

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİDROFOBİK YÜZEYLERİN TÜRBÜLANSLI BORU AKIMLARINDA
SÜRTÜNME KAYIPLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

MUSTAFA PEHLİVAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAMSUN
2019**

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Mustafa PEHLİVAN tarafından hazırlanan “Hidrofobik Yüzeylerin Türbülanslı Boru Akımlarında Sürtünme Kayıplarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi” adlı tez çalışması .../.../2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

Başkan Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Dr. Öğr. Üyesi Bilal SUNGUR
Samsun Üniversitesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım. .../.../2019

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

13/06/2019

Mustafa PEHLİVAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİDROFOBİK YÜZEYLERİN TÜRBÜLANSLI BORU AKIMLARINDA SÜRTÜNME KAYIPLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa PEHLİVAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

Bu tez çalışmasında, pürüzsüz bakır boru iç yüzeyi hidrofobik özellik kazandırılacak şekilde kaplanarak türbülanslı akımda basınç kaybı ve sürtünme faktörü üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kaplama malzemesi olarak floroidetilenpropilen (FEP) ve bu temel malzemeye ağırlıkça % 1 oranında grafen (FEP-G) ve ağırlıkça % 1 oranında grafit (FEP-C) ekleyerek elde edilen solüsyonlar kullanılmıştır. FEP, FEP-G ve FEP-C malzemeleri ile pürüzsüz bakır boru iç yüzeyleri spreysel yöntemle kaplanıp 400°C sıcaklıkta kurutulmuş hidrofobik yüzeyler elde edilmiştir. İşlenmemiş konvansiyonel pürüzsüz bakır yüzeyi, FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı yüzeylerin hidrofobikliğini belirlemek için temas açıları sırasıyla 65°, 93°, 96° ve 102° olarak ölçülmüştür. Türbülanslı akımda, 5.000 – 30.000 Reynolds sayıları aralığında deneysel olarak basınç kayıpları ölçülerek sürtünme faktörü belirlenmiştir. Sonuç olarak, test edilen hidrofobik yüzeylerde % 7 - % 36,1 aralığında sürtünme faktöründe azalma belirlenmiş ve bu azalmanın türbülanslı akım geliştikçe yani Reynolds sayısı yükseldikçe düştüğü görülmüştür.

Haziran 2019, 41 sayfa

Anahtar Kelimeler: Hidrofobik yüzey, FEP kaplama, Türbülanslı akım, Basınç kaybı, Sürtünme faktörü

ABSTRACT

Master's Thesis

Experimental Investigation Of The Effect Of Hydrophobic Surfaces On Friction
Losses In Turbulent Pipe Flows

Mustafa PEHLİVAN

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZBEY

In this thesis, the inner surface of the smooth copper pipe was coated with a hydrophobic material and an experimental study was made to determine the effect on the friction factor in turbulent flow. Fluoroid ethylene propylene (FEP) was chosen as the base coating material and 1 % by weight of graphene and 1 % by weight of graphite are added to this base material to obtain FEP-G and FEP-C materials, respectively. The inner surface of the smooth copper pipe was coated with FEP, FEP-G and FEP-C materials by using the spray technique. Than coated pipe was dried at 400°C to form hydrophobic surfaces. The contact angles representing the hydrophobicity of the uncoated conventional smooth copper, FEP, FEP-C, and FEP-G coated surfaces were measured as 65°, 93°, 96°, and 102°, respectively. In the turbulent flow, the pressure losses in the range of 5.000 – 30.000 Reynolds numbers were experimentally measured and the change in the friction factor was determined. As a result, the decrease in the friction factor was determined in the range of 36.1% to 7% and this relative change in friction factor decreases as the Reynolds number increases.

June 2019, 41 pages

Key Words: Hydrophobic surface, FEP coating, Turbulent flow, Pressure drop, Friction factor

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kaplama işlemlerinde birlikte çalıştığımız yüksek lisans öğrencisi Uğur KARAKURT'a, deneyler esnasında yardımını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Fevzi ŞAHİN'e, kaplama malzemesini temininde ve kaplama çalışmalarında olan desteklerinden dolayı hocam sayın Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ ve Mertech İleri Teknoloji Malzemeleri A.Ş.'ye, yüksek lisansın başlangıcından, bu tezi teslim edene kadar her aşamada çalışmayı yönlendiren, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY'e, her koşulda beni destekleyen eşim Özlem PEHLİVAN'a ve moral kaynağım kızım Elif'e ayrıca eğitim öğretim hayatımın başından buyana maddi manevi desteklerinden dolayı Anne – Babama teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2019, Samsun

Mustafa PEHLİVAN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kayma Gerilmesi	1
1.2. Akım Rejimi.....	3
1.2.1. Laminer akım	4
1.2.2. Türbülanslı akım	8
1.3. Hidrofobik Laminer Akım	14
1.4. Hidrofobiklik.....	16
2. LİTERRATÜR ARAŞTIRMASI.....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Materyal	25
3.2. Yöntem.....	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Kaplanmış Malzemelerin Temas Açılırları	30
4.2. Deney Sonuçları	31
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	37
EK 1 MOODY DİYAGRAMI.....	38
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

b	: Kayma uzunluğu, m
D	: Boru çapı, m
f	: Darcy sürtünme faktörü
f_h	: Hidrofobik sürtünme faktörü
F_g	: Yerçekimi kuvveti, N
F_P	: Basınç kuvveti, N
F_s	: Sürtünme kuvveti, N
g	: Yerçekimi ivmesi, m/s^2
h_k	: Yük kaybı, m SS
l	: Karışım uzunluğu, m
L	: Boru uzunluğu, m
m	: Kayma katsayısı
m_l	: Hidrofobik laminer sürtünme faktörü düzeltme katsayısı
m_t	: Hidrofobik türbülanslı sürtünme faktörü düzeltme katsayısı
Q	: Hacimsel debi, m^3/s
r	: Radyal doğrultu
R	: Boru yarıçapı, m
Re	: Reynolds sayısı
u	: x yönündeki hız bileşeni, m/s
$\bar{u}$	: Zaman ortalamalı hız, m/s
u^*	: Sürtünme hızı, m/s
u^+	: Boyutsuz hız
u_k	: Kayma hızı, m/s
u', v', w'	: x, y, z yönünde sırasıyla çalkantı hız bileşenleri, m/s
p'	: Çalkantı basınç bileşeni, Pa
ΔP	: Basınç kaybı, Pa
T	: Ortalama periyot, $1/s$
v	: y yönündeki hız bileşeni, m/s
V_{ort}	: Akım ortalama hızı, m/s
w	: z yönündeki hız bileşeni, m/s
y^+	: Boyutsuz mesafe
∇	: Del operatörü
κ	: Karman sabiti
μ	: Dinamik viskozite, $kg/m.s$
μ_t	: Türbülans viskozitesi, $kg/m.s$
ρ	: Akışkan yoğunluğu, kg/m^3
τ	: Kayma gerilmesi, N
τ_l	: Laminer kayma gerilmesi, N
τ_t	: Türbülanslı kayma gerilmesi, N
τ_w	: Duvar kayma gerilmesi, N
γ_{KH}	: Katı – hava arasındaki yüzey gerilimi
γ_{KS}	: Katı – sıvı arasındaki yüzey gerilimi
γ_{SH}	: Sıvı – hava arasındaki yüzey gerilimi
θ	: Temas açısı
θ'	: Pürüzlü yüzey temas açısı

KISALTMALAR

DNS	: Doğrusal sayısal simülasyon
FEP	: Floroidetilenpropilen
FEB-C	: % 1 grafit katkılı floroidetilenpropilen
FEP-G	: % 1 grafen katkılı floroidetilenpropilen
LES	: Genişletilmiş çalkantı simülasyonu
MD	: Moleküler dinamik simülasyon
μ –PIV	: Mikro parçacık görüntü hızölçeri
PIV	: Parçacık görüntü hızölçeri



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kayma gerilmesi ile oluşan deformasyon	2
Şekil 1.2.	Akış rejimleri.....	3
Şekil 1.3.	Laminer akım	4
Şekil 1.4.	Ortalama ve çalkantılı türbülans değerlerinin gösterimi	8
Şekil 1.5.	Cidar yakınında türbülanslı akışta hız ve kayma gerilmesi dağılımları..	10
Şekil 1.6.	Deneyssel incelemelerle ortaya çıkmış türbülanslı akım hız dağılımı	12
Şekil 1.7.	Hidrofobik özelliğin hız profili üzerindeki etkisi.....	14
Şekil 1.8.	Nilüfer yaprağının hidrofobikliği	17
Şekil 1.9.	Yüzey ıslanabilirliği	17
Şekil 1.10.	Yüzey gerilimi.....	18
Şekil 1.11.	Pürüzsüz yüzeyde temas açısı ölçümü	18
Şekil 1.12.	Pürüzlü yüzey temas açısı ölçümü için Wenzel teorisi	19
Şekil 1.13.	Pürüzlü yüzey temas açısı ölçümü için Cassie-baxter teorisi	19
Şekil 3.1.	Hassas terazi.....	25
Şekil 3.2.	Grafitin kimyasal yapısı	26
Şekil 3.3.	Grafenin yapısı	26
Şekil 3.4.	Numune hazırlamada kullanılan fırın.....	27
Şekil 3.5.	İşlenmemiş bakır plaka ve FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı plakalar	27
Şekil 3.6.	Deney Seti	28
Şekil 3.7.	İş akış şeması.....	29
Şekil 4.1.	İşlenmemiş bakır plaka temas açısı.....	30
Şekil 4.2.	FEP kaplı bakır plaka temas açısı	30
Şekil 4.3.	FEP-C kaplı bakır plaka temas açısı	31
Şekil 4.4.	FEP-G kaplı bakır plaka temas açısı	31
Şekil 4.5.	Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi.....	32
Şekil 4.6.	Reynolds sayısına göre sürtünme faktöründeki yüzde azalma.....	33
Şekil 4.7.	Basınç kaybının Reynolds sayısına göre değişimi	34
Şekil 4.8.	Pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım sürtünme faktörü düzeltme katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi	35
Şekil 4.9.	Hidrolik pompalama gücündeki tasarrufun Reynolds sayısına göre değişimi	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Türbülans tabakalarında kullanılan formüller.....	12
--	----



1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarının büyük çoğunluğunda akışkan maddeler bir yerden bir yere taşınarak prosesler gerçekleştirilmektedir. Bunun için de toplam elektrik tüketiminin % 20'sini oluşturan pompalama gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Yumurtacı ve Sarıgül, 2011). Nüfusun ve endüstrileşmenin giderek artması ile enerjiye duyulan ihtiyacın çoğaldığı günümüzde enerji üretiminde en çok kullanılan fosil enerji kaynaklarının hem sera gazı etkisinden hem de tükenebilirliği açısından değerlendirildiğinde enerji tasarrufu yapılması gerekliliği ortadadır.

Pompalama sistemlerinde enerji tasarrufu sağlamanın bir yolu da borularda oluşan sürtünme kayıplarının azaltılması olabilmektedir. Boru içi akımlar genel olarak laminar ve türbülanslı akım formunda gerçekleşir ve pratikteki uygulamaların büyük bir çoğunluğunda karşılaşılan başlıca akışkan suyun viskozitesinin düşük olmasından dolayı laminar akımdan çok türbülanslı rejimde meydana gelir. Türbülanslı akımda meydana gelen yük kaybı laminar akıma kıyasla daha fazladır. Yük kaybını etkileyen en önemli etkenlerden biri sürtünme faktörüdür. Sürtünme faktöründeki azalma yük kaybını azaltmaktadır, dolayısıyla bu yolla enerji tasarrufu sağlanabilir.

Son zamanlarda gelişen yüzey kaplama teknolojileri sayesinde düşük yüzey enerjili maddeler üretilebilmekte ve bu sayede hidrofobik yani su tutmayan yüzeyler elde edilebilmektedir. Bu yüzeylerle akışkanın temasında yüzeyde kaymama koşulu ortadan kalkar ve yüzeyde meydana gelecek akım hızı yüzeydeki şekil değiştirme hızını azaltacağı için kayma gerilmesini, aynı zamanda sürtünme kuvvetini azaltacaktır.

Bu çalışmada 15,8 mm iç çapında 1 m uzunluğunda pürüzsüz bakır boru iç yüzeyleri düşük yüzey enerjili yüzey elde edilecek şekilde floropolimer esaslı malzeme ve türevleri ile kaplanarak hidrofobik özellik kazandırılarak, deneysel olarak 5.000 - 30.000 Reynolds sayısı aralığında türbülanslı akımda basınç kayıpları ölçülerek sürtünme faktörü ve buna bağlı olarak pompalama gücündeki tasarruf miktarı belirlenmiştir.

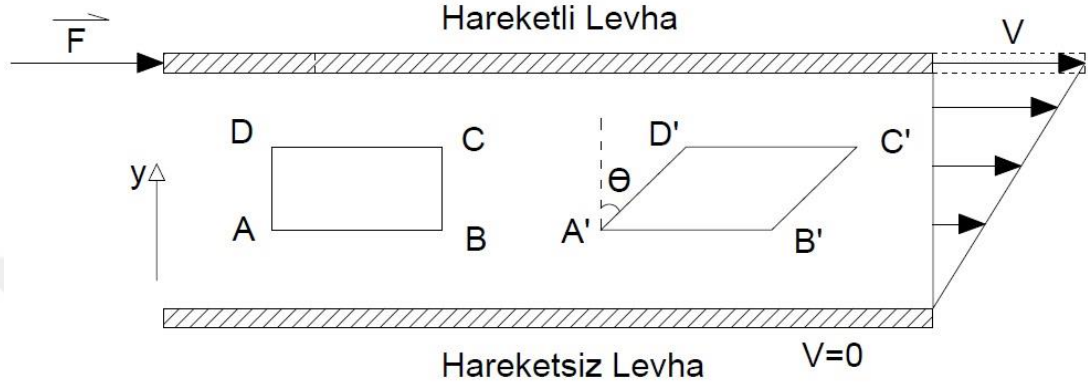
Bu bölümde sürtünme kayıpları ile ilgili akım teorisi ele alınmıştır.

1.1. Kayma Gerilmesi

Akışkanlar mekaniği bilimi açısından incelendiğinde bütün maddeler katı ve akışkan olmak üzere ikiye ayrılır. Bu iki kavram arasındaki en önemli fark katı ve akışkan maddelerin kayma gerilmesine karşı gösterdikleri tepkidir. Kayma gerilmesi katı cisimlere uygulandığında kuvvetin büyüklüğüne bağlı olarak katı cisim bir miktar şekil değişimine uğrar, ancak akışkan madde bu kayma gerilmesinin büyüklüğüne

kadar küçük olsa da kuvvetin etkisi devam ettiği sürece şekil değişimine uğrar (White, 2016).

Diferansiyel bir akışkan elemanı ele alınarak kayma gerilmesi (τ) Şekil 1.1’de gösterildiği gibi açıklanabilir. Alttaki hareketsiz levha ile üstteki hareketli levha arasında akışkan bulunmaktadır.



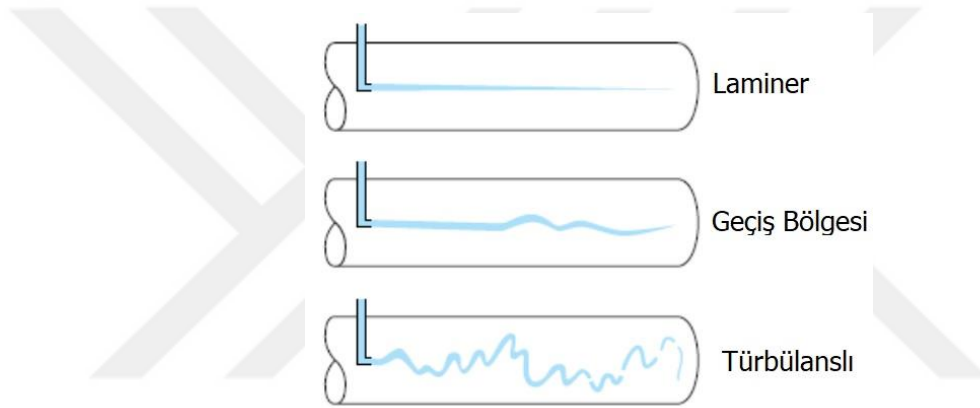
Şekil 1.1. Kayma gerilmesi ile oluşan deformasyon

Üst levha sabit V hızı ile hareket ettirildiğinde ABCD örnek akışkan parçacığı A'B'C'D' konumuna gelmektedir ve hız profili y eksenini boyunca şekilde gösterildiği gibi doğrusal değişmektedir. Buradan hareketle kayma gerilmesinin y eksenini boyunca şekil değiştirme hızı yani hız gradyeni (du/dy) ile orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Ancak akışkan cinsine göre şekil değiştirme hızları farklıdır ve bu fark akışkanın viskozite (μ) değerine de bağlıdır. Dolayısıyla, kayma gerilmesi ile ilgili $\tau = \mu \cdot (du/dy)$ bağıntısı geçerlidir. Bu formül birim zamandaki şekil değiştirme hızı ile kayma gerilmesi arasındaki oranın sabit olduğu koşulda geçerlidir, bu koşulu sağlayan akışkanlara *Newtonian akışkan* denir.

Burada vurgulanması gereken önemli nokta, yüzeyde kayma olmama şartına göre bağıl akım hızı yüzeyde sıfır olur, ancak şekil değiştirme hızı, yani hız gradyeni sıfır olmaz. Dolayısıyla, yüzeyde meydana gelen kayma gerilmesinin oluşmasına akışkanın viskozitesi ile beraber hız gradyeninin de etkisi önemli rol oynamaktadır.

1.2. Akım Rejimi

Boru içi akıslarda laminer ve türbölanslı akım rejimleri Şekil 1.2’de gösterilen Osborne Reynolds tarafından yapılan deneyde saydam boru merkezine yerleştirilen bir kılcal boru ile akıma enjekte edilen renkli boya ile görselleştirilmiştir. Düşük debi ve dolayısıyla hızlarda, akışkan içerisine ilave edilen boya düz bir hat boyunca, keskin sınırlı bir çizgi şeklinde ilerlemektedir, bu akım rejimi *laminer* olarak tanımlanır. Yüksek debi ve hızlarda ise ilave edilen boya anında akım alanına dağılmakta ve keskin sınırları bozularak geliş güzel bir yörünge takip etmektedir. Bu akım rejimi de *türbölanslı* olarak tanımlanır. Laminer akımdan türbölanslı akıma geçiş, *geçiş rejimi* olarak adlandırılır (Young vd, 2013), fakat pratikte pek önemi yoktur.



Şekil 1.2. Akış rejimleri (Young vd, 2013)

Bu akım rejimlerinin boyutsuz, *Reynolds sayısı*, Re olarak adlandırılan bir değere bağlı olarak geliştiği tespit edilmiştir. Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Vizkoz Kuvvetler}} = \frac{\rho V_{ort} D}{\mu} \quad (1.1)$$

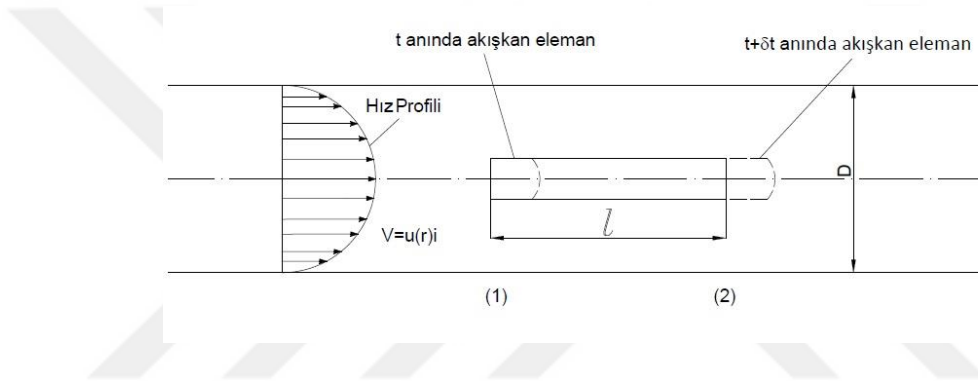
Burada, V_{ort} ortalama akım hızı (m/s), D boru çapı (m), ρ akışkanın yoğunluğu (kg/m^3) ve μ akışkanın viskozitesi ($N \cdot s/m^2$)’dir.

Boru içi akımlar, Reynolds sayısının aldığı değere göre, $Re < 2.300$ için laminer akım, $2.300 < Re < 4.000$ için geçiş rejimi ve $Re > 4.000$ için de türbölanslı akım rejiminde meydana gelmektedir. Ancak kolay akışlı geçiş veya giriş kesitine sahip, pürüzsüz borularla ve titreşimsiz ortamlarda yapılan deneylerde Reynolds sayısının laminer akım için 100.000’li değerlere ulaşabildiği tespit edilmiştir (Çengel ve

Cimbala, 2008), yani türbülanslı akıma geçiş Reynolds sayısının 100.000 değerinde meydana geldiği görülmüştür. Ancak pratikte genel olarak türbülanslı akıma geçiş kritik Reynolds sayısı değeri 2.300 olarak çoğunlukla kabul görmektedir.

1.2.1. Laminer akım

Tam gelişmiş laminer akımda akışkan, boru içerisinde bir çizgi üzerinde hareket ediyormuş gibi davranır ve hız profili o çizgi boyunca değişmez. Şekil 1.3’de laminer akımda oluşan hız profili gösterilmiştir. Hız bir çizgiden diğer çizgiye geçildiğinde değişmektedir. Bu değişim yani hız gradyeni, viskozite ile birlikte kayma gerilmesine yol açmaktadır (Young vd, 2013).



Şekil 1.3. Laminer akım

Newton’un 2. hareket kanununu akım içindeki herhangi bir anda diferansiyel bir akışkan elemanına uyguladığımızda, akışkana etki eden toplam kuvvet;

$$\Sigma F = m \cdot a = m \frac{Dv}{Dt} \quad (1.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada toplam kuvvet basınç kuvveti, sürtünme kuvveti ve yerçekimi kuvvetinin toplamından oluşmaktadır.

$$F_p + F_s + F_g = m \frac{Dv}{Dt} \quad (1.3)$$

Sıkıştırılamaz ve laminer akım için, basınç kuvveti akım doğrultusunda azalacağından negatif yöndedir; sürtünme kuvveti viskoz kuvvetler, dolayısıyla kayma gerilmesi ile oluşur, yerçekimi kuvveti de akışkanın ağırlığından kaynaklanır. Bu durumda toplam kuvveti (1.4) no’lu denklemdeki gibi yazabiliriz.

$$-P \cdot A + \tau \cdot A + mg = m \frac{Dv}{Dt} \quad (1.4)$$

(1.4) no'lu denklem birim hacim olarak yazıldığında aşağıdaki şeklini alır.

$$-\nabla P + \nabla \tau + \rho g = \rho \frac{Dv}{Dt} \quad (1.5)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (1.6)$$

Viskozite sabit ise;

$$\begin{aligned} \rho \frac{DV}{Dt} &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \\ \rho \frac{DV}{Dt} &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}, \\ \rho \frac{DV}{Dt} &= -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho g \end{aligned} \quad (1.7)$$

Bu denklem *momentum denklemidir*. *Süreklilik denklemi* ise laminar ve sıkıştırılamaz akım için (1.8) no'lu denklemde verilmiştir.

$$\nabla V = 0 \quad (1.8)$$

(1.7) ve (1.8) no'lu denklem takımı Navier–Stokes denklemleri olarak adlandırılır.

Silindirik koordinatlarda süreklilik denklemi (1.9) no'lu denklemde, Navier Stokes momentum denklemleri ise r , θ ve x doğrultularında sırasıyla (1.10), (1.11) ve (1.12) no'lu denklemlerde verilmiştir.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + u \frac{\partial v_r}{\partial x} - \frac{v_\theta^2}{r} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \right. \\ &\left. \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) + \rho g_r \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_r v_\theta}{r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - u \frac{\partial v_\theta}{\partial x} \right) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \right. \\ &\left. \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial x^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) + \rho g_\theta \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v_r \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \rho g_x \quad (1.12)$$

Bir boyutlu aksenal boru akımında v_r ve v_θ hız bileşenleri sıfır olur. Bu durumda (1.9) no'lu süreklilik denkleminin ilk üç terimi sıfır olur ve (1.13) no'lu denklemdeki eşitlik sağlanır.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1.13)$$

Dolayısıyla (1.12) no'lu x-ekseni doğrultusundaki momentum denklemi;

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v_r \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (1.14)$$

şeklini alır ve burada v_r , v_θ ve $\partial u / \partial x$ sıfır olduğundan, ayrıca kararlı akım için denklem aşağıdaki gibi olur.

$$\mu \left(\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (1.15)$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.16)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.17)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{r}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.18)$$

(1.18) no'lu denklemin iki tarafının da integrali alınarak;

$$r \frac{du}{dr} = \frac{r^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} + c_1 \quad (1.19)$$

(1.19) no'lu denklemdeki şeklini alır, $r = 0$ iken, hız gradyeni du/dr sıfır olur ve bu durumda $c_1 = 0$ 'dır. Denklem yeniden yazılırsa;

$$\frac{du}{dr} = \frac{r}{2\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.20)$$

olur, bu denklemin de integralini alınarak;

$$u_{(r)} = \frac{r^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} + c \quad (1.21)$$

şeklini alır. $r=R$ 'de, yani boru iç yüzeyinde kayma olmama şartından dolayı $u=0$ olur. Bu sınır şartına göre

$$c = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.22)$$

olur ve (1.21) no'lu denklemde yerine yazılınca boru kesiti boyunca hız profili bağıntısı aşağıdaki şeklini alır.

$$u_{(r)} = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - R^2) \quad (1.23)$$

Boru kesitindeki akışkanın debisi;

$$Q = \int_0^R u 2\pi r dr \quad (1.24)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki u akım hızı x -ekseni doğrultusundaki bileşenidir. (1.24) no'lu denklemdeki hız ifadesinin yerine (1.23) no'lu denklem yazılırsa denklem aşağıdaki formlarını alır.

$$Q = \int_0^R \frac{2\pi}{4\mu} \frac{dP}{dx} (r^3 - rR^2) dr$$

$$Q = -\frac{\pi}{8\mu} \frac{dP}{dx} R^4 \quad (1.25)$$

x -ekseni boyunca gerçekleşen basınç değişimi, $-dP/dx$, yerine $\Delta P/L$ yazılabilir. Ayrıca çap yerine yarıçap yazılınca debi denklemi aşağıdaki formunu alır.

$$Q = \frac{\pi D^4}{128\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (1.26)$$

Ortalama hız $V_{ort} = Q/A$ olur.

$$V_{ort} = \frac{\frac{\pi D^4}{128\mu} \frac{\Delta P}{L}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{D^2}{32\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (1.27)$$

İster laminar olsun ister türbülanslı, uygulamadaki tüm akım türleri için kullanılan yük kaybı, yani basınç kaybı, ΔP_k , ile sürtünme faktörü arasındaki ilişki (1.28) no'lu denklemde verilmiştir.

$$h_k = \frac{\Delta P_k}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{ort}^2}{2g} \quad (1.28)$$

Burada f , Darcy sürtünme faktörüdür. (1.27) ve (1.28) no'lu denklemlerdeki ΔP değerleri birbirine eşitlenirse, dairesel borudaki tam gelişmiş, laminar akış için sürtünme faktörü (1.29) no'lu denklemdeki gibi belirlenir.

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{ort}} = \frac{64}{Re} \quad (1.29)$$

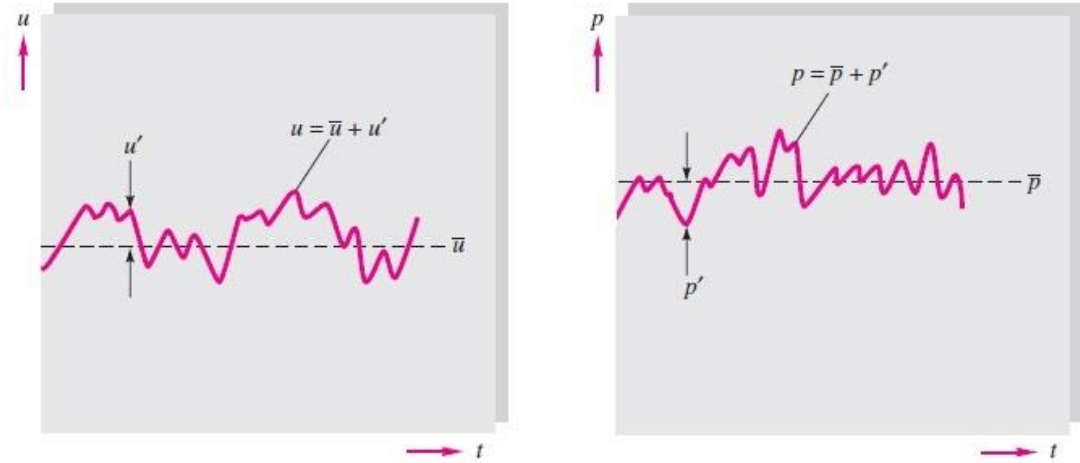
Su ve hava gibi akışkanların viskoziteleri çok düşük olduğundan akım esnasındaki Reynolds sayıları oldukça yüksektir. Bundan dolayı çoğu mühendislik uygulamalarında akım türbülanslı rejimde gerçekleşmektedir.

1.2.2. Türbülanslı akım

Türbülanslı akımda akışkan elemanları tedirgin davranarak çalkantılı hareket ettiği için özellikle akım büyüklükleri konumun ve zamanın bir fonksiyonu haline gelir. Anlık davranışlar bir rastgelelik içerdiği için türbülanslı akımda örneğin eksenel hız bileşeni $u(x,y,z,t)$ 'nin zaman ortalaması $\bar{u}$ dikkate alınır:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (1.30)$$

Burada T ortalama bir periyottur, türbülanslı akımlarda bu periyot genel olarak yaklaşık 5 saniye olarak alınır. Şekil 1.4'de hız ve basınç bileşenlerinin zaman ortalaması ve ortalama değerlerinden sapması, *çalkantı bileşeni*, u', p' , olarak tanımlanır.



Şekil 1.4. Ortalama ve çalkantılı türbülans değerlerinin gösterimi (White, 2016).

Çalkantı bileşeni Şekil 1.4'de de gösterildiği gibi aşağıdaki formüldeki gibidir.

$$u' = u - \bar{u} \quad (1.31)$$

Tanımından da anlaşılacağı gibi çalkantı bileşeninin zaman ortalaması $\overline{u'} = 0$ 'dır. Ancak çalkantı değerinin karesinin ortalaması sıfır değildir ki bu değer *türbülans şiddetinin* bir ölçüsüdür.

$$rms = \sqrt{\overline{u'^2}}.$$

Laminer akım için ki momentum denkleminde, özellikle hız bileşenleri ortalama ve çalkantı bileşenlerine ayrılarak türbülanslı akım için x-ekseni doğrultusundaki momentum denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\rho \left[\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right) \quad (1.32)$$

$$\rho \left[\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \rho \left[\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \quad (1.33)$$

Buradaki $-\rho \overline{u'^2}$, $-\rho \overline{u'v'}$ ve $-\rho \overline{u'w'}$ terimleri türbülans kaynaklandığı için, *türbülans gerilmeleri* veya *Reynolds gerilmeleri* olarak adlandırılırlar. Yapılan deneysel araştırmalara göre akıma, türbülans kayma gerilmelerinden $-\rho \overline{u'v'}$ hakimdir ve diğerleri ihmal edilebilir (White, 2016).

Bu durumda (1.33) no'lu denklemdeki son iki terim;

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \tau'_{ij}) \quad (1.34)$$

şeklini alır. Burada τ_{ij} laminar akımla aynı özelliği gösterdiğinden laminar kayma gerilmesi, τ_l , τ'_{ij} 'de türbülanslı akımdan kaynaklandığı için türbülans kayma gerilmesi, τ_t , olarak tanımlanır.

Türbülanslı akışlarda kayma gerilmesi aşağıdaki gibi olur ve gelişimi Şekil 1.8'de gösterilmiştir.

$$\tau = \tau_l + \tau_t \quad (1.35)$$

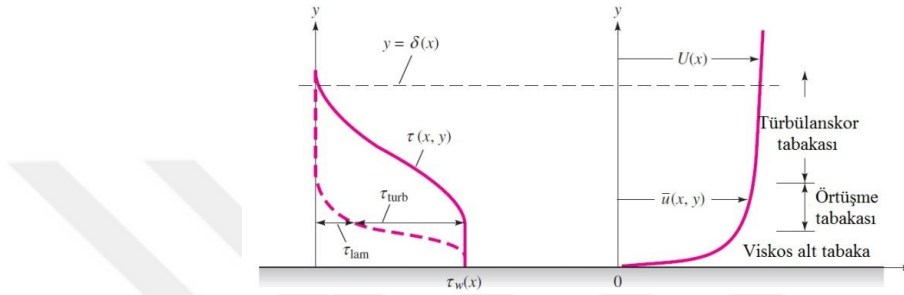
Türbülans ve laminar kayma gerilmelerinin benzerliğinden türbülans kayma gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (1.36)$$

Bu denklemdeki μ_t terimi *türbülans* veya *çalkantı (eddy) viskozitesi* olarak anılır. Tanımı viskozite olarak geçse de (1.36) no'lu denklemdeki eşitlikten de anlaşılacağı üzere akışkanın bir özelliği olmayıp, türbülanslı akımın bir özelliğidir ve boyut benzerliğinden dolayı viskozite olarak anılır (Çengel ve Cimbala, 2008). Burada dikkat edilmelidir ki Reynolds gerilmeleri akışkanın bir özelliği olmayıp akıma bağlı bir özellik olarak kendini göstermektedir ve momentum denklemindeki atalet kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.

$$\tau = (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (1.37)$$

Cidara yaklaştıkça türbülans etkilerinin azalıp viskoz kuvvetlerin arttığı ve dolayısıyla akımın laminar özellik gösterdiği Şekil 1.5'ten anlaşılmaktadır. Cidarda çok ince bir tabaka halinde, sadece viskoz kuvvetlerin etkili olduğu bölge *viskoz alt tabaka* olarak adlandırılır. Türbülans etkileri ile viskoz kuvvetlerin aynı anda olduğu, viskoz alt tabakanın bir üstündeki tabaka *örtüşme tabakası*dır. Tamamen türbülans kayma gerilmelerinin hakim olduğu bölge *türbülans kor tabakası* olarak adlandırılır.



Şekil 1.5. Cidar yakınında türbülanslı akışta hız ve kayma gerilmesi dağılımları (White, 2016)

Viskoz alt tabaka çoğunlukla boru çapının % 1'inden daha küçük bölümünde etkilidir. Ancak buradaki herhangi bir düzensizlik ve pürüzlülüğün diğer akış katmanları üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bu nedenle laminar akışta ihmal edilen pürüzlülük etkisi türbülanslı akışta ihmal edilemeyecek düzeydedir. (Çengel ve Cimbala, 2008)

Burada birbiri ile ilişkili iki boyutsuz parametre tanımlanır. Bunlardan biri hız, diğeri duvarın normaline doğrultusundaki mesafe ile ilgilidir.

$$u^+ = \frac{u}{u^*} = f\left(y^+ = \frac{yu^*}{\nu}\right), \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1.38)$$

Burada u^* sürtünme hızıdır, τ_w duvardaki kayma gerilmesidir. Viskoz, yani laminar alt tabaka ilişkisi (1.39) no'lu denklemdeki gibidir ve *cidar yasası* olarak adlandırılır.

$$u^+ = y^+ \quad (1.39)$$

Pürüzsüz borularda deneysel verilere göre boyutsuz hız ile mesafe, *boyutsuz mesafe değerinin* $0 < y^+ \leq 5$ aralığında iken doğrusal bir ilişki göstermektedir (White, 2016).

Örtüşme tabakasındaki hız profilini elde etmek için cidardan uzaklıkla doğru orantılı olan *türbülans karışım uzunluğu*, l , ve buna bağlı olarak da *Karman sabiti*, κ , tanımlanır.

$$\bar{u}', \bar{v}' \approx l \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1.40)$$

$$l \approx \kappa y \quad (1.41)$$

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} \approx \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (1.42)$$

$$\tau_t = \rho \kappa^2 y^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (1.43)$$

Duvardaki kayma gerilmesini sadece türbülans kaynaklandığını varsayarak (1.38) no'lu denklemdeki τ_w yerine (1.43) no'lu denklemdeki türbülans kayma gerilmesi τ_t yazılırsa;

$$\rho u^{*2} = \rho \kappa^2 y^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \dots$$

$$u^* = \kappa y \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1.44)$$

şeklini alır. Denklem düzenlenip integrali alınırsa;

$$\int \frac{dy}{y} = \int \frac{\kappa}{u^*} d\bar{u}.$$

$$\ln y = \frac{\kappa}{u^*} \bar{u} + c.$$

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu^*}{v} + c \quad (1.45)$$

bulunan bu denklem *logaritmik yasa* olarak tanımlanır. Deneysel olarak κ sabitinin değeri 0,41, c 'nin değeri ise 5 olarak belirlenmiştir. Bu durumda logaritmik yasa aşağıdaki şekli alır (Çengel ve Cimbala, 2008).

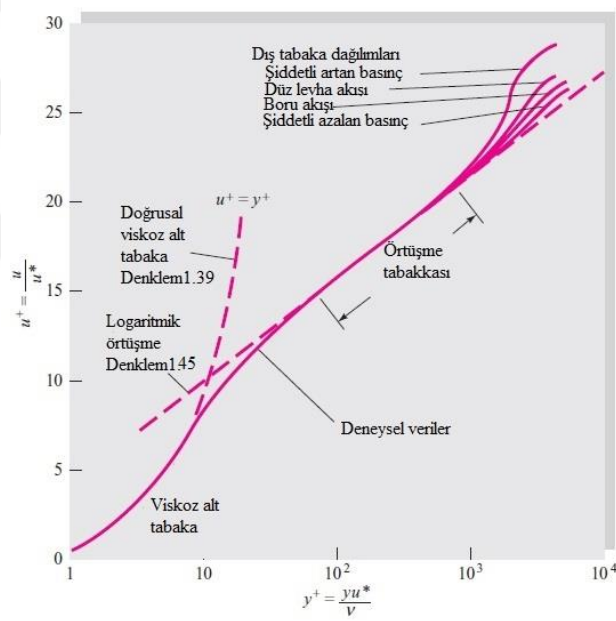
$$u^+ = 2,44 \ln y^+ + 5 \quad (1.46)$$

Ortalama hızın, sürtünme hızına oranına göre türbülanslı akım içindeki tabakalar ve bu tabakalarda geçerli olan formüller Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Türbülans tabakalarında kullanılan formüller

u^+ değeri	Formül	Tabaka
$0 \leq y^+ < 5$	$u^+ = y^+$	Viskoz alt tabaka
$5 \leq y^+ < 70$	$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + c$	Örtüşme tabakası
$y^+ > 70$	$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + c$	Türbülans kor tabaka

Deneyisel araştırmalar sonucu ortaya çıkan ve Çizelge 1.1.'de verilen formüller ile oluşturulmuş türbülanslı akım hız profili Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Deneyisel incelemeler sonucu ortaya çıkmış türbülanslı akım hız dağılımı (White, 2016).

Türbülanslı boru akımında logaritmik yasa;

$$\frac{u(r)}{u^*} \approx \frac{1}{\kappa} \ln \frac{(R-r)u^*}{v} + c \quad (1.47)$$

şeklini alır. Burada genel hız denklemi için κ ve c değerlerinin yerine yazılmış hali (1.48) no'lu denklemde verilmiştir.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u^* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \frac{(R-r)u^*}{\nu} + c \right] 2\pi r dr = \frac{1}{2} u^* \left(\frac{2}{\kappa} \ln \frac{Ru^*}{\nu} + 2c - \frac{3}{\kappa} \right).$$

$$\frac{V}{u^*} \approx 2,44 \ln \frac{Ru^*}{\nu} + 1,34 \quad (1.48)$$

V/u^* ifadesinde u^* yerine (1.38) no'lu denklemdeki ifade yazılırsa aşağıdaki şeklini alır.

$$\frac{V}{u^*} = \sqrt{\frac{\rho V^2}{\tau_w}} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (1.49)$$

(1.48) ve (1.49) no'lu denklemler birlikte çözülür ve logaritma tabanı 10 olarak değiştirilirse pürüzsüz borular için aşağıdaki denklem ortaya çıkar.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re_d \sqrt{f}) - 0,8 \quad (1.50)$$

Bu denklemin uygulama zorluğundan dolayı H. Blasius türbülanslı akım ve pürüzsüz borular için aşağıda verilen sürtünme faktörü bağıntısını ortaya koymuştur (White, 2016).

$$f = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad (1.51)$$

Laminer akımda yüzey pürüzlülüğü ε , sürtünme faktörünü etkilemezken, türbülanslı akımlarda etkiler. Pürüzlülük, viskoz alt tabaka kalınlığına göre değerlendirilir. Eğer boru yüzeyindeki pürüzlülük viskoz alt tabaka sınırını geçiyorsa pürüzlü, geçmiyorsa pürüzsüz olarak adlandırılır. Pürüzlülük, düzensiz pürüzlerin ortalama yüksekliği şeklinde tanımlanır. D boru çapı olmak üzere; ε/D oranı ise bağlı pürüzlülüğü ifade etmektedir (Çengel ve Cimbala, 2008) .

Colebrook, logaritmik örtüşme yasasını pürüzlü borulara uygulamış ve Darcy sürtünme faktörünü pürüzlü borular için aşağıdaki gibi önermiştir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re_d \sqrt{f}} \right) \quad (1.52)$$

Bu denklem kapalı bir denklemdir ve bunun çözümünde birkaç kere iterasyon yapmak gerekir. Bu sebeple sürtünme faktörünün yaklaşık açık hali, Haaland tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (1.53)$$

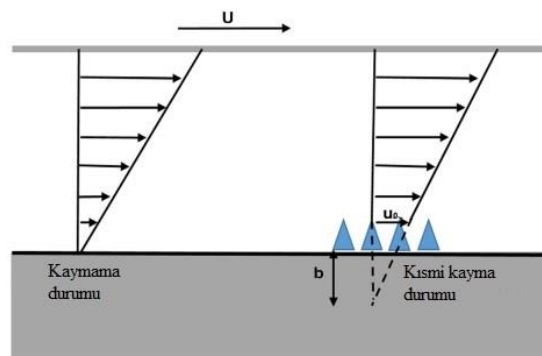
Bu denklemler vasıtasıyla Ek 1'de verilen *Moody Diyagramı* çizilmiştir.

Moody diyagramından da görüleceği üzere genel olarak laminar akımda sürtünme faktörü türbülanslı akıma kıyasla daha yüksektir. Ancak, bu demek değildir ki laminar akımda sürtünme basınç kayıpları türbülanslı akımdakinden daha fazladır. Aynı zamanda sürtünme faktörü hem laminar hem de türbülanslı akımda Reynolds sayısı arttıkça azalmaktadır. Burada da benzer bir durum vardır: Reynolds sayısının artmasıyla azalan sürtünme faktörü sürtünme basınç kayıplarının azaldığı anlamına gelmez. Çünkü basınç kayıpları sürtünme faktörü yanı sıra akım hızı ile de ilgilidir. Laminar boru akımlarında basınç kaybı akım hızı ile 1. dereceden doğru orantılı iken türbülanslı akımlarda hızın 1.75 üssü ile orantılı artmaktadır.

1.3. Hidrofobik Laminar Akım

Hidrofobik özellik gösteren yüzeylerde kaymama koşulu ortadan kalkmakta, dolayısıyla yüzeyde akım hızı sıfırdan farklı olmaktadır. Bu durum kayma gerilmesini etkileyen akışkanın özelliği olan viskozite ile ilgili değildir ancak akımın özelliği olan hız gradyanına doğrudan etki eder.

Hidrofobik özelliğin yüzeyde kaymama koşulunu sağlamamasının nedeni, hidrofobik özellik sayesinde sıvının katı yüzeyle temas ettiği alanın azalması ve buna bağlı olarak sıvı damlalarının katı yüzey üzerinde yuvarlanabilmesidir. Bu durumda katı yüzeyindeki deformasyon hızı düşecek, dolayısıyla da yüzeydeki sürtünme kuvveti azalacaktır. Aynı zamanda Şekil 1.7’te görüldüğü üzere hidrofobik özellik kazandırılmış bir yüzeyde akım hızı sıfırdan farklı olacaktır. Ayrıca bu şekilde verilen b uzunluğu *kayma uzunluğu* olarak adlandırılır (Wang vd, 2017).



Şekil 1.7. Hidrofobik özelliğin hız profili üzerindeki etkisi (Wang vd, 2017).

Yüzeyde kayma olduğu durumda yüzeydeki kayma gerilmesi τ_w ile *kayma hızı* u_k , arasındaki oran *kayma katsayısı*, m , olarak ifade edilebilir, u_k değeri kayma gerilmesi tanımından aşağıdaki gibi olur.

$$\tau_w = -\mu \frac{du}{dr} = -\frac{dP}{dx} \frac{R}{2} = mu_k \quad (1.54)$$

$$u_k = -\frac{dP}{dx} \frac{R}{2m} \quad (1.55)$$

Ayrıca yüzeydeki hız gradyeni, kayma hızının kayma uzunluğuna oranı olarak tarif edilebilir. Bu durumda yüzeydeki kayma gerilmesi;

$$\tau_w = \mu \frac{u_k}{b} \quad (1.56)$$

şeklini alır. Bu denklem (1.54) no'lu denklem ile birleştirilirse kayma katsayısı değeri aşağıdaki gibi olur.

$$m = \frac{\mu}{b} \quad (1.57)$$

Laminer boru akımı için (1.21) no'lu denklemde elde edilen bağıntı hidrofobik yüzeylerde, $r=R$ için, $u = u_k$ olur ve c değeri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$c = -\frac{dP}{dx} \frac{1}{2m} R - \frac{dP}{dx} \frac{1}{4\mu} R^2 \quad (1.58)$$

$$c = \left(\frac{R}{2m} + \frac{R^2}{4\mu} \right) \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (1.59)$$

Bu durumda yüzeyde kayma gerçekleştiği durumdaki hız profili aşağıdaki formunu alır.

$$u = \left(-\frac{r^2}{4\mu} \right) \left(-\frac{dP}{dx} \right) + \left(\frac{R}{2m} + \frac{R^2}{4\mu} \right) \left(-\frac{dP}{dx} \right),$$

$$u = \left[\frac{R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{R}{2m} \right] \left(-\frac{dP}{dx} \right) \quad (1.60)$$

Akım yüzeyinde kayma olmadığı durumdaki hacimsel debi (1.26) no'lu denklemde verilmiştir, yüzeyde kayma olduğu durumda ise hacimsel debi aşağıdaki gibi olur.

$$Q = \int AVdA = \int_0^R u 2\pi r dr = \int_0^R \left[\frac{R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{R}{2m} \right] \left(-\frac{dP}{dx} \right) 2\pi r dr \quad (1.61)$$

$$Q = -\frac{\pi R^2}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 + \frac{4\mu}{Rm} \right) \quad (1.62)$$

Yüzeyde kayma olduğu durum için ortalama hız değeri aşağıda verilmiştir.

$$u_{ort} = \frac{Q}{A} = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dP}{dx} \left(1 + \frac{4\mu}{Rm}\right) \quad (1.63)$$

(1.63) no'lu denklemde yarıçap R yerine, D/2 ve $\left(-\frac{dP}{dx}\right)$ yerine $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$ yazılırsa;

$$u_{ort} = -\frac{\frac{D^2}{4}}{8\mu} \frac{\Delta P}{L} \left(1 + \frac{4\mu}{Rm}\right) \quad (1.64)$$

$$\Delta P = \frac{u_{ort} 32\mu L}{D^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{4\mu}{Rm}\right)} \quad (1.65)$$

şeklini alır. Bu denklem (1.1) no'lu Reynolds sayısı denklemi ile birleştirilirse;

$$\Delta P = \frac{64}{Re} \frac{\rho u_{ort}^2}{2} \left(\frac{L}{D}\right) \frac{1}{\left(1 + \frac{4\mu}{Rm}\right)} \quad (1.66)$$

(1.28) ve (1.29) no'lu denklemlerde sırasıyla laminar boru akımı için yük kaybı ΔP ve Darcy sürtünme faktörü f verilmiştir. Bunları (1.63) no'lu denklemde uygularsak, yüzeyde kayma olduğu durumdaki sürtünme katsayısı aşağıdaki şekli almaktadır.

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{\left(1 + \frac{4\mu}{Rm}\right)} \quad (1.67)$$

Bu denklemde kayma katsayısı yerine (1.57) no'lu denklemdeki değeri yazılırsa;

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{\left(1 + \frac{4b}{R}\right)} \quad (1.68)$$

şeklini alır. Hidrofilik bir yüzeyde kaymama koşulu olması durumunda kayma uzunluğu b sıfır olur, bu durumda (1.68) no'lu denklemden görüleceği üzere $4b/R$ teriminin değeri de sıfır olur ve denklem konvansiyonel bir yüzey için olan laminar akım sürtünme faktörü değeri ile aynı olur. (1.67) no'lu denklemdeki $\frac{4\mu}{Rm}$ eklentisi *hidrofobik laminar akım düzeltme katsayısı*, m_l olarak anılabilir.

$$f = \frac{64}{Re} \frac{1}{(1+m_l)} \quad (1.69)$$

1.4. Hidrofobiklik

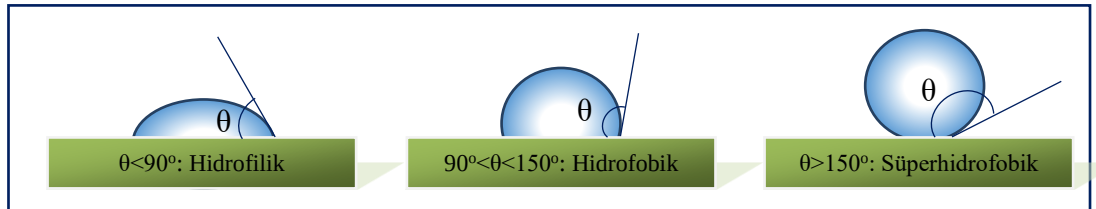
Endüstriden tıba kadar birçok alanda kullanılan hidrofobiklik kısaca ıslanmazlık olarak da ifade edilebilir. Şekil 1.8'de görüldüğü gibi nilüfer bitkisinin yaprağı

üzerinden yağmur damlasının hiçbir iz bırakmadan, yaprağın üzerindeki toz zerreciklerini toplayarak kayması hidrofobikliğe örnek olarak verilebilir.



Şekil 1.8. Nilüfer yaprağının hidrofobikliği (Zhang ve Lv, 2015)

Hidrofobikliğin belirlenmesinde temas açısı kullanılır. Temas açısı katı yüzey üzerindeki sıvı damlasının, temas halinde olduğu yüzeyle oluşturduğu açıdır, sıvının ve temas halinde olunan katının fiziksel özelliklerine bağlıdır. Şekil 1.9’de görüldüğü gibi bu açının aldığı değere göre yüzeyin ıslanabilirliği için üç durum söz konusudur. Yüzey ıslanabilirliği temas açısı 90° ’den daha küçükse *hidrofilik*, 90° ’den büyük 150° ’den küçük ise *hidrofobik* ve 150° ’den büyükse *süperhidrofobik* olarak adlandırılır.

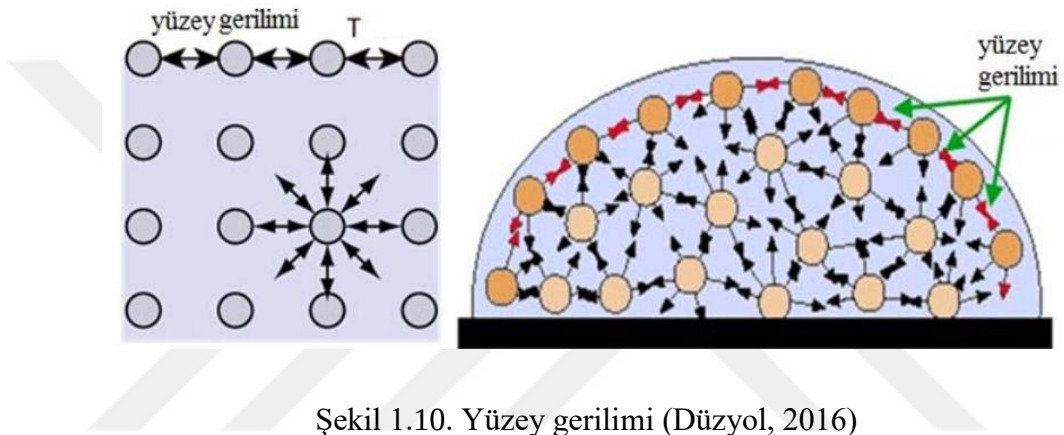


Şekil 1.9. Yüzey ıslanabilirliği

Temas açısı, sıvının yüzey gerilimine, katının yüzey enerjisi ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Bir maddede aynı moleküller arasındaki çekim kuvvetine *kohezyon*, farklı moleküller arasındaki çekim kuvvetine ise *adezyon* adı verilmektedir. Şekil 1.10’te görüldüğü gibi madde içerisine dağılmış moleküller kohezyon kuvvetinden dolayı birbirlerine karşı kararlı bir yerleşim sergiler. Ancak madde yüzeyindeki moleküller kohezyon kuvvetinin çekim alanına tam olarak giremediğinden farklı bir yerleşim sergiler ve kohezyon kuvveti etkisi ile maddenin içerisine doğru çekilir. Böylelikle yüzeydeki moleküller, yanındaki moleküller ve iç

tarafındaki moleküllere yaklaşık bir konum alır. Bu durum sıvıların yüzeyini adeta bir zar gibi kaplar ve bu duruma *yüzey gerilimi* adı verilir.

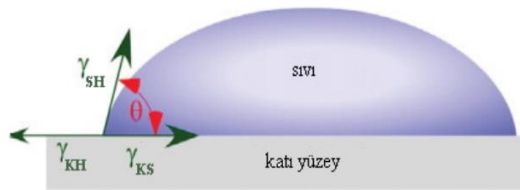
Sıvının yüzey gerilimi azaldıkça temas açısı ve buna bağlı olarak hidrofobiklik azalır. Hidrofobik özellik katının yüzey pürüzlülüğü ile artar. Pürüzlü olmayan yüzeylerde ölçülen temas açısı 120° 'yi geçmez. Ancak yüksek pürüzlülüğe sahip katı yüzeylerde, katının yüzeyi ile sıvı arasında bulunan hava, yüzeyler arası etkileşimi azaltarak hidrofobik özelliği artırır (Kartal, F. E. 2009). Aynı zamanda katının yüzey enerjisi ne kadar düşükse sıvı ile arasındaki adezyon kuvveti o kadar az olacağından hidrofobiklik özelliği artar.



Şekil 1.10. Yüzey gerilimi (Düzyol, 2016)

Temas açısı ölçümleri yüzeyin özelliğine göre farklılık göstermektedir. İdeal kabul edilen pürüzsüz yüzeylerde temas açısı ölçümü Şekil 1.11'da gösterilen değerlere göre hesaplanmaktadır. Burada, θ_0 temas açısı, γ_{SH} sıvı – hava, γ_{KH} katı – hava, γ_{KS} katı – sıvı ara yüzeylerindeki yüzey gerilimi olmak üzere temas açısı hesabında kullanılan Young denklemi aşağıdaki gibidir (Kartal, F. E. 2009).

$$\gamma_{SH} \cdot \cos \theta_0 = \gamma_{KH} - \gamma_{KS} \quad (1.70)$$

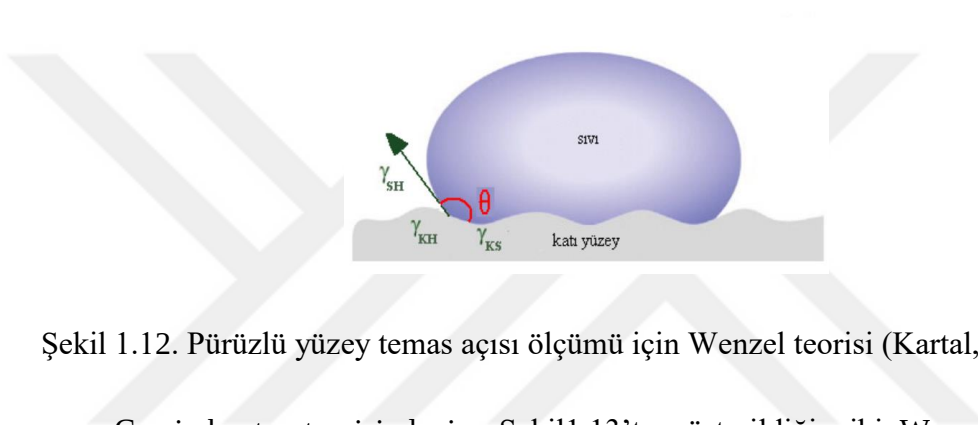


Şekil 1.11. Pürüzsüz yüzeyde temas açısı ölçümü (Kartal, F. E. 2009)

Pürüzsüz yüzeylerde bir adet temas açısı ölçülür, pürüzlü yüzeyler için Wenzel ve Cassie-baxter teorileri ortaya çıkmıştır. Wenzel şekil 1.12’de olduğu gibi sıvının katı yüzey üzerindeki pürüzlülükleri tamamen doldurduğunu varsayarak Young denklemini iyileştirmiştir.

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta'}{r} \quad (1.71)$$

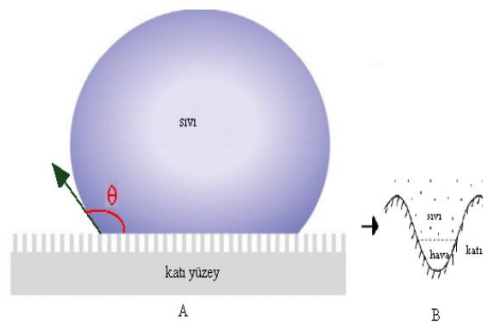
Bu denklemde θ' pürüzlü yüzey temas açısı ve r pürüzlülük faktörüdür. Pürüzlülük oranı, r , pürüzlü yüzeyin gerçek alanının görünür alana oranı olarak tarif edilir. (Kartal, F. E. 2009)



Şekil 1.12. Pürüzlü yüzey temas açısı ölçümü için Wenzel teorisi (Kartal, F. E. 2009)

Cassie-baxter teorisinde ise Şekil1.13’te gösterildiği gibi Wenzel teorisinin aksine pürüzlü yüzeyler sıvı ile dolmamakta, sıvı ile katı arasında pürüzlü yüzeylerin içinde tamamen hava boşluğu oluşmaktadır. Cassie-baxter teoremi de Wenzel teoremini iyileştirmiştir. Bu teoriye göre iki adet temas açısı oluşur ve bunların toplamı gerçek temas açısını verir.

$$\cos \theta' = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2 \quad (1.72)$$



Şekil 1.13. Pürüzlü yüzey temas açısı ölçümü için Cassie-baxter teorisi (Kartal, F. E. 2009)

2. LİTERRATÜR ARAŞTIRMASI

Tüm sektörlerde ve endüstriyel sistemlerde boru akımları ile karşılaşilmektedir. Pratikte akım karakteri laminar akımdan daha çok türbülanslı olarak gerçekleşir. Türbülanslı akımda meydana gelen basınç kaybı laminar akıma kıyasla daha yüksektir. Laminar boru akımlarında basınç kaybı akım hızı ile 1. dereceden doğru orantılı iken türbülanslı akımlarda hızın 1.75 üssü ile orantılı artmaktadır. Dolayısıyla türbülanslı akımlarda sürtünme kaynaklı basınç kaybı enerji tasarrufu açısından daha büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda malzeme teknolojisine bağlı olarak gelişen yüzey işleme ve kaplama metotları uygulanarak sürtünme kayıplarını azaltmak üzerine teorik ve deneysel çalışmaların artmaya başladığı görülmektedir. Genel olarak, sürtünme kayıplarını azaltmak için yoğunlukla konvansiyonel yüzeyler düşük yüzey enerjili malzemeler ile kaplanarak hidrofobik yüzeyler elde edilmektedir.

Tretheway ve Meinhart (2002) cam mikrokanal yüzeylerini hidrofilik ve hidrofobik malzeme ile kaplamışlar ve yaptıkları deneylerde μ -PIV (Micro-Particle Image Velocimetry) ölçüm tekniğini kullanmışlardır. Hidrofilik malzeme ile kaplı cam yüzeylerde kayma hızı oluşmadığını doğrularken, hidrofobik malzeme ile kaplı cam yüzeylerde mikrokanal içindeki ortalama akım hızının % 10'u kadar bir kayma hızı oluştuğunu ve kayma uzunluğunun da $1\mu\text{m}$ olduğunu tespit etmişlerdir.

Ou vd (2005) tarafından mikrokanalarda yapılan deneysel çalışmada süperhidrofobik yüzey üzerinde akım yönünde mikro çıkıntılar oluşturulmuş ve bu yapının μ -PIV tekniği ile ölçümü yapılmıştır. Bu çalışmalarında maksimum kayma hızının mikrokandaki ortalama akım hızının % 60'ı kadar olduğunu belirlemişlerdir ve süperhidrofobik yüzey üzerindeki kaymanın sürtünme faktörünü azaltan en önemli etken olduğunu vurgulamışlardır.

Gogte vd (2005) dokulu ve süperhidrofobik olarak kaplanmış yüzeylerin etrafındaki sıvı akışını, 10 mm'lik karakteristik doku boyutları ile incelemişlerdir. Eğimli bir yüzeyden aşağı hareket eden damlacıklar için süperhidrofobik kaplama ile birleştirilmiş yüzey dokusunda kayda değer sürtünme azalımı oluşmuştur. En yüksek düşme hızları, karakteristik özelliği 8 mm olan düzensiz dokulu yüzeylerde, % 10'dan daha fazla olarak elde edilmiştir.

Choi vd (2006) düz bir levha üzerine kaplanmış ızgara desenli nano yapının sürtünme faktörünü % 20 - 30 oranında düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca, nano yapı

üzerindeki desenlere paralel olan akımlarda enine olan akımlara göre sürtünme faktöründe daha fazla düşüş tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise ızgaraların arasında oluşan hava katmanının sebep olduğu belirtilmiştir.

Henoch vd (2006) ürettikleri süperhidrofobik yüzeyleri su tüneline teste tabi tutmuşlardır. Hem laminar hem de geçiş rejimindeki sürtünmeyi 1,4 m/s hıza kadar ölçmüşler ve laminar akımda sürtünme azalmasını yaklaşık % 50 olarak tespit etmişlerdir. Ancak akım türbülanslı akıma yaklaşıırken sürtünme azalması oranının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Truesdell vd (2006) düzenli oluklu bir yapı oluşturarak süperhidrofobik bir yüzey elde etmiş ve düşük Reynolds sayılarında yüzeydeki kayma olayını incelemişlerdir. Bu yapı etkili sıvı - yüzey temas alanını azaltmış ve dolayısıyla sıvı yüzeyde kaymaya başlamış ve sürtünme faktörü azalmıştır. Bu sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile de sayısal analizi yapılmıştır. Deney sonucu elde edilen kayma hızı, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kayma hızından 40 kat daha fazladır. Bu durumu, deney esnasında katı sıvı ara yüzeyinde oluşan hava katmanı içerisinde bulunan sıvı buharından kaynakladığı şeklinde açıklamışlardır.

Ybert vd (2007), yaklaşık 50 - 100 nm çapında, 5 μ m aralıklı sütunlardan oluşan bir yüzeyde 179°'den daha büyük bir temas açısı elde etmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda böyle bir yüzeyde kayma uzunluğunu 100 μ m olarak ölçmüşlerdir.

Daniello vd (2009) yaptıkları deneysel çalışmada aldıkları PIV sonuçlarına göre pürüzsüz konvansiyonel yüzeye kıyasla süperhidrofobik yüzeyli mikro kanalda türbülanslı akım için birim uzunluk başına basınç kaybının % 50'den daha fazla azaldığını tespit etmişlerdir.

Jung ve Bhushan (2009) biyomimetik yapıları yüzeylerin sürtünme azaltımı üzerindeki etkisini incelemişler ve bu bağlamda köpekbalığı derisinin benzeri olarak ürettikleri malzemeler üzerinde hem laminar akım için hem de türbülanslı akım için deneyler yapmışlardır. Oluşturdukları malzemeler arasından temas açısı en yüksek olanının en fazla sürtünme azalımı sağladığını ve laminar akım için % 12, türbülanslı akım için ise % 30 sürtünme azalımı oluştuğunu belirtmişlerdir.

Martell vd (2010) teorik olarak inceledikleri süperhidrofobik yüzeylerin, $Re_T \approx 180$, $Re_T \approx 395$ ve $Re_T \approx 590$ Reynolds sayılarındaki mikro-geometri yapıları için kayma hızı, duvar kayma gerilmeleri ve Reynolds gerilmelerini belirlemişlerdir.

Süperhidrofobik yüzeylerin, türbülanslı akımlarda laminar alt tabakayı deforme ettiği ve buna bağlı olarak sürtünme faktörünü azalttığını tespit etmişlerdir. Mikro-geometriye bağlı olarak simüle edilen en büyük farkın, kayma hızının süperhidrofobik olmayan yüzeydeki ortalama akım hızının % 80'inin üzerinde olduğu ve duvar kayma gerilmesinin süperhidrofobik olmayan yüzeye göre % 50'den fazla azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, Martell vd (2008) daha önce yaptıkları bir çalışmada, süperhidrofobik duvarın yakınındaki ortalama hız profilinin, duvar kayma gerilmesi ile ölçeklenmeye devam ettiğini, ancak bunların temel olarak mikro-geometride oluşan hava boşluklarına bağlı bir kayma hızı ile dengelendiğini göstermişlerdir.

Jeffs vd (2010) akış yönüne paralel olarak tasarlanmış desenli süperhidrofobik yüzeyli kanallarda yaptıkları teorik çalışmada, aynı Reynolds sayılarında deneysel olarak hesaplanan % 11 sürtünme azalması değerine karşı (Woolford vd, 2009), teorik olarak ortalama % 14,5 sürtünme azalması değerini belirlemişlerdir.

Chinappi, M. ve Casciola (2010) pürüzsüz malzeme yüzeylerini hidrofobik olarak kaplamış ve moleküler dinamik simülasyon (MD) tekniği ile kayma uzunluklarını ölçmüşlerdir. Deneysel olarak 20 nm olarak ölçülen kayma uzunluğu (Cottin-Bizonne vd, 2005), MD tekniği ile ölçüldüğünde 0,2-0,5 nm değerleri elde etmişlerdir. Bu iki ölçüm arasındaki farkın sıvı – katı yüzeyi arasında oluşan hava katmanını nedeniyle olduğu sonucuna varmışlardır.

Nouri vd (2012) yaptıkları teorik çalışmada hidrofobik yüzeylerdeki sürtünme azaltılmasını Large Eddy Simulation (LES) denklemleri kullanarak çözümlenmişlerdir. Buldukları % 30 sürtünme azalması değerini doğrudan sayısal simülasyon (DNS) yöntemi ile de doğrulamışlardır. Bu sürtünme azaltılmasının sebebi olarak duvar yakınındaki türbülanslı yapının yüzeydeki kayma hızı ile değişmesi olarak açıklamışlar ve bu etkinin de kayma uzunluğunun belirli bir değeri aştığında oluştuğunu belirtmişlerdir.

Aljallis vd (2013), hidrofobik nano partiküllerin püskürtülmesi ile oluşturulan süperhidrofobik kaplamanın yüksek hızlı çekme tankı sisteminde deneye tabii tutarak sürtünme etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, daha yüksek temas açısına sahip, yani sıvı-katı ara yüzeyinde hava katmanını oluşan, süperhidrofobik yüzeylerin hem laminar akımlarda hem de türbülanslı sınır tabakası akımlarında sürtünmenin azalmasında daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, etkili sürtünme azalması

için yüzeydeki hava tabakasının sabit kalınlıkta olmasının kritik öneme sahip olduğuna dikkat çekmişlerdir. Türbülanslı sınır tabakası akımındaki yüksek duvar kayma hızı ile yüzeydeki hava tabakası veya kabarcıklar azalıp tamamen kaybolabilmektedir. Bu durumda, yüzey su ile ıslanır ve süperhidrofobik yüzey desenlerinin pürüzlülüğü, sürtünmeyi daha da arttıracaklarını ortaya çıkarmışlardır.

Moaven vd (2013), alüminyum disk yüzeyine süperhidrofobik özellik kazandırarak kaplamasız yüzeye kıyasla sürtünme direncinin % 15 - 30 kadar azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, hidrofobik yüzeylerin sürtünme direncini büyük ölçüde azalttığını belirleyerek pompalama gücünü azaltmak için büyük bir potansiyel arz ettiğine dikkat çekmişlerdir.

Bir kargo gemisinin direnci üzerinde sürtünmenin katkısı % 60 - 70, bir tankerde ise % 80 oranındadır (Fukuda vd, 2000). Tek başına nakliyenin küresel petrol arzı içindeki payı % 8,5 (Winkler, 2008) ve CO₂ emisyonları payı % 3,3 oranındadır (Qi ve Song, 2012). Hidrofobik yüzey oluşturularak sürtünme etkilerinin azaltılması, enerji tasarrufu sağlanması ve sera gazı azalımı için küresel ölçekte dikkate değer ölçüde bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilebilir. Park vd (2014) gemi gövdeleri için yaptıkları çalışmada 2,7 x 2,7 mm² süperhidrofobik ve pürüzsüz bir numune ile yapılan deney sonucunda ızgara parametrelerinin % 75'e kadar türbülanslı sürtünme azalmasında etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Jelly vd (2014) süperhidrofobik bir kanal yüzeyindeki türbülanslı akımı DNS yöntemi ile incelemiş ve yüzey kaplamasının türbülans ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kayma oluşmayan yüzeye göre sürtünme faktöründe % 21,6 oranında azalma tespit etmişlerdir. Ayrıca deneylerde kaymayan yüzeylerdeki sürtünme faktöründeki yüksekliğin sebebi olarak kaymayan bölgede ortalama momentumun yayılmasının olduğu sonucuna varmışlardır.

Bidkar vd (2014) türbülanslı akım rejimlerinde 10⁶ ile 9x10⁶ aralığındaki Reynolds sayılarında yaptıkları deneysel çalışmada hidrofobik yüzeylerin sürtünme azaltımı üzerine etkilerini incelemiş ve ortalama olarak % 20 - % 30 arasında sürtünme azalması tespit etmişlerdir. Reynolds sayısı arttıkça hidrofobik yüzeylerin havayı tutma kabiliyetini azaldığı ve bu sebepten dolayı sürtünmedeki azalma oranının düştüğünü belirtmişlerdir.

Tian vd (2015) zaman çözünürlüğünde PIV ölçüm tekniği ile hidrofilik ve süperhidrofobik yüzeylerin sürtünmelerini karşılaştırmış ve süperhidrofobik yüzeyde hidrofilik yüzeye oranla % 10 oranında daha az sürtünme oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Volkov vd (2015) aynı özellikteki levhaları çeşitli metotlarla kaplamış ve bu levhaların hidrolik sürtünmeleri ile kaplanmamış yüzeyin hidrolik sürtünmesini karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucu kaplama özelliğine göre % 15,5 - 23 arasında hidrolik sürtünmede azalma kaydetmişlerdir.

Rastegari ve Akhavan (2015) süperhidrofobik mikrokanal yüzeylerinde türbülanslı akımın sürtünme azaltımındaki etkisini DNS yöntemi ile incelemişlerdir. Süperhidrofobik yüzeyleri uzunlamasına mikro oluk, boyuna mikro oluk ve mikro direkler şeklinde hazırlamışlar ve sırasıyla %5 - 83, %-4 - 20 ve %14 - 81 oranlarında sürtünme azalımı belirlemişlerdir.

Ríos-Rodríguez vd (2016) hidrofobik malzeme ile kapladıkları cam boruda 70 - 250 Reynolds sayısı aralığında olan laminar akım gerçekleştirmişlerdir. Newtonyan akışkan kullanarak yaptıkları bu deneyde PIV ölçümleri sonucunda kaplanmamış cam boruya göre % 20 oranında sürtünmede azalma tespit etmişlerdir.

Fiolava vd (2017a) hidrofobik malzeme ile kaplı paralel plakalar arasındaki laminar akım için duvardaki kayma koşulunu ve buna bağlı olarak oluşan hız profilini incelemişlerdir. Başka bir çalışmada (Fiolava vd, 2017b) hidrofilik ve süperhidrofobik yüzeylerdeki hız profilini PIV tekniği ile incelemişlerdir. Süperhidrofobik yüzeylerde kayma hızının oluştuğunu ve bu kayma hızının Reynolds sayısı arttıkça azaldığını tespit etmişlerdir. Bir diğer çalışmada (Pochylı vd, 2018) türbülanslı akım için $k-\epsilon$ modeli ile hidrofobik yüzeylerin çözümünü yapmışlardır. Türbülanslı akım için yüzeyde kayma olması durumunda hızın çalkantı bileşeni, u' , oluşacağı ve dolayısıyla burada türbülans kayma gerilmelerinden söz edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu durumda yüzeyde türbülans viskozitesi, μ_t , de oluşacağı unutulmamalıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, floropolimer esaslı olan floroidetilenpropilen (FEP) malzemesi ticari olarak satın alınmıştır. FEP'e ağırlıkça % 1 oranında ayrı ayrı grafen ve grafit ilave edilerek bir kabın içinde mekanik olarak karıştırılmış ve bu karışımlardan sırasıyla FEP-G ve FEP-C solüsyonları elde edilmiştir. Ölçümler için Şekil 3.1'de gösterilen 0,1 mg hassasiyetli Radwag AS 220.R2 marka hassas terazi kullanılmıştır. Oluşturulan FEP, FEP-G ve FEB-C kaplama malzemeleri ile bakır boru iç yüzeyi kaplanarak hidrofobik yüzeyler oluşturulmuştur.

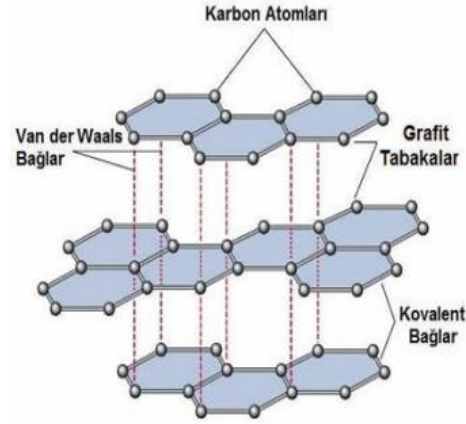


Şekil 3.1. Hassas terazi

FEP, flor atomlarıyla doymuş uzun ve düz karbon zincirlerinden meydana gelmektedir. FEP, atomlar arasındaki kuvvetli bağlar sebebiyle oldukça yüksek hidrofobik ve aşınma dayanımı özelliklerine sahiptir. FEP ile kaplanmış bakır plakanın kaplanmamış bakır plakaya göre özgül aşınma miktarı % 72 oranında azalttığı dolayısıyla aşınma direncini oldukça yükseltmektedir (Pehlivan vd, 2019). Düşük mekanik sürtünme katsayısı ve yüksek kimyasal dirence sahip malzeme olan bu floropolimerin yapışma özelliği de oldukça yüksektir. Diğer polimerlere göre daha yüksek sıcaklık dayanımları ve geniş bir çalışma sıcaklığı aralığına sahip olmaları sebebiyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

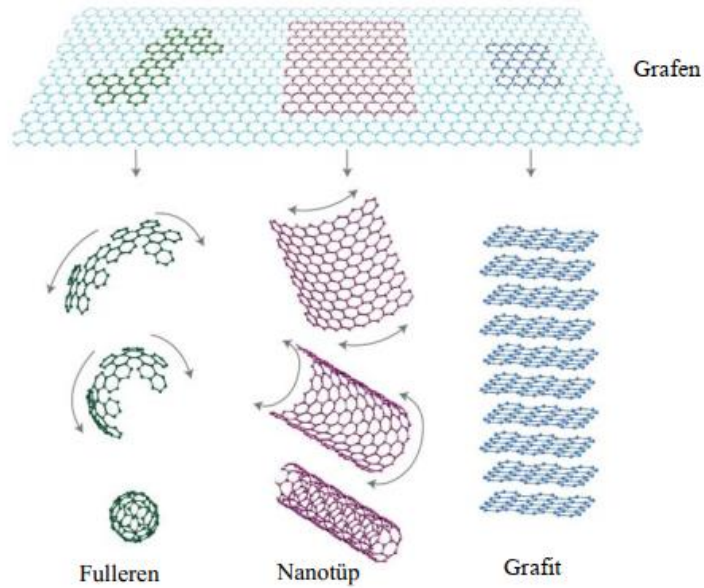
Kimyasal yapısı Şekil 3.2'de verilen grafitin mükemmel ısı iletkenliği, elektrik iletkenliği ve ısıya dayanıklılığı (Çuhadaroğlu ve Kara, 2018) gibi özelliklerinin yanı sıra bu çalışmada katkı malzemesi olarak kullanılmasının nedeni belirtilen oranlarda

eklendiği FEP malzemesine pürüzlülük kazandırması ve hidrofobik özelliğini arttırmasıdır.



Şekil 3.2. Grafitin kimyasal yapısı (Çuhadaroğlu ve Kara, 2018)

Grafen, Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov'in ilk kez 2004 yılında ortaya çıkardığı bir malzemedir. Grafen Şekil 3.3'de görüldüğü gibi nanotüp, fuleren ve grafitten oluşmaktadır ancak özellikleri itibarıyla bu yapılardan çok farklıdır. Grafen, bulunan birçok özelliğinin yanı sıra kolayca esneyebilmekte ve değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolayca kaplanabilmektedir (Şenel vd, 2015).



Şekil 3.3. Grafenin yapısı (Randviir vd, 2014)

FEP malzemesine belirtilen oranlarda ilave edilen grafit ve grafen, uygulandığı yüzeydeki pürüzlülüğü arttırarak hidrofobik özelliğin artmasına katkı sağlamaktadır.

FEP, FEP-G ve FEP-C solüsyonları ile aynı tipteki 3 adet iç çapı 15,8 mm, 1 m uzunluğundaki bakır borunun iç yüzeyi spreyci yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplamanın bağlayıcılığını arttırmak için oda sıcaklığındaki fırına atılarak sıcaklık 400 °C'ye kadar doğrusal olarak artırılmış ve 10 dakika süresince bu sıcaklıkta bekletilerek ısı işleme tabi tutulmuştur. Numune hazırlama esnasında kullanılan fırın bilgileri Şekil 3.4'de verilmiştir.

	Nabertherm NW440
	Çekmece mekanizmalı, fırın tabanı tamamen çıkarılabilir.
	Maximum sıcaklık 1300 °C
	İç ölçüler 600 x 750 x 1000 mm
	Dış ölçüler 1000 x 1400 x 1830 mm
	Dış ölçüler 1000 x 1400 x 1830 mm

Şekil 3.4. Numune hazırlamada kullanılan fırın

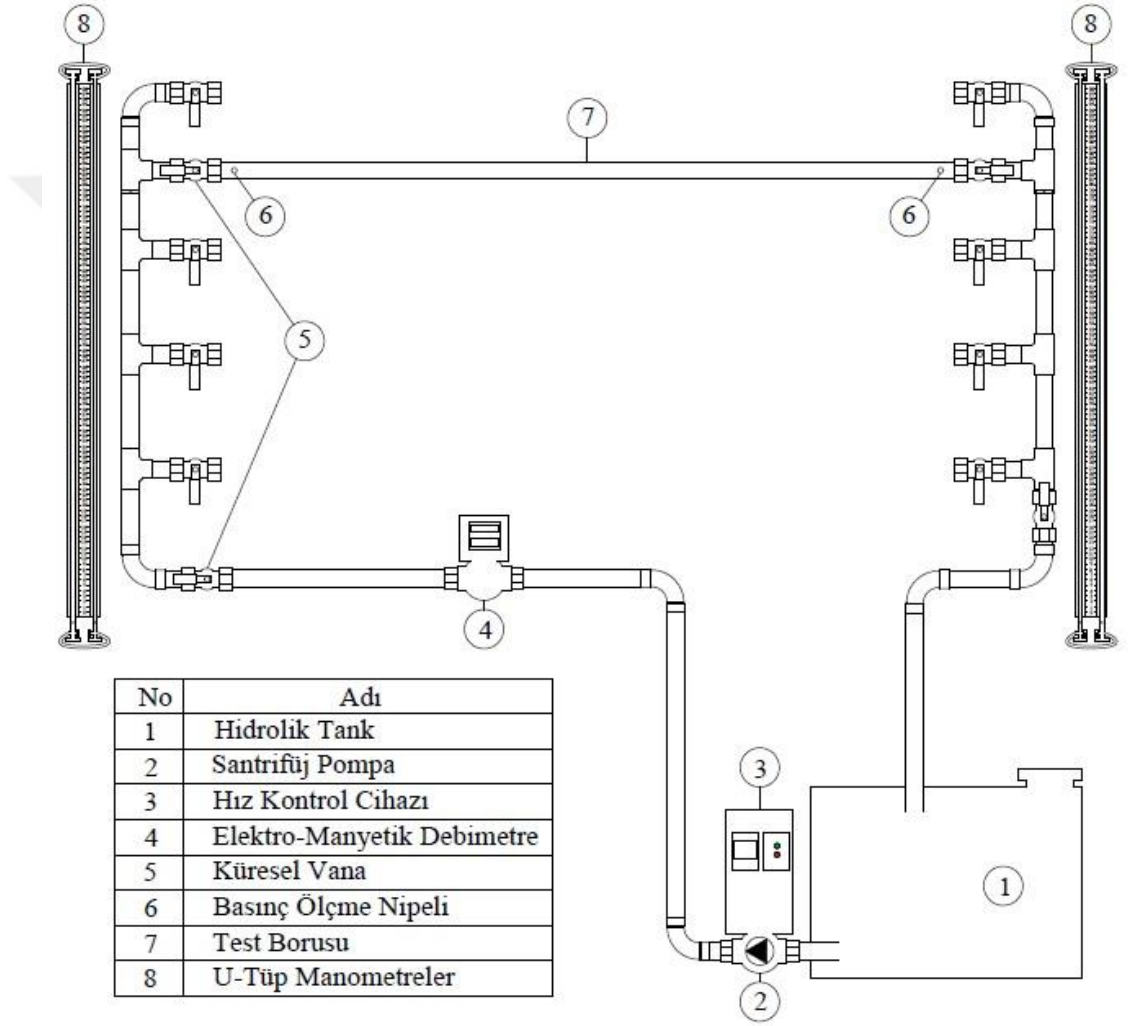
Bakır boruların yanı sıra Şekil 3.5'de görülen plaka yüzeyleri de aynı malzemeler ile kaplanıp bu plakalardan temas açısı değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3.5. İşlenmemiş bakır plaka ve FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı plakalar

3.2. Yöntem

Deney düzeneğinin şematik görünümü ve içerdiği elemanlar Şekil 3.6’de verilmiştir. Deney düzeneği genel olarak santrifüj pompa, elektro-manyetik debimetre, boru, manometre, hidrolik tank ile vana ve dirsek gibi tesisat elemanlarından oluşan kapalı devre bir sistemdir. Bu deney düzeneği genel olarak borularda, boruların çap değişimlerinde, dirseklerde ve vanalarda oluşan basınç kayıplarının U-tüp manometre vasıtasıyla okunması amacıyla kullanılmaktadır.

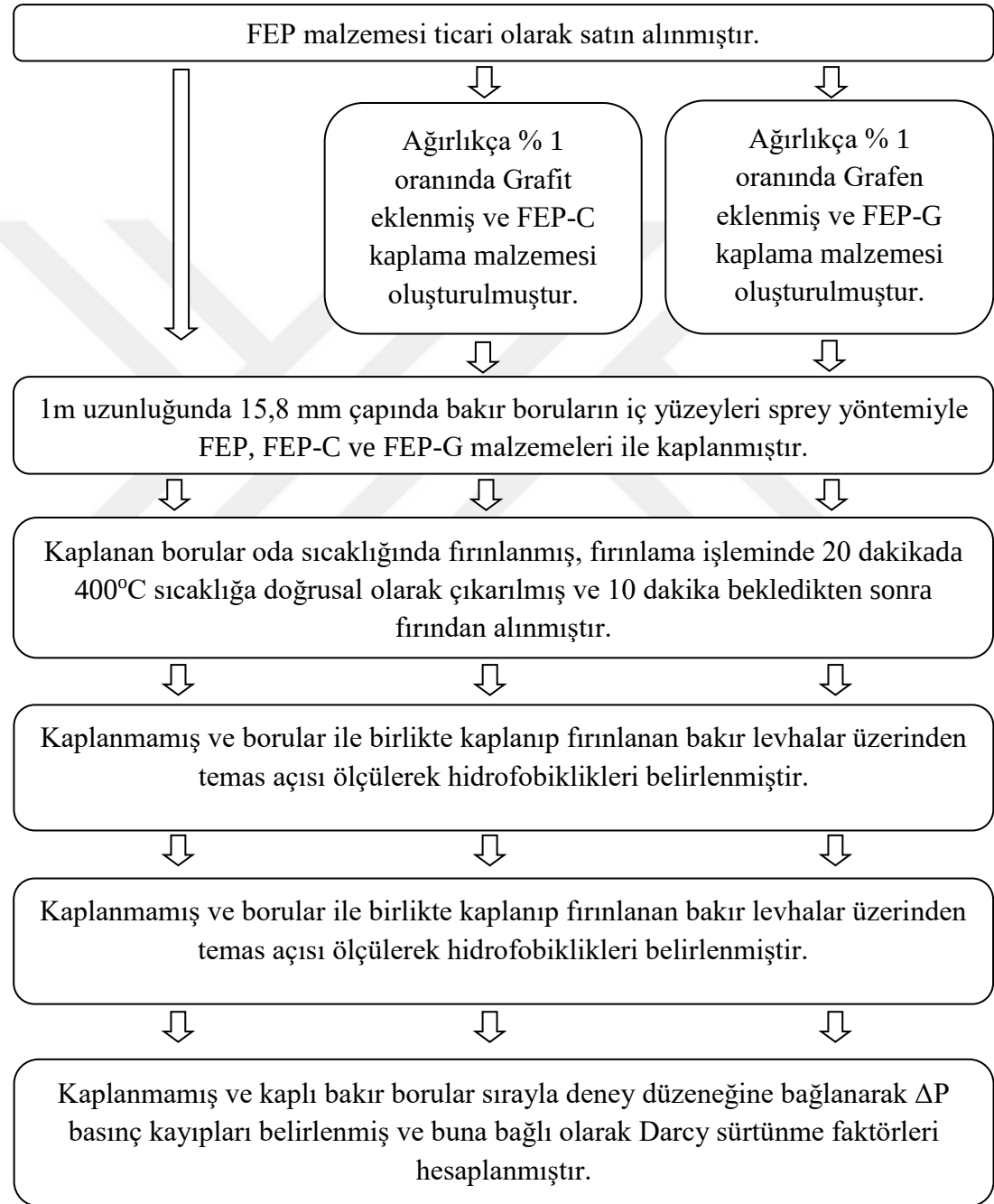


Şekil 3.6. Deney Seti

Deneylerde belli bir Reynolds sayısında akım sağlamak için gerekli ortalama hız (1.27) no’lu denklem ile, gerekli debi ise (1.26) no’lu denklem kullanılarak hesaplanmış ve deney düzeneğinde bulunan santrifüj pompanın devri hız kontrol cihazıyla değiştirilip bu debiye ayarlanmıştır. Kararlı akım sağlandıktan sonra U-tüp manometre vasıtasıyla deney borusunun giriş ve çıkış kesitlerindeki basınçlar

okunarak ΔP basınç kaybı ölçülmüştür. (1.28) no'lu denklem kullanılarak Darcy sürtünme faktörü belirlenmiştir. Deneyler esnasında çalışma akışkanı olan suyun sıcaklığı 15 °C ölçülmüş ve yoğunluğu ve viskozitesi bu sıcaklığa göre hesaba dâhil edilmiştir.

Materyal oluşturma ve deneyler sürecindeki iş akış şeması Şekil 3.7'te verilmiştir.

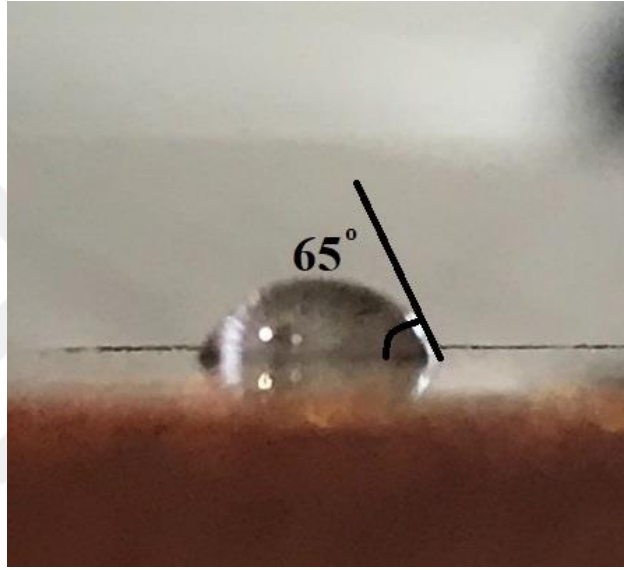


Şekil 3.7. İş akış şeması

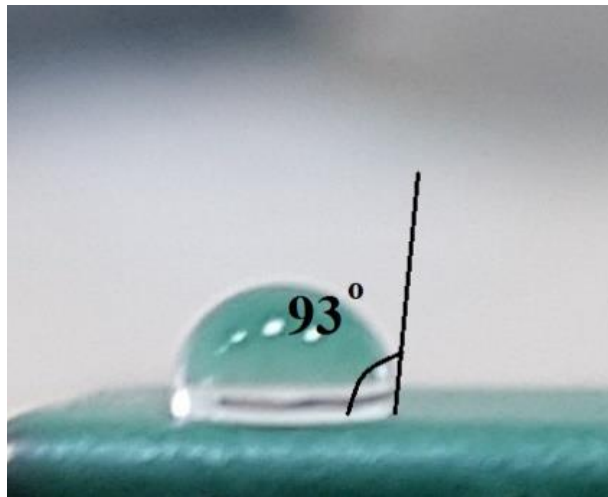
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kaplanmış Malzemelerin Temas Açıları

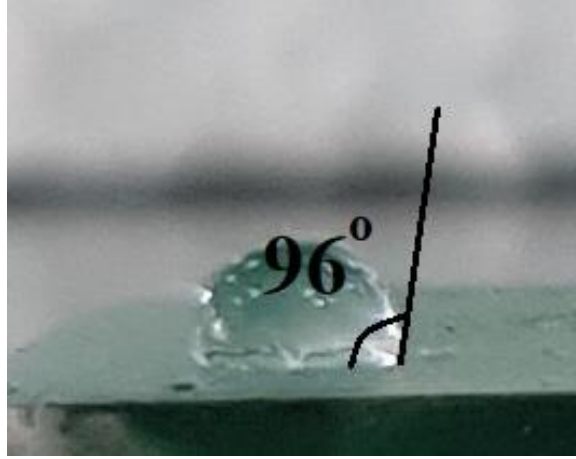
Bakır boru iç yüzeyleri FEP, FEP-C ve FEP-G malzemeleri ile kaplanırken bakır plakalar da kaplanmış ve bu plakalar üzerinden temas açıları ölçülmüştür. Ölçülen bu temas açıları Şekil 4.1 - 4.4'te verilmiştir. İşlenmemiş konvansiyonel bakır ve FEP, FEP-C, FEP-G ile kaplanan yüzeylerin temas açıları sırasıyla 65° , 93° , 96° ve 102° olarak belirlenmiştir.



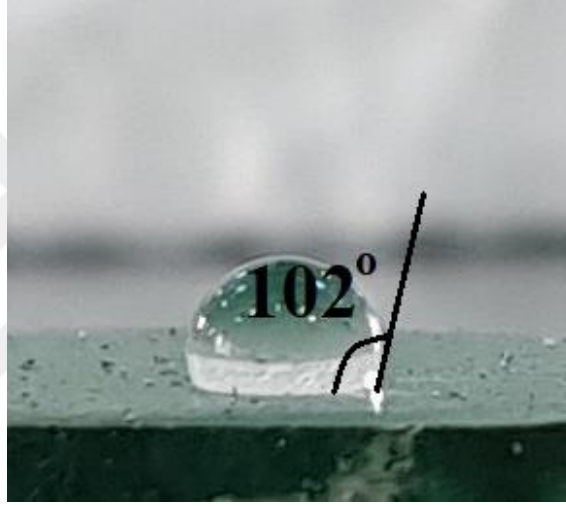
Şekil 4.1. İşlenmemiş bakır plaka temas açısı



Şekil 4.2. FEP kaplı bakır plaka temas açısı



Şekil 4.3. FEP-C kaplı bakır plaka temas açısı



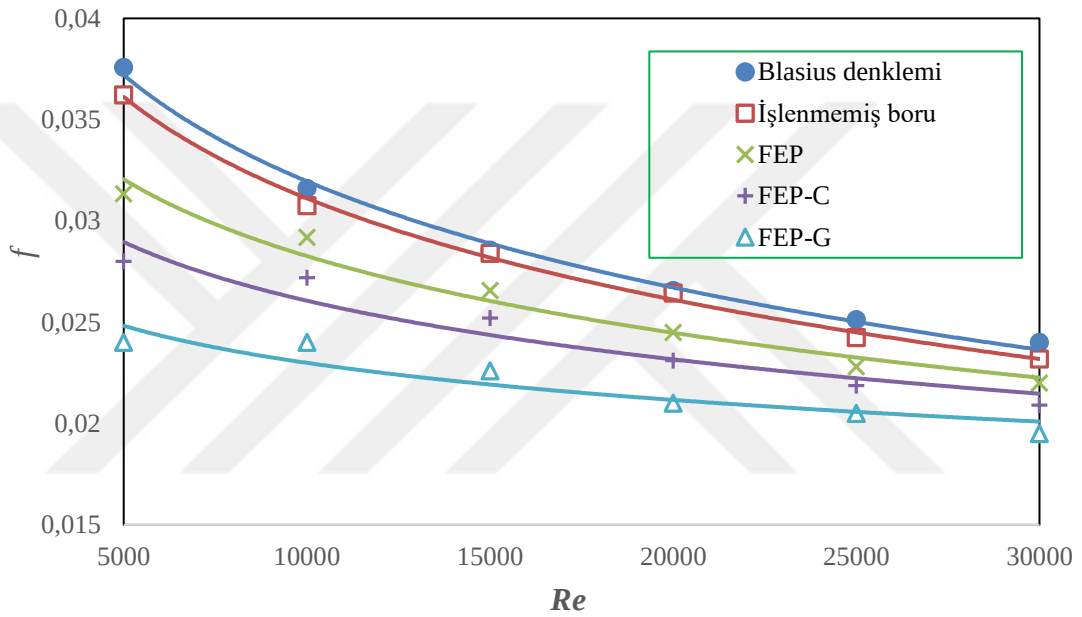
Şekil 4.4. FEP-G kaplı bakır plaka temas açısı

4.2. Deney Sonuçları

Şekil 4.5'te deneysel olarak konvansiyonel kaplanmamış bakır boru ile FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı bakır borular için ve (1.51) no'lu denklemdeki Blasius formülü kullanılarak hesaplanmış sürtünme faktörünün Reynolds sayına göre değişim grafiği verilmiştir. Şekil 4.5'te Blasius'un denkleminde hesaplanan sürtünme faktörleri ile işlenmemiş boruya ait deneysel olarak belirlenmiş sürtünme faktörlerinin birbirlerine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu fark, tüm Reynolds sayısı aralığında yaklaşık % 1'dir. Aynı zamanda hidrofobik yüzey kaplamanın bakır boruların sürtünme faktörlerini azalttığı açıkça görülmektedir. Sürtünme faktöründeki en fazla düşüşün 5.000 Reynolds sayısı değerinde yani laminar akıma yakın akım rejiminde ve sürtünme faktöründeki en az düşüşün ise 30.000 Reynolds sayısı değerinde meydana

geldiği görülmektedir. Bir başka ifadeyle sürtünme faktörü Reynolds sayısı arttıkça Blasius denkleminde ve Moody diyagramında da olduğu gibi logaritmik olarak azaldığı görülmektedir. Fakat bu sürtünme faktöründeki azalmanın Reynolds sayısı arttıkça azaldığı belirlenmiştir.

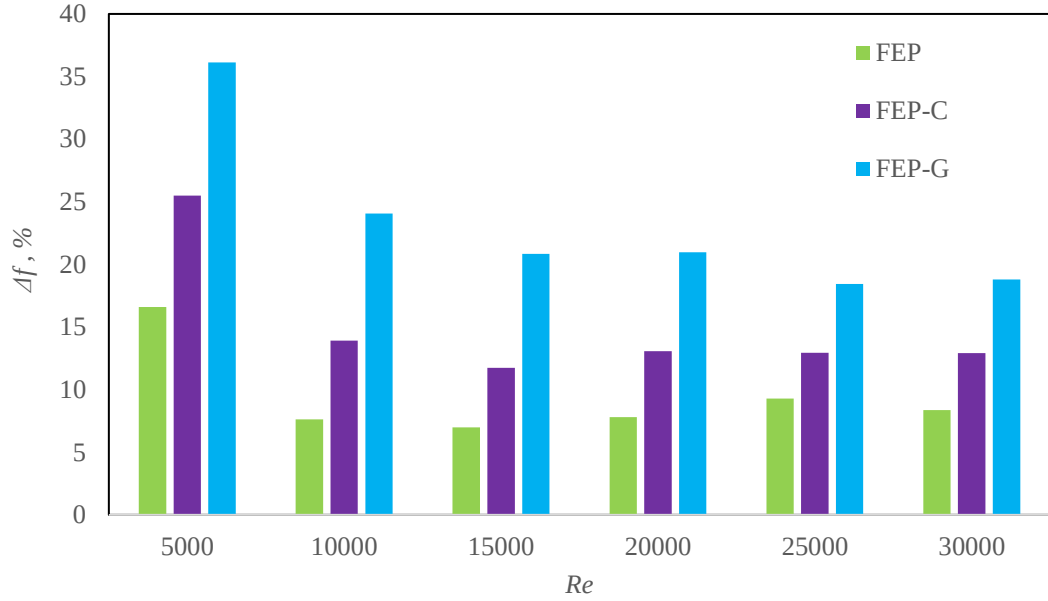
Şekil 4.5'ten hidrofobik kaplı malzemeler arasında ise FEP-G ile kaplı bakır borunun sürtünme faktörünü en fazla düşürdüğü, ikinci sırada FEP-C ile kaplı bakır borunun olduğu daha sonra da FEP malzeme ile kaplı bakır borunun olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi

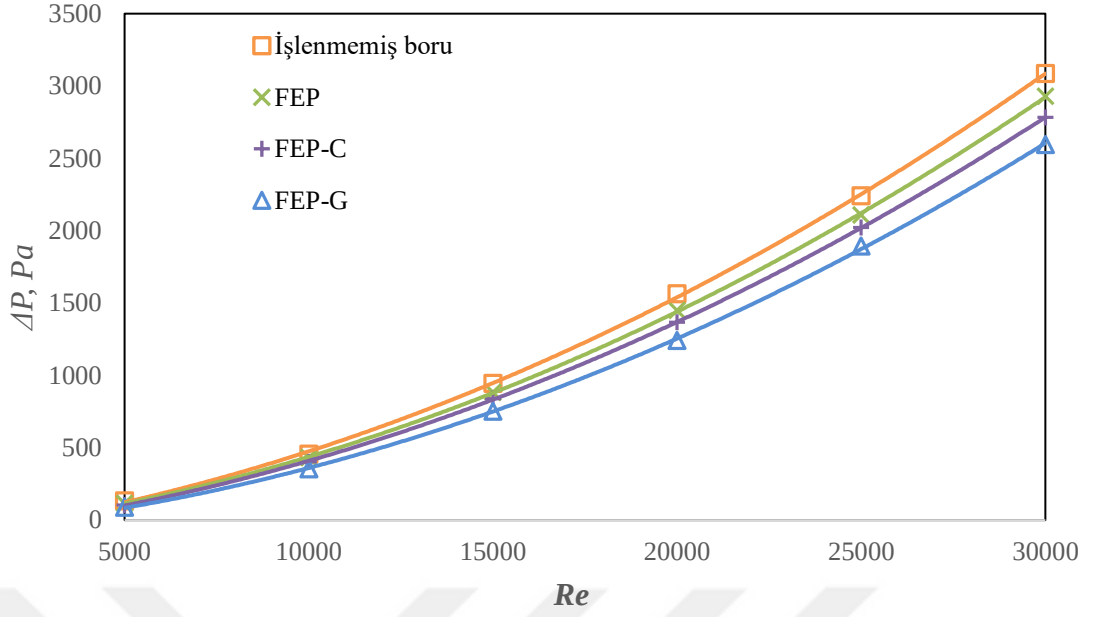
Şekil 4.6'da FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplanmış bakır boruların çeşitli Reynolds sayılarında sürtünme faktöründeki yüzde azalma grafiği verilmiştir. Şekil 4.6'dan hidrofobik malzeme ile kaplı boruların istisnasız olarak deney yapılan her bir Reynolds sayısı için sürtünme faktörünü düşürdüğü görülmektedir. Küçük Reynolds sayılarında sürtünme faktöründe azalma yüzdesi daha fazlayken türbülanslı akım geliştikçe sürtünme faktöründe azalma yüzdesi değişmemektedir. % 36,1 değeri ile en fazla sürtünme faktöründe azalma yüzdesi FEP-G ile kaplı bakır borunun 5.000 Reynolds sayısında gerçekleşmektedir. Tüm grafik boyunca Reynolds sayılarına göre en fazla sürtünme faktöründe azalma FEP-G ile kaplanmış bakır boruda görülmektedir. FEP-C ile kaplı bakır borudaki sürtünme faktöründeki azalma ikinci

sıradayken bu kaplamalar arasındaki en az sürtünme faktöründe azalma FEP ile kaplı bakır boruda oluşmaktadır.



Şekil 4.6. Reynolds sayısına göre sürtünme faktöründeki yüzde azalma

Şekil 4.7’de işlenmemiş konvansiyonel bakır boru, FEP, FEP-C, FEP-G ile kaplı bakır boruların deneysel olarak belirlenmiş Reynolds sayılarına ait basınç kaybı grafiği verilmiştir. Şekil 4.7’den basınç kaybının Reynolds sayısı arttıkça parabolik olarak arttığı ve 5.000 Reynolds sayısında laminar akım rejimine yakın noktada bütün basınç kayıplarının birbirlerine çok yakın olduğu, türbülanslı akım geliştikçe 30.000 Reynolds sayısında ise basınç kayıp değerlerinin en fazla değiştiği görülmektedir. Bu görüntü Reynolds sayısının arttıkça basınç kaybı değerinin yüzde düşüşünün arttığı izlenimini verse de küçük Reynolds sayılarında basınç kaybının sayısal değeri çok küçük olduğundan yüzde düşüş fazla olsa dahi sayısal olarak az düşüş olduğundan kaynaklanmaktadır. Yüzde düşüşün en az olduğu noktalardan biri olan 30.000 Reynolds sayısında ise basınç kaybının sayısal değeri çok büyük olduğundan bu değerdeki düşüş de en fazla olmaktadır. (1.28) no’lu denklemden de anlaşılabileceği gibi basınç kaybının yüzde düşüş eğilimi de Şekil 4.6’da verilen Reynolds sayısına göre sürtünme faktöründeki yüzde azalma grafiği ile aynıdır. Şekil 4.7’de grafik genel olarak incelendiğinde, sürtünme faktöründe olduğu gibi, basınç kayıptaki en fazla düşüşün FEP-G ile kaplı bakır boruda, ikinci sıradaki en fazla düşüşün FEP-C ile kaplı bakır boruda, en az düşüşün ise FEP ile kaplı bakır boruda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Basınç kaybının Reynolds sayısına göre değişimi

Sürtünme faktörünün hidrofobik yüzeylerde aldığı değerlerin teorik olarak hesaplanabilmesi için, m kayma katsayısını (1.51) no'lu Blasius denklemine entegre edersek *hidrofobik sürtünme faktörü*, f_h ;

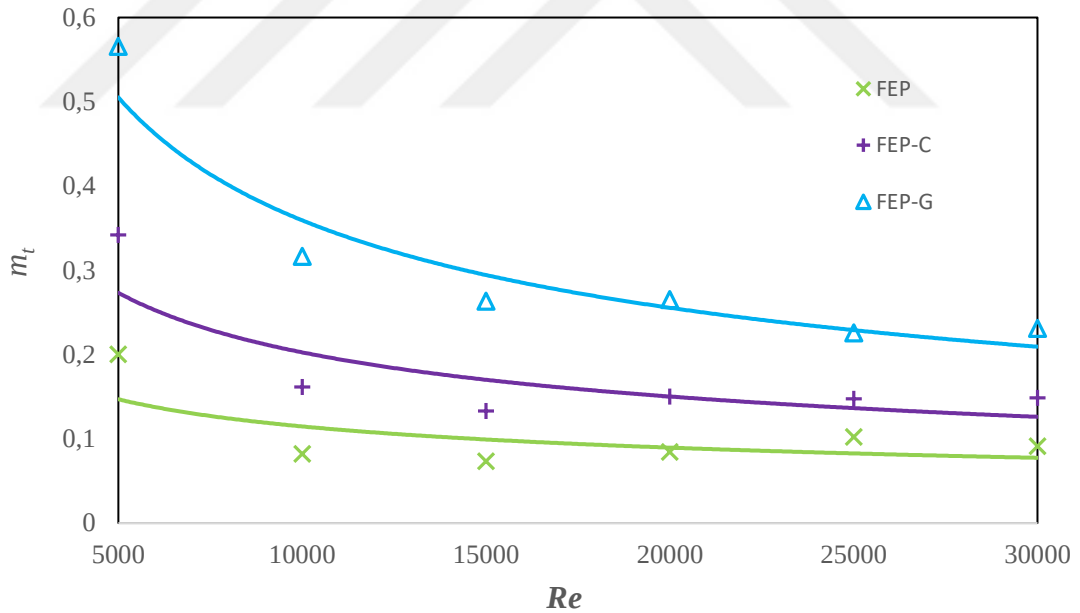
$$f_h = \frac{0,316}{Re^{1/4}(1+m_t)} \quad (4.1)$$

şeklini alır. Bu denklem hidrofobik yüzeyde kayma oluşması durumunda pürüzsüz yüzeyler için sürtünme katsayısını hesaplamak amacıyla oluşturulmuştur. Hidrofobik laminar akım için (1.69) no'lu sürtünme faktörü denklemine benzeştirilerek pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım için (4.1) no'lu denklem türetilmiştir. (4.1) no'lu denklemdeki m_t eklentisi *hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayısı* olarak anılabilir. Hidrofobik yüzeylerde kayma olması durumu ile alakalı bir katsayıdır, konvansiyonel yüzeylerde kayma olmaması durumunda yani yüzey hidrofobik değil iken $m_t = 0$ olacak ve denklem (1.51) no'lu Blasius denklemindeki halini alacaktır. (4.1) no'lu denklem düzenlenirse, hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayısı değeri aşağıdaki halini alır.

$$m_t = \frac{f}{f_h} - 1 \quad (4.2)$$

Şekil 4.8'de FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı bakır boruların (4.2) no'lu denkleme göre hesaplanan hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi grafiği verilmiştir. m_t düzeltme katsayısı Reynolds

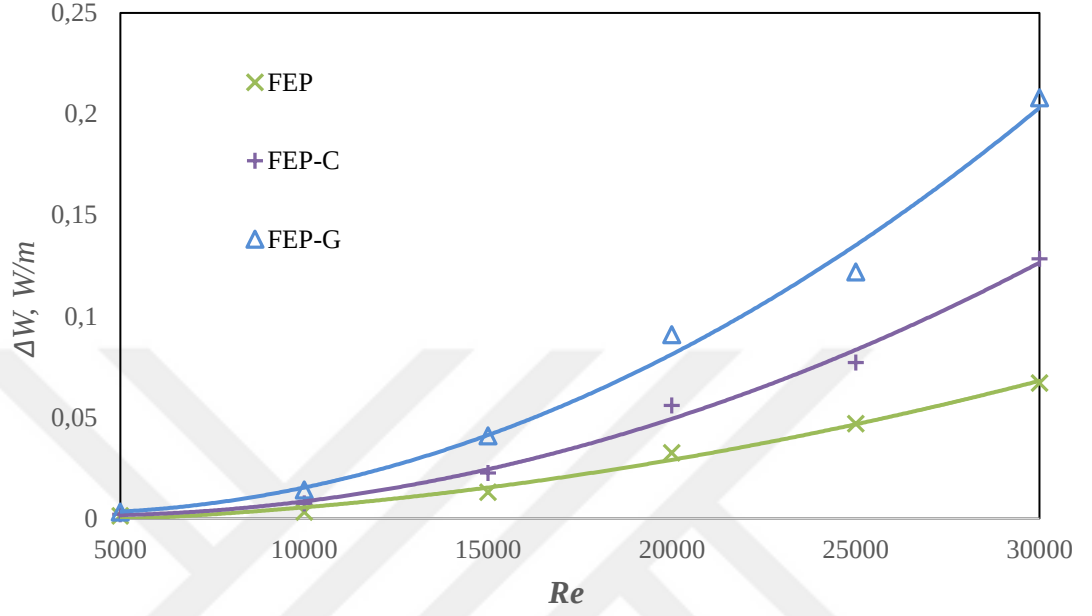
sayısı yükseldikçe logaritmik olarak azalmaktadır. Buradan anlaşılağı üzere Reynolds sayısı arttıkça yüzeyde kayma azalmaktadır. Bu durumu, Şekil 4.6’da verilen sürtünme faktörünün Blasius denklemine göre yüzde azalması ve Şekil 4.8’de verilen türbülanslı akım hidrofobik düzeltme katsayısının Reynolds sayısı arttıkça azalması sonucu açıklamaktadır. Daha önce yapılan çalışmalara göre bu durumun yüzeyde katı-sıvı arasındaki hava katmanının incelmesinden (Aljallis vd, 2013; Bidkar vd, 2014) ve Reynolds sayısı yükseldikçe boru yüzeyine yakın kısımda oluşan laminar alt tabakanın Reynolds gerilmelerinin etkisiyle türbülanslı hale gelmesinden (Martell vd, 2010; Pochylý vd, 2018) kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 4.8’e göre 5.000 – 30.000 Reynolds sayısı aralığında FEP-G ile kaplı bakır boru en fazla pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım sürtünme faktörü düzeltme katsayısına sahiptir. İkinci sırada FEP-C ile kaplı boru varken FEP ile kaplı boru en az katsayıya sahiptir. Grafik genel olarak incelendiğinde 10.000 Reynolds sayısı değerinden sonra hidrofobik türbülanslı akım düzeltme katsayısı m_t ’nin Reynolds sayısı arttıkça hemen hemen değişmediğı FEP için 0,087, FEP-C için 0,148, FEP-G için ise 0,261 değerinde olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.8. Pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım sürtünme faktörü düzeltme katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

FEP, FEP-C ve FEP-G ile kaplı bakır boruların sürtünme faktöründeki azalmanın, Reynolds sayılarına göre birim metre başına hidrolik pompalama gücündeki tasarrufu Şekil 4.9’da verilmiştir. Reynolds sayısı yükseldikçe bütün borular için tasarruf miktarının arttığı görülmektedir. En fazla tasarruf FEP-G ile kaplı

bakır borunun 30.000 Reynolds sayısında 0,21W/m olarak hesaplanmıştır. Bütün Reynolds sayılarında en fazla tasarruf FEP-G ile kaplı bakır boruda oluşurken, ikinci sırada FEP-C ve en az ise FEP kaplı bakır boruda oluşmaktadır. En az tasarruf ise FEP kaplı bakır borunun 5.000 Reynolds sayısı değerinde 0,0013W/m olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9. Hidrolik pompalama gücündeki tasarrufun Reynolds sayısına göre değişimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

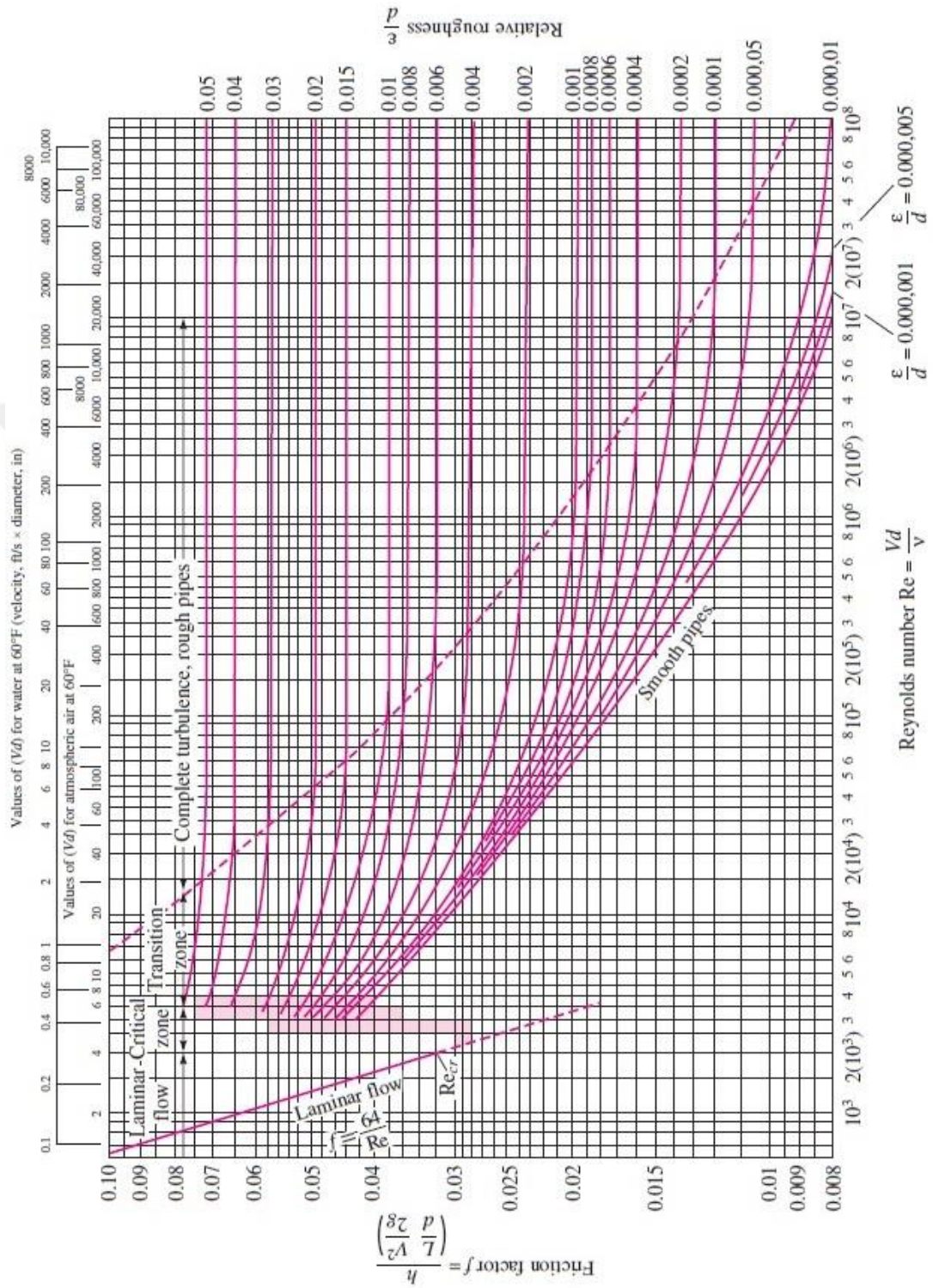
Bu çalışmada pürüzsüz bakır boru iç yüzeyleri floro polimer esaslı FEP, FEP-C, FEP-G malzemeler ile kaplanıp hidrofobik yüzey elde edilerek, 5.000 - 30.000 Reynolds sayısı aralığındaki türbülanslı akımda sürtünme faktörünün ve basınç kaybının değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

Elde edilen yüzeylerin hidrofobikliği temas açısı ölçülerek belirlenmiştir. Konvansiyonel bakır yüzeyin temas açısı 65° iken sırasıyla FEP, FEP-C, FEP-G kaplı yüzeylerin temas açıları 93° , 96° ve 102° olarak ölçülmüştür. Temas açısı, dolayısıyla hidrofobikliği en düşük olan FEP kaplı borudaki konvansiyonel bakır boruya kıyasla sürtünme faktöründeki azalma en azdır, en yüksek azalma ise temas açısı, yani hidrofobikliği en yüksek olan FEP-G ile kaplı boruda meydana gelmiştir. Sonuç olarak, hidrofobiklik arttıkça sürtünme faktöründeki azalma artmaktadır.

Bu çalışmada ayrıca boru akışlarında kayma sınır şartlarındaki teorik hesaplamalar ele alınmıştır. Boru iç cidarı hidrofobik kaplama malzemesiyle kaplı boru boyunca türbülanslı akım rejiminde yüzeyde kayma meydana geldiği deneysel olarak ispatlanmıştır. Hidrofobik laminar akım için teorik olarak elde edilen sürtünme faktörü denkleminde yer alan m_1 katsayından esinlenerek, pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım için Blasius sürtünme faktörü denklemi geliştirilmiştir, yani pürüzsüz hidrofobik türbülanslı akım için Blasius'un sürtünme faktörü denklemi sürtünme faktörü düzeltme katsayısı ile modifiye edilmiştir. Boru iç cidarında meydana gelen kaymayla sürtünme faktöründe Reynolds sayısı 5.000 - 30.000 aralığında % 36,1 ile % 7 aralığında azalma meydana gelmektedir.

Bu çalışmada pürüzsüz borularda 5.000 - 30.000 Reynolds sayısı aralığında türbülanslı akımda hidrofobik yüzeylerin sürtünme faktörü üzerine etkileri incelenmiştir. İleriye yönelik daha geniş Reynolds sayısı aralığında ve pürüzlü borularda hidrofobikliğin sürtünme faktörüne etkisinin incelenmesi için hem teorik hem de deneysel çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır.

EK 1 MOODY DİYAGRAMI



KAYNAKLAR

- Aljallis, E., Sarshar, M. A., Datla, R., Sikka, V., Jones, A. and Choi, C. H. 2013. Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow. *Physics of fluids*, 25(2), 025103.
- Bidkar, R. A., Leblanc, L., Kulkarni, A. J., Bahadur, V., Ceccio, S. L. and Perlin, M. 2014. Skin-friction drag reduction in the turbulent regime using random-textured hydrophobic surfaces. *Physics of Fluids*, 26(8), 085108.
- Chinappi, M. and Casciola, C. M. 2010. Intrinsic slip on hydrophobic self-assembled monolayer coatings. *Physics of Fluids*, 22(4), 042003.
- Choi, C. H., Ulmanella, U., Kim, J., Ho, C. M. and Kim, C. J. 2006. Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels. *Physics of fluids*, 18(8), 087105.
- Cottin-Bizonne, C., Cross, B., Steinberger, A. and Charlaix, E. 2005. Boundary slip on smooth hydrophobic surfaces: intrinsic effects and possible artifacts. *Physical review letters*, 94(5), 056102.
- Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. 2008. *Akışkanlar mekaniği: temelleri ve uygulamaları*. (Çev. T. Engin, H.D. Öz, H. Küçük ve Ş. Çeşmeci). İzmir Güven Kitabevi. (Orijinal eserin yayın tarihi, 2006), İzmir
- Çuhadaroğlu, A. D., ve Kara, E. 2018. Grafit: Bir Genel Değerlendirme. *Teknik Bilimler Dergisi*, 8(1), 14-33.
- Daniello, R. J., Waterhouse, N. E. and Rothstein, J. P. 2009. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces. *Physics of Fluids*, 21(8), 085103.
- Düzyol, S. 2016. Cevher hazırlama işlemlerinde yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümünün genel bir değerlendirmesi. *CBÜ Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi*, 22(II), 21-31.
- Fialová, S., Pochylý, F., Kotek, M. and Jašíková, D. (2017a). Velocity profiles of fluid flow close to a hydrophobic surface. In *EPJ Web of Conferences* Mayıs 2017, Vol. 143, p. 02023, Web
- Fialová, S., Pochylý, F., Havlasek, M. and Malik, J. (2017b). Influence of boundary conditions on fluid flow on hydrophobic surfaces. In *AIP Conference Proceedings*, Eylül 2017, Vol. 1889, No. 1, p. 020008, Web
- Fukuda, K., Tokunaga, J., Nobunaga, T., Nakatani, T., Iwasaki, T. and Kunitake, Y. 2000. Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface. *Journal of Marine Science and Technology*, 5(3), 123-130.
- Gogte, S., Vorobieff, P., Truesdell, R., Mammoli, A., van Swol, F., Shah, P. and Brinker, C. J. 2005. Effective slip on textured superhydrophobic surfaces. *Physics of fluids*, 17(5), 051701.
- Henoch, C., Krupenkin, T., Kolodner, P., Taylor, J., Hodes, M., Lyons, A., Peguero, C. and Breuer, K. 2006. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces. In *3rd AIAA Flow Control Conference* (p. 3192).

- Jeffs, K., Maynes, D. and Webb, B. W. 2010. Prediction of turbulent channel flow with superhydrophobic walls consisting of micro-ribs and cavities oriented parallel to the flow direction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(4), 786-796.
- Jung, Y. C. and Bhushan, B. 2009. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 22(3), 035104.
- Jelly, T. O., Jung, S. Y., and Zaki, T. A. 2014. Turbulence and skin friction modification in channel flow with streamwise-aligned superhydrophobic surface texture. *Physics of Fluids*, 26(9), 095102.
- Kartal, F. E. 2009. Nanokompozit Süperhidrofobik Yüzey Sentezi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 70, Ankara.
- Martell, M. B., Perot, J. B. and Rothstein, J. P. 2009. Direct numerical simulations of turbulent flows over superhydrophobic surfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, 620, 31-41.
- Martell, M. B., Rothstein, J. P. and Perot, J. B. 2010. An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation. *Physics of Fluids*, 22(6), 065102.
- Moaven, K., Rad, M. and Taeibi-Rahni, M. 2013. Experimental investigation of viscous drag reduction of superhydrophobic nano-coating in laminar and turbulent flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 239-243.
- Nouri, N. M., Sekhavat, S., and Mofidi, A. 2012. Drag reduction in a turbulent channel flow with hydrophobic wall. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 24(3), 458-466.
- Ou, J. and Rothstein, J. P. (2005). Direct velocity measurements of the flow past drag-reducing ultrahydrophobic surfaces. *Physics of Fluids*, 17(10), 103606.
- Qi, X. and Song, D. P. 2012. Minimizing fuel emissions by optimizing vessel schedules in liner shipping with uncertain port times. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(4), 863-880.
- Park, H. and Sun, G. 2014. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters. *Journal of Fluid Mechanics*, 747, 722-734.
- Pehlivan, M., Karakurt, U., Özbey, M. ve Gürbüz, M. (2019). Floro polimer kaplamanın bakır plaka üzerine uygulanması ve aşınma üzerine etkisinin incelenmesi. ISAS 2019, 19.04-21.04, 3th ISAS Booklets, 408-410, Ankara
- Pochylý, F., Fialová, S. and Havlásek, M. (2018). New boundary conditions for fluid interaction with hydrophobic surface. *In EPJ Web of Conferences*, Haziran 2018, Experimental Fluid Mechanics 2017, Volume 180, p. 02084 1-7, Web
- Randviir, E. P., Brownson, D. A. and Banks, C. E. 2014. A decade of graphene research: production, applications and outlook. *Materials Today*, 17(9), 426-432.
- Rastegari, A. and Akhavan, R. 2015. On the mechanism of turbulent drag reduction with super-hydrophobic surfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, 773.

- Ríos-Rodríguez, A., Palacios-Morales, C. A., Bernal, E., Ascanio, G. and Aguayo-Vallejo, J. P. 2016. Effect of Hydrophobic Coating on Hagen-Poiseuille Flows. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(3), 1035-1040.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. 2015. Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Engineer & the Machinery Magazine*, (669).
- Tian, H., Zhang, J., Wang, E., Yao, Z., and Jiang, N. 2015. Experimental investigation on drag reduction in turbulent boundary layer over superhydrophobic surface by TRPIV. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 5(1), 45-49.
- Tretheway, D. C. and Meinhart, C. D. 2002. Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls. *Physics of fluids*, 14(3), L9-L12.
- Truesdell, R., Mammoli, A., Vorobieff, P., van Swol, F. and Brinker, C. J. 2006. Drag reduction on a patterned superhydrophobic surface. *Physical review letters*, 97(4), 044504.
- Volkov, A. V., Parygin, A. G., Lukin, M. V., Ryzhenkov, A. V., Khovanov, G. P., Naumov, A. V., Soukal, J., Pochyly, F. and Fialova, S. 2015. Analysis of the effect of hydrophobic properties of surfaces in the flow part of centrifugal pumps on their operational performance. *Thermal Engineering*, 62(11), 817-824.
- Wang, C., Tang, F., Li, Q., Zhang, Y. and Wang, X. 2017. Spray-coated superhydrophobic surfaces with wear-resistance, drag-reduction and anti-corrosion properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 514, 236-242.
- White, F. M. 2016. *Akışkanlar mekaniği 7. Metrik basımdan çeviri.* (Çev. K. Kırıkköprü ve E. Ayder) Literatür Yayıncılık. (Orijinal eserin yayın tarihi, 2011), İstanbul
- Winkler, J. P. 2008. Shipping wasting 4.37 million barrels of oil a day. <http://www.bussinesswire.com/news/home/20080624005568/en/Shipping-Wasting-4.37-Million-Barrels-Oil-Day> (Erişim tarihi 24.03.2019)
- Woolford, B., Prince, J., Maynes, D. and Webb, B. W. 2009. Particle image velocimetry characterization of turbulent channel flow with rib patterned superhydrophobic walls. *Physics of Fluids*, 21(8), 085106.
- Ybert, C., Barentin, C., Cottin-Bizonne, C., Joseph, P. and Bocquet, L. 2007. Achieving large slip with superhydrophobic surfaces: Scaling laws for generic geometries. *Physics of fluids*, 19(12), 123601.
- Young, D. F., Munson B. R., Okiishi, T. H. and Huebsch, W. W. 2013. *Akışkanlar Mekaniğine Giriş.* (Çev. N. Yücel, N. Dinler, H. Türkoğlu ve Z. Altaç) Nobel Yayınevi. (Orijinal eserin yayın tarihi, 2011), Ankara.
- Yumurtacı, Z., ve Sarigul, A. 2011. Santrifüj pompalarda enerji verimliliği ve uygulamaları. *Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 49-58.
- Zhang, P. and Lv, F. Y. 2015. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*, 82, 1068-1087.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mustafa PEHLİVAN

Doğum Yeri : Samsun

Doğum Yılı : 30.05.1983

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum / Kurumlar)

Lise: Ondokuz Mayıs Lisesi (2000)

Lisans: Selçuk Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği (2005)

Yüksek Lisans: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı (02.2014 - 06.2019)

İletişim Bilgileri

Adres: Mevlana Mah. 745. Sok. No:11/D-7 ATA KUM / SAMSUN

e-posta: mustafa.pehlivan@samsun.edu.tr

Tel No: 555 300 7258