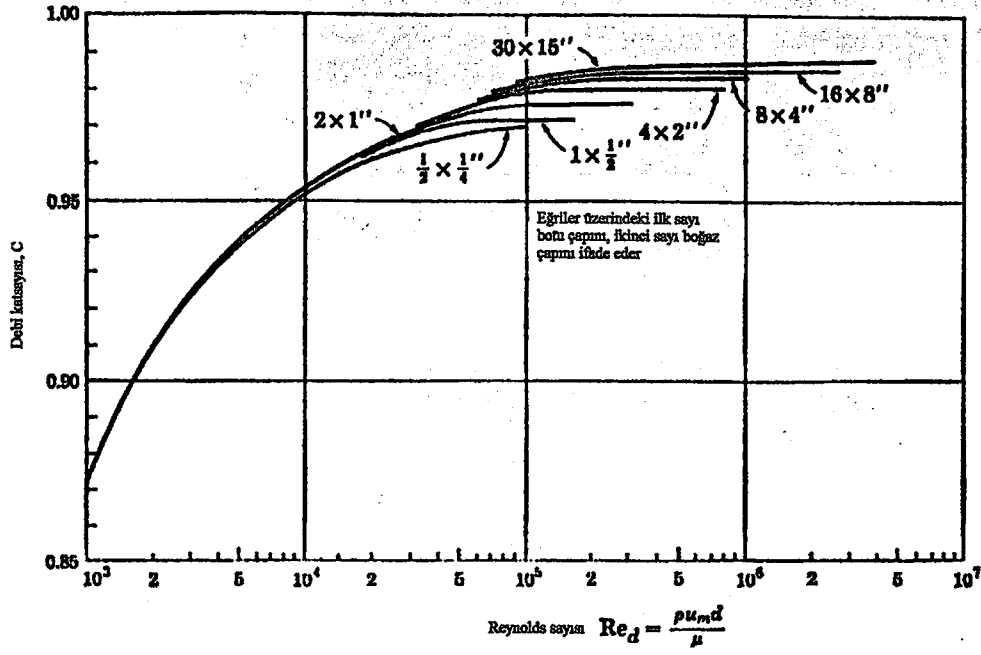
T	ρ	c_p	k'	k	$10^3 \beta$	$10^5 \mu$	$10^6 \mu'$	$10^6 \nu$	$10^6 a$	Pr
-150	2.793	0.245	0.0120	0.0103	8.21	0.87	0.887	3.11	4.19	0.74
-100	1.980	0.241	0.0165	0.0142	5.82	1.18	1.203	5.96	8.28	0.72
-50	1.534	0.240	0.0206	0.0177	4.51	1.47	1.494	9.55	13.4	0.715
0	1.2930	0.240	—	—	3.67	1.72	1.754	13.30	18.7	0.711
20	1.2045	0.240	0.0257	0.0221	3.43	1.82	1.855	15.11	21.4	0.713
40	1.1267	0.241	0.0271	0.0233	3.20	1.91	1.950	16.97	23.9	0.711
60	1.0595	0.241	0.0285	0.0245	3.00	2.00	2.042	18.90	26.7	0.709
80	0.9908	0.241	0.0299	0.0257	2.83	2.10	2.134	20.94	29.6	0.708
100	0.9458	0.242	0.0314	0.0270	2.68	2.18	2.224	23.06	32.8	0.704
120	0.8980	0.242	0.0328	0.0282	2.55	2.27	2.311	25.23	36.1	0.70
140	0.8535	0.242	0.0343	0.0295	2.43	2.35	2.397	27.55	39.7	0.694
160	0.8150	0.243	0.0358	0.0308	2.32	2.43	2.481	29.85	43.0	0.693
180	0.7785	0.244	0.0372	0.0320	2.21	2.51	2.564	32.29	46.7	0.69
200	0.7475	0.245	0.0386	0.0332	2.11	2.58	2.635	34.63	50.5	0.685
250	0.6745	0.247	0.0421	0.0362	1.91	2.78	2.832	41.17	60.3	0.68
300	0.6157	0.250	0.0390	0.0390	1.75	2.95	3.005	47.85	70.3	0.68
350	0.5662	0.252	0.0485	0.0417	1.61	3.12	3.178	55.05	81.1	0.68
400	0.5242	0.255	0.0516	0.0443	1.49	3.28	3.340	62.53	91.9	0.68
450	0.4875	0.258	0.0543	0.0467	—	3.44	3.508	70.54	103.1	0.685
500	0.4564	0.261	0.0570	0.0490	—	3.86	3.938	70.48	114.2	0.69
600	0.4041	0.266	0.0621	0.0534	—	3.58	3.653	95.57	138.2	0.69
700	0.3625	0.271	0.0667	0.0573	—	4.12	4.202	113.7	162.2	0.70
800	0.3287	0.276	0.0706	0.0607	—	4.37	4.450	132.8	185.8	0.715
900	0.301	0.280	0.0741	0.0637	—	4.59	4.680	152.5	210	0.725
1000	0.277	0.283	0.0770	0.0662	—	4.80	4.890	175	235	0.735

Ek 21. 1 kg/cm² ve daha yüksek basınçlarda suyun özellikleri (Kakaç 1970)

- T : Sıcaklık (°C)
 p : Basınç (kg/cm²)
 ρ : Yoğunluk (kg/m³)
 c_p : Özgül ısı (kcal/kg°C)
 h_{fg} : Buharlaşma ısı (kcal/kg)
 k' : Isı iletim kat. (W/m°C)
 k : Isı iletim kat. (kcal/mh°C)
- β : Isıl genişleme kat. (1/°K)
 μ : Dinamik viskozite (kg/ms)
 μ' : Dinamik viskozite (kgs/m²)
 ν : Kinematik viskozite (m²/s)
 α : Isıl yayınma (m²/s)
 Pr : Prandtl sayısı

T	p	ρ	c_p	h_{fg}	k'	k	$10^3 \beta$	$10^3 \mu$	$10^6 \mu'$	$10^6 \nu$	$10^6 \alpha$	Pr
0	1	999.8	1.0074	597.3	0.552	0.475	-0.07	1.792	182.7	1.795	0.131	13.67
10	1	999.7	1.0013	591.7	0.587	0.497	0.088	1.307	133.3	1.307	0.138	9.47
20	1	998.2	0.9988	586.0	0.598	0.514	0.206	1.002	102.2	1.004	0.143	7.01
30	1	995.7	0.9980	580.4	0.614	0.528	0.303	0.797	81.3	0.801	0.148	5.43
40	1	992.2	0.9980	574.7	0.628	0.540	0.385	0.653	66.6	0.658	0.151	4.35
50	1	988.0	0.9985	569.0	0.641	0.551	0.457	0.548	55.9	0.554	0.155	3.57
60	1	983.2	0.9994	563.2	0.652	0.560	0.523	0.467	47.6	0.475	0.158	3.00
70	1	977.8	1.0007	557.3	0.661	0.568	0.585	0.404	41.2	0.413	0.161	2.56
80	1	971.8	1.0023	551.3	0.669	0.575	0.643	0.355	36.2	0.365	0.164	2.23
90	1	965.3	1.0044	545.2	0.676	0.581	0.698	0.315	32.1	0.326	0.166	1.96
100	1.0332	958.4	1.0070	539.0	0.682	0.586	0.752	0.282	28.8	0.295	0.169	1.75
120	2.0245	943.1	1.014	526.1	0.686	0.589	0.860	0.235	23.9	0.2485	0.171	1.45
140	3.6848	926.1	1.024	512.3	0.684	0.588	0.975	0.199	20.3	0.215	0.172	1.25
160	6.3023	907.4	1.037	497.4	0.682	0.586	1.098	0.172	17.5	0.1890	0.173	1.09
180	10.225	886.9	1.053	481.3	0.676	0.581	1.233	0.151	15.35	0.1697	0.172	0.98
200	15.857	864.7	1.074	463.5	0.666	0.572	1.392	0.136	13.96	0.1579	0.171	0.92
220	23.659	840.3	1.101	443.7	0.653	0.561	1.597	0.125	12.75	0.1488	0.168	0.88
240	34.140	813.6	1.137	421.7	0.636	0.546	1.862	0.116	11.78	0.1420	0.164	0.87
260	47.866	784.0	1.189	396.8	0.612	0.526	2.21	0.107	10.91	0.1365	0.157	0.87
280	65.457	750.7	1.268	368.5	0.581	0.499	2.70	0.0994	10.15	0.1325	0.145	0.91
300	87.611	712.5	1.40	335.4	0.541	0.465	3.46	0.0935	9.43	0.1298	0.129	1.00
320	115.12	667.0	1.58	295.6	0.491	0.422	4.60	0.0856	8.72	0.1282	0.111	1.15
340	148.96	609.5	2.0	245.3	0.430	0.370	8.25	0.0775	7.90	0.1272	0.0844	1.5
360	190.42	524.5	3.2	171.9	0.349	0.300	—	0.0683	6.98	0.1306	0.0500	2.6
374.2	225.6	326	∞	0	0.209	0.180	—	0.0506	5.16	0.155	0	∞

Ek 22



Şekil 1. Ventüri için debi katsayıları (Holman 1984)