



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**HİDROFOBİK YÜZEYLERİN ISI DEĞİŞTİRİCİ
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Salih DAĞLI

Danışman
Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

SAMSUN
2023

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**HİDROFOBİK YÜZEYLERİN ISI DEĞİŞTİRİCİ
PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Salih DAĞLI

Danışman

Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.22.006 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Salih DAĞLI tarafından, Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY danışmanlığında hazırlanan “HİDROFOBİK YÜZEYLERİN ISI DEĞİŞTİRİCİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 17.02.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN Hitit Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye (Danışman)	Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Lütfü NAMLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi İbrahim İNANÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Bilal SUNGUR Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

24/01/2023
Salih DAĞLI

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : HİDROFOBİK YÜZEYLERİN ISI DEĞİŞTİRİCİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 24/01/2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 1

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

24/01/2023
Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

ÖZET

HİDROFOBİK YÜZEYLERİN ISI DEĞİŞTİRİCİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Salih DAĞLI

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Şubat/2023

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

Bu çalışmada, contalı plakalı ısı değiştiricinin mevcut tasarımı değiştirilmeden, plaka ıslak yüzeylerine uygulanan hidrofobik kaplamaların ısı transferi, basınç kaybı, kirlenme, mekanik dayanım ve enerji verimliliği üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Reynolds değerleri 10000 ile 30000 arasında eşit aralıklı beş farklı değer olarak ayarlanmıştır. Akışkan giriş sıcaklıkları 52, 62 ve 72 °C olarak belirlenmiştir. FEP (florlu etilen propilen) malzeme içerisine hidrofobikliği artırmak için kütlece %3, %7 ve %10 oranında h-BN (hegzagonal bor nitrür) nanopartikül eklenmiş, yüksek hidrofobik özelliğe sahip, ucuz ve kolay uygulanabilir yeni bir hidrofobik kaplama solüsyonu sentezlenmiştir. Plaka ıslak yüzeyleri FEP, FH3 (FEP+%3 h-BN), FH7 (FEP+%7 h-BN) ve FH10 (FEP+%10 h-BN) olmak üzere dört farklı hidrofobik özelliğe sahip nanopartikül takviyeli karbon bazlı polimer solüsyon ile kaplanmıştır. Hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiriciden elde edilen ısı transferi, basınç kaybı, kirlenme, mekanik dayanım ve pompa gücü sonuçları, kaplamasız ısı değiştirici ile karşılaştırılmıştır. Kaplanan yüzeylerin temas açıları sırasıyla 95°, 121°, 135° ve 113° olarak ölçülmüştür. Artan h-BN oranı ile temas açısı artmış fakat kütlece %10 eklendiği durumda yüzeyde oluşan pürüzlülük ve kaplama film kalınlığının artması ile temas açısı azalmıştır.

Isı değiştirici etkinliğinin hidrofobik özellik ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hidrofobik kaplama uygulanmış ısı değiştiricilerde en yüksek etkinlik FH7 kaplama ile elde edilmiş olup bu değer 0.543 olarak tespit edilmiştir. Hidrofobik kaplama ile ısı transferinde yaklaşık %17.14 azalma olduğu belirlenmiştir. Basınç kayıpları en iyi hidrofobik özelliğe sahip olan FH7 kaplı ısı değiştiricide, kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiriciye göre %71.28 daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. Yerel kayıplarda ise FH7 kaplı ısı değiştiricide %25.5 iyileşme sağlanmıştır. Hidrofobik yüzey kaplamaları ile ısı değiştiricide meydana gelen kirlenme oluşumu %82 oranında azaltılmıştır. Kirlenme etkilerinin azaltılması sonucunda FH7 kaplı ısı değiştiricide ısı transferinde %38.22 artış sağlanmıştır. En düşük sürtünme katsayısı FH7 kaplı ısı değiştiricide 0.21 olarak belirlenmiş ve aşınma oranlarında kaplamasız duruma göre %74.69 iyileşme elde edilmiştir. Sirkülasyon pompalarının enerji tüketimi FH7 kaplama sayesinde %17.76 oranında azaltılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Hidrofobik, Isı değiştirici, Temas açısı, Isı transferi, Basınç kaybı, Kirlenme, Enerji verimliliği

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HYDROPHOBIC SURFACES ON HEAT EXCHANGER PERFORMANCE

Salih DAĞLI

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Ph. D., February/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZBEY

In this study, the effects of hydrophobic coatings applied to plate wet surfaces on heat transfer, pressure drop, fouling, mechanical strength, pump power and heat exchanger performance were experimentally investigated by keeping the existing designs of gasketed plate heat exchangers constant. The Reynolds values were set to five different values equally spaced between 10000 and 30000. The temperature of the inlet fluid was set at 52, 62 and 72 °C, respectively. In order to increase the hydrophobicity of the FEP (Fluorinated Ethylene Propylene) material, 3%, 7% and 10% by mass weighted of h-BN (Hexagonal Boron Nitride) nanoparticles were added in the solution. A cheap and easily applicable new hydrophobic coating solution which has high hydrophobic properties was synthesized. The wet surfaces of the plate were covered with a nanoparticle reinforced carbon-based polymer solution with four different hydrophobic properties: FEP, FH3 (FEP+3% h-BN), FH7 (FEP+7% h-BN) and FH10 (FEP+10% h-BN). The heat transfer, pressure drops, fouling, mechanical strength and pump power results obtained from the heat exchanger with hydrophobic surface coating were compared with the uncoated heat exchanger. The contact angles of the coated surfaces were measured as 95°, 121°, 135° and 113°, respectively. The contact angle increased due to high h-BN ratio, but when 10% by mass was added, the contact angle decreased with the increase in surface roughness and coating film thickness.

It was observed that the efficiency of the heat exchanger increased in direct proportion to the degree of hydrophobicity. The highest efficiency value in hydrophobic heat exchanger was found in the FH7 coating and was determined as 0.543. It was determined that there was a decrease of approximately 17.14% in heat transfer with the hydrophobic coating. The pressure drops were 71.28% lower in the FH7 surface coated heat exchanger, which has the best hydrophobic property, compared to the heat exchanger without any coating process. In local losses, 25.5% improvement was achieved in the FH7 coated heat exchanger. Thanks to the hydrophobic surface coatings, the formation of fouling in the heat exchanger has been reduced by 82%. As a result of reducing the effects of fouling, 38.22% increase in heat transfer was achieved in the FH7 coated heat exchanger. The lowest coefficient of friction was determined as 0.21 in the FH7 coated heat exchanger, and 74.69% improvement was obtained in abrasion rates compared to the uncoated heat exchanger. The energy consumption of the circulation pumps has been reduced by 17.76% thanks to the FH7 coating.

Keywords: Hydrophobic, Heat exchanger, Contact angle, Heat transfer, Pressure drop, Fouling, Energy efficiency

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora çalışma sürecinde tecrübelerini benimle paylaşan, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY’e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez izleme komitesinde yer alan değerli fikirleriyle çalışmalara önemli katkılar sağlayan Sayın Doç. Dr. Lütfü NAMLI ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim İNANÇ’a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Endüstriyel ısı değiştiricileri uygulamaları, sektörün sorunları ve ihtiyaçları hakkında teknik destek sağlayan Ekin Endüstriyel firmasına teşekkür ederim.

Mertech İleri Teknoloji Malzemeleri A.Ş firmasına ve Sayın Doç. Dr. Mevlüt Gürbüz’e desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman yanımda olan ve beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Çalışmalarına katkı sağlayan arkadaşlarıma ve firmalara teşekkür ederim.

PYO.MUH.1904.22.006 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

Salih DAĞLI

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	3
1.2. Tez Kapsamı	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Hidrofobik Yüzeylerin Isı Transferine Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar	5
2.2. Hidrofobik Yüzeylerin Basınç Kayıplarına Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar	14
2.3. Hidrofobik Yüzeylerin Kirlenme Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar	16
2.4. Hidrofobik Yüzeylerin Mekanik Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar	18
3. CONTALI PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ	20
3.1. Contalı Plakalı Isı Değişticilerinde Kullanılan Malzemelerin Önemi	23
3.1.1. Plakalar ve Özellikleri	24
3.1.2. Contalar ve Özellikleri	25
3.2. Contalı Plakalı Isı Değişticilerinde Kullanılan Plaka Geometrilere	26
3.3. Paralel ve Karşıt Akışlı Contalı Plakalı Isı Değişticiler	27
3.4. Contalı Plakalı Isı Değişticilerin Avantajları ve Dezavantajları	28
3.5. Contalı Plakalı Isı Değiştirici Tasarımı ve Seçim Kriterleri	29
3.5.1. Kapasitenin Belirlenmesi	30
3.5.2. Debi İhtiyacı	30
3.5.3. Çalışma Sıcaklıkları	30
3.5.4. Basınç Kayıpları	30
3.5.5. Plaka Tipinin Belirlenmesi	31
3.5.6. Conta Tipinin Belirlenmesi	31
3.6. Isı Transferine ve Performansa Etki Eden Parametreler	31
3.6.1. Akış Tipi	32
3.6.2. Akışkanın Özelliği	32
3.6.3. Plaka Yapısı	32
3.6.4. Kirlenme	33
3.6.5. Korozyon	36
3.7. Isı Değiştirici Sistemlerinde Bakım Maliyetleri	37
4. HİDROFOBİK YÜZEYLER	39
4.1. Yüzey Enerjisi ve Gerilimi	40
4.2. Temas Açısı	41
4.3. Yüzey Pürüzlülüğü	43
4.3.1. Wenzel Metodu	43
4.3.2. Cassie-Baxter Metodu	44
4.4. Temas Açısı Ölçüm Yöntemleri	44
4.5. Hidrofobik Yüzeylerin Elde Edilmesi İçin Kullanılan Yöntemler	45
4.6. Hidrofobik Yüzey Kaplama Teknikleri	46
4.6.1. Sprey Kaplama Yöntemi	46
4.7. Hidrofobik Yüzeylerin Kullanım Alanları	47
4.7.1. Sürtünmeyi Azaltma	48
4.7.2. Korozyon Önleyici	49
4.7.3. Kirlenme Önleyici	49

4.7.4. Buzlanma Önleyici.....	49
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
5.1. Contalı Plakalı Isı Değiştirici.....	50
5.1.1. Contalı Plakalı Isı Değiştirici Özellikleri	50
5.2. Kaplama Malzemesi	51
5.2.1. Floroidetilenpropilen (FEP)	51
5.2.2. Hekzagonal Bor Nitrür (h-BN)	52
5.3. Kaplama Solüsyonunun Hazırlanması.....	55
5.4. Yüzey Kaplama Prosesi	56
5.5. Deneysel Isı Değiştirici Sistemi.....	58
5.6. Kullanılan Ekipmanlar.....	60
5.6.1. Sıcak Su Tankı	60
5.6.2. Soğuk Su Tankı	60
5.6.3. Sirkülasyon Pompası	61
5.6.4. Manyetik Debimetre.....	61
5.6.5. Datalogger ve Termokupl.....	61
5.6.6. Fark Basınç Transmitteri	61
5.6.7. Wattmetre.....	62
5.6.8. Kontrol Ünitesi.....	62
5.7. Deney Parametreleri	63
5.8. Çalışmada Kullanılan Deneysel Yöntemler.....	63
5.8.1. Temas Açısı Ölçümü.....	63
5.8.1. Aşınma Testi	64
5.8.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	66
5.8.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	67
5.8.1. Kaplama Kalınlık Ölçümü	67
5.9. Contalı Plakalı Isı Değiştiricilerin Termodinamik Analizi.....	68
5.9.1. Isı Geçişi Miktarı.....	68
5.9.2. Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı (LMTD).....	69
5.9.3. ϵ -NTU Metodu	71
5.9.4. Isı Değiştirici Etkinliği, ϵ	71
5.9.5. Isıl Kapasite Oranı (C^*)	72
5.9.6. Aktarım Birim Sayısı (NTU).....	73
5.9.7. Etkinlik (ϵ) - Aktarım Birim Sayısı (NTU) ilişkisi	73
5.9.8. Kanal Hidrolik Çapı	75
5.9.9. Basınç Düşüşü	76
5.9.10. Yerel Kayıplar	76
5.9.11. Basınç Kaybı	77
5.9.12. Pompa Gücü	77
5.10. Belirsizlik Analizi.....	78
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	80
6.1. Hidrofobik Kaplamaların Temas Açısı (θ) Ölçüm Sonuçları.....	80
6.2. Isı Transferi Bulguları.....	82
6.2.1. ϵ -Re Sonuçları	82
6.2.2. ϵ -NTU Sonuçları	86
6.2.3. Q-Re Sonuçları.....	90
6.3. Basınç Kaybı Bulguları.....	94
6.4. Yerel Kayıp Bulguları	99
6.5. Kirlenme Bulguları	103
6.6. Pompa Enerji Tüketimi ve Maliyet Bulguları.....	109
6.1. Hidrofobik Kaplama Prosesi Bulguları	111
6.1.1. Kaplama Kalınlığı Ölçüm Sonuçları	111
6.1.2. Kaplama Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	112
6.2. Hidrofobik Kaplamalarının Mekanik Bulguları	113

6.2.1. Aşınma Test Sonuçları	114
6.2.2. SEM Analiz Sonuçları.....	115
6.2.3. EDX Analiz Sonuçları.....	119
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
7.1. Tez Sonrasında Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler	123
KAYNAKLAR	124
ÖZ GEÇMİŞ.....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	:Isı transfer alanı
C	:Isıl kapasite
C*	:Isıl kapasite oranı
CPID	:Contalı Plakalı Isı Değiştirici
C _p	:Özgül ısı
C _{min}	:Minimum ısıl kapasite
C _{max}	:Maksimum ısıl kapasite
D _h	:Hidrolik çap
EDX	:Enerji saçılımlı X-ışını analizi
FEP	:Florlu Etilen Propilen
FH3	:FEP + %3 h-BN
FH7	:FEP + %7 h-BN
FH10	:FEP + %10 h-BN
h-BN	:Hekzagonal Bor Nitrür
ID	:Isı değiştirici
k	:Isı iletim katsayısı
K	:Yerel kayıp katsayısı
KİTAM	:Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi
LMTD	:Logaritmik ortalama sıcaklık farkı
N	:Güç
NTU	:Aktarım birim sayısı
N _p	:Pompa gücü
P	:Basınç
P _w	:Plaka ıslak yüzey alanı

Q	:Isı değiştiricide geçen ısı miktarı
R_f	:Kirlilik faktörü
Re	:Reynolds Sayısı
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
t_p	:çalışma süresi
T_{hi}, T_{ho}	:Sıcak akışkan giriş-çıkış sıcaklığı
T_{ci}, T_{co}	:Soğuk akışkan giriş-çıkış sıcaklığı
T_{min}	:Minimum akışkan sıcaklığı
T_{max}	:Maksimum akışkan sıcaklığı
ΔT	:Sıcaklık farkı
Δt	:Zaman farkı
U	:Toplam ısı transfer katsayısı
U_k	:Kirli durumdaki toplam ısı transfer katsayısı
U_t	:Temiz durumdaki toplam ısı transfer katsayısı
V	:Akışkan akış hızı
$\dot{m}$	:Kütlesel debi
$\dot{m}_h$	:Sıcak akışkanın kütlesel debisi
$\dot{m}_c$	:Soğuk akışkanın kütlesel debisi
$\dot{V}$	:Hacimsel debi
β	:Plaka Chevron açısı
μ	:Dinamik viskozite
ν	:Kinematik viskozite
ρ	:Yoğunluk
ϵ	:Etkinlik
η	:Verim
θ	:Temas açısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Contalı plakalı ısı değıştirici bileşenleri (JeoTes).....	22
Şekil 3.2. Contanın plaka üzerinde akış yolu (a), montajı (b) (Genç, 2014; Sundén ve Manglik, 2007)	25
Şekil 3.3. Isı değıştirici plakası ve genel bilgiler	26
Şekil 3.4. Plaka çeşitleri a) İki ok balık kılıcı b) Asimetrik yüksek ve alçak theta plakalar	26
Şekil 3.5. Karşıt akışlı ısı değıştiricide akışkanın akış yönü ve sıcaklık dağılımı (Genç, 2014).....	27
Şekil 3.6. Paralel akışlı ısı değıştiricide akışkanın akış yönü ve sıcaklık dağılımı	28
Şekil 3.7. Chevron açılı plakalar a) Düşük aç b) Yüksek aç.....	33
Şekil 3.8. Contalı plakalı ısı değıştiricilerinde kirlenme.....	34
Şekil 3.9. Kirlenme durumu ve ısı transferi (Awad, 2011).....	34
Şekil 3.10. Basınç kaybı (ΔP), kirlilik faktörü (R_f) ve toplam ısı transfer katsayısı (U) ilişkisi (Rafferty ve Culver, 1998).....	35
Şekil 3.11. Plaka yüzeyinde korozyon oluşumu sonucu meydana gelen çatlaklar (Faes vd., 2019).....	36
Şekil 4.1. Doğadaki akıllı yüzey örnekleri a) Lotus çiçeği b) Kelebek kanadı.....	39
Şekil 4.2. Sıvı yüzey geriliminin şematik gösterimi (CENGİZ, 2017)	40
Şekil 4.3. Yüzey morfolojisi ve yüzeyin ıslanabilirlik değerleri (Oberli vd., 2014).....	41
Şekil 4.4. Sıvı damlası ile katı bir yüzey arasındaki yüzey gerilimleri	42
Şekil 4.5. Bir sıvı damlasının katı yüzey üzerindeki davranışı ve yüzey enerjisi değışimi ...	42
Şekil 4.6. Farklı yapılarıdaki yüzeylerin ıslanabilme özellikleri (Zhang vd., 2012).....	43
Şekil 4.7. Wenzel metodu (Kibar, 2016)	43
Şekil 4.8. Cassie-Baxter metodu (Kibar, 2016)	44
Şekil 4.9. Boya tabancası ile spreylendirme işlemi	47
Şekil 4.10. Hidrofobik yüzey kaplama uygulama alanları (Zhang ve Lv, 2015).....	48
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan ısı değıştiricinin teknik ölçüleri (a), akış yapısı (b), genel görünüşü (c).....	51
Şekil 5.2. FEP kimyasal bağ yapısı.....	52
Şekil 5.3. Hekzagonal Bor Nitrürün kristal yapısı (Majety vd., 2012)	53
Şekil 5.4. Kaplama solüsyonu hazırlama prosesi.....	56
Şekil 5.5. Kaplama prosesi akış şeması	56
Şekil 5.6. Isı değıştirici plakalarına kaplama işleminin uygulanması	57
Şekil 5.7. Kaplama işlemi uygulanmış ısı değıştirici plakaları	57
Şekil 5.8. Isı değıştirici plakalarına fırınlama işleminin uygulanması.....	58
Şekil 5.9. Deneysel ısı değıştirici sistemi şematik gösterimi	58
Şekil 5.10. Deney düzeneği	59
Şekil 5.11. Deney düzeneği modellenmesi ve kullanılan ekipmanlar	60

Şekil 5.12. Deney sisteminde kullanılan ekipmanlar, (a) Pompa, (b) Manyetik debimetre, (c) Fark basınç transmitteri, (d) Kontrol ünitesi, (e) Wattmetre, (f) Datalogger	62
Şekil 5.13. Optik Tensiyometre (Temas Açık Ölçer Cihazı)	64
Şekil 5.14. Aşınma test düzeneği	65
Şekil 5.15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	66
Şekil 5.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	67
Şekil 5.17. Kaplama kalınlık ölçüm cihazı	67
Şekil 5.18. Paralel akış yapısına sahip ısı değiştiricide sıcaklık dağılımı (Kılıç, 2013)	70
Şekil 5.19. Ters akış yapısına sahip ısı değiştiricide sıcaklık dağılımı (Kılıç, 2013)	70
Şekil 5.20. Paralel akışlı ısı değiştiricide NTU-C*’nin fonksiyonu olarak ε değerleri (Kakaç vd., 1983)	74
Şekil 5.21. Ters akışlı ısı değiştiricide NTU-C*’nin fonksiyonu olarak ε değerleri (Kakaç vd., 1983)	74
Şekil 5.22. Isı değiştirici plakası akışkan temas bölgesi (ıslak bölge)	75
Şekil 6.1. Hidrofobik kaplama temas açısı değerleri: (a) UNC, (b) FEP, (c) FH3, (d) FH7, (e) FH10	80
Şekil 6.2. Temas açısı değerlerinin h-BN katkı oranlarına göre değişimi	81
Şekil 6.3. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$) ...	82
Şekil 6.4. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$) ...	83
Şekil 6.5. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$) ...	84
Şekil 6.6. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin NTU değerine göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)	86
Şekil 6.7. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin NTU değerine göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)	87
Şekil 6.8. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin NTU değerine göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$)	88
Şekil 6.9. Farklı yüzey kaplamaları için ısı transferinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)	90
Şekil 6.10. Farklı yüzey kaplamaları için ısı transferinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)	91
Şekil 6.11. Farklı yüzey kaplamaları için ısı transferinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$)	92
Şekil 6.12. Farklı yüzey kaplamaları için basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)	95
Şekil 6.13. Farklı yüzey kaplamaları için basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)	96
Şekil 6.14. Farklı yüzey kaplamaları için basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$)	97
Şekil 6.15. Farklı yüzey kaplamaları için kayıp katsayısının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)	99
Şekil 6.16. Farklı yüzey kaplamaları için kayıp katsayısının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)	100

Şekil 6.17. Farklı yüzey kaplamaları için kayıp katsayısının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	101
Şekil 6.18. Kirlenme oluşumunun ısı transferine etkisinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72^{\circ}\text{C}$).....	103
Şekil 6.19. Kirlili ve temiz durumlar için ısı transferinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72^{\circ}\text{C}$).....	104
Şekil 6.20. Kaplama işlemi uygulanmamış plakalarda kirlenme oluşumu	105
Şekil 6.21. FH7 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış plakalarda kirlenme oluşumu....	105
Şekil 6.22. $t_p=250$ saat sonunda kirlenmiş plaka görüntüleri a) Kaplanmamış b) FH7 kaplanmış.....	106
Şekil 6.23. Görüntü işleme ile kirlilik tespiti a) Kaplanmamış plaka b) FH7 kaplı plaka ...	107
Şekil 6.24. Çalışma süresine bağlı olarak ısı değiştiricide kirlilik faktörünün değişimi.....	107
Şekil 6.25. Farklı yüzey kaplamaları için pompa gücünün Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52$ $^{\circ}\text{C}$).....	109
Şekil 6.26. Solüsyon içerisine takviye edilen h-BN oranına göre kaplama kalınlığı değişimi	111
Şekil 6.27. Sürtünme katsayısının hareket mesafesine göre değişimi	114
Şekil 6.28. Kaplamasız plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi	115
Şekil 6.29. FEP kaplı plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi	116
Şekil 6.30. FH7 kaplı plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi	117
Şekil 6.31. FH10 kaplı plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi	118
Şekil 6.32. FEP kaplamanın SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi	119
Şekil 6.33. FH7 kaplamanın SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi.....	120

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Contalı plakalı ısı değıştiricilerin temel özellikleri (Kakac vd., 2002).....	23
Tablo 3.2. Contalı plakalı ısı değıştiricilerin plaka malzeme özellikleri (Shah ve Sekulic, 2003).....	24
Tablo 3.3. Contalı plakalı ısı değıştiricilerin conta malzeme özellikleri (Shah ve Sekulic, 2003).....	25
Tablo 3.4. CPID’de kullanılan akışkan türüne göre kirlenme dirençleri (Tay ve Yang, 2006)	35
Tablo 3.5. Contalı plakalı ısı değıştiricilerde yıllık kirlenme maliyetleri (Tay ve Yang, 2006).....	37
Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan ısı değıştiricinin genel özellikleri.....	50
Tablo 5.2. FEP’in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Akıncı vd., 2003).....	52
Tablo 5.3. h-BN’nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Ebin, 2007).....	54
Tablo 5.4. h-BN tozlar için üretici firmadan alınan veriler.....	55
Tablo 5.5. Çalışmada kullanılan kaplama oranları ve kod bilgileri	55
Tablo 5.6. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler	63
Tablo 5.7. Ölçümler ve belirsizlikler	79
Tablo 6.1. Temas aç ı ölçüm sonuçları	80
Tablo 6.2. Pompa enerji tüketim ve maliyet hesabı	110
Tablo 6.3. Hidrofobik yüzey kaplama ortalama kalınlık değeri	111
Tablo 6.4. Hidrofobik kaplama ortalama yüzey pürüzlülük değeri	112

1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda ısı transferinin artırılması veya iyileştirilmesi sıklıkla karşımıza çıkan mühendislik problemlerinden birisidir. Özellikle ısı değiştirici sistemlerindeki teknolojik gelişmeler sonucunda ısı değiştiricilerin uygulama alanlarının hızlı bir şekilde artması ve bu sistemlerinin verimliliğinin artırılmasına yönelik ihtiyaç bu problemin ana nedeni olmuştur. Gelişen teknoloji ile ısı değiştirici sistemlerinin tasarımları küçülmekte ve birim hacimde meydana gelen ısı kapasitesi artmaktadır (Genceli, 1999). Bu nedenle oluşan problemlerin giderilmesi için sistematik bir çözüm gereklidir. Bu çözümleri sağlamak için araştırmacılar ısı değiştirici uygulamalarında enerjiyi etkin bir şekilde kullanabilecek sistemler tasarlamakta ya da mevcut sistemler için iyileştirme çalışmaları yapmaktadır. Yapılacak verimlilik çalışmaları ile enerjinin etkin bir şekilde kullanımı sağlanacak ve işletme maliyetleri azaltılacaktır.

Günümüzde ısı transferinin iyileştirilmesi ile enerji tasarrufu elde etmek ve verimliliği artırmak için teknolojik gelişmeler konusundaki çabalar dikkat çekmektedir. Bu kapsamda ısı transferini artırmak amacıyla birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda harici güç kaynağına ihtiyaç duymayan, ısı artışı ve yüksek verimlilik sağlamak amacıyla özel yüzey kaplamaları, nano akışkan katkıları kullanılan pasif yöntemler üzerine birçok metot geliştirilmektedir (Davar vd., 2021). Aynı zamanda sistem haricinde ek enerji veya pompa gücü gerektiren aktif yöntemler ile bu yöntemlerin birlikte kullanıldığı karma yöntemler olmak üzere birçok sistematik yaklaşım ve çözümler geliştirilmektedir.

Aktif yöntemlerin, sistem dışından ek enerji ya da güç gerektirmesi, akışkan hızına bağlı olarak istenilen verimin sağlanamaması ve çalışma ortamında gürültü oluşumu gibi dezavantajları bulunmaktadır. Buna karşın akış kapasitesi değiştirilmeden ısı transferini iyileştirmeye imkan veren pasif yöntemler daha çok kullanılmaktadır. Bu yöntemde yaygın olarak kullanılan metot ise ısı transfer katsayısı düşük bölgelerde veya yüzeylerde özel kaplamalar kullanılmasıdır. Kaplamalar sayesinde akışın gerçekleştiği alan içerisinde hidrofobik özellikte yani su tutmayan yüzeyler oluşturularak akışkanın yüzeyde tutunması engellenir. Böylece katı yüzey ile sıvı arasındaki azalan etkileşim ile sürtünme kuvveti azaltılarak taşınım ile gerçekleşen ısı ve kütle transferi oranlarında artış sağlanmış olur.

Isı değiştiricileri özellikle kimya endüstrilerinde, ısıtma, soğutma ve iklimlendirme uygulamalarında, araçlarda, gıda ve içecek üretiminde, elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı değiştirici (ID) sistemlerinde ısı transferinin iyileştirilmesi ile enerjinin verimli ve etkin kullanımı sağlanarak enerji tasarrufu elde edilecektir. Enerji talebinin artması ve enerji kaynaklarındaki azalma değerlendirildiğinde, ısı transferinin kullanıldığı ısı değiştirici sistemlerinde termal verimliliğin artırılması daha da çok önem kazanmaktadır. Dünyadaki enerji talebinin hızla artması ile ısı transfer süreçlerinde verimsiz kullanım nedeniyle enerji kaybını azaltmak çok daha önemli hale gelmiştir. ID sistemlerinin veriminde sağlanacak iyileştirmelerin, enerji tasarrufu sağlama ve işletme maliyetlerini azaltma potansiyeli mevcuttur. Isı transferini artırıcı teknikler kullanılarak contalı plakalı ısı değiştiricilerin boyutlarının küçültülmesi, mevcut tasarımları değiştirilmeden fonksiyonel yüzey kaplama uygulamaları ile ısı transferi artışı sağlanırken pompa kapasitesi küçülmektedir (Kumar vd., 2020). Isı transfer verimliliğin artırılması ile sistemde akışkan hareketini sağlayan pompaların enerji tüketimleri de azalmaktadır.

Son yıllarda nano teknoloji alanında meydana gelen gelişmeler ile farklı yüzeylere fonksiyonel özellik kazandırabilmek için hidrofobik yüzeyler oluşturma konusunda birçok metot geliştirilmiştir. Nano teknoloji sayesinde malzeme yüzey yapılarının incelenmesi kolaylaşmış ve yeni malzemelerin geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda akıllı yüzeyler olarak adlandırılan hidrofobik ve süperhidrofobik özellikte yeni nesil yüzeyler geliştirilmiştir. Yüzey enerjisi oldukça düşük bu nano malzemeler sağladığı faydalardan dolayı günlük hayatta ve endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yüzeyinde kir ve su tutmayan tekstil ürünleri, yapışmayan mutfak gereçleri, kendi kendini temizleyebilen solüsyonlar örnek olarak verilebilir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının, ısı transferini iyileştirmek, kirlenmeyi ve korozyonu önlemek, mekanik dayanımı artırmak, sistem performansını iyileştirerek enerji tüketimini düşürmek amacıyla kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır.

Hidrofobik yüzey kaplama uygulamalarıyla ısı değiştirici sistemlerinde ısı transferi iyileştirilirken, basınç kayıplarının ve plaka yüzeylerinde oluşan kirlenmenin azaltılması ile ısı değiştirici performansı artırılarak kullanım ömrü uzatılacak, işletme bakım maliyetleri önemli lde düşürülecektir. Endüstriyel uygulamalarda en sık karşılaşılan sorunlardan olan plaka aşınması ve delinmesi, yüksek aşınma direncine sahip özel hidrofobik yüzey kaplamaları ile engellenebilecektir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu tezde gerçekleştirilen deneysel çalışma ile ısı değiştiricinin mevcut tasarımları değiştirilmeden plaka ıslak yüzeylerine hidrofobik kaplama işlemi uygulanarak, ısı transferinin iyileştirilmesi, etkinliğin artırılması, basınç kayıplarının ve kirlenmenin önlenerek ısı değiştirici performansının iyileştirilmesi, plakalarının dayanımının artırılarak kullanım ömrünün uzatılması ve sistemlerin enerji tüketimlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Ayrıca mevcut tez çalışması, özgün bir çalışma olarak bilime, teknolojiye, ısı değiştirici üretici firmalarına katkı sağlayacak ve ısı değiştirici sistemlerinde hidrofobik yüzey kaplamaları konusunda literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır. Bu tez çalışmasının amaçları aşağıda detaylı olarak sunulmuştur:

- i. Bu çalışma ile contalı plakalı ısı değiştiricilerinde (CPID) hidrofobik yüzey kaplama uygulamalarının ısı transferi üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.
- ii. Hidrofobik özelliğe sahip solüsyon, partikül takviyeli kompozit nano malzemeler eklenerek sentezlenecek ve hidrofobiklik özelliği artırılacaktır. Elde edilen ucuz ve kolay uygulanabilir, yeni nesil hidrofobik kaplama solüsyonunun endüstriyel uygulamalarda kullanılması için ticarileştirme çalışmaları da amaçlanmaktadır.
- iii. Isı değiştirici plakalarına uygulanan kaplama işlemi sonucunda elde edilen yüzeylerin bazı mekanik özellikleri (sürtünme direnci, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü) belirlenecektir. Ayrıca kaplama yüzey karakterizasyonu, mikroskobik (SEM-EDX) ve mikroskobik olmayan yöntemlerle incelenerek literatüre katkı yapılması amaçlanmıştır.
- iv. Hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı değiştiricilerinde kullanımı ile ID plakalarının aşınma dirençleri arttırılarak, cihazların kullanım ömürlerinin uzatılması, iş kayıplarının önlenmesi, bakım ve işletme maliyetlerinin azaltılması amaçlanmıştır.
- v. Isı değiştiricilerine hidrofobik yüzey kaplamaları uygulanarak, plaka iç yüzeylerinde tortu, partikül gibi malzemelerin birikimi ve korozyon oluşumu engellenerek, kirlenme üzerine etkilerinin en aza indirilmesi ve enerji veriminin artırılması amaçlanmıştır. Plaka aşınma ve delinme durumları önlenerek işletme maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmıştır.

- vi. Endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan CPID verimliliği değerlendirilirken, kirlenme durumlarının, basınç kayıplarının ve enerji tüketimlerinin sistem performansı açısından oldukça önemli olduğu ifade edilmiş ve bu parametrelerin etkilerinin üretici firmalara kazandırılması amaçlanmıştır.

1.2. Tez Kapsam

Bu doktora tezi toplamda yedi ana bölümden oluşmaktadır.

1. Bölümde ısı değiştiricileri, ısı transferi, kirlenme ve basınç kayıpları gibi parametrelerin öneminden bahsedilmiş, enerji verimliliğinin günümüzdeki kritik önemine değinilmiştir.

2. Bölümde contalı plakalı ısı değiştiricilerinde hidrofobik yüzey kaplama uygulamaları hakkında detaylı bir literatür araştırmasına yer verilmiştir.

3. Bölümde contalı plakalı ısı değiştiricileri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Contalı plakalı ısı değiştiricilerin ID sınıfındaki yeri ve önemi açıklanarak, ısı değiştiricisini oluşturan tüm ekipmanlar açıklanmıştır. Isı değiştirici seçim kriterleri ile ısı transferine ve performansına etkiyen parametrelerden bahsedilmiştir.

4. Bölümde hidrofobik yüzeyler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Temas açısı ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri açıklanmıştır. Hidrofobik malzemelerin sınıflandırması, uygulama şekilleri, ölçüm yöntemleri, kullanım alanları belirtilmiştir.

5. Bölümde tezde kullanılan materyaller açıklamaları ile verilmiş, deneysel yöntem tüm detayları ile açıklanmıştır. Yöntemin çeşitleri, yönteme etkiyen parametreler, deney parametreleri, termodinamik analizler ve çalışmada sırasında karşılaşılan hatalar bu bölümde genel bilgi olarak sunulmuştur. Ayrıca contalı plakalı ısı değiştirici için termodinamik analiz ve temel formüller detaylı bir şekilde grafikler ile desteklenerek açıklanmıştır.

6. Bölümde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular detaylı bir şekilde sunulmuş ve sonuçlar tüm yönleriyle değerlendirilerek karşılaştırmalara yer verilmiştir. Çalışmada elde edilen deneysel, teknik ölçüm sonuçları ve SEM-EDX görüntüleri de bu bölümde sunulmuştur.

7. Bölümde ileride gerçekleştirilecek çalışmalar için genel öneriler ve üretici firmalar için yapılabilecek iyileştirmeler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında hidrofobik kaplamaların ısı transferi, basınç kaybı, kirlenme, mekanik dayanım, enerji verimliliği parametrelerinin ısı değiştirici performansına etkisi ve ısı değiştirici uygulamalarında kullanımı hakkında literatürde bulunan çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Literatür taramasından, hidrofobik yüzey kaplama malzemeleri ve bu malzemelerin ısı değiştiricilerinde uygulamaları ile ilgili deneysel ve sayısal çalışmaların olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamdaki çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.1. Hidrofobik Yüzeylerin Isı Transferine Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Choi ve Kim (2011) yapmış oldukları incelemede ıslanabilirliğin ısı transferi üzerine etkilerini birçok çalışmayı ele alarak derinlemesine incelemişlerdir. Öncelikle ıslanabilirliğin tanımını detaylı bir şekilde açıklamışlar ve temas açısına göre sınıflandırmalarını belirtmişlerdir. Isı transferini tek fazlı ve iki fazla olarak kategorize ederek çalışmaları değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda hidrofobik ve süperhidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferinin artırılmasında önemli bir uygulama olduğunu belirlemişlerdir.

Hsieh ve Lin (2009) yapmış oldukları deneysel çalışmada dikdörtgen kanal yüzeylerini hidrofobik özellikte malzemeler ile kaplayarak oluşan yüzeylerin ısı transferi üzerine etkilerini dört farklı akışkan için incelemişlerdir. Araştırmacılar en/boy oranı $(H/W)=0.56$ olan dikdörtgen tipi mikrokanalda deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak hidrofobik yüzeye sahip kanallarda, hidrofilik yüzeye sahip kanallara kıyasla sürtünme faktöründe ve ortama ısı transfer katsayısında yaklaşık %8-10 oranında azalma olduğunu bulmuşlardır. Deneysel çalışmalarında elde ettikleri sayısal sonuçları literatürdeki benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Bonanno vd. (2019) yapmış oldukları deneysel ve sayısal çalışmada ısı değiştiricilerin yüzeylerine hidrofobik kaplama uygulayarak basınç düşüşü ve ısı transferi verimliliği açısından etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında dört farklı boyutta lehimli kaynaklı ısı değiştirici kullanmış ve daldırma yöntemi ile yüzeylerini kaplamışlardır. ID yüzeylerine Al_2O_3 nanopartiküllerini ısıtma işlemi ile uygulayarak hidrofobik özellik kazandırmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmalarda akışkan

olarak su ve yağ kullanmışlardır. Isı değıştiricilerin performansının yüzey kaplama ile arttığını ifade etmişlerdir. Tip A ısı değıştiricisinde ısı iletim katsayısı kaplamasız durumda 116.46 (W/m²K) iken hidrofobik kaplanmış durumda 176.47 (W/m²K) olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları yazılım ile sayısal ve deneysel çalışmalarda elde ettikleri sonuçların tutarlılığını kontrol etmişlerdir.

Sadaghiani (2019) yapmış olduğu çalışmada mikro ve nano yüzey kaplama teknolojilerinin kritik ısı akısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Plaka yüzeylerini 3D köpük benzeri grafen katkılı pHEMA malzemeleri ile 50, 100, 200 nm kalınlığında kaplamıştır. Farklı ıslanabilirlik özelliğe sahip yüzey kaplamaları kullanarak yaptığı deneysel çalışmalarda, kaplanan yüzeyde oluşan yüzey kalınlığının ısı transferi artışında etkili olduğunu tespit etmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile en yüksek ısı transfer oranı için, optimum bir yüzey özelliği ve kaplama kalınlık değeri belirlemiştir. Hidrofobik kaplama yüzeylerde sıvı taşınımını artırdığı ve akış direncini de azalttığını tespit etmiştir.

Chatterjee vd. (2013) üç farklı hidrofobik özelliğe sahip kaplama kullanarak ısı transferi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında bakır plakaları 200 nm kalınlığında Teflon AFTM malzeme ile kaplayarak hidrofobik özellik kazandırmışlardır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, tamamen hidrofobik özelliğe sahip yüzeyde ısı transferi maksimum değere ulaşmıştır. Hidrofilik yüzey için ısı transfer katsayısının hidrofobik yüzeye göre 2.5 kat düşük olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında hidrofobik kaplı yüzeylerde kütle akışının daha hızlı gerçekleştiğini ve ısı verimliliğe olumlu yönde fayda sağladığını gözlemlemişlerdir.

Deng vd. (2022) yaptıkları sayısal çalışmada, ıslanabilirliğin kaynama ısı transferi üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında bakır plakalar için altı farklı hidrofilik/hidrofobik yüzey kaplaması kullanmışlardır. Yüksek ısı akısı durumunda akışkan ile hidrofobik yüzey arasındaki temasın azaldığı ve buna bağlı olarak ısı transfer performansında artışın olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmada aynı veriler için hidrofilik ve hidrofobik durumlar için karşılaştırmalar yapmışlardır. Elde edilen sayısal verilerin kompakt ısı değıştirici tasarımlarında ve imalatında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Betz vd. (2013) çalışmalarında farklı ıslanabilirlik derecelerine sahip yüzeylerde kaynama ısı transferini analiz etmişlerdir. Yüzey kaplama malzemesi olarak Teflon

floropolimer kullanmışlar ve yüzey üzerinde minimum 5 nm, maksimum 200 nm kalınlık olacak şekilde uygulama gerçekleştirmişlerdir. Kaplama temas açılarını ise hidrofobik için 110-120°, süperhidrofobik için 150-165° aralığında ölçmüşlerdir. Çalışmanın sonucunda en büyük ısı transfer katsayısına hidrofilik ve hidrofobik yüzeyleri bir araya getiren bifilik yüzeylerde ulaşmışlardır. Bu ölçümler ışığında, bifilik yüzeylerin buhar ve sıvı taşınımını nasıl etkin bir şekilde yönettiğini, kritik ısı akısını geciktirdiğini ve ısı aktarım katsayısını en büyük değerlere çıkardığını gösteren analitik bir model geliştirmişlerdir.

Sikarwar vd. (2012) yapmış oldukları sayısal çalışmada hidrofobik kaplanmış yüzeylerde damlacık yoğunlaşmasının ısı transferi artışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Sayısal modelleme esnasında hidrofobik kaplamalar için temas açılarını 90, 120 ve 140° olarak kabul yapmışlardır. Çalışmalarında temas açısı ve damla arasında bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin net ısı transferi üzerine etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Hidrofobik yüzeylerin erken yoğunlaşma oluşmasına imkân vermesi sonucunda ısı transferini artırmada olumlu etkileri olduğunu ifade etmişlerdir.

Lara ve Holtzaple (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada hidrofobik yüzeylerin ısı değiştiricilerine etkilerini incelemişlerdir. ID malzemesi olarak titanyum ve bakır levha malzemeler kullanmışlardır. Uygulanan hidrofobik yüzey kaplama kalınlığı 0.635 ile 127 µm aralığında değişmiştir. En iyi ısı transfer katsayısı kurşun bazlı hidrofobik kaplama uygulanmış bakır levhada $U=240 \text{ kW (m}^2\cdot^\circ\text{C)}$ olarak ölçülmüştür. Çalışmalarında hidrofobik ısı değiştiricilerine ait literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırma yaptıklarında en iyi ısı transfer katsayısının $U=17 \text{ kW (m}^2\cdot^\circ\text{C)}$ olduğunu ve deneylerinde elde ettikleri en iyi ısı transfer katsayısının literatürdeki değerden 14.2 kat daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Chatterjee vd. (2014) hidrofobik ve hidrofilik kaplama uygulanmış yüzeylerin ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca %25 hidrofilik, %75 hidrofobik kaplanmış yüzeylerde karma bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek ısı transfer katsayısı tamamen hidrofobik yüzeyde 31500 (W/m²K), hidrofilik yüzeyde ise 12400 (W/m²K) olarak belirlemişlerdir. Hidrofobik kaplanmış yüzeylerde yoğunlaşma esnasında yüzeyde tutunan damlacık miktarında ve damlacık boyutlarında azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

Yang vd. (2017) çalışmalarında V desenli yüzeylere hidrofobik, süperhidrofobik ve hidrofilik kaplama işlemi uygulayarak ıslanabilirliğin ısı transferi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kaplama malzemesi olarak kütlece %0.2 oranında etil nonaflorobütil içeren organik bir çözeltiyi yüzeylere püskürterek kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda hidrofobik yüzey için ısı transfer katsayısının, çalışma hızı ve bağıl nemden bağımsız olarak hidrofilik yüzeyinkinden %3-%9 daha yüksek değere sahip olduğunu görmüşlerdir. Süperhidrofilik yüzeyde meydana gelen filmsel sıvı damlacık yoğunlaşması sebebiyle ısı transfer veriminin düştüğünü ifade etmişlerdir.

Lin vd. (2020) ısı değiştiricileri üzerine yapmış oldukları çalışmada, hidrofobik kaplanmış yüzeye sahip bakır plakalar kullanarak 0.5-2.5 m/s aralığında değişen hava hızı ve %60 ile %90 bağıl nem değerlerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Hidrofobik kaplanmış ısı değiştirici ile yüzeyi kaplanmamış ısı değiştiricinin termal performanslarının karşılaştırmasını yapmışlardır. İncelemeleri sonucunda hidrofobik kaplanmış ısı değiştiricilerin kaplanmamış duruma göre %5.56 daha yüksek ısı transfer verimliliği sergilediğini tespit etmişlerdir.

Li (2018) yapmış olduğu tez çalışmasında, süperhidrofobik kaplamaların ID performansına etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmasında alüminyum kanatlı borulu ısı değiştiricilerini hidrofilik ve süperhidrofobik kaplamalı olarak karşılaştırmasını yapmıştır. Kurmuş olduğu deney sisteminde bulunan ısı değiştiricilerinde akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarını, nem ve hız değerlerini ölçerek ısı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanmıştır. Elde edilen verilere göre tüm ID için ısı transfer katsayısının genel olarak giriş hava hızı ile arttığını belirlemiştir. Süperhidrofobik kaplamalı ısı değiştiricinin kaplamasız göre %5.2 daha yüksek termal performans gösterdiğini açıklamıştır.

Rainieri vd. (2009) yaptıkları çalışmada, çapraz akışlı plakalı ısı değiştiricilerinde hidrofobik kaplamaların ısı transfer katsayısı üzerine etkilerini incelemişlerdir. 300x180x3 mm alüminyum plaka üzerinde üç farklı Reynolds değeri için hidrofobik yüzey kaplamalı ve kaplamasız şekilde deneysel çalışmalarını yapmışlardır. Plaka yüzeylerini methyl methacrylate (Perspex) malzeme ile kaplayarak hidrofobik özellik kazandırmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda hidrofobik kaplamanın damlacıkların hareketliliğini artırarak ısı transferi artışı sağladığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar deneysel çalışmada inceledikleri

koşulların çapraz akışlı plakalı ısı değiştiriciler için tipik koşulları temsil ettiği sonucuna varmışlardır.

Mahvi vd. (2021) çalışmalarında ısı değiştiricilerinde hidrofobik kaplamaların ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında elektrikli araçlarda kullanılan alüminyum kanatlı ısı değiştiricilerini süperhidrofobik ve süperhidrofilik kaplamalar ile kullanmışlardır. Süperhidrofobik kaplamalı ısı değiştiricinin donmayı geciktirdiği ve ısı transfer oranlarını 3 kW' ın üzerinde tuttuğu belirlenmiştir. Kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricilerinde ısı transfer oranlarının başta yüksek olmasına karşın geçen sürede sabit kalmayıp azaldığını tespit etmişlerdir.

Drelich vd. (2011) çalışmalarında hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeyleri tüm yönleriyle kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Hidrofobik malzemelerin temas açısı ölçüm yöntemlerini ve sınıflandırmalarını açıklamışlardır. Yüzey ıslanabilirliği ile alakalı Wenzel ve Cassie Baxter modellerini örneklemiştir. Hidrofobik ve süperhidrofobik malzemeler hakkındaki son gelişmeleri ve yapılan güncel çalışmaları ele almışlardır. Hidrofobik yüzeylerin kullanımının ısı transferi üzerine etkilerini yapılmış örnekler ile etraflıca incelemişlerdir.

Williams (2016) yapmış olduğu tez çalışmasında süperhidrofobik yüzeylerin ısı transferine etkisini incelemiştir. Çalışmalarında dört adet 15x3.8 cm boyutlarında bakır plakalarda hem yüzey kaplaması hem de yüzey deseni kullanmıştır. Sprey kaplama tekniği kullanarak plaka yüzeylerinde 10, 20 ve 30 nm kalınlık olacak şekilde aerjel Rust-Oleum NeverWet nano malzeme kullanarak yüzeylere hidrofobik özellik kazandırmıştır. Laminer ve türbülanslı akış şartlarında mikro desenli süperhidrofobik yüzeylerde sürtünme ve basınç kayıplarında azalma olduğunu belirlemiştir. Hidrofobik kaplı plakalarda Nusselt sayısı ve sürtünme kaybı arasındaki oranı belirlemiş ve bu orana göre ısı transferindeki artış değerlerini tespit etmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen verilerin doğruluğunu sayısal veriler ile karşılaştırmıştır.

Chaudhury vd. (2013) yapmış oldukları deneysel çalışma ile yüzey ıslanabilirliği ile ısı transfer verimliliği, Peclet sayısı ve Nusselt sayısı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. İncelemelerinde yüksek Peclet değerlerinde Nusselt sayısının etkilendiğini, düşük değerlerde ise değişme olmadığını belirlemişlerdir. Islanabilirlik ile ısı transferi arasında belirgin bir ilişki olduğunu ve artan temas açısı ile Nusselt sayısında azalma olduğunu bulmuşlardır.

Wajs ve Mikielwicz (2016) yapmış oldukları deneysel çalışmada plakalı ısı değiştiricilerin geliştirilmesine yönelik ıslanabilirliğin etkilerini incelemişlerdir. Yüzeyi kaplanmış plakalı ısı değiştiriciler ile kaplama işlemi uygulanmamış plakalı ısı değiştiricilerini kullanarak elde ettikleri verileri karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda kaplanmış yüzeylerde ısı transfer hızının daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Akış direnci açısından da çok düşük akış hızları için toplam basınç düşüşü yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerinde daha büyük değerlerde gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Artan Reynolds değerlerinde sınır tabaka kalınlığının azalması ile basınç kayıplarının düştüğünü ifade etmişlerdir.

Abbasiasl vd. (2021) hidrofobik ve süperhidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferi üzerine etkilerini sayısal verilerle belirlemişlerdir. Çalışmalarında yüzeyleri hidrofobik özelliğe sahip malzeme ile kaplanmış bakır plakaları mini bir kanal içerisinde test ederek ısı verimliliği ve yoğuşma durumlarını incelemişlerdir. Elde edilen verilere göre hidrofobik kaplanmış numunelerde elden edilen ısı transfer katsayısının kaplanmamış numunelere göre %37 oranında daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Tokunaga ve Tsuruta (2020) hidrofobik ve hidrofilik yüzeylerin yoğuşma ısı transferi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında yüksek soğutma şartlarında ısı transfer katsayısının azalmasını önlemek için çeşitli girişimlerde bulunmuşlardır. Bu kapsamda yivli bir yüzey ve hidrofobik kaplama kullanarak yaptıkları çalışmada ısı transfer katsayısının kaplama işlemi uygulanmamış yüzeylere göre üç kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhu vd. (2021) hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferinin artışı ve sürtünme direncinin azaltılmasındaki etkilerini incelemişlerdir. Isı transferi iyileştirmesi için yüzey kaplaması ve yüzey geometrisi ile optimum bir tasarım yaparak çalışmalarını bu şartlarda gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen verilere göre hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferinde artış sağladığı ve sürtünmeyi azalttığı sonucuna varmışlardır.

Boyina vd. (2019) yapmış oldukları deneysel ve sayısal çalışma ile ısı değiştiricilerinde hidrofobik kaplama uygulamasının ısı transferi ve donma üzerine etkilerini incelemişlerdir. Alüminyum kanatçıklı borulu ısı değiştiricilerine süperhidrofobik kaplama uygulayarak farklı giriş ve çıkış sıcaklık değerlerinde

deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen verilere göre uygulanan yüzey kaplamasının donma süresini geciktirdiğini ve 300W üzerindeki ısı transfer oranlarını kaplanmamış yüzeylere oranla 3 kat daha yüksek oranda uzun süre koruyabildiğini belirlemişlerdir.

Budaklı vd. (2021) yüzeyde mikro yapılandırma ve kaplama teknikleri kullanarak ısı transfer katsayısındaki değişimi incelemişlerdir. Yüzey yapılandırması olarak V tip ve kare kesit kullanarak 3 farklı bakır plaka üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak kaplama yapmadan yüzey yapılandırmaları ile deneylerini gerçekleştirmiş sonrasında aynı numunelerin yüzeylerine hidrofobik kaplama uygulayarak deneyleri tekrarlamışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Isı transferi açısından kaplanmış ve işlenmemiş yüzeylerin daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Mikro yapılı yüzeyde daha fazla ısı transfer artışı beklenmesine karşın yüzey yapılandırma işlemi uygulanmamış yüzeylerde daha yüksek oranda ısı transfer artışı olduğunu bildirmişlerdir.

Alammar vd. (2017) yapmış oldukları sayısal çalışmada Ansys Fluent programında hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (HAD) kullanarak aşırı soğutulmuş sıcaklıklarda yüzey ıslanabilirliğinin yoğunlaşma ısı transferi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 140° ve 150° temas açısına sahip süperhidrofobik yüzey kaplamaları kullanmışlardır. Elde edilen verilere göre süperhidrofobik kaplamalı yüzeylerde kaplamasız yüzeylere kıyasla 2-3 kat daha yüksek değerlerde ısı transfer oranı gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Davar vd. (2021) yaptıkları çalışma ile yüksek ısı transfer oranlarına sahip ticari hidrofobik yüzey kaplama malzemelerini incelemişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplamasını beş farklı kalınlık değerinde uygulamışlardır. Daha sonra kaplama işlemi uygulanmış yüzeyler ile kaplama işlemi uygulanmamış yüzeylerde deneysel çalışmalarını yapmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda hidrofobik kaplamaların ısı transferini artırdığını tespit etmişler ve en iyi termal performansın 17 µm yüzey kalınlığına sahip parçada kaplamasız yüzeye oranla %200 daha yüksek olarak gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Lu vd. (2017) süperhidrofobik yüzeylerin yoğunlaşma ve ısı transferi üzerine etkilerini incelemişlerdir. En yüksek ısı iletim katsayısını $88 \pm 16 \text{ kW/m}^2\text{K}$ olarak tespit etmişlerdir. Bu değer literatürde bilinen en yüksek yoğunlaşma ısı transfer

katsayılarından biri olduğunu belirtmişlerdir. Süperhidrofobik kaplama işlemi uygulanan yüzeylerdeki ısı transfer artışı hidrofobik yüzeylere oranla %87, hidrofilik yüzeylere oranla ise %155 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda süperhidrofobik yüzeylerin hidrofobik yüzeye göre daha üstün ısı transfer performansına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Kim ve Lee (2013) ısı değiştiricilerinde hidrofobik yüzeylerin ısı transferine ve donma etkileri üzerine yapmış oldukları çalışmada yüzey kaplama işlemini ve ID kanat özelliklerini deney parametreleri olarak kullanmışlardır. Panjurlu kanatlı ısı değiştiriciyi 14-16-18 inç finli şekilde kullanmışlar ve kanat yüzeylerini temas açısı 130° olan hidrofobik malzeme ile kaplamışlardır. En iyi ısı transfer artışı performansını 16 FPI dizaynında ve yüzeyi hidrofobik kaplanmış ısı değiştiricisinde elde etmişlerdir.

Patil vd. (2017) yapmış oldukları kapsamlı literatür araştırmasında ısı değiştiricilerin buzlanma önleme, kuru ve ıslak çalışma koşullarında ısı transfer karakteristiklerini ve termal performans iyileştirmelerini incelemişlerdir. Isı değiştiricilerin farklı çalışma koşullarındaki fiziksel ve termal performanslarına etki eden parametreleri teorik, sayısal ve deneysel yöntemlerle analiz ederek değerlendirmişlerdir. İncelemelerinde hidrofobik kaplamalı ID ile yapılan çalışmalarını inceleyerek kullanılan parametreler hakkında bilgiler vermişler ve ısı değiştiricilerinde ısı transferinin iyileştirilmesi hakkındaki çalışmaları özetlemişlerdir.

Kim vd. (2014) gerçekleştirdikleri çalışmada mikro kanallı ısı değiştiricilerinde ıslanabilirliğin ısı transfer oranına ve buzlanma önleme üzerine etkilerini incelemişlerdir. Termal performans değerlendirmesinde ID kanat aralığını, kanalların aralığını ve derinliğini kritik parametreler olarak ele almışlardır. Deneyler sonucunda yüzeyleri hidrofobik kaplanmış ve daha ince derinlikteki ısı değiştiricilerinde kaplamasız olana göre ısı transfer oranında %5 daha yüksek artış tespit etmişlerdir. Ayrıca daha geniş kanat aralığına sahip ve kaplamalı ısı değiştiricilerinde ısı transfer oranında yaklaşık %6 artış olduğunu belirlemişlerdir.

Wen vd. (2017) nano yapılı yüzeyler ile ıslanabilirliği ve ısı transferini artırmak için gerekli parametreleri belirlemek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında temas açısı 114° olan hidrofobik kaplama kullanmışlardır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda yüzey kaplama işleminin hem ısı akışı hem

de ısı transfer katsayısında önemli bir artış sağladığını belirlemişlerdir. Hidrofobik yüzeylerde damlacık sıçraması ile ısı transferinde %100 artış tespit etmişlerdir.

Senthilkumar vd. (2013) dikdörtgen kesitli alüminyum kanatlar üzerinde hidrofobik yüzey kaplama işleminin ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kaplamalı ve kaplamasız yüzeyler için ısı transfer oranlarını hesaplayarak karşılaştırmışlardır. Sıcaklık ve ısı transferi özelliklerini Nusselt, Grashof, Prandtl ve Rayleigh sayılarını kullanılarak araştırmışlardır. Deneylerinde Taguchi yöntemi ve Anavo analizi kullanarak istatistiksel araştırma yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda hidrofobik kaplamalı yüzeylerde ısı transfer oranı artışının ortalama %5 olarak gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Meikandan vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada hidrofobik kaplamaların ısı değiştiricileri üzerine etkilerini gerçekleştirdikleri deneyler ile incelemişlerdir. ID yüzeylerini hidrofobik nano malzeme ile kaplayarak ısı transferi artışı oranlarını değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda kaplamanın sürtünme üzerine etkisinin önemli bir boyutta olmadığını vurgulamışlardır. Isıl verimlilik açısından bakıldığında kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerinde yüzey kaplama işlemi uygulanmamış olanlara oranla %24.2' lik bir iyileşme oranı tespit etmişlerdir.

Tang vd. (2013) yaptıkları deneysel çalışmada bakır plakaların yüzeylerine hidrofobik kaplama işlemi uygulayarak ısı transferine etkisini incelemişlerdir. Özellikle düşük ısı akışı koşullarında kaplanmamış yüzeylere kıyasla hidrofobik kaplanmış yüzeylerde ısı transfer katsayısında artış gözlemlemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre hidrofobik yüzeylerde en yüksek ısı transfer artış oranının kaplama işlemi uygulanmamış numuneye göre %172.7 daha yüksek olduğunu açıklamışlardır.

Derby vd. (2014) hidrofobik ve hidrofilik yüzeylerin yoğuşma ısı transferi üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında hem yüzey kaplamasının hem de yüzey geometri değerlerini alarak deneysel parametreleri belirlemişlerdir. Hidrofilik kaplanmış bakır plakalar ve hidrofobik kaplanmış teflon plakalar üzerinde dört farklı yüzey deseninde 300-500 kPa basınç, 50-200 kg/m²s kütle akışında deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre hidrofobik kaplanmış yüzeylerde hidrofilik kaplanmış yüzeylere göre 3.2-13.4 kat daha yüksek ısı transfer artışı tespit etmişlerdir. Teflon kaplama ile elde edilen hidrofobik kaplamaların ısı transferi artışında daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Wang vd. (2015) kanatlı borulu ısı değiştiricilerinde hidrofobik ve süperhidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferi ve donma üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı tipte finli borulu ID kullanmışlar ve yüzey karakteristiğinin buzlanma ve ısı transferi üzerine davranışlarını gözlemlemişlerdir. Süperhidrofobik kaplanmış ısı değiştiricilerinde donma kalınlığı kaplama uygulanmamışa göre %17.1 daha düşük oranda gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca süperhidrofobik kaplı ısı değiştiricide en yüksek ısı transfer artışı olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey kaplama işleminin enerji tüketimi, ısı transfer artışı ve donma önleme üzerinde etkili olduğunu açıklamışlardır.

Jhee vd. (2002) kanatlı borulu ısı değiştiricilerinde hidrofobik kaplamaların ısı transferi ve donma üzerine etkilerini incelemişlerdir. ID tasarımında boru uzunluğu 310 mm, aralık ölçüsü 7 mm olacak şekilde 44 adet fin kullanmışlardır. Bakır plakaları PTFE (polytetrafluoroethylene) madde ile yüzeylerini kaplayarak hidrofobik özellik elde etmişlerdir. Kaplama yapılan malzemelerin temas açılarını 12°, 72°, 124° olarak ölçmüşlerdir. Hidrofobik kaplanmış ısı değiştiricide kaplanamamış duruma göre %2 daha yüksek ısı transfer oranı gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Buz çözme performansını ise %20 olarak gerçekleştiğini açıklamışlardır. Hidrofobik kaplamaların buz oluşumunu ve suyun yüzeyde birikmesini engellediğini verilerle tespit etmişler ve bu veriler ışığında daha kompakt ID tasarımları için öneriler sunmuşlardır.

2.2. Hidrofobik Yüzeylerin Basınç Kayıplarına Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Rosengarten vd. (2006) yaptıkları incelemede sıvı ile yüzey temas açısının basınç düşüşü ve ısı transfer hızı üzerine etkilerini incelemişlerdir. İnce film teknolojisi kullanarak yüzey ıslanabilirliğini 20-120° temas açı değerlerinde kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda yüksek temas açılarında basınç düşüşünü deneysel olarak kanıtlamışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda temas açısına bağlı olarak ısı transfer hızında %10'u aşan değişimler gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Wang ve Chang (1998) çalışmalarında hidrofilik kaplamalı ve kaplamasız kanatlı borulu ısı değiştiricilerinde ısı transferi ve kütle özelliklerinin değişimlerini incelemişlerdir. Deneylerinde ısı değiştirici olarak üç farklı kanat deseni ve düz tip kanatlar kullanmışlardır. Isı değiştirici yüzeylerinin kaplamalı ve kaplamasız durumlarında gerçekleştirdikleri çalışmada hidrofilik kaplamanın basınç düşüşü ve ısı

transferinde artış sağladığını belirlemişlerdir. Basınç kayıplarının kaplamasız olanlara göre %30-%40 daha düşük oranlarında gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

Ma vd. (2007) yaptıkları deneysel çalışma ile kanatlı borulu ısı değıştircilerine hidrofobik kaplama işlemi uygulayarak ısı verim, sürtünme ve basınç kaybı özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda hidrofobik kaplamanın ısı transferini artıma özelliğinin kanat yüzeyinde meydana gelen akış koşulları ile alakalı olduğunu belirlemişlerdir. Hidrofobik kaplanmış yüzey üzerinde akışkan hareketi kolay olduğundan ısı transfer katsayısında artış, sürtünme ve basınç kaybı değerlerinde de düşüş olduğunu görmüşlerdir. Kaplanmış yüzeyde gerçekleşen basınç kaybını kaplanmamış yüzeyde gerçekleşen basınç kaybı değerinden %44 daha düşük ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen korelasyona göre ısı transfer katsayı oranı ile basınç düşüşünün %9.9'luk bir değışime sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Kumar ve Suresh (2012) yaptıkları deneysel çalışmada, akışkan olarak su kullanarak dikdörtgen kesitli bir mikro kanalda hidrofobik yüzey kaplaması uygulanmış paslanmaz çelik plakalarda ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerini, Reynolds sayısının 500-2600 arasında değışen değerlerinde hem laminar hem de türbülanslı akış şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Tüm deneyler sabit ısı koşullarında gerçekleştirilmiş ve kaplanmamış plakalar ile yüzeyi hidrofobik kaplanmış plakaları karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak hidrofobik kaplamalı plakadaki ısı transfer hızının kaplamasız duruma göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca uygulanan kaplamanın yüzey pürüzlülüğünü artırdığını ve özellikle türbülanslı akış bölgesinde basınç düşüşüne neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Lee vd. (2020) araştırmalarında ısı değıştircilerinde hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeylerin, ısı transferi ve basınç düşüşü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kanatlı borulu ısı değıştircilerin yüzeylerini heptadecafluorodecyl silane (FTS) ile kaplamışlardır. Süperhidrofobik kaplanmış ısı değıştircide ısı transfer oranının kaplama uygulanmamış duruma göre %14.4, basınç düşüşün ise %470 daha yüksek oranda meydana geldiğini belirlemişlerdir. Normal çalışma şartlarında süperhidrofobik yüzeylerin ortalama ısı transfer hızının kaplamasız yüzeylere göre %4.8 daha yüksek olduğunu açıklamışlardır.

2.3. Hidrofobik Yüzeylerin Kirlenme Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Rungraeng vd. (2012) süt işleme endüstrisinde kullanılan plakalı ısı değiştiricilerde süperhidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transfer artış oranına ve kirlenme önlemeye etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında akışkan olarak kullanılan sütün yüzeyde tıkanma oluşturmalarını engellemek amacıyla süperhidrofobik yüzey kaplaması kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde kaplanmamış duruma göre %97 oranında kirlenme ve partikül oluşumunun engellendiğini tespit etmişlerdir. Süperhidrofobik kaplamalar ile plakalı ısı değiştiricide ısı transfer oranı artışına bağlı olarak proseste %10.2 daha düşük enerji tüketimi gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Kukulka ve Leising (2010) yapmış oldukları deneysel çalışmada kompakt ısı değiştiricilerde hidrofobik yüzey kaplamalarının kirlenme önleme ve buna bağlı olarak ısı transfer artışını incelemişlerdir. Kullandıkları ID plakaları hidrofobik kaplamalı ve kaplamasız olarak arıtılmamış su kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda hidrofobik kaplama işlemi uygulanan ısı değiştiricilerde %50 daha az tortu birikmesi gerçekleştiğini ve %40'a varan termal performans artışı meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Wang vd. (2018) kanatlı borulu ısı değiştirici yüzeylerini süperhidrofobik kaplayarak kendi kendini temizleme, yoğunlaşma ve buzlanma önleme ile ısı performans artırıcı etkilerini incelemişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiriciler ile kaplanmamış ısı değiştiricileri 10 ay boyunca farklı pH değerlerinde doğal su kullanarak test etmişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricide ısı transfer performansının, aynı koşullarda test edilen kaplanmamış duruma göre %2-%8 oranında daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının donma oluşumunu engellemesinden dolayı kaplanmamış ısı değiştiriciye göre %85'e varan enerji tasarrufu elde ettiklerini açıklamışlardır. Süperhidrofobik kaplamaların sadece termal verimi artırmakla kalmayıp aynı zamanda kendi kendini temizleme ve korozyon önleme kabiliyetleriyle ısı değiştiricilerin kullanım ömrünü uzattığını ifade etmişlerdir.

Kumar vd. (2020) kanatlı borulu ısı değiştiricilerin yüzeylerini farklı nano malzemeler ile kaplayarak ısı transferi üzerine etkilerini deneysel ve sayısal çalışmalar ile incelemişlerdir. Ayrıca uygulanan kaplama işleminin aşınma, yıpranma, kirlenme

gibi cihaz ömrüne etkiyen parametreleri de araştırmışlardır. Deneysel çalışmada iki farklı kaplama malzemesi kullanarak ısı verimliliği incelemişlerdir. Sonuç olarak kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricide kaplama işlemi uygulanmamış duruma göre daha yüksek ısı transfer verimliliği elde etmişlerdir. Sayısal çalışma kısmında ANSYS yazılımı kullanılarak yüzey kaplamalarının ısı değiştiricisine etkilerini deneysel çalışmadaki aynı parametreleri kullanarak belirlemeye çalışmışlardır.

Huo vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada süt endüstrisinde kullanılan paslanmaz plakalı ısı değiştiricilerde yüzey kaplamaları kullanarak kirlenmeyi önlemeyi amaçlamışlardır. Yüzey kaplama malzemesi olarak FluorolinkS10 malzeme içerisine nanopartiküller ekleyerek plaka yüzeylerini kaplamışlardır. Kullanmış oldukları kaplama malzemesinin temas açısı değerini, yüzey enerjisini ve yapışma özelliklerini test etmişlerdir. Serbest yüzey enerjisinin hidrofobik kaplamaların etkisi ile 46.38'den 19 mNm⁻¹ değerine düştüğünü belirlemişlerdir. Plaka kanallarını tıkayan peynir altı suyunun yüzeyde birikmesini hidrofobik kaplamalar ile engellemişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplamaları ile plakalarda oluşan kirlenmenin yaklaşık %75 ile %98 oranında giderildiğini tespit etmişlerdir.

Da Cruz vd. (2015) hidrofobik yüzey kaplamalarının gıda endüstrisinde kullanılan ısı değiştiricilerinde kirlenme oluşumuna ve bakım maliyetlerine etkilerini incelemişlerdir. Kirlenme önleyici yüzey kaplamaları ile yüzeyler arası etkileşimin azaltılarak tortu birikiminin engellenebileceğini belirlemişlerdir. Florokarbon bazlı hidrofobik kaplamaların kirlenmeyi önleyerek ısı değiştiricilerin çalışma sürelerini uzattığını görmüşlerdir. İşletmelerde temizleme sürelerinin uzatılması ile bakım maliyetlerinin azaldığını belirlemişlerdir.

Ahn vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada boron nitride nanopartikül katkılı hidrofobik yüzey kaplamalarının kirlenme üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kaplama malzemesi olarak polimetil metakrilat ve BN kullanmışlardır. Temas açısı değerlerini katkısız durumda 113°, BN katkılı durumda ise 142° olarak ölçmüşlerdir. Isı değiştiricinin kirlenme performansını artırmak için kirlenme hızlandırma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca kirlenme oluşumu ile ısı transfer katsayılarının da azaldığını tespit etmişlerdir. En yüksek kirlenme önleme performansının BN katkılı kaplama uygulanmış ısı değiştiricide meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Li vd. (2016) çalışmalarında paslanmaz plakalı ısı değıştiricide meydana gelen kirlenmeyi incelemişlerdir. PTFE (Teflon) yüzey kaplaması kullanarak sürtünme faktörünü ve kirlenme direncini belirlemişlerdir. Re değerini 600-6000 aralığında kullanmışlardır. Hidrofobik kaplamaların kaplanmamış olana göre %33.82 kirlenme direncini azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kirlenme birikintilerini SEM ortamında haritalama yaparak analiz etmişlerdir.

2.4. Hidrofobik Yüzeylerin Mekanik Etkileri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Lara ve Holtzaple (2011) çalışmalarında hidrofobik yüzey kaplama uygulamasının levhalı ısı değıştiricilerinde ısı transferine etkilerini incelemişlerdir. 305x305mm ölçülerindeki pirinç ve bakır plakaları Ni-P-PTFE hidrofobik kaplama ile yüzeylerini püskürtme yöntemiyle kaplayarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek ısı transfer artışı 0.635 µm kalınlığında Ni-P-PTFE malzeme ile yüzeyine hidrofobik özellik kazandırılmış bakır plakada P=722 kPa, T=166 °C parametre koşullarında 4.3 kat olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında uygulanan hidrofobik kaplama ile ıslanmama özelliğinin yanında aşınmaya karşı dirençli yüzeyler sağlandığını belirlemişlerdir.

Lv ve Zhang (2016) yapmış oldukları çalışmada süperhidrofobik yüzeylere sahip boruların sürtünme ve ısı transfer özelliklerini araştırmışlardır. Deneylerini 3000-11000 Reynolds aralığında, 4.8 ve 12 mm çaplardaki borularda ve 79.9° ve 158.5° temas açına sahip kaplama malzemeleri ile gerçekleştirmişlerdir. Süperhidrofobik özelliğe sahip yüzeylerde kaplanmamış yüzeylere göre %8.3-%17.8 oranlarında sürtünme değerlerinde düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Sürtünme katsayısının Reynolds sayısının artması ile azaldığını, boru çapının küçülmesi sonucunda ise arttığını ifade etmişlerdir. Tüm süperhidrofobik malzeme kaplanmış borularda Reynolds sayısının artması ile ısı transfer oranında artış tespit etmişlerdir.

Cai vd. (2016) çalışmalarında epoksi reçine üzerine R974 nanopartiküller ekleyerek süperhidrofobik yüzeyler elde etmişlerdir. Elde etmiş oldukları solüsyonu daldırma metodu ve sprey kaplama metodu kullanarak uygulamışlardır. Yapmış oldukları ölçümlerde temas aç değeri 154.7 ° olarak belirlemişlerdir. Sprey kaplama ile elde ettikleri yüzeyin daldırma metodu ile kaplanmış yüzeye göre daha pürüzlü olduğunu ifade etmişlerdir. Kaplanmamış yüzey ile süperhidrofobik kaplanmış

yüzeylerin sürtünme dirençlerini karşılaştırdıklarında hidrofobik etki ile sürtünme değerlerinde %12 azalma tespit etmişlerdir.

Literatür özetleri değerlendirildiğinde, hidrofobik malzemelerin contalı plakalı ısı değiştiricilerinde kullanımı ve ısı transferi verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Isı transferi açısından inceleme yapılan çalışmalarda ID sistemlerinde oldukça önemli olan basınç kayıpları, kirlenme faktörü gibi parametreler genellikle hesaplamalara ve incelemelere dahil edilmemiş, genel kabuller yapılmıştır. Isı değiştirici uygulamalarında hidrofobik yüzey kaplamaları kullanılarak, pompalama gücünün azaltılmasına ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar ise literatürde neredeyse bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalarda, hidrofobik yüzey kaplama malzeme çeşitliliği az olmakla birlikte genellikle kaplama malzemesi olarak piyasada hazır bulunan ürünlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada ise nano partikül katkılı yüksek hidrofobik özelliğe sahip yeni nesil bir yüzey kaplama çözümü sentezlenerek kullanılmıştır.

Bu tez çalışması ile günümüz teknolojisinde önemli bir yeri olan hidrofobik yüzey kaplamalarının, endüstride kullanımı oldukça yaygın olan contalı plakalı ısı değiştirici sistemlerindeki uygulama prosesleri, parametreleri ve sonuçları literatüre kazandırılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile literatürdeki en önemli eksikliklerden olan basınç kayıpları, kirlenme ve mekanik dayanım parametrelerinin etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca gerçekleştirilen çalışma ile ucuz ve kolay uygulanabilir, sürtünmeye katsayısı düşük ve aşınma direnci yüksek, katı yağlayıcı ve yüksek hidrofobik özelliğe sahip bir yüzey kaplama çözümü geliştirilerek araştırmacıların ve endüstrinin kullanımına sunulmuştur.

3. CONTALI PLAKALI ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ

Isı değıştirciler, aralarında sıcaklık farkı bulunan ve temas halindeki iki veya daha fazla akışkan veya katı parçacıklar ile akışkan arasında ısı geçişini sağlayan cihazlardır. Isı değıştircilerin temel amacı bir akışkanı ısıtmak veya soğutmak ya da her ikisini birlikte gerçekleştirmektir. Isı değıştirici (ID) sistemlerinde genellikle dışarıdan ısı veya iş alışverişı olmaz. Isı değıştirciler; termik santrallerde buhar jeneratörü, kimya endüstrisinde damıtıcı, demir çelik endüstrisinde yağ soğutucu, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı, elektronik cihazlarda soğutucu, taşıtlarda radyatör olarak çok çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Endüstride yaygın olarak kullanılan ısı değıştirciler kullanım şekline bağlı olarak değışik konstrüksiyonlarda, farklı akış ve akışkan özelliklerinde, farklı kapasitelerde, boyutlarda ve türlerde üretilmektedirler.

Isı değıştircilerin dizaynlarında en önemli iki parametre; sistem değışkenleri ve cihaz boyutlarıdır. Sistem değışkenlerinde ısı değıştircinin üstleneceği göreve göre farklılıklar oluşmaktadır. Boyutlandırma değışkenleri için de aynı durum geçerlidir. Isı değıştircinin kullanılacağı proses özellikleri; önceden belirlenmiş akışkan akış hızları, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları, ısı transfer hızı, sistemde oluşabilecek basınç kaybı değeri ve kirlenme, korozyon kaynaklı oluşabilecek yerel kayıp değeri belirlenmesine bağlıdır. Boyutlandırma ise, en yüksek ısı transferi ve en az basınç kaybının elde edilmesi için ısı değıştircisini oluşturan tüm parçaların boyutlarının belirlenmesini, yani uygulama sonucunda elde edilecek çıktının optimum düzeyde olabilmesi için gerekli tasarım parametre ve özelliklerinin belirlenmesi ile ilgilidir.

Isı değıştirciler çoğunlukla yapısal özelliklerine göre gruplandırılırlar. Bunlar; gövde borulu, plakalı (levhalı) ve kanatlı borulu ısı değıştircilerdir. Endüstriyel uygulamalarda plakalı ısı değıştirciler sağladıkları avantajlar ile en yaygın kullanılan ısı değıştirici türüdür. Plakalı ısı değıştircilerin diğer ısı değıştircilerine göre daha çok tercih edilmesinin en önemli nedeni sahip olduğu ısı transfer verimliliğidir. Isı değıştirici içerisindeki akışkanları ayıran plakaların çok düşük kalınlıklarda olması, farklı plaka yüzey geometrileri şekillerine sahip olması ısı transfer hızını artırır ve aktarım esnasında meydana gelebilecek ısı kayıplarını da önler. Plakalı ısı değıştirciler, sahip olduğu küçük boyut, kolay temizlenebilme, yüksek verimlilik, kompakt gövde yapısı gibi özellikler ile gıda sektörü gibi hijyenin önemli olduğu

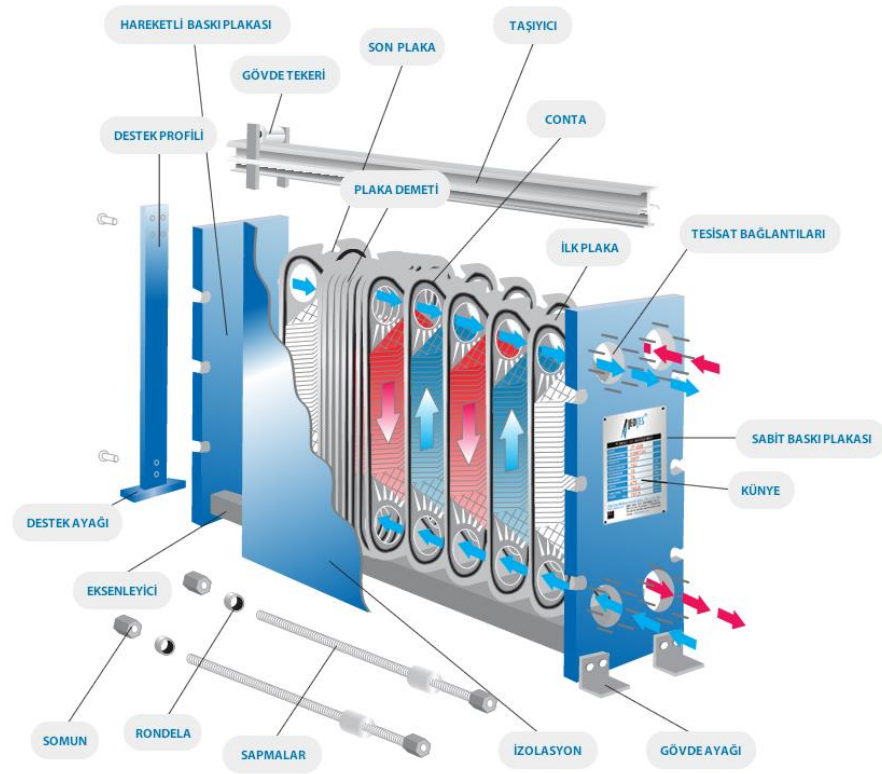
endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Plakalı ısı değiştiricilerin en önemli özelliği, kompakt bir yapıya sahip olması ve çalışma kapasitesinde oluşabilecek değişikliklere göre sistem içerisine kolaylıkla plaka eklenebilmesi veya çıkarılabilmesi sonucunda hızlı bir şekilde kapasitesinin değiştirilebilmesidir.

Plakalı ısı değiştiriciler, kompakt tasarımları ve mükemmel verimlilik değerlerine sahip olması nedeniyle gıda, demir çelik, denizcilik, kimya ve iklimlendirme sistemleri gibi birçok sektörde sıklıkla tercih edilmektedir. Plakalı ısı değiştiriciler verimli olmaları ile birlikte kullanıldığı sistemlerde korozyon, kirlenme ve tortu oluşumunu önler. Ayrıca boru hatlarında oluşabilecek yüksek basınca karşı genel sistemi korur. Çalıştıkları uygulamanın performansını artıran bu özellikleriyle plakalı ısı değiştiriciler, boru hatlarında basınç kırıcı veya devre kesici eleman olarak da endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Plakalı ısı değiştiriciler, akış kanallarını oluşturan çok düşük kalınlığa sahip plakalardan imal edilir. Soğuk ve sıcak akışkanlar, farklı yüzey yapısına sahip plakalar ile birbirinden ayrılır. Plakalar tek parça şeklinde presleme metodu ile üretilir. Plakalı ısı değiştiriciyi oluşturan plakaların temel görevi, içerisindeki akışkanların birbirine karışmasını önleyerek ısıtıcı akışkandan diğer akışkana ısı transferini gerçekleştirmektir. Plakaların sahip olduğu girintili yüzeyler akışkanın türbülanslı bir şekilde hareketini sağlamaktır. Oluşan yüksek türbülans akışkanlar arasındaki ısı dağılımını iyileştirir ve verimliliği artırır. Plakalı ısı değiştiriciler genellikle 250 °C ve altındaki sıcaklıklarda, 40 bar ve altındaki basınç değerlerinde çalışırlar. Plakalı ısı değiştiricilerin, contalı ve lehimli olmak üzere iki farklı çeşidi bulunmaktadır.

Contalı plakalı ısı değiştiriciler (CPID), iki ana gövde sacı arasına konumlandırılmış ve akışkanları ayıran girintili yüzeylere sahip bir grup ince plakadan oluşmaktadır. Kalınlığı oldukça ince bu plakalar arasında akışkanları yönlendiren özel geometrili contalar vardır. Plaka yüzeyleri arasındaki boşluklardan akışkanlar akar ve ısı geçişi tüm plaka yüzeyinde meydana gelir. Plakalı ısı değiştiricilerde kullanılan farklı yüzey geometrilerinde, farklı açı ve boyutlarda plaka modelleri bulunmaktadır. Plakaların alt ve üst kısımlarında yer alan delikler soğuk ve sıcak akışkanların geçişini sağlar. Bu deliklerin ve plakaların kenarında bulunan contalar ID içerisindeki akışkanların akışını yönlendirir ve karışmalarını önler.

CPID'nin diğer ısı değiştirici tiplerine göre birçok avantajı bulunmaktadır. Plakalı ısı değiştiricinin veriminin düşmesini engellemek için zaman zaman temizlenmeleri gerekmektedir. CPID'nin en büyük avantajlarından birisi de hızlı bir şekilde sökülüp temizlenerek tekrar devreye alınabilmesidir. ID'nin tüm elamanları temizlik ve bakım amacıyla kolaylıkla sökülüp takılabilmektedir. Gövde borulu ısı değiştiricilerde gerçekleşen kirlenmeye oranla % 25 oranında daha düşük kirlenme seviyesine sahiptirler. Bu tip ısı değiştiricilerin temizlenmesi kolay olduğu için gıda ve ilaç sanayisinde çoğunlukla kullanılırlar. CPID'nin ısı kapasitesi ve performansı ısı değiştiricisine plaka eklenip çıkarılarak kolaylıkla değiştirilebilir. Sahip olduğu oluklu ve değişik açılardaki plaka çeşitleri, türbülans oluşumunu hızlandırarak yüksek performans sağlar. Plaka malzemesi aşınıp delinmediği sürece, akışkanlar arasında sızıntı meydana gelmez. Contalar, plakalar arasında yer aldığından, oluşabilecek bir sızıntı ID dış yüzeyine doğru gerçekleşir ve sistem herhangi bir zarar görmez. CPID'nin ağırlığı, aynı kapasitedeki gövde borulu ısı değiştiricinin toplam ağırlığının yaklaşık 1/6'sına denk gelmektedir (Rafferty ve Culver, 1998). Şekil 3.1'de contalı plakalı ısı değiştiricisini oluşturan bileşenler görülmektedir.



Şekil 3.1. Contalı plakalı ısı değiştirici bileşenleri (JeoTes)

Contalı plakalı ısı değıştirciler aşağıdaki parçalardan oluşmaktadır:

- Üzerinde giriş-çıkış bağılantıları ve bilgi etiketi yer alan ön gövde
- Plakaları sıkmak amacıyla kullanılan alt ve üst saplamalar
- Akışkanın gövde sacı ile temasını önleyen birinci plaka
- Akışkan hareketi vasıtasıyla ısı transferini gerçekleştiren plakalar ve sızıntı engelleyici contalar
- Akışkanın arka gövde ile temasını önleyen son plaka
- Üzerinde montaj, onarım bilgileri bulunan ve saplama milleri üzerinde hareket edebilen arka gövde
- Ana gövdeyi taşıyan ve plakaların üretici firmanın belirlediğı sıklıkta kalmasını sağılayan saplama ve rondelalar

Contalı plakalı ısı değıştircinin performansı genellikle plaka türü, plaka yüzeyindeki kanal yapısı, plaka en/boy ölçüsü ve kullanılan akışkan türü gibi birçok değışkene bağılı olmasına karşın standart bir CPID'ne ait bazı standart bilgiler, performans özellikleri ve genel ölçüler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Contalı plakalı ısı değıştircilerin temel özellikleri (Kakac vd., 2002)

Çalışma		Plakalar		Performans	
Basınç	0.1 - 3.0 MPa	Kalınlık	0.5 – 1.2 mm	Sıcaklık yaklaşımı	En düşük 1 °C
Sıcaklık	-40 - 260 °C	Boyut	0.03 – 3.6 m ²	Isı transfer verimi	%93'e kadar
Maksimum geçiş hızı (sıvı)	6 m/s	Genişlik	70 – 1200 mm	Isı transfer katsayısı (sıvı-sıvı)	3000 – 8000 W/m ² .K
Kanal akış hızı	0.05 – 12.5 m ³ /s	Uzunluk	0.4 – 5 m	İdeal basınç düşümü	30 kPa (her bir NTU için)

3.1. Contalı Plakalı Isı Değıştircilerinde Kullanılan Malzemelerin Önemi

Diğer ısı değıştircilerinde olduğı gibi CPID için de malzeme seçimi en çok dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. CPID'nin istenilen ısı performansta uzun süre problemsiz bir şekilde çalışmasını sağılayan etkenlerden en önemlisi ID parçalarının malzeme özellikleri ve kalitesidir. Malzeme seçimi, proseste kullanılan akışkanların türü ve ısı transferi modeli gibi uygulama özelliklerine de bağılıdır. CPID

performansını ve ömrünü etkileyen en önemli bileşenler; oluklu plakalar, plaka geometrileri, contalar ve dış (basınç ve çerçeve) plakalar olarak söylenebilir.

3.1.1. Plakalar ve Özellikleri

Isı değıştiricilerde kullanılan değışik yüzey yapısına sahip plakalar, soğuk şekillendirmeye uygun herhangi bir metal veya alaşım türünden imal edilebilir. Paslanmaz çelik, titanyum, nikel, alüminyum ve titanyum bu malzeme türlerine örnek verilebilir. Plaka malzemesinin seçimi kullanılacak akışkan türüne ve istenilen ısı transfer modeline göre belirlenir. Isıl verimlilik optimizasyonu veya üretici firma teknolojileri gibi bazı parametreler de etkilidir. Sistemde dolaşımı sağlanacak akışkan türüne ve belirlenen en yüksek çalışma mukavemetine göre plaka malzemesi tercihi oldukça önemlidir. CPID sistemlerinde kullanılan plakalar ve özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen plaka malzeme türü ise 1.440 /AISI 316’dır.

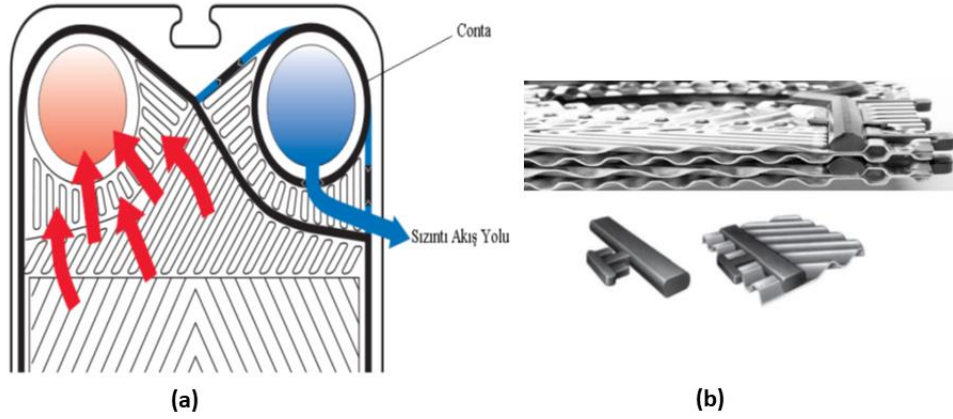
Kullanılan plaka malzemesinin, ortamın fiziksel şartlarına dayanıklı olması, çalışma sıcaklık değerleri ile uyumlu olması ve akışkan tarafından aşınmayacak mukavemette olması gerekmektedir. Diğer önemli parametre ise malzemenin ısıl iletkenlik değeridir. Isı iletim katsayısı ısı transferini sınırlayan çok önemli bir parametredir ve ısı değıştiricinin maliyetini büyük ölçüde etkilemektedir. Isıl iletim katsayısı düştükçe, gerekli ısıl kapasitenin sağlanması için gereken ısı transfer yüzeyi artmakta, bunun sonucunda ID ağırlığının ve boyutlarının büyümesine sebep olarak işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır.

Tablo 3.2. Contalı plakalı ısı değıştiricilerin plaka malzeme özellikleri (Shah ve Sekulic, 2003)

Malzeme	Isı İletim Katsayısı (W/m.K)
AISI 304 Paslanmaz Çelik	14.9
AISI 316 Paslanmaz Çelik	16.3
254 SMO Alaşımı Paslanmaz Çelik	13
Nikel	90
C-276 Nikel	10.6
Titanyum	21.9

3.1.2. Contalar ve Özellikleri

Contalı plakalı ısı değıştiricilerin performansı, kullanılan contaların tipi ve malzeme özellikleri ile de ilişkilidir. Contalar, standart olarak tek parça şeklinde kalıplanmış malzemelerdir ve malzeme özellikleri, akışkan türü, çalışma sıcaklık aralığı ve basınç değeri göz önünde bulundurularak seçilir. Contalar Şekil 3.2’de gösterildiği gibi girintili plaka yüzeyi kenarındaki kanallara oturarak iki plaka arası boşluğu doldurarak plaka içi/dışı sıvı sızıntısını engeller. Contaların sahip oldukları geometrik tasarımlar, contanın üst yüzeylerinin plakalar arasında tamamen sıkışarak plakalarla bütünlük oluşturmalarını sağlar. Gelişen teknoloji ile contalar, plaka yüzeylerine herhangi bir yapıştırıcı malzeme kullanmadan klipsli bir şekilde montaj edilebilmektedir.



Şekil 3.2. Contanın plaka üzerinde akış yolu (a), montajı (b) (Genç, 2014; Sundén ve Manglik, 2007)

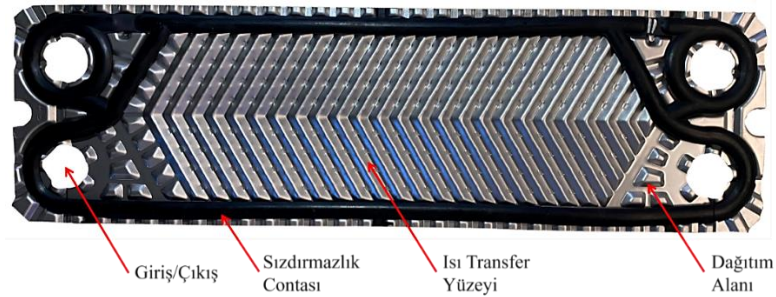
Contalar genel olarak kauçuk ve polimerize formlar gibi çeşitli özellikte plastik ve kolay şekil alabilir malzemelerden imal edilir. CPID sistemlerinde kullanılan conta malzemeleri ve genel özellikleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Contalı plakalı ısı değıştiricilerin conta malzeme özellikleri (Shah ve Sekulic, 2003)

Malzeme	Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)
Lastik	70
Neoprin (Sentetik Kauçuk)	70
Nitril	135
Silikon	180
Etilen - Propilen Kauçuk (EPDM)	155
Flor Elastomer	150
Florlu Lastik	180

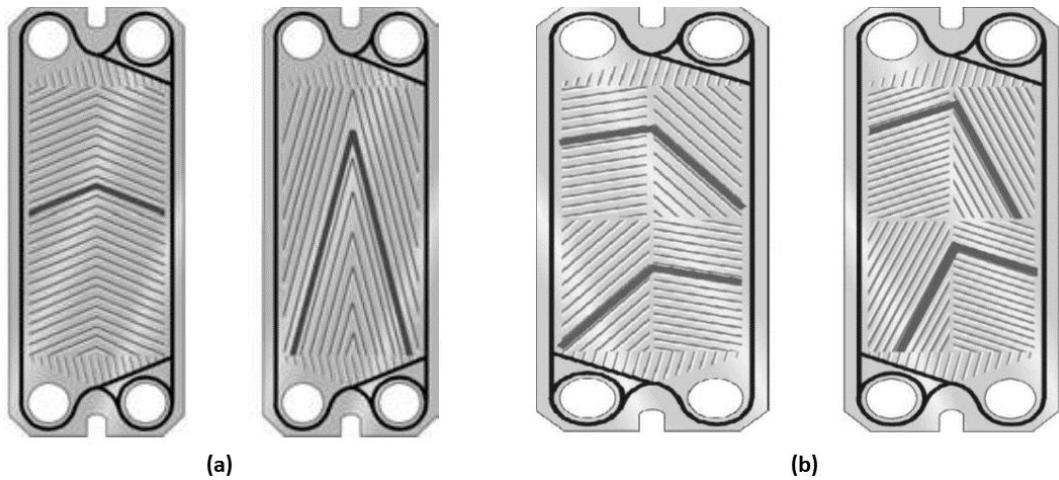
3.2. Contalı Plakalı Isı Değiştiricilerinde Kullanılan Plaka Geometrileri

Plaka yüzeyindeki kıvrımlı veya oluklu yapı, sac metal üzerine güçlü pres makinaları ile bastırılarak veya bombelenerek oluşturulur. ID plakalarının üzerinde, dört adet port noktası, dağıtım kanalları ve akışkan hareketi ile ısı transferinin gerçekleştiğı akışkan kanalları bulunmaktadır. Plaka yüzeyindeki port noktaları ikili grup şeklinde kullanılmaktadır. Kullanılan çift port noktaları birbirlerine çapraz bağlantılı veya proses durumuna göre birbirlerine paralel bağlantılı da olabilir. Portlar, plaka grupları arasından akışkanın diğerk plakalara aktarımını sağlar. Plaka yüzeyinde bulunan dağıtım alanı, akışkanın giriş kısmından ısı transferinin gerçekleşeceği akışkan kanal yüzeyine gelene kadar akışkanın yanlış dağılımını önleyerek homojen yapıda dağılmasını sağlar. Şekil 3.3'te CPID plakasına ait genel bilgiler verilmiştir.



Şekil 3.3. Isı değıştirici plakası ve genel bilgiler

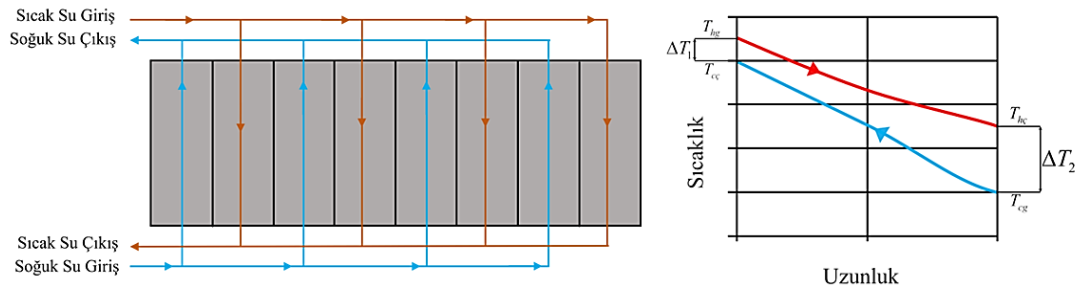
Günümüzde endüstride kullanılan plakalar genel olarak balık kılçığı modelinde üretilmektedir. Standart balık kılçığı modeli plakalar ise iki farklı açıda imal edilmektedir. Bunlar; akışa karşı gösterdiği direnç miktarına göre yüksek ve alçak theta plaka çeşitleridir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Plaka çeşitleri a) İki ok balık kılçığı b) Asimetrik yüksek ve alçak theta plakalar

3.3. Paralel ve Karşıt Akışlı Contalı Plakalı Isı Değiştiriciler

Isı değiştiricilerinde ısı transferi, akış yapısından bağımsız olarak iletim ve taşınım ile gerçekleşmektedir. Sıcak akışkandan ısı aktarımı taşınım vasıtasıyla gerçekleşirken, plaka/duvar boyunca iletimle ısı aktarılır. Sonrasında taşınım ile ısı soğuk olan diğer akışkana aktarılmaktadır. Bu aktarım CPID dizilimi boyunca devam etmektedir. Aktarım sürecinde akışkanların sıcaklıkları genellikle sabit olmamaktadır. Sıcak ve soğuk akışkanların ID içindeki akış dağılımı Şekil 3.5 ve Şekil 3.6.'da verilmiştir. Isı değiştiricide gerçekleşen ısı transfer oranı, sıcak ve soğuk akışkanlar arasındaki sıcaklık farkının değişiminden dolayı akış yolu boyunca değişkenlik göstermektedir. CPID sistemlerinde genellikle aynı ve karşıt yönlü akış olarak iki çeşit akış yapısı vardır. Karşıt akış sistemi, ısı transferi bakımından değerlendirildiğinde paralel akış yapısına göre daha yüksek performansa sahiptir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi iki akışkan birlikte aynı eksendeki alt-üst portlardan ID'sine girmekte ve plakalar arasından birbirlerine paralel olarak zıt yönde akmakta ve diğer portlardan alt-üst seviyede tekrar ısı değiştiriciden çıkmaktadır.



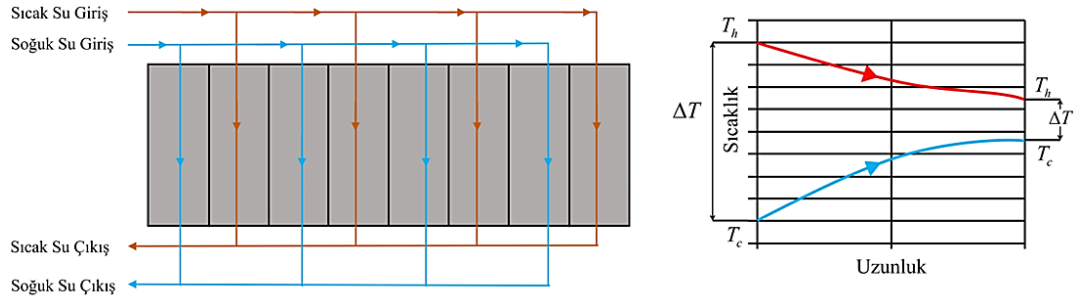
Şekil 3.5. Karşıt akışlı ısı değiştiricide akışkanın akış yönü ve sıcaklık dağılımı

Şekil 3.6'da ise iki akışkan aynı hizadaki portlardan ısı değiştiriciye girmekte ve plakalar arasından birbirleriyle aynı yönde paralel olarak akmakta, diğer portlardan aynı hizada ID'den çıkmaktadır. Paralel akışlı ısı değiştiricinin kullanıldığı sistemlerin sıcaklık dağılım şekline bağlı olarak iki dezavantajı vardır. Bunlar;

- Contalı plakalı ısı değiştiricilerin giriş portunda soğuk ve sıcak akışkan arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle ID gövde duvarlarında anlık termal gerilmelerin meydana gelmesi ve buna bağlı olarak da plaka malzemesinin hasar alması ve kullanılamaz duruma gelmesi.

- Contalı plakalı ısı değiştiricilerde çıkış portundaki soğuk akışkan sıcaklığı, her zaman sıcak akışkan sıcaklığından azdır. Bu durum yüksek verimlilik ve performans

gerektiren proseslerde kullanılamamasına sebep olmaktadır. Paralel akış düzeni genellikle sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıklarının birbirine yakın olması istenilen endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir.



Şekil 3.6. Paralel akışlı ısı değiştiricide akışkanın akış yönü ve sıcaklık dağılımı

3.4. Contalı Plakalı Isı Değiştiricilerin Avantajları ve Dezavantajları

CPID, tasarımlarının sürekli geliştirilip performanslarının artırılması sayesinde birçok işletme tarafından yaygın olarak kullanılmakta olmasına rağmen bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptirler.

Contalı plakalı ısı değiştiricilerin avantajlarından bazıları şu şekildedir;

- Plakalarının kolay bir şekilde sökülüp takılabilmesi sebebiyle contalı plakalı ısı değiştiricilerin kurulumu, bakım ve onarımı, temizliği oldukça kolaydır.
- 1 °C gibi çok düşük sıcaklık farklarına erişebilmektedirler. Gövde borulu ısı değiştiricilerde bu değerler 5 °C ile 10 °C aralığındadır.
- Esnek tasarıma ve gövde yapısına sahiptirler. İstenilen farklı kapasite değerlerine plaka eklenerek veya çıkartılarak ulaşılabilir.
- Yüksek viskoziteli akışkanlar ile çalışabilirler.
- Yüksek türbülans ve hızlı karışma özellikleri sayesinde kirlenme ve plaka oluklarının tıkanma olasılıkları oldukça düşüktür.
- Aynı ısı kapasite değeri için ilk yatırım maliyetleri daha düşüktür.
- Kompakt yapıları sayesinde gövde ağırlıkları çok düşüktür.
- Akış yapısının dağılıp yeniden birleşmesi ve türbülans oluşumu sayesinde oldukça yüksek ısı transfer oranları elde edilebilir.
- Contalı plakalı ısı değiştirici yapısında ısıya bağlı olarak akışkanların yapısını bozabilecek sıcak veya soğuk noktalar yoktur.

- Akışın neden olduğu titreşimler, gürültü, portlarda sıkışma gibi sorunlar contalı plakalı ısı değiştiricilerinde oluşmamaktadır.
- Sadece plakaların kenarları dış ortama açık olduğundan dolayı kayıplar ihmal edilebilir ve yalıtım işlemi gerektirmezler.
- Değişik yüzey geometrilerine sahip plakalar aynı ısı değiştiriciye takılabilir ve farklı akış düzeni yapısında kullanılabilirler.

Contalı plakalı ısı değiştiricilerin dezavantajları ise şu şekildedir;

- Çok yüksek basınç değerlerine dayanaklı değildirler. Çalışma basıncı 40 bar ve üzerinde olan uygulamalarda tercih edilmemelidir.
- Kullanılan conta malzemesinin termal özelliklerine bağlı olarak en yüksek çalışma sıcaklık değeri 250 °C ile sınırlıdır. Bu sebeple conta malzemesi, contalı plakalı ısı değiştirici performansını ve çalışma şartlarını etkilemesi durumundan oldukça önemli bir parametredir.
- ID plakaları üzerinde aşınma veya kavitasyon sonucu meydana gelebilecek küçük boyutlu deliklerin tespit edilmesi oldukça zordur.
- Aynı değerdeki akışkan hızlarında CPID basınç düşüşü gövde boruluya kıyasla daha yüksektir. Fakat contalı plakalı ısı değiştiricide portlardaki akışkanın hızı düşük, plaka geometrilerinin küçük ve ısı transfer miktarının yüksek olması basınç kayıplarını telafi etmektedir.

3.5. Contalı Plakalı Isı Değiştirici Tasarımı ve Seçim Kriterleri

CPID'nin tasarımı ve performanslarını tespit etmek için kullanılan denklemler ve bağıntılar, kullanıldığı sistemlere göre değişkenlik göstermesi nedeniyle genellikle üretici firmalar tarafından belirlenmektedir. Fakat literatürde yer alan, ID performansının belirlenmesi için kullanılan tasarım parametrelerine göre bazı durumlarda seçim yapılabilmektedir. Bir contalı plakalı ısı değiştirici seçimi yapılırken aşağıda verilen kriterler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Gerekli kapasite hesabı,
- Gerekli debi miktarı
- Birinci ve ikinci devre sıcaklıkları,
- Sistemde öngörülen basınç kayıpları,
- Plaka modelinin ve özelliklerinin belirlenmesi,

- Conta modelinin ve özelliklerinin belirlenmesi,
- Port bağlantı şekli ve ölçüleri,
- Basınç düşüşü ve yerel kayıplar
- Tasarım ve çalışma güvenliği

3.5.1. Kapasitenin Belirlenmesi

CPID bir bölgede bulunan ısı enerjisi aktarabileceğinden, sistemi oluşturan tank, soğutma sistemi, sirkülasyon pompası gibi cihazların sistemin kapasitesini karşılayabilecek şekilde seçilmesi gerekmektedir. Yüksek ve değişken kapasitelerin bulunduğu uygulamalarda, sistemin toplam kapasitesi belli miktarlarda bölünerek ek kapasite sağlanıp birden fazla ısı değiştiricinin uygulama içerisinde kullanılmasıyla güvenilir bir sistem oluşturulmalıdır.

3.5.2. Debi İhtiyacı

Uygulamalarda CPID'nin karşılayabileceği kapasiteyi sağlayan primer ve sekonder devrelerde kullanılan akışkan hareketini sağlayan sirkülasyon pompalarının debi değerlerinden seçim yapılabilir. Bu seçim değerleri, devrelerin mevcut sıcaklıkları bilindiğinde durumlarda sistem için gerekli kapasitenin bulunmasına imkan verir.

3.5.3. Çalışma Sıcaklıkları

ID sistemlerinde sıcak akışkanın ısı değiştiriciden çıkış sıcaklık değeri, soğuk akışkanın giriş sıcaklık değerinden daha düşük olamaz. Soğuk akışkan, sıcak akışkanın giriş sıcaklık değerinden daha fazla sıcaklığa ulaşamaz. CPID primer ve sekonder devre birbirine en fazla 1 °C sıcaklığa kadar yaklaşabilir (Shah ve Sekulic, 2003).

3.5.4. Basınç Kayıpları

CPID tasarımında ısı değiştiriciyi etkileyen en önemli parametrelerden birisi de akış devrelerinde meydana gelen basınç kayıplarıdır. Tüm akışkan ve akış durumları için basınç ile ilgili hesaplamaların yapılması gereklidir. ID plaka yüzeyindeki girintiler, akışkan hareketine karşı bir direnç meydana getireceğinden, devrelerde basınç kayıpları meydana gelecektir.

Basınç düşüşü, akış tipi (laminer ya da türbülanslı), akışkanın türü ve plaka geometrisi gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Aynı tip CPID kullanıldığı farklı uygulamalarda benzer plaka sayısında farklı basınç kayıpları meydana gelmektedir. Buna göre ısı değiştirici sistemlerinde basınç kayıpları ne kadar önlenbilirse daha az

plaka sayısı ile aynı kapasite sağlanacak ve işletme maliyetlerinde önemli ölçüde kazanımlar elde edilecektir.

ID uygulamalarında, sistem içerisinde akışkan hareketi için pompa gerektiğinden devrelerde kullanılacak pompaların kapasitelerinin belirlenmesinde CPID içerisinde meydana gelen basınç kayıpları önemli rol oynamaktadır. Basınç kaybının yüksek olması durumunda daha büyük kapasitede pompa gerekecektir. Bunun sonucunda hem sistem bileşenlerinin maliyetleri artacak hem de daha yüksek enerji tüketimi ortaya çıkacaktır.

3.5.5. Plaka Tipinin Belirlenmesi

Isı değıştiricide gerçekleşen ısı transferinin akışkanlardan en verimli şekilde sağlanmasında en önemli parametreler plaka malzemesi ve plaka kalınlığıdır. Piyasada farklı uygulama parametrelerine göre plaka çeşitleri yer almaktadır. CPID dizaynı gerçekleştirilirken plaka seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta plakanın mukavemetini etkileyecek malzemeye ve sistemi en yüksek performansa ulaştıracak plaka geometri modeline karar vermektir.

3.5.6. Conta Tipinin Belirlenmesi

Contalı plakalı ısı değıştiricilerin en önemli avantajlarından birisi de sıcak ve soğuk akışkanların birbirine karışmadan ısı transferinin gerçekleştirilmesidir. Bu işlem contalar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu sistemlerde conta kaynaklı karışımlar veya sızıntılar ile çok karşılaşılsa da sistem performansı açısından conta malzemesinin sisteme uygun olarak seçimi oldukça önemlidir. Bunun için dikkat edilmesi gereken kullanılan contanın basına ve sıcaklığa dayanım özellikleridir. Ayrıca kullanılan akışkanın yapısına uygun conta seçmekte son derece önemlidir (Kakaç vd., 2013).

3.6. Isı Transferine ve Performansa Etki Eden Parametreler

Contalı plakalı ısı değıştiricilerde enerji tasarrufu, ısı transferinin artırılarak etkin bir şekilde kullanımı ile sağlanabilir. Enerjiye erişimin zorlaştığı, maliyetlerin arttığı ve kaynaklarının tükendiğı günümüzde ısı değıştirici sistemlerinde ısı transferinin artırılması daha çok önem kazanmaktadır. ID performansını ve verimini artırmak için, ID boyutlarını küçültmek, ısı transferi oranını iyileştirmek, ısı değıştirici içerisindeki akışkanların ortalama logaritmik sıcaklık farkını azaltmak gerekmektedir. Bunun sonucunda sistemin toplam etkinliğini arttırmak amaçlanmaktadır (Kakaç vd., 2013). ID sistemlerinde ısı transferi etkileyen en önemli parametreler ise şunlardır;

- Akış tipi
- Akışkan özelliği
- Plaka yapısı
- Plaka dizilimi
- Plaka yüzeylerinde gerçekleşen kirlenmeler
- Akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı
- Sistemde meydana gelen basınç kayıpları
- Korozyon etkisi

3.6.1. Akış Tipi

Isı değiştirici uygulamalarında, farklı ısı transfer yüzeyleri ve akış hızları kullanıldığından değişik akış türleri ile karşılaşılabilir. Akışkan iki plaka arasından akarken, akışkan hızına bağlı olarak laminer veya türbülanslı akış yapılarından birisi meydana gelebilir. Laminer veya türbülanslı akış şartlarında, Reynolds değeri basınç kayıplarıyla doğru orantılı olarak değişim gösterir (Kumar vd., 2015).

3.6.2. Akışkanın Özelliği

CPID sistemlerinde kullanılan akışkanların fiziksel özellikleri oldukça önemlidir. Isı transferi ve basınç düşüşü hesaplamalarında kullanılan parametreler :

- Yoğunluk (ρ)
- Özgül ısı (C_p)
- Termal iletkenlik (k)
- Viskozite (μ)

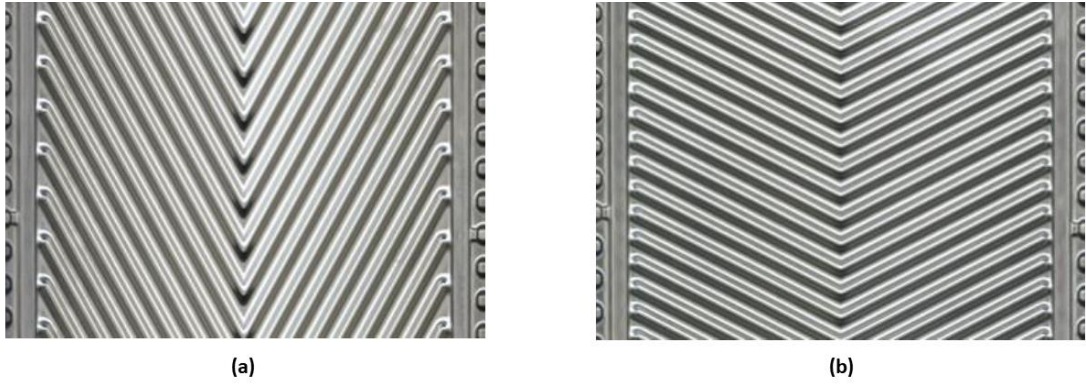
CPID’de kullanılan transfer akışkanlarının önerilen çalışma sıcaklığı ile prosesin sıcaklık koşullarının uyuşması sistemin performansı ve güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır.

3.6.3. Plaka Yapısı

CPID, plakalarla sağlanan akış şekilleri genel olarak simetrik ya da asimetrik şekilde farklı bir yapıya sahiptirler. Plakalar ile sağlanan özel akış yapısı, akışkanı yüksek türbülansa geçirerek, ısı aktarımının daha verimli gerçekleşmesine olanak sağlar. Plakaların geometrik yapısı aynı zamanda plakaların mukavemetini artırır ve kullanım ömrünü uzatır. Bu nedenle, ID üreticileri daha yüksek performans elde etmek için plaka yüzey tasarımları üzerine büyük Ar-Ge çalışmaları yapmaktadırlar. Dar

kesitli plaka aralığı ve girintili tasarım sayesinde, kirlenme etkilerini ve tortu birikimini engelleyen güçlü türbülans oluşumu ile birlikte daha yüksek ısı transferi gerçekleştirilebilir. Yüksek ısı transferi ise daha küçük ısı transfer alanına imkan verir. Yani uygulama proseslerinde gerekli olan plakadan daha az plaka kullanılmasını, boyutların küçültülmesini ve maliyetlerinin azaltılmasını sağlar.

ID plakalarının yüzeylerinde bulunan girintilerin plaka merkeziyle yaptığı dikey açı değerine göre türbülans değeri ve ısı transfer miktarı değişir. Plakalardaki Chevron (β) açısı arttığında, daha yüksek ısı transferi elde edilir fakat sistemdeki basınç kayıpları da artar. Açının düşmesi ise tam tersi sonuçların oluşmasına neden olur. Bu durumda ise türbülanslı yapı ısı transferine karşı daha düşük oranlarda direnç göstermektedir. Yüksek ısıl iletkenlikte kalınlığı oldukça düşük bir plaka kullanıldığı durumda ise yüksek ısı transfer katsayısı elde edilir (Khan vd., 2010). Şekil 3.7’de farklı kanal açılara ve farklı dizilişlere sahip ID plakaları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Chevron açılı plakalar a) Düşük açı b) Yüksek açı

3.6.4. Kirlenme

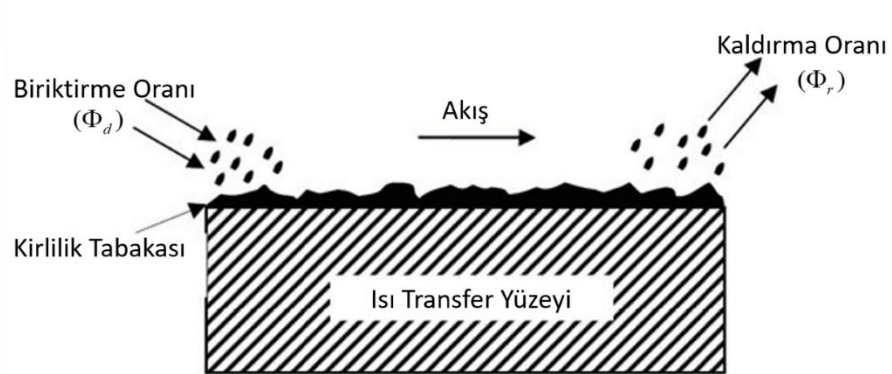
Contalı plakalı ısı değiştiricilerde kirlenme oluşumu, plaka yüzeylerinde istenmeyen bazı partiküllerin birikmesidir ve ısı değiştirici verimliliği açısından oldukça zararlıdır. Kirlenme, ısı aktarımı yapılan plaka yüzeyinde meydana geldiğinden ısı transferini olumsuz etkilemesinden dolayı ID sistemlerinde istenmeyen bir durumdur. Şekil 3.8’de ısı değiştirici ve plaka yüzeylerinde meydana gelen kirlenme ve tortu oluşumu örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Contalı plakalı ısı değıştircilerinde kirlenme

Plakalardaki yüzey tasarımı iyi bir karışım sağlama ve türbülans oluşturma eğilimindedir ve bu sayede CPID sistemlerinde kirlenmenin meydana gelme olasılığı düşüktür. CPID’de ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı incelediğinde, akışkanın devre portundan girdikten sonra en yüksek ısı transferini gerçekleştirmek amacıyla tüm plaka yüzeyini kullanması gerekmektedir. Kirlenmenin etkisi ile plakaların tüm yüzeyleri kullanılamadığından akışkan plakanın en uç noktalarına taşıyan dağılım alanında etkin bir dağılım gerçekleşmez ve sistemde basınç kayıpları meydana gelir.

Isı değıştirici plaka yüzeylerinde meydana gelen kirlenme sonucunda yüzeyde oluşan kirlilik tabakası ve gözenekli yapının akış ve ısı transferi üzerine etkisi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



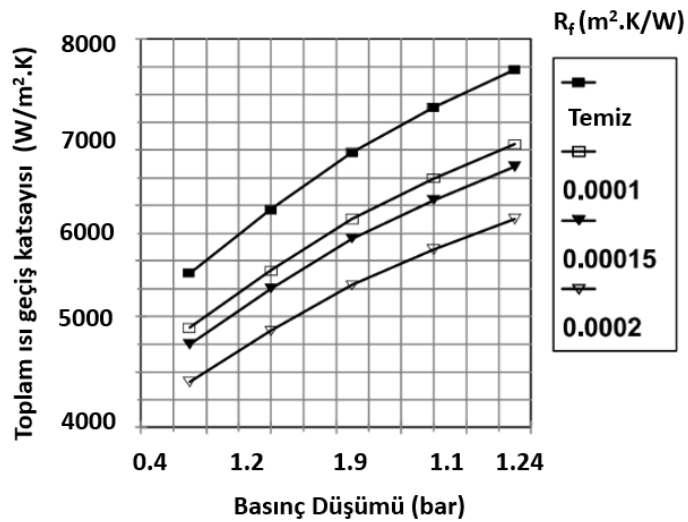
Şekil 3.9. Kirlenme durumu ve ısı transferi (Awad, 2011)

Contalı plakalı ısı değıştircileri için sistem içerisinde kullanılan akışkan türüne göre kirlenme direnci (R_f) değeri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. CPID’de kullanılan akışkan türüne göre kirlenme dirençleri (Tay ve Yang, 2006)

Akışkan	Kirlenme Direnci (m^2K/kW)
Minerali giderilmiş veya damıtılmış su	0.009
Yumuşak su	0.017
Sert su	0.043
Kıyı deniz suyu	0.043
Okyanus deniz suyu	0.026
Nehir suyu	0.043
Yağlama yağı	0.017-0.043
Bitkisel yağlar	0.014-0.052
Organik çözücüler	0.009-0.026
Buhar	0.009
Genel proses akışkanları	0.09-0.052

Kirlenmenin ısı değiştirici performansına etkileri, sistemdeki basınç düşüş değişimleri incelenerek belirlenebilir. Kirlenme oluşumu ile pompa çalışma eğrisi sol kısma kayarak çalışma performansı değişecek, gerçek debi azalacak buna karşılık sistem eğrisi ise önemli ölçüde artacaktır. Sistem içerisinde akış debisi azalırsa, ısı transfer katsayısı da azalacaktır (Awad, 2011). Şekil 3.10’da verilen grafik toplam ısı geçiş katsayısı ile basınç düşümündeki değişimi farklı koşullardaki kirlilik faktörlerine göre göstermektedir. Şekilden anlaşılabacağı gibi, ısı transfer katsayısı arttıkça sistemdeki basınç düşüşü de artmaktadır. Bu nedenle ID tasarımında ve seçiminde, istenilen termal performans ile belirli oranda basınç düşüşü değeri için bir optimizasyon yapılması sistemin performansı açısından büyük önem taşımaktadır.



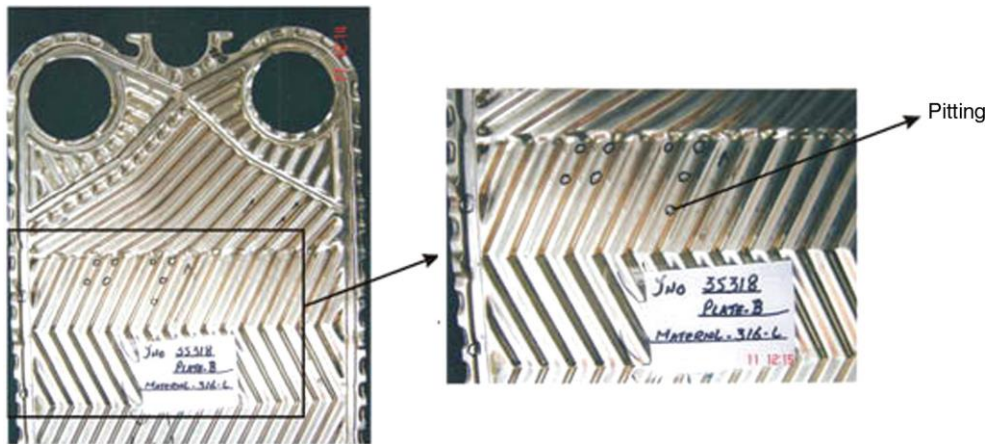
Şekil 3.10. Basınç kaybı (ΔP), kirlilik faktörü (R_f) ve toplam ısı transfer katsayısı (U) ilişkisi (Rafferty ve Culver, 1998)

Plakalardaki kirlenme oluşumu sebebiyle ısı değıştiricilerde meydana gelen ani kesit daralmalarından kaynaklı sistemde oluşan basınç kayıpları, sistemde yer alan akışkan hareketini sağlayan pompaların daha yüksek güçlerde çalışarak elektrik tüketimlerinin artmasına sebep olacaktır. Günümüzde enerjiye olan ihtiyacın ve enerji maliyetlerinin oldukça yüksek olması sebebiyle ısı değıştirici sistemlerde kirlenmenin etkileri dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden biridir.

3.6.5. Korozyon

Contalı plakalı ısı değıştiricilerde plaka ömrüne etkileyen en önemli parametrelerden birisi de korozyondur. ID plakalarının bulunduğu ortam ile çevre arasındaki etkileşim nedeniyle bozulması korozyon olarak ifade edilebilir. Korozyon, plaka malzemenin metalurjik ve yapısal faktörlerinden ve bununda yanında bulunduğu çevresel faktörlerden etkilenmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda ısı değıştiricilerde en yaygın olarak karşılaşılan korozyon çeşidi çatlak korozyonudur. Isı değıştirici plakalarının şekillendirmesi esnasında soğuk presleme işlemi kullanıldığından kavisli alanlar düz alanlara göre daha fazla gerilmelere sebep olur. Bu nedenle gerilmelerin olduğu bölgelerde çatlaklar veya delikler oluşmaktadır (Şekil 3.11). Ayrıca CPID’de akış başlangıçlarında veya ara kesintilerde koç darbesi olarak adlandırılan yüksek ani şok dalgaları meydana gelmektedir. Oluşan bu şok dalgaları plakalarda korozyona sebebiyet vermektedir. Plaka yüzeylerinde meydana gelen bu çatlak noktaları çok küçük olduğundan görünmesi oldukça zordur ve genellikle plakalar boyanıp mor ışık altında bakılarak tespit işlemleri yapılmaktadır.



Şekil 3.11. Plaka yüzeyinde korozyon oluşumu sonucu meydana gelen çatlaklar (Faes vd., 2019)

Korozyon ile sıcaklık ilişkisi incelendiğinde, akışkanda gerçekleşen faz değişimi ve yapısındaki maddelerde çözünme nedeniyle ID plakalarının üzerinde korozyon yapılarının meydana gelmesinde hızlandırıcı ya da yavaşlatıcı etki gösterebilir. Isı transferi gerçekleşirken, LMTD değerinin zamana göre değişimi ile ısı transferinde bölgeler arasında değişik sıcaklık değerleri meydana gelmesine, bunun sonucunda da korozyon yapılarının çeşitli fakat aynı anda oluşmasına sebep olur.

CPID sistemlerinde korozyon sonucunda arızaların meydana gelmesi sıklıkla karşılaşılan bir durumdur ve genellikle yüksek bakım/onarım maliyetlerine sebep olmaktadır. NACE International firmasının yaptığı araştırmada, yıllık dünya genelindeki korozyon maliyetinin 2.5 trilyon dolar olarak tespit edilmiştir (Faes vd., 2019). İfade edilen yüksek maliyetler, korozyonun sebep olduğu maliyetlerin toplamıdır ve işletmeler için hem para hem de iş kaybına neden olmaktadır. Ortaya çıkan bu yüksek maliyetler için farklı teknolojiler, kaplama uygulamaları geliştirilerek maliyetlerin en aza indirilmesi ve ömür artışı sağlanarak fabrika dur/kalk işlemlerinin kaldırılması sağlanabilir.

3.7. Isı Değiştirici Sistemlerinde Bakım Maliyetleri

Endüstriyel uygulamalarda CPID neredeyse tüm sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sahip olduğu temizlik ve bakım kolaylığı nedeniyle özellikle kimya, demir çelik, petrol ve süt endüstrilerinde tercih edilmektedir. Fakat ısı değiştiricilerinde kirlilik ve korozyona bağlı olarak ortaya çıkan bakım ve onarım ihtiyaçları firmalar için ek maliyetler yaratmaktadır (Tablo 3.5). ID sistemlerinde sermaye maliyeti, enerji maliyeti, bakım maliyeti, proseslerin durması ve üretim kaybı gibi birçok işletme gideri ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3.5. Contalı plakalı ısı değiştiricilerde yıllık kirlenme maliyetleri (Tay ve Yang, 2006)

Ülke	Kirlenme Maliyeti (milyon \$/yıl)
Amerika	0.009
İngiltere	0.017
Almanya	0.043
Fransa	0.043
Japonya	0.026
Avustralya	0.043
Yeni Zelanda	0.017-0.043

Isı değiştiricilerinde kirlenme sorununun aşılması için genellikle ID kapasiteleri %20-30 oranında daha büyük seçilmektedir. Bu da daha fazla yatırım maliyeti ve daha büyük kapasitede pompa ihtiyaına sebep olmaktadır. Kirlenmenin neden olduğu debi azalmalarının giderilmesi ve sistem kararlılığının sağlanması için artan pompa kapasitesi ile ihtiyaç duyulan enerji miktarı da artacaktır.

Isı değiştiricilerinde kirlenme sonucu oluşan tıkanmalar nedeniyle planlı veya plansız tesis kapatmaları büyük sorunlara ve kayıplara neden olabilir. Bu kayıplar genellikle kirlenmenin ana maliyeti olarak kabul edilir ve proseslerde tıkanmanın ne zaman oluşacağının tahmin edilmesi çok zordur. Rafineri ve petrokimya gibi büyük tesislerde kullanılan ID'lerin temizlenmesi ve bakımlarının gerçekleştirilmesi için tüm prosesin durdurulması gerekmektedir. Buda çok yüksek üretim kayıplarına ve maliyetlere sebep olmaktadır.

ID plakalarının sürekli sk/tak yapılması sonucunda da plaka yüzeylerinde hasarlar meydana gelir ve bu da ısı değiştiricinin kullanım performansını düşürerek ömrünü kısaltır. Büyük kapasiteli ID'de yüzlerce plaka olduğu düşünüldüğünde plakaların sökülerek temizlenip tekrar montajının gerçekleştirilmesi çok fazla zaman alacak ve iş kaybına neden olacaktır. Plaka yüzeylerinde oluşan çatlakların tespit işlemi uzun süren ve birçok boyama, ışık altında kontrol işlemlerinden meydana gelmektedir. Tüm bu işlemler kullanıcıya veya firmaya ek bir maliyet olarak yansımaktadır. Plaka yüzeylerinde oluşan kirlenmeyi temizlemek için bazı durumlarda ise özel kimyasal solüsyonlar kullanılmaktadır. Bu zel solüsyonların fiyatları yüksek ve uygulama prosesleri de oldukça zordur. Ayrıca bu kimyasal uygulamaların çevreye oldukça fazla zararı da olmaktadır.

Kirlenme ve korozyon ID uygulamalarında en sık karşılaşılan ve tam olarak çözümlenemeyen bir sorundur. Kendi kendini temizleme özelliği ile hidrofobik yüzey kaplamaları, plaka yüzeylerinde oluşabilecek kirlenme ve korozyon oluşumlarını engelleyerek ısı değiştiricinin performans kayıplarını önleyebilir. Katı yağlayıcı özelliği yüksek kaplama solsyonumuz ile plaka yüzeylerinde korozyona bağlı olarak meydana gelebilecek delik ve çatlak oluşumu engellenecektir. Bu sayede oldukça yüksek oranlarda maliyet tasarrufu sağlanacaktır.

4. HİDROFOBİK YÜZEYLER

Günümüzde nano teknolojinin gelişmesi ile birçok alanda önemli gelişmeler elde edilmektedir. Bu önemli gelişmelerden birisi de malzeme yüzey teknolojilerindeki değişimlerdir. Bilim insanları yoğun çalışmalar neticesinde akıllı yüzeyler elde etmeyi başarmışlardır. Doğada bulunan bazı canlılar ise bu yüzeyler ile dünyaya gelmektedir. Canlılarda bulunan akıllı yüzeyler, balinaların gövdeleri, kelebek kanatları, özel türdeki bitkilerin yaprakları olarak örneklendirilebilir (Şekil 4.1). Doğadaki örneklerden yaygın olarak bilineni ve araştırmalara konu olan lotus bitkisi'dir. Wilhelm Barthlott gerçekleştirdiği çalışma ile lotus bitkisinin yüzey yapısının özellikleri ile kendini temizleyebilme yeteneğini bulmuştur. Bu bitkinin yapraklarında 5-10 µm çapında ve 10-15 µm aralık mesafesinde çok küçük yumru şeklinde yapılar bulunmaktadır. Bu yumru yapılar 1nm çapında hidrofobik özellikte film tabakayla kaplıdır. Lotus bitkisinin yapraklarındaki yüzey özellikleri nedeniyle su damlaları ile yaprak yüzeyi arasında yaklaşık 170° temas açısı değeri meydana gelmektedir. Oluşan temas açısı ile su damlaları bitkinin yüzeyinden yuvarlanarak akıp gitmekte ve yüzey kendi kendini temizlemektedir (Taurino vd., 2008).



(a)



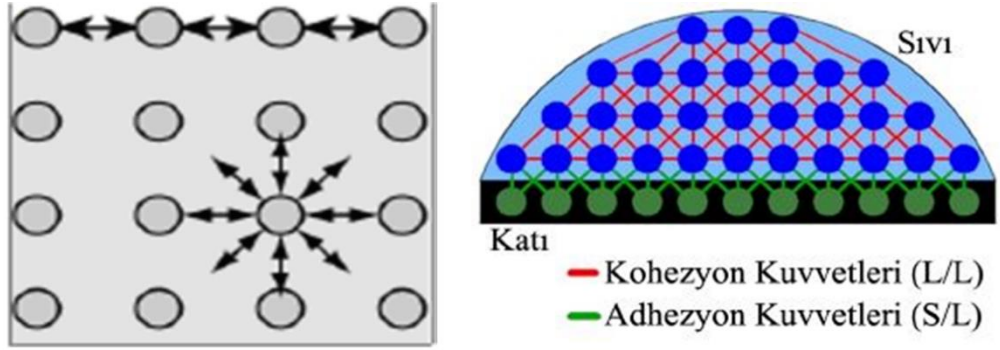
(b)

Şekil 4.1. Doğadaki akıllı yüzey örnekleri a) Lotus çiçeği b) Kelebek kanadı

Gelişen teknoloji ile yüzey morfolojilerinin incelenmesi kolaylaşmıştır. Bu incelemeler neticesinde nano teknoloji alanında akıllı yüzeyler olarak adlandırılan hidrofobik ve süperhidrofobik özellikte yeni nesil yüzeyler geliştirilmiştir. Hidrofobik kelimesi Latince olup ıslanmaz, suyu sevmeyen olarak ifade edilebilir. Bu durum, yüzey gerilim değeri az olduğunda, yüzeye konumlandırılmış su damlacıklarının yüzeyle yaptıkları açının 90°'den büyük olduğu durumlar için kullanılır. Bu yüzeyler hidrofobik yüzeyler olarak adlandırılır.

4.1. Yüzey Enerjisi ve Gerilimi

Sıvıların yüzey alanını, sabit bir sıcaklık ve basınç değerinde, bir birim arttırabilmek için gereken iş miktarına yüzey gerilimi adı verilir. Yüzeyi geren enerjiye ise yüzey enerjisi denilmektedir. Yüzey enerjisi katı yüzeyler için kullanılırken yüzey gerilimi terimi ise sıvılar için kullanılmaktadır. Yüzey geriliminin nedeni sıvı molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetidir. Sıvı içerisinde yer alan moleküllere her yönden eşit derecede bir kuvvet uygulanırken yüzeyde bulunan sıvı moleküllerine her yönden eşit derecede bir kuvvet uygulanamaz. Yüzeyde bulunan sıvı moleküllerine etki eden sıvı-gaz ara yüzeyinin çekim kuvveti sıvı-sıvı ara yüzeyi çekim kuvvetine göre daha zayıftır ve yüzeyde bulunan sıvı molekülleri sıvı içerisine doğru çekilir (Şekil 4.2). Yüzey gerilimini meydana getiren bu kuvvetler aynı zamanda yüzeyi küçültme eğilimindedir. Yüzey gerilimi; sıcaklığa ve akışkan yapısına göre farklılık gösterir. Moleküllerin titreşim hareketleri sıcaklıkla artar ve aralarındaki kohezyon kuvveti azalır. Yani sıcaklık arttıkça yüzey gerilimi azalır.



Şekil 4.2. Sıvı yüzey geriliminin şematik gösterimi (CENGİZ, 2017)

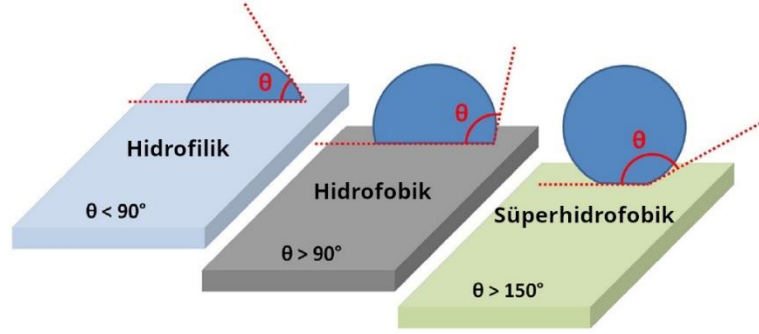
Denklem (4.1)'de ifade edilen ∂W : iş, ∂A : birim alan ve γ : yüzey gerilimi olarak belirlenmiştir (Ono ve Kondo, 1960).

$$\gamma = \frac{\partial W}{\partial A} \quad (4.1)$$

Sıvılar yapıları gereği yüzey alanlarını azaltma eğilimindedirler. Yüzey geriliminin nedeni sıvıların mevcut yüzey enerjisini düşürme çabası, buna bağlı olarak da sıvıların tüm yüzey alanını azaltma çabası olarak ifade edilebilir. Bu nedenle sıvı damlaları yüzey gerilimi etkilerinden dolayı genellikle en küçük yüzey alanına sahip kürenin geometrisine dönüşürler. Yüzey geriliminin etkili olduğu sıvı yüzeyi ile bu etkinin bulunmadığı sıvıların iç yapı özellikleri birbirinden farklıdır.

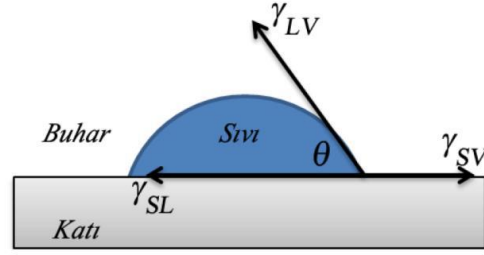
4.2. Temas Açısı

Islanabilirlik, yüzey ve yüzey üzerindeki sıvı damlası arasındaki temas açısının belirlenmesiyle ifade edilebilir. Sıvı yüzey ile katı bir yüzeyin temas etmesi sonucunda yüzeyler arasında açı meydana gelir. Temas açısı (θ) olarak adlandırılan bu açı değeri ile katı yüzeylerin ıslatılabilirliği tespit edilir. Temas açısı değerinin 90° 'den küçük olduğu durumlarda sıvı katı yüzeyi ıslatır ve hidrofilik yüzeyler olarak adlandırılır. Temas açısı değerinin 90° 'den yüksek olduğu durumda ise sıvı bulunduğu yüzeyi ıslatamaz. Bu tür yüzeylere hidrofobik yüzeyler denir. Sıvının yüzeye geniş bir şekilde yayıldığı ve temas açı değerinin 5° 'den az olduğu yüzeyler süperhidrofilik yüzeyler olarak adlandırılır. Sıvının yüzeyde tam küre yapısına benzer şekilde konumlandığı ve açı değerinin 150° 'den yüksek olduğu yüzeyler ise süperhidrofobik yüzeyler olarak ifade edilmektedir (Şekil 4.3).



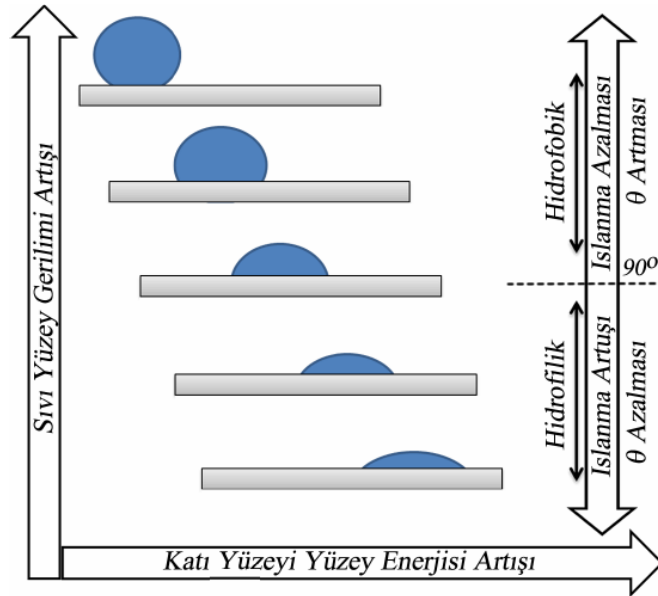
Şekil 4.3. Yüzey morfolojisi ve yüzeyin ıslanabilirlik değerleri (Oberli vd., 2014)

Temas açı değeri, yüzey enerjisi ve pürüzlülüğü, yüzeyin elde edilmesindeki metot ve yüzeyin temiz olma durumu gibi birçok parametreye göre değişkenlik göstermektedir. Bunlar içerisinde yüzey enerjisi, temas açı değerini etkileyen en önemli parametredir. Yüzey geriliminin bir sonucu olarak yüzey enerjisi meydana gelmiştir. Katı bir yüzeyde bulunan sıvının, katının serbest yüzey gerilimi ile sıvının yüzey geriliminin belirlediği, katı yüzey ve sıvı damlası arasında katı-sıvı (SL), katı-buhar (SV) ve sıvı-buhar (LV) ara yüzey gerilimleriyle tanımlanan üç kuvvet ile dengede kalır (Şekil 4.4). Katının serbest yüzey enerjisi, sıvın katı bir yüzeydeki temas açı değeri ile belirlenir. Temas açı değeri (θ), sıvı damlasının katı ve gaz fazlarının kesiştiği fazların sınırında oluşan açı olarak da ifade edilebilir.



Şekil 4.4. Sıvı damlası ile katı bir yüzey arasındaki yüzey gerilimleri

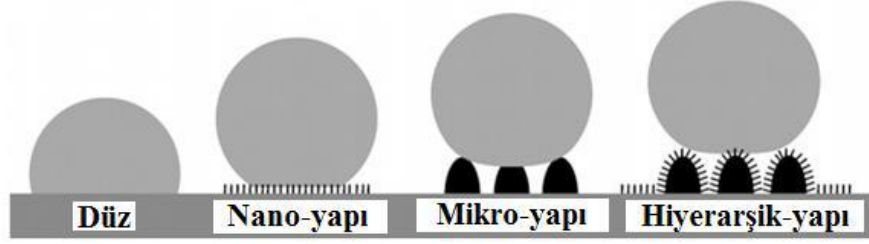
Kristal içerisindeki bir atom, tüm yönlerden çekme kuvvetine maruz kaldığından dolayı kristal yapıda içerisindeki konumunu bozulmadan koruyabilir. Fakat aynı durum yüzeydeki atomlarda geçerli değildir. Yüzey atomuna, içinde bulunan atoma uygulanan çekme kuvvetinin bir kısmı yansır ve bunun sonucunda yüzeyi kırmaya çalışır. Etkiyen bu kuvvetler yüzeylerde zorlanmaya sebep olur. Yüzey enerjisi düştükçe temas açısı değeri yükselmektedir (Şekil 4.5). Yüksek yüzey pürüzlülük değeri hidrofilik ve hidrofobik özelliklerde değişiklikler meydana getirir. Yüzeydeki pürüzlülük sonucunda, yüzey ile su arasında hava molekülleri sıkışmaktadır. Bunun sonucunda su ile yüzey arasındaki çekim kuvvetleri düşer ve yüzeyin temas açısı değeri yükselir (Çerne vd., 2008).



Şekil 4.5. Bir sıvı damlasının katı yüzey üzerindeki davranışı ve yüzey enerjisi değişimi

Farklı özellikteki yüzeylere ait ıslanabilme davranışları Şekil 4.6’da verilmiştir. Sıvı damlası ve katı yüzey arasındaki en geniş temas alanı düz yüzeyde ve mikro boyutlu yapılar oluşturulmuş yüzeyde yer almaktadır. Nano boyutta yapıların ve

hiyerarşik düzenin oluşturulduğu yüzeylerde ise temas alanı sırasıyla azalmakta ve bunun sonucunda yüzeyin hidrofobik özelliği artmaktadır (Zhang vd., 2012).



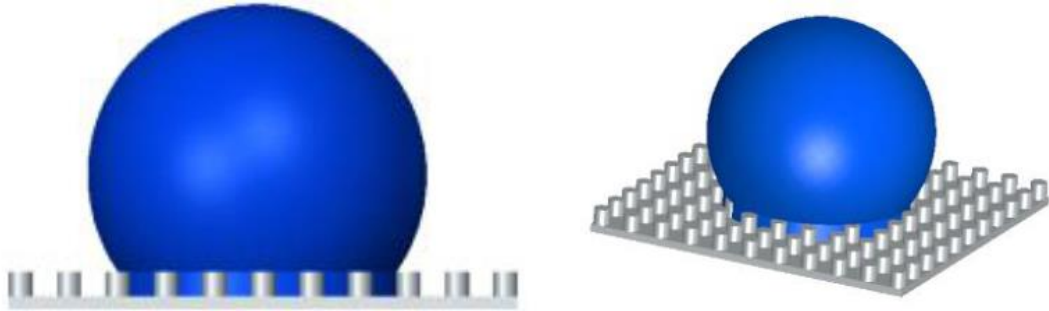
Şekil 4.6. Farklı yapıdaki yüzeylerin ıslanabilme özellikleri (Zhang vd., 2012)

4.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzeylerin hidrofobik özelliklerini iyileştirmek için sıklıkla tercih edilen yöntemlerden birisi de yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktır. Yüzey pürüzlülük değeriyle temas açısı değeri arasındaki ilişkiyi belirtmek yani ıslanma özelliklerine etkisini ifade etmek için birçok metot vardır. Bunlar; Wenzel metodu ve Cassie-Baxter metodudur.

4.3.1. Wenzel Metodu

Bu metoda göre, ıslatma durumu homojen olarak gerçekleşmektedir. Sıvı damlası pürüzlü yüzey üzerine damlatıldığında, sıvının yüzeydeki tüm boşluklara girdiğini ve doldurduğunu bu metot ifade etmektedir. Yüzeyde meydana gelecek pürüzlülük ile temas açısı değeri düşürülebilir. (Whyman vd., 2008).



Şekil 4.7. Wenzel metodu (Kibar, 2016)

Wenzel metodu akışkanın pürüzlü yüzeydeki bütün girinti ve çıkıntıları tamamen doldurduğunu varsayarak, sıvının üst bölgesindeki serbest sıvı alanında gerçekleşecek yükselmenin düz yüzeylere göre pürüzlü yüzeylerde daha çok bölgede ıslanmayı sağlayacağını açıklamaktadır. Wenzel 'e göre düz yüzey ile farklı yapıdaki geometrik yüzeyler arasında farklılık bulunmalıdır. Pürüzlülük faktörü “ R_a ” olarak belirtilen bu değer gerçek yüzeyin geometrik yüzeye oranıdır.

$$R_a = \frac{\text{gerçek yüzey alanı}}{\text{geometrik yüzey alanı}} \quad (4.2)$$

R_a oranı her zaman 1'den büyük bir değerdir. Wenzel'in Young-Laplace eşitliğini pürüzlü yüzeyler için dönüştürdüğü formül şu şekildedir:

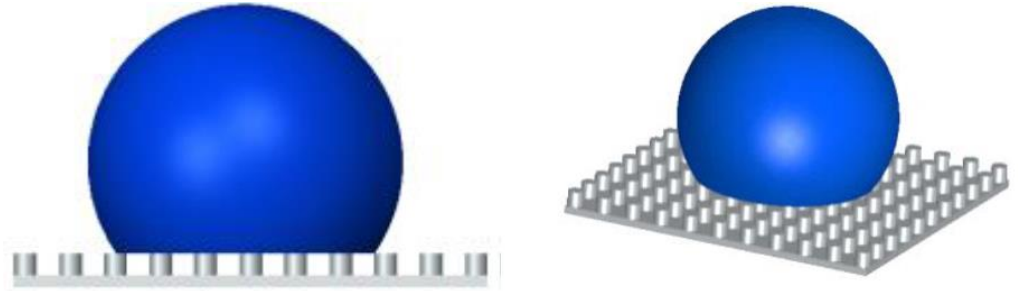
$$\cos \theta_w = R_a \cos \theta_y \quad (4.3)$$

Pürüzlülük, Wenzel'in ifadesine göre hidrofilik ($\theta < 90^\circ$) yüzeylerde temas açısını azaltarak yüzeyin hidrofilik özelliğini artırmakta; hidrofobik ($\theta > 90^\circ$) yüzeylerde ise temas açısını artırarak hidrofobik özelliği artırmaktadır.

4.3.2. Cassie-Baxter Metodu

Bu metotta benzer yapıda olmayan pürüzlü bir yapıya sahip yüzeye konulan sıvı bulunduğu yüzey üzerinde tüm bölgelere yayılamaz. Bunun nedeni yüzeyde nano ve mikro boyutlarda pürüzlülük olmasıdır. Dolayısıyla sıvı ile katı yüzey arasındaki hava, sıvı damlacıklarının pürüzlü kısımlara dolmasına izin vermez. Bu durumda damlacık yüzey üzerinde küresel geometride şekil alır (Whyman vd., 2008). Bu durum sonucunda sıvı-yüzey arayüzeyi; sıvı-katı arayüzeyi ve sıvı-gaz arayüzeyi olmak üzere iki fazdan oluşur. Birim yüzey alanına ait yüzey fraksiyonu ϕ_1 , temas açısı $\theta_{y,1}$ ve alan fraksiyonu ϕ_2 , temas açısı $\theta_{y,2}$ için görünen temas açısı şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\cos \theta_c = \phi_1 \cos \theta_{y,1} + \phi_2 \cos \theta_{y,2} \quad (4.4)$$



Şekil 4.8. Cassie-Baxter metodu (Kibar, 2016)

Cassie-Baxter modeli, pürüzlü yüzeylerde daha uygun ve doğru sonuçlar vermektedir. Fakat eşitlikte yer alan parametrelerinin hesaplanması oldukça zordur.

4.4. Temas Açı Ölçüm Yöntemleri

Yüzeylerin hidrofobik özelliklerinin belirlenmesi ve bu yüzeylerin derecelendirilebilmesi için temas açısı ölçümü oldukça önemlidir. Uygun yöntemin seçilmesi, yöntemin uygulanabilirliği numunelerin durumuna göre değişebilmektedir.

Gözenekli yapıda olmayan katıların temas açılarının belirlenmesinde optik teleskop ve tensiyometre metotları kullanılmaktadır. Gözenekli yapıya sahip katılar için ise durgun damla ve Washburn metotları tercih edilmektedir.

Düzgün yüzeyli bir katı üzerinde bulunan sıvı damlasının temas açısının ölçümünde yaygın olarak optik tensiyometre (gonyometre) kullanılır. Temas açısı belirlenirken, numune cihaz ölçüm noktasına konumlandırılır. Yüzeyin düzgün olması amacıyla cihaz sehpa gönyesi ayarlandıktan sonra şırınga yardımıyla yüzeye sıvı damlası damlatılarak kayıt yapılır. Katı yüzey, sıvı ve havadan meydana gelen üçlü faz dengesine geldikten sonra kamera ile görüntüler alınır. Cihaz yakaladığı görüntülerden sıvı damlacığının cihaz yüzeyindeki yayılma durumuna göre aldığı şekilleri cihaz yazılımına entegre edilmiş Young-Laplace eşitliğine ekler. Cihaz yazılımı sıvı damlacığının katı yüzeyinde oluşturduğu çift taraflı ölçülen temas açısı değerlerini verir. Temas açısı, soldan ve sağdan ölçülen değerlerin ortalaması alınarak elde edilir. Optik tensiyometre cihazı, ölçüm prosesinde sıvı damla görüntülerini kaydederek zamana bağlı olarak inceler. Bu cihazlar ölçüm yapılan numuneye ait aşağıdaki özellikler hakkında da bilgi vermektedir:

- Temas açısı
- Yüzey gerilimi
- Sıvı emilimi
- Sıvı yayılması
- Yüzey temizliği

4.5. Hidrofobik Yüzeylerin Elde Edilmesi İçin Kullanılan Yöntemler

Hidrofobik yüzeylerin elde edilmesinde daldırma, döndürme, sprey tabanca ile kaplama, lazer işleme ve yüzey aşındırma yöntemleri kullanılmaktadır. Hidrofobik yüzey oluşturmadaki temel amaç, yüzey üzerinde mikro ve nano yapıların elde edilmesi ve sonrasında bu yüzeyin işlem görecekt bölgesinin yüzey enerjisi oldukça düşük bir malzeme ile kaplanmasıdır.

Yüzey enerjisi düşük bir yüzeyin pürüzlülüğünün artırılması için yapılması gerekenler genellikle uygulama prosesleri hızlı ve kolay, ekonomik olarak da ucuzdur. Fakat yüzey kaplama prosesinde kullanılan malzemelerin sınırlı olmasından dolayı dezavantaja sahiptirler. Florokarbon malzemeler, düşük yüzey enerjisine sahip oldukları için hidrofobik yüzey uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar. Yüzey

pürüzlülüğü bazı işlemler ile yükseltildiğinde bu polimerlerde hidrofobik özellik hemen ortaya çıkmaktadır. Florokarbon haricinde; silikonlar, silika, polikarbonat ve karbon nanotüpler gibi malzemelere de pürüzlülük kazandırılarak doğrudan hızlıca hidrofobik yüzeyler meydana getirilebilir (Ma ve Hill, 2006).

Yüzey enerjisi az olan malzemelere pürüzlülük kazandırma prosesi kısıtlı malzemeler ile yapıldığı için, pürüzlü olan yüzey ile yüzey enerjisi oldukça düşük olan bir malzemeyle modifikasyonu yapılan yöntemlerde uygulamalarda yer almaktadır. Bu uygulamalarda yüzey enerjisi düşük olan malzemenin üst yüzeyi pürüzlü hale getirilir. Bir yüzeyin pürüzlü hale getirilmesi için sol-jel işlemi, elektrokimyasal reaksiyon ve çöktürme, plazma ve lazer aşındırma, kimyasal buhar çöktürme gibi metotlar kullanılabilir. Kovalent ve fiziksel bağlanma ile yüzey kaplama gibi yöntemlerle de kimyasal modifikasyon metodu kullanılarak yüzey enerjisi azaltılabilir (Ma ve Hill, 2006).

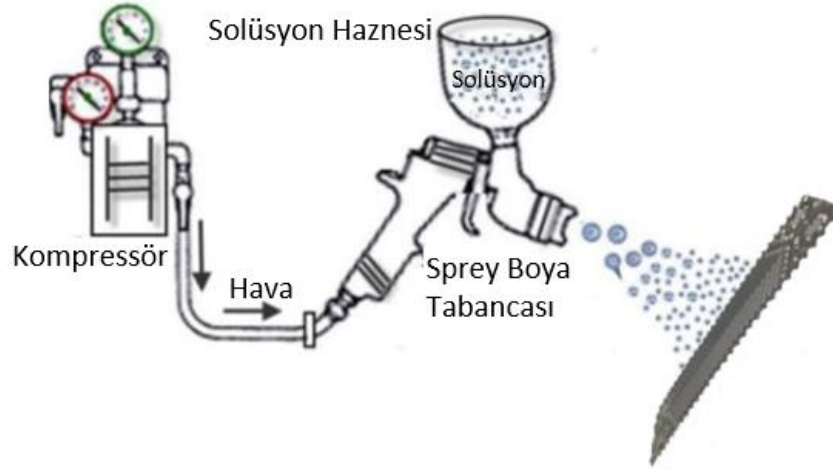
4.6. Hidrofobik Yüzey Kaplama Teknikleri

Günümüzde yüzey modifikasyonları çok sayıda kaplama prosesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Hidrofobik yüzey kaplama prosesinde, akışkan veya çözelti yüzey üzerine daldırma, sprej kaplama, döndürme, akıtma gibi kaplama teknikleri kullanılarak kaplanabilir.

4.6.1. Sprej Kaplama Yöntemi

Hidrofobik yüzeylerin sahip olduğu düşük yüzey enerjisi ve yüksek yüzey pürüzlülüğü, hem kimyasal bileşim hem de yüzey yapısı kontrol edilerek elde edilmektedir. Nano partikül kullanımı, hidrofobik kaplama üretmenin en kolay yollarından bir tanesidir. Nano partiküller, düşük yüzey enerjisine sahip bileşiklerle karıştırılarak süspansiyon formunda katı yüzeylere daldırma, döndürme ile kaplama, sprej kaplama gibi yöntemlerle uygulandığında yüzey pürüzlülüğünü artırarak yüzeyin hidrofobik özellik kazanmasını sağlamaktadır. Hidrofobik kaplamaların sprej kaplama yöntemi ile üretilmesi; farklı kimyasal yapıdaki, büyük ve düz olmayan yüzeylere uygulanabilme, düşük üretim ve uygulama maliyeti, sprej kaplama yönteminin halihazırda kaplama ve boya endüstrisinde kullanıyor olması, basit uygulanabilirlik, özel ve yüksek maliyetli ekipman gerektirmemesi, kısa süre içerisinde hazırlanabilme ve uygulanabilme kolaylığı, özel eğitimli personel gerektirmemesi, yarı saydam kaplamaların üretilmesine olanak vermesi ve son

kullanıcı açısından kullanıcı dostu olması vb. avantajları nedeniyle çok sayıda araştırmanın konusu haline gelmiştir (Hwang vd., 2011). Sprey kaplama yöntemi, her zaman homojen dağılıma sahip olamaması ve tekrarlanabilir kalınlık problemleri nedeniyle kısıtlamalara da sahiptir.



Şekil 4.9. Boya tabancası ile sprej kaplama işlemi

Sprej (püskürtme) kaplama yönteminde hidrofojik kaplama üretmek amacıyla inorganik partikül ve polimer karışımından sentezlenen solüsyon hava tabancası aracılığıyla yüzeye uygulanır. Üretilen hidrofojik kaplamanın yüzey enerjisi ve pürüzlülüğü; nano partikül tipi, nano partikül boyutu, solüsyon içerisindeki nano partikül konsantrasyonu, hava tabancası nozulu ile uygulama yapılan yüzey arasındaki mesafe, hava tabancasının nozul çapı, kompresör basıncı, uygulama süresi, nano partikül ve polimerin yüzey enerjisini azaltmak amacıyla kullanılan kimyasal bileşiklerin özellikleri ve konsantrasyonu, uygulama sayısı gibi çok sayıda parametre ile kontrol edilmektedir.

4.7. Hidrofojik Yüzeylerin Kullanım Alanları

Hidrofojik yüzeyler yapışmama, kirlenmeme ve kendini temizleme, donmayı geciktirme, buzlanma ve buğulanmanın önlenmesi, korozyon ve kirlenmenin engellenmesi, sürtünme etkilerinin düşürülmesi gibi üstün özelliklere sahiptirler. Hidrofojik yüzeyler sahip oldukları eşsiz özellikler ile gündelik hayatta ve endüstriyel uygulamalarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Şekil 4.10'da hidrofojik yüzey kaplama teknolojilerinin kullanıldığı genel uygulama alanları verilmiştir.



Şekil 4.10. Hidrofobik yüzey kaplama uygulama alanları (Zhang ve Lv, 2015)

Günümüzde nano özellikli hidrofobik yüzey kaplamaları yalnızca mekanik aşınma etkilerine karşı koruma yüzeyi olarak değil, yeni nesil, akıllı ve fonksiyonel malzemeler olarak da kullanılmaktadır. Genel olarak bakıldığında hidrofobik yüzey kaplamaları kirlenme ve korozyon oluşumu engelleyici, aşınmayı geciktirici, antibakteriyel, kendini temizleyen, donma oluşumunu ve buz birikimini önleyici, yapışmayan yüzey özellikleri ile tüm sektörlerdeki uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Zhang ve Lv, 2015).

4.7.1. Sürtünmeyi Azaltma

Sürtünme; uçaklar, gemiler, denizaltılar ve akışkanlar için hızı etkileyen en önemli parametredir. Deniz taşımacılığı uygulamalarında kullanılan araçlar suyun etkileşimi ile üretilen sürtünme etkisini yenmek için fazladan enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Sürtünmeyi azaltma etkisi gösteren fonksiyonel ve kullanım ömrü uzun hidrofobik yüzey kaplamalarının geliştirilmesi için birçok farklı çalışma yapılmaktadır. Hidrofobik yüzey kaplamaları, sahip olduğu sürtünme azaltma özelliği ile endüstriyel uygulamalarda, uçak kanatları, gemi gövdeleri, deniz kıyafetleri, yarış arabaları, hızlı trenler ve medikal ürünler gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Luo vd., 2015; Jeevahan vd., 2018).

4.7.2. Korozyon Önleyici

Korozyon, genel olarak metalik özellikteki malzemelerin kullanım sürelerini kısaltan bunun sonucunda ise çok büyük maliyetlere sebep olan ciddi bir problemdir. Endüstriyel uygulamalarda korozyona dayanıklı malzemelerin hemen hemen hepsi krom ile sentezlenerek elde edilmektedir. Ancak kromun kimyasal etkileri ve çok pahalı olması nedeni ile korozyon önleyici fonksiyonel yüzey kaplamaların üretilmesinde yeni yöntemler geliştirilmesi bir gereklilik haline gelmiştir. Endüstriyel uygulamalarda hidrofobik kaplamalar, korozyon direncini arttırmak ve yüzeylerde korozyon oluşumunu önlemek amacıyla alüminyum ve çelik gibi genel mühendislik malzemelerinin yüzeylerinde kullanılmaktadır (S. Wang vd., 2015). Hidrofobik kaplamalar, sürekli yoğun tuzlu ortama maruz kalan, ayrıca yosun ve diğer deniz organizmaları ile çevrelenmiş deniz araçları, denizaltılar ve petrol kuleleri üzerine koruyucu yüzey kaplama olarak uygulanmaktadır (Chambers vd., 2006).

4.7.3. Kirlenme Önleyici

Hidrofobik yüzey kaplamaları endüstriyel uygulamalarda kirlenme önleme ve kendi kendini temizleme özellikleri sayesinde yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Kendi kendini temizleyen cam, hidrofobik boyalar, mimari kaplamalar ve tekstil ürünleri bunlara örnektir. Hidrofobik yüzeylerde, su damlaları yüzeyden yuvarlanırken yüzey üzerinde birikmiş olan kirleri taşıyarak kendini temizlemiş olur. Kir tutmayan hidrofobik kaplamalar tarımsal proseslerde, güneş panellerinde, bina dış yüzeylerinde, tekstil ürünlerinde, askeri alanlarda ve sağlık sektöründe birçok uygulamalara sahiptir. Hidrofobik kaplamalar gemi gövdelerinin suda bulunan kısımlarında deniz canlılarının gövde yüzeyine tutunmasını önler ve kirlenme miktarını azaltır (Das vd., 2018). Günümüzde cam, güneş paneli, araç kaplama, tekstil ürünleri gibi hemen hemen tüm uygulamalarda kendini temizleme özelliğine sahip yüzey kaplamaları ticarileştirilmiştir (Jeevahan vd., 2018).

4.7.4. Buzlanma Önleyici

Hidrofobik yüzey kaplamaları özellikle uçaklarda ve gemilerde buzlanmayı önlemek için kullanılmaktadır (Farhadi vd., 2011). Ayrıca sert iklimlerin hakim olduğu bölgelerde rüzgar türbinleri, uydu alıcıları ve güneş panellerinde donma oluşumunu engellemek veya geciktirmek için hidrofobik malzemeler tercih edilmektedir. Hidrofobik malzemeler ile sıvının yüzeyde tutunması engellenerek buzlanma oluşumu geciktirilmekte veya önlenmektedir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Contalı Plakalı Isı Değiştirici

Bu tez çalışması kapsamında Ekin Endüstriyel firmasının üretmiş olduğu modüler yapıya sahip MIT-503 model contalı plakalı ısı değiştirici kullanılmıştır.

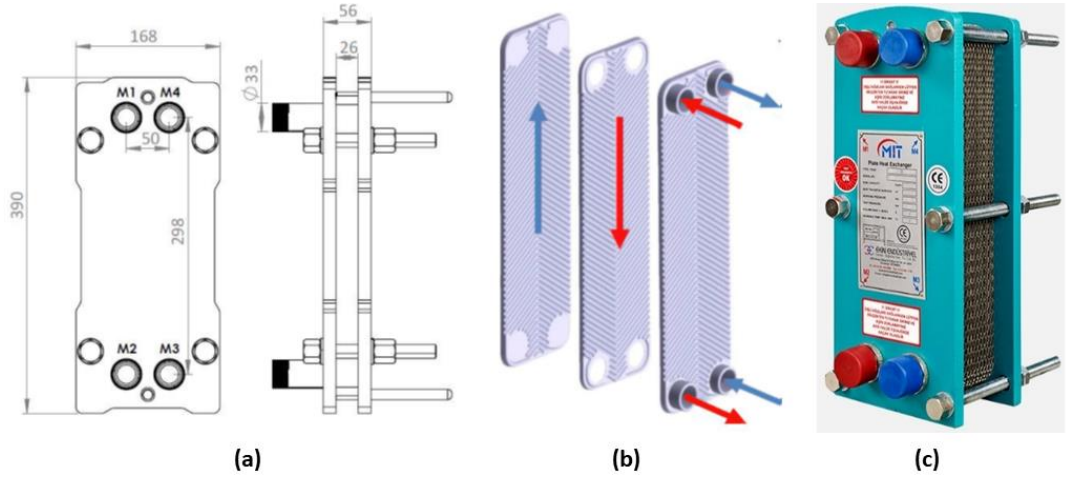
5.1.1. Contalı Plakalı Isı Değiştirici Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan plakalı ısı değiştirici 9 plakadan oluşmaktadır ve ters akışlıdır. ID giriş ve çıkış portları 33 mm çapında kılavuzlu bağlantı yapısına sahiptir. ID gövdesi 20 mm karbon çelik malzemeden imal edilmiştir. Isı değiştirici plakaları Chevron tipi olup 60° açığa sahiptir ve 0.5 mm paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Isı değiştiricinin maksimum çalışma sıcaklığı 150 °C, minimum çalışma sıcaklığı ise -25 °C'dir. Kullanılan CPID modüler özellikte olup, sisteme plaka eklenip çıkarabilmekte, hızlı bir şekilde sökülüp değiştirilebilmektedir. Contalı plakalı ısı değiştiriciye ait teknik değerler ve genel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan ısı değiştiricinin genel özellikleri

Parametre	Değer
Plaka uzunluğu, L (m)	0.397
Plaka genişliği, W (m)	0.167
Plaka kalınlığı, t (m)	0.0005
Chevron Açısı, β (°)	60
Toplam plaka sayısı	9
Isı transfer alanı, A (m ²)	0.14
Plaka malzemesi	AISI 316L
Conta malzemesi	EPDM
Dizayn sıcaklığı (°C)	150
Dizayn basıncı (bar)	10

Plakalı ısı değıştiriciye ait genel ölçülerin yer aldığı teknik resim, akışkan giriş-çıkış noktalarını ve yönünü belirten akış yapısı ve CPID genel görüntüsü Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan ısı değıştiricinin teknik ölçüleri (a), akış yapısı (b), genel görüntüsü (c)

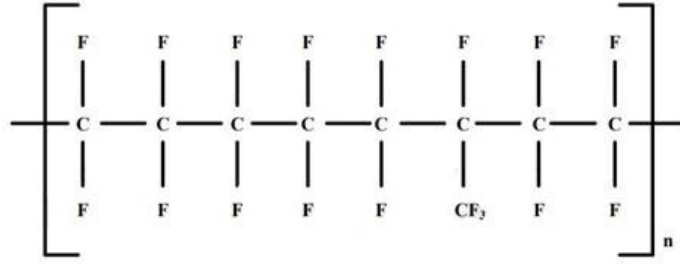
5.2. Kaplama Malzemesi

Bu tez çalışması kapsamında kaplama malzemesi olarak, temel içeriğı karbon bazlı olan floroidetilenpropilen (FEP) solüsyon ile bu solüsyona ek kaplamanın aşınma dayanımını ve hidrofobiklik özelliğini artırmak amacıyla nanopartikül boyutlarında hegzagonal bor nitrür (h-BN) toz sentezlenerek kullanılmıştır.

5.2.1. Floroidetilenpropilen (FEP)

Floropolimerler sahip oldukları düşük sürtünme katsayısı ve yüzey gerilimi, yağ ve su iticilik, yapışmazlık ve kirlilik önleyici özellikler gibi benzersiz özelliklerinin yanı sıra olağanüstü termal ve kimyasal kararlılık gibi ek avantajları nedeniyle fonksiyonel kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Floropolimer esaslı olan floroidetilen propilen (FEP), flor atomları ile düz karbon zincir yapılarından oluşmaktadır. Atomlar arasındaki kuvvetli bağların etkisiyle yüksek oranlarda hidrofobiklik ve mekanik dayanım özelliklerine sahiptirler. Yapı olarak düşük sürtünme özelliklerine ve yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Benzer polimerlere kıyasla daha yüksek sıcaklık etkilerine dayanabilirler ve çalışma sıcaklık değeri aralıkları oldukça geniştir. FEP malzemeler yapısı gereğı mükemmel bir yapışmayan yüzey özelliğine sahip oldukları için birçok alanda kullanılmaktadır (Özbey vd., 2021). Aşınma özellikleri, yük taşıma kabiliyeti ve yüksek mukavemeti içerdikleri malzemeler ile kontrol edilebilmektedir. Bu sebeple genellikle daha yüksek özelliklere

sahip nanopartiküller ile takviye edilerek kullanılabilmektedirler. Şekil 5.2’de FEP malzemenin kimyasal yapısı verilmiştir.



Şekil 5.2. FEP kimyasal bağ yapısı

Tablo 5.2’de ise FEP malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.2. FEP’in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Akıncı vd., 2003)

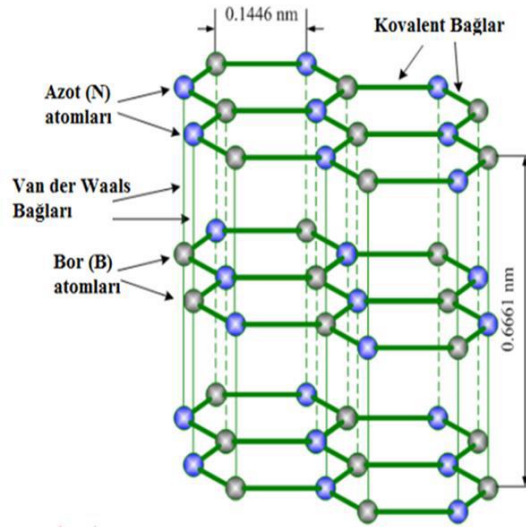
Özellik	Değer
Özgül ağırlık	2.15 g/cm ³
Darbe direnci	Kırılmaz
Dielektrik sabiti	2.1
Sürtünme Katsayısı	0.12-0.20
Su absorpsiyon (24 saat)	< 0.01
Termal iletkenlik	0.20 W/m.K
Ergime sıcaklığı	260 °C
Çekme mukavemeti	23 MPa
Eğilme Modülü	600 MPa
Sertlik (Shore D)	55-60

5.2.2. Hekzagonal Bor Nitrür (h-BN)

Hekzagonal bor nitrür (h-BN), aynı orana sahip bor (B) ve azot (N) atomlarının tüm yapılarıyla sentezlenmesiyle elde edilen ve doğada bulunmayan nadir bir bileşiktir. Grafite benzeyen bu nanomalzemeler, grafitle benzer düzlemsel yapı ve özelliklere sahiptirler. Bu nedenle “beyaz grafit” olarak da bilinmektedir. h-BN kendine özgü kimyasal bağlanma özellikleri ile farklı yapılarda oluşabilmektedir. h-

BN benzersiz optik özellikleri, güçlü yalıtkanlık performansı, yüksek ısıl iletkenlik ve kimyasal kararlılık gibi kendine özgü ve mükemmel fiziksel özellikleri nedeniyle son yıllarda endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

Bor nitrürü oluşturan elementlerden bor ve azot, karbon ile aynı hizada olduğundan birbirine benzer yapıya sahiptirler. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi hekzagonal bor nitrürün kristal yapısında; B ve N atomlar arası kuvvetli kovalent bağ yapısı, tabaklar arasında zayıf Van der Waals bağ yapısı bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Hekzagonal Bor Nitrürün kristal yapısı (Majety vd., 2012)

Son zamanlarda, hekzagonal bor nitrür nanopartiküller üzerine yapılan çalışmalarda ve uygulamalarda artış görülmektedir. Yapılan çalışmalarda h-BN'nin farklı malzeme türleri ile sentezi ve genel karakterizasyonu, yapı özellikleri ve uygulamaları dikkat çekmektedir. h-BN malzemelerin sahip oldukları termal iletkenlik, kimyasal yapı kararlılığı, üstün elektrik direnci gibi mekanik ve fiziksel özellikler yapılan çalışmalar ile ifade edilmiştir. Farklı malzeme türlerine yüzey kaplama uygulamaları yapılarak yeni özelliklerin elde edilmesi, yeni uygulama alanlarının keşfedilmesi bu nanopartiküllerin kullanım alanlarını genişletmektedir. h-BN malzemeler, “a” kafes yapısındaki güçlü bağlar ve “c” kafes yapısındaki zayıf bağların etkisiyle üstün katı yağlayıcı özelliğe sahiptirler. Malzeme içeriğinde alt katmanlarda yer alan zayıf bağların sürtünme esnasında kopması ile yağlayıcı etki oluşur. Benzer katı yağlayıcı malzemelerle kıyaslandığında molibden disülfür 350 °C'de grafit 600 °C'de özelliklerini kaybederken h-BN'nin 900 °C'ye kadar katı yağlayıcı özelliğini koruduğu belirlenmiştir. (Çelik, 2010).

Hekzagonal bor nitrür malzemeler sahip oldukları eşsiz kristal yapı özellikleri ve yüksek katı yağlayıcı özellikleri sayesinde hidrofobik yüzeyler elde etmek veya hidrofobik özelliği artırmak için kullanılmaktadır (Wagemann vd., 2020). h-BN, toz formunda veya sıcak preslenmiş yoğun formda, kompozit malzemelere takviye veya yüzey kaplama solüsyonlarında özellik geliştirici ürün olarak kullanılabilir. Tablo 5.3 'de h-BN malzemeye ait fiziksel ve kimyasal özellikler verilmiştir.

Tablo 5.3. h-BN'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri (Ebin, 2007)

Özellik	Değer
Moleküler ağırlık	24.83 g
Özkütle (teorik)	2.27 g/cm ³
Renk	Beyaz
Kristal yapı	Hekzagonal
Dielektrik mukavemeti	800-1000 volts/mil
Sürtünme Katsayısı	0.2-0.7
Elektriksel direnç (298K)	1,7*10 ¹³ ohm-cm
Termal genleşme katsayısı	0.8-7.5*10 ⁶ /C ;25-1000C
Ergime sıcaklığı	2600 °C
Kırılma Modülü	100 MPa
Young Modülü	20-103 MPa

h-BN; yüksek sıcaklık değerlerinde refrakter özelliği, yüksek termal şok direnci, yüksek ısı iletkenliği, elektriksel yalıtkanlık, kimyasal kararlılık, yağlayıcılık ve üstün yapısal özelliklere sahip nanopartiküldür. Sahip olduğu üstün özellikler sayesinde, metalurjide yüksek sıcaklık etkilerini önleyici proseslerde, yağlayıcı olarak kalıplarda, yüzey kaplama malzemesi olarak nükleer reaktörlerde ve lastik, reçine, plastik malzemeler için aktif dolgu malzemesi olarak tüm endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Deneyisel çalışmada Nanografi firmasından satın alınan ticari hekzagonal bor nitrür tozları kullanılmıştır. Firmanın satışını yaptığı bu ürüne ait sunmuş olduğu teknik bilgiler Tablo 5.4'te görülmektedir.

Tablo 5.4. h-BN tozlar için üretici firmadan alınan veriler

Özellik	Değer
Gerçek yoğunluk	2.3 g/cm ³
Renk	Beyaz
Kristal yapı	Hekzagonal
Safılık	%99.7
Ortalama parçacık boyutu	780 nm
Fe ₂ O ₃	%0.03
CaO	%0.002
MgO	%0.04
B ₂ O ₃	%0.1

5.3. Kaplama Solüsyonunun Hazırlanması

İlk aşamada ticari kaplama malzemesi olarak kullanılan temel içeriği karbon bazlı olan floroidetilenpropilen (FEP) solüsyon içerisine ek olarak kütlece %3, %7 ve %10 oranlarında h-BN nanopartikül toz eklenerek çalışmada kullanılacak özel kaplama solüsyonları elde edilmiştir. Tablo 5.5'te kütlece % h-BN katkı oranına göre deneysel parametre ve kaplama kod bilgisi verilmiştir.

Tablo 5.5. Çalışmada kullanılan kaplama oranları ve kod bilgileri

Parametre	Katkı oranı (kütlece %)	Kod bilgisi
Kaplamasız	-	UNC
FEP	-	FEP
FEP+ % h-BN	%3	FH3
FEP+ % h-BN	%7	FH7
FEP+ % h-BN	%10	FH10

FEP malzeme içerisine h-BN nanopartiküller hassas terazi ile tartılarak kütlece % belirlenen oranlarda ilave edilerek sentezleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Solüsyon içerisinde topaklanmanın minimize edilmesi için nanopartiküller manyetik karıştırıcı üzerinde solüsyon içeriğine eklenmiştir. Elde edilmek istenen solüsyonun bileşimi göz önüne alınarak kütlece farklı oranlarda FEP ve h-BN malzemelerinin tartımı ve sentezleme işlemi sonrasında homojen bir dağılım sağlamak amacıyla solüsyon manyetik karıştırıcı ile 10 dakika boyunca karıştırılmıştır (Şekil 5.4).

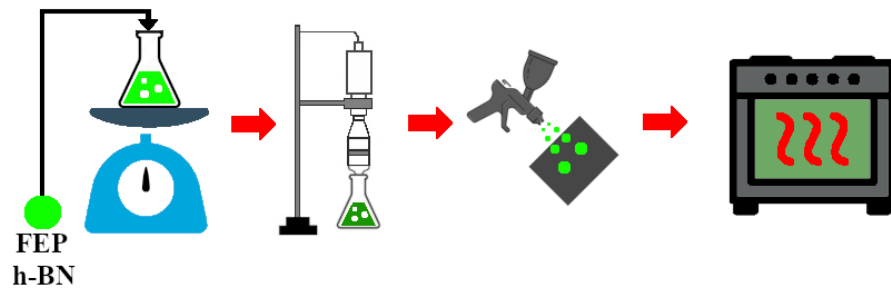


Şekil 5.4. Kaplama solüsyonu hazırlama prosesi

Kendi içerisinde homojen ve akışkanlık özelliği yüksek solüsyon elde edildikten sonra spray kaplama prosesinde kullanılmak üzere cam bir koruyucu kap içerisine alınarak muhafaza edilmiştir.

5.4. Yüzey Kaplama Prosesi

Yüzey kaplama işlemi, elde edilen solüsyonların kaplanacak yüzeye spray boya tabancası yardımıyla püskürtülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama esnasında kompresör basıncı, spray boya tabancası nozul çapı ve perde ayarı, uygulama mesafesi ve süresi gibi parametrelerin işleme uygun bir şekilde ayarlanmasına dikkat edilmiştir. Kaplama işlemi sonrası ID plakaları fırın içerisinde ısıtılarak kaplamanın plaka yüzeylerine tamamen yapışması sağlanmıştır. Kaplama prosesine ait iş akışı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Kaplama prosesi akış şeması

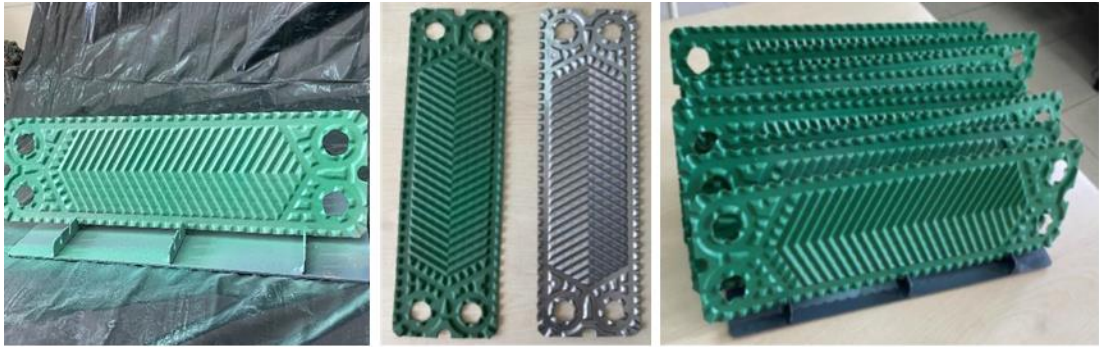
Plakalarının yüzey kaplama işlemi kompresörlü spray boya tabancası ile gerçekleştirilmiştir. Önceden hazırlanmış olan solüsyonlar spray tabanca boya haznesi içerisine manyetik karıştırıcı ile yeniden karıştırılarak homojen bir yapıda doldurulmuştur. Kaplama prosesinde, yaklaşık 4 bar hava basıncı, 1.2 mm çap nozul

ile sprej boya tabancası perde ayarı yapıldıktan sonra plaka yüzeylerine 20 cm mesafeden homojen bir dağılım ve eşit boya kalınlığı olacak şekilde yaklaşık 30 saniye süre ile kaplama işlemi uygulanmıştır (Şekil 5.6).



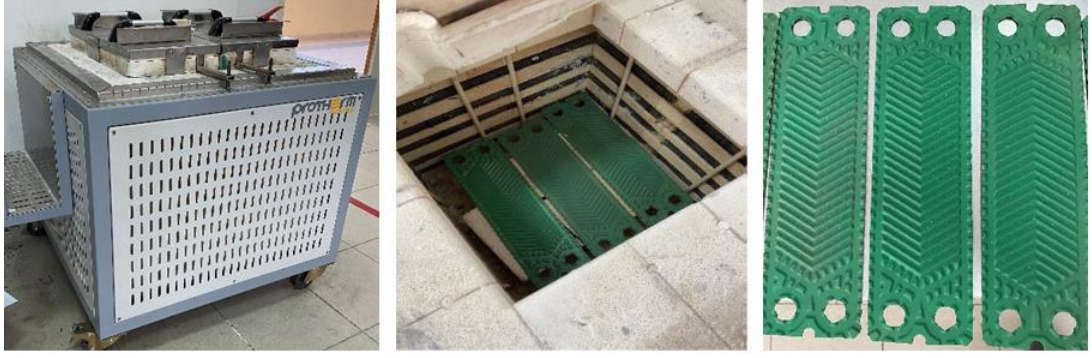
Şekil 5.6. Isı değiştirici plakalarına kaplama işleminin uygulaması

Hidrofobik yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve fırınlama prosesi için hazır plakalar Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7. Kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştirici plakaları

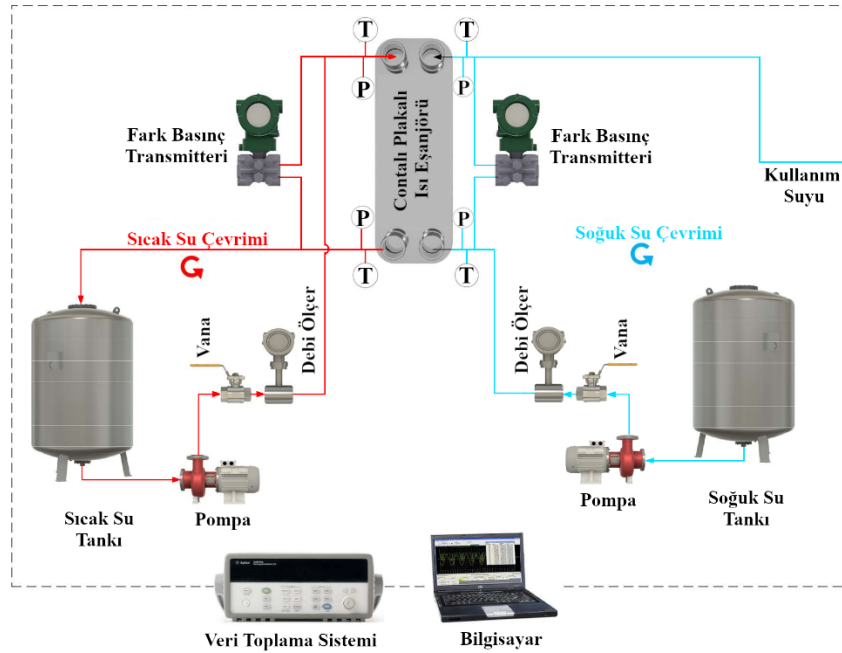
Kaplama işlemi uygulandıktan sonra plakalar hızlı bir şekilde ısı işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemin amacı kaplamanın yüzey ile tamamen bütünleşerek plaka yüzeylerinden kopmamasını sağlamaktır. Sprey boya tabancası ile kaplanmış plakalar 300 °C sıcaklığa ayarlanmış fırın içerisine yerleştirilerek yaklaşık altı dakika boyunca sabit ısıda bekletilmiştir. İşlem sonrası plakalar direkt ortam sıcaklığına maruz kalmaması için kapalı bir kutu içerisinde yavaş yavaş soğutulmuştur. Isı değiştirici plakalarının fırınlama prosesine ait resimler Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Isı değiştirici plakalarına fırınlama işleminin uygulanması

5.5. Deneysel Isı Değiştirici Sistemi

Bu doktora çalışmasının amacı, ısıtma sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan contalı plakalı ısı değiştiricilerinde hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferi, basınç kaybı ve enerji verimliliği üzerine etkilerini incelemektedir. Ayrıca farklı hidrofobik temas açısı değerlerine sahip solüsyonlar ile plakaları kaplanmış ID kullanılan bir deney düzeneği üretilerek ve contalı plakalı ısı değiştiricilerin genel performans özellikleri belirlenecektir. Bu amaçla CPID kullanılan bir deney düzeneği tasarlanarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi genel olarak otomatik kontrollü rezistanslı ısıtıcı vasıtasıyla istenilen sıcaklık değerlerinde, sirkülasyon pompa kademesi ve sistemde yer alan akış kontrol vanalarına bağlı olarak istenilen debi aralıklarında çalışabilmektedir. Deneysel sistemin şematik gösterimi Şekil 5.9’da, kurulan deneysel düzeneği ise Şekil 5.10’da görülmektedir.



Şekil 5.9. Deneysel ısı değiştirici sistemi şematik gösterimi



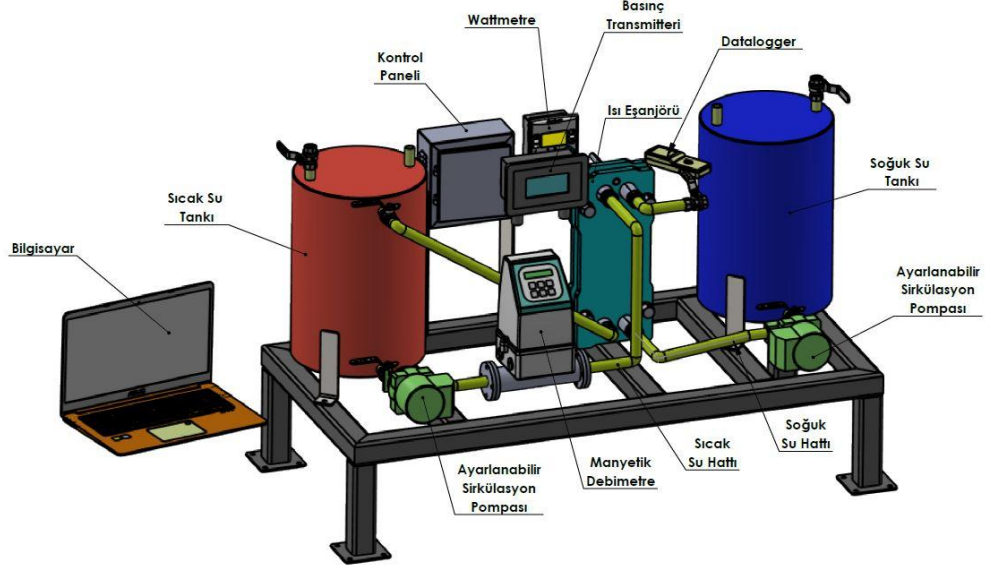
Şekil 5.10. Deney düzeneği

Deneyisel sistem çalıştırıldığında 7 kW ısıtma kapasitesine sahip rezistans yardımıyla sıcak su tankında ısıtılan su, sirkülasyon pompası vasıtasıyla contalı plakalı ısı değiştiricisine iletilmektedir. Contalı plakalı ısı değiştiricisine akış boruları ile taşınan sıcak su sıcaklığını, ID'nin diğer portundan gelen suya aktararak sıcaklığı düşmüş bir şekilde sıcak su tankına geri pompalanmaktadır. Soğuk su tankındaki su ikinci sirkülasyon pompası tarafından ısı değiştiriciye iletilmektedir. ID içerisinde sıcaklığı yüksek suyun ısınıp çekerek sıcaklık değeri yükselen su, kullanım suyu olarak proses dışına iletilmektedir. Contalı plakalı ısı değiştiricide sıcak akışkandan soğuk akışkana ısı geçişinin olduğu hat primer devre olarak soğuk akışkanın sıcak akışkandan ısı çektiği hat sekonder devre şeklinde isimlendirilmiştir. Deneylerde akış rejimi türbülanslı akış rejimi seçilmiştir. Primer ve sekonder devrelerde sistemin kararlı hale gelmesiyle sıcaklık değişimleri sabitlenmiş ve deneyler sonlandırılmıştır.

Deneyisel çalışmada kullanılan contalı plakalı ısı değiştirici girişinde ve çıkışında akan akışkan debi değerleri manyetik debimetre ile lt/dk olarak, sıcaklıklar ise K tipi termokupllar ile santigrat ($^{\circ}\text{C}$) olarak ölçülmüştür. Isı değiştirici giriş ve çıkışlarında meydana gelen basınç değerleri ise fark basınç transmitteri ile Pascal olarak ölçülmüştür. Deneyisel sistemde ölçülen tüm değerler, sistem kararlı hale geldikten sonra datalogger vasıtasıyla 15 saniye aralıklar ile kayıt altına alınmıştır.

5.6. Kullanılan Ekipmanlar

Bu bölümde ısı transfer deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Şekil 5.11’de deney düzeneği modellemesi ve sistemde kullanılan ekipmanlar belirtilmiştir.



Şekil 5.11. Deney düzeneği modellemesi ve kullanılan ekipmanlar

5.6.1. Sıcak Su Tankı

Sıcak su üretici tankı, 50 litre hacminde olacak şekilde tasarlanmış ve St37 kalite sacdan imal edilmiştir. Deney düzeneğinde yer alan primer devredeki sıcak su, 7 kW ısıtma kapasitesine sahip otomatik olarak kontrol edilebilen elektrikli rezistans vasıtasıyla sağlanmıştır. Rezistanslar, tank içerisindeki akışkanı ısıtmak üzere taban kısmına yerleştirilmiş ve elektrik bağlantı izolasyonu yapılmıştır. Sıcak su tankı içerisinde sıcaklık ayarı için termostat kontrol sistemi de bulunmaktadır. Tank üst kısmında dolum vanaları yer almaktadır.

5.6.2. Soğuk Su Tankı

Soğuk su tankı da sıcak su tankına benzer şekilde 50 litre kapasitede tasarlanmış ve St37 kalite sacdan imal edilmiştir. Bu sistem ekipmanı, contalı plakalı ısı değiştiriciden geçirilerek sıcaklığının artırılması istenilen suyun bulunduğu kısımdır. Tank alt kısmında temizlik işlemleri için küresel tahliye vanası bulunmaktadır. Üst kısımda ise akışkan dolumu için giriş vanası yer almaktadır.

5.6.3. Sirkülasyon Pompası

Deneysel sistemde akışkan hareketini sağlamak amacıyla Westburg marka BPS15-7A model sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Pompa üzerinde bulunan ayar düğmesi üç kademeli farklı debi değerlerinde çalışmaktadır. Maksimum debi değeri $3.25 \text{ m}^3/\text{h}$, basma yüksekliği 7m ve çalışma sıcaklığı $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $+95 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığındadır. Ayrıca farklı debi değerleri için pompa hattı üzerinde bulunan küresel vanalar ile de istenilen debi ayarı yapılabilmektedir (Şekil 5.12a).

5.6.4. Manyetik Debimetre

Deney düzeneğinde akışkan debisini ölçmek için Strans MAG5000 model tek setli manyetik debimetre kullanılmıştır. Farklı giriş ve çıkış fonksiyon seçim özellikleri ile istenilen uygulamaya kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Cihaz enerji kesintisinde ölçülen değeri hafızada saklayarak ve tekrar enerjilendiğinde hafızadaki değer üzerine ölçme işlemine devam edebilmektedir. Geçen akışkanın debisi lt/dk olarak ölçülmektedir (Şekil 5.12b).

5.6.5. Datalogger ve Termokupl

Deney sisteminde veriler K tipi termokupl ile uyumlu LCD ekranlı AZ88598 model 4 kanallı datalogger vasıtasıyla kayıt altına alınmıştır. K tipi termokupllar $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ölçüm hassasiyetine sahip olup $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $+400 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında ölçüm yapabilmektedir. Çalışmada termokupllar kalibrasyon işlemi yapıldıktan sonra deney düzeneğindeki ayarlı yuvaya yerleştirilmiş ve sızdırmazlığı sağlanmıştır. Datalogger ile 4 adet sıcaklık ve 4 adet basınç değeri ölçümü ve kayıt işlemi gerçekleştirmiştir. Bu değerler primer devre su giriş-çıkış sıcaklıkları ile basınç değerleri ile sekonder devre su giriş-çıkış sıcaklık ve basınç değerleridir. Ölçümler her 15 saniye 'de bir değer alınabilmesi için ayarlanmıştır. Primer devre su giriş-çıkış sıcaklıkları ve basınç değerleri sırasıyla T_1 , T_2 , P_1 , P_2 , sekonder devre su giriş-çıkış sıcaklıkları ve basınç değerleri ise sırasıyla T_3 , T_4 , P_3 , P_4 şeklinde sembolize edilmiştir (Şekil 5.12f).

5.6.6. Fark Basınç Transmitteri

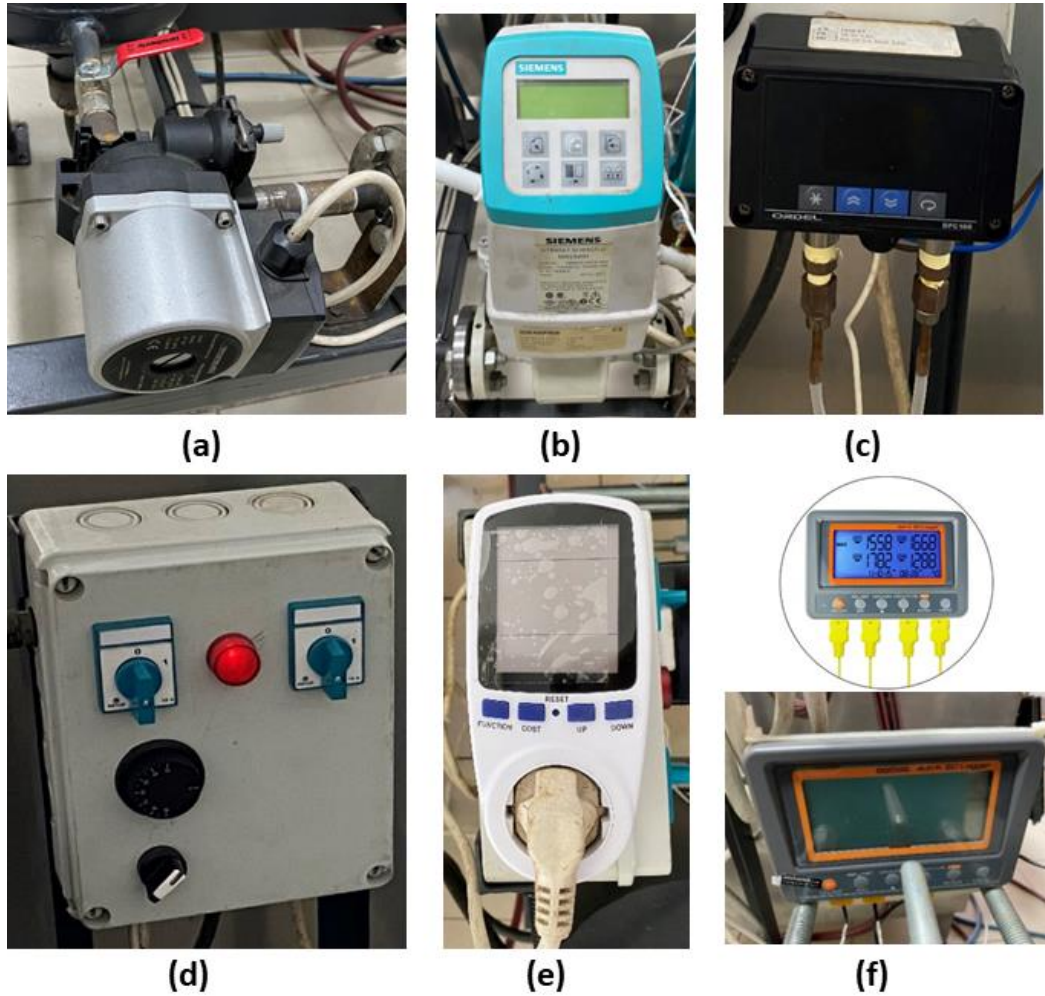
Deney düzeneğinde akışkanlar arasındaki basınç değişimlerini hassas bir şekilde ölçmek amacıyla ORDEL marka DPC100-1/010 model fark basınç transmitteri kullanılmıştır. Deney sisteminde soğuk ve sıcak suyun giriş-çıkış basınç değerleri ölçülmüştür. Cihaz ayarlanabilir modları ile normal basınç ve fark basınç ölçüm işlemleri de gerçekleştirilebilmektedir. Bar olarak ölçüm yapmaktadır (Şekil 5.12c).

5.6.7. Wattmetre

Deney düzeneğinde sirkülasyon pompalarının anlık enerji tüketim miktarlarını ölçmek için kullanılmıştır. Sistemde bulunan iki adet sirkülasyon pompası tek bir elektrik hattına bağlanmış ve priz üzerinden wattmetre ile harcanan güç değerleri ölçülmüş ve datalogger ile kayıt altına alınmıştır. Cihaz ayrıca ayarlanabilir modu ile anlık akım, voltaj ve frekans gibi istenilen değerleri LCD ekranında göstermektedir. Gerçekleşen tüketiminin kWh olarak ölçümünü gerçekleştirmektedir (Şekil 5.12e).

5.6.8. Kontrol Ünitesi

Deney düzeneğinde yer alan tüm elemanların genel elektrik bağlantılarının yer aldığı panodur. Üzerinde sirkülasyon pompalarının ayrı ayrı çalıştırılması için aç-kapa anahtarlar yer almaktadır. Kontrol ünitesi üzerinde ısıtıcı tank içerisinde bulunan termostatin ayar anahtarı ve gösterge lambası bulunmaktadır. Sıcak su tankında istenilen sıcaklık değeri termostat ayar anahtarı ile ayarlanmaktadır (Şekil 12d).



Şekil 5.12. Deney sisteminde kullanılan ekipmanlar, (a) Pompa, (b) Manyetik debimetre, (c) Fark basınç transmitteri, (d) Kontrol ünitesi, (e) Wattmetre, (f) Datalogger

5.7. Deney Parametreleri

Isı transfer deneylerinde hidrofobik yüzey kaplamaları ile primer ve sekonder devrelerdeki akışkanların ısı transfer katsayılarındaki değişim incelenmiştir. Aynı zamanda sistemde yer alan sirkülasyon pompalarının enerji tüketim miktarları da incelenmiştir. Isı transferi üzerinde hedeflenen gelişimler, özellikle farklı temas açısına sahip hidrofobik yüzey kaplamaları dikkate alınarak araştırılmıştır. Bu parametrelerin yanında ısı transferini doğrudan etkileyecek farklı Reynolds sayıları ve farklı değerlerdeki akışkan giriş sıcaklık parametreleri dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan parametre ve değerler Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler

Parametre	Parametre Değişkeni
Reynolds Sayısı	10000, 15000, 20000, 25000,30000
Sıcak su giriş sıcaklığı (T_{hi})	52-62-72 °C
Soğuk su giriş sıcaklığı (T_{co})	15 °C
Debi ($\dot{m}$)	0.044-0.132 lt/dk
Yüzey kaplama türü	UNC-FEP-FH3-FH7-FH10
Temas açısı	72-95-121-135-113 °

Deneysel çalışmada sıcak su girişi 52-62-72 °C, soğuk su girişi ise şebeke suyu sıcaklığı (15 °C) olarak belirlenmiştir. Su akışı ise primer ve sekonder devre için 0.044-0.132 lt/dk aralığında yapılmıştır. Reynolds sayısı 10000-30000 aralığında eşit aralıklarla beş farklı değerde seçilmiştir. Contalı plakalı ısı değiştiricisinde yüzey kaplaması olarak farklı temas açısı değerlerine sahip FEP, FH3, FH7 ve FH10 solüsyonları ile yüzey kaplaması uygulanarak deneyler yapılmıştır.

5.8. Çalışmada Kullanılan Deneysel Yöntemler

5.8.1. Temas Açısı Ölçümü

Temel bazda FEP malzeme ve içerisine belirli oranlarda kütlece % h-BN nano partikül toz eklenerek elde edilen hidrofobik yüzey kaplamalarının temas açıları dinamik ölçüm yöntemi kullanılarak Optik Tensiyometre (Thetate Flex) cihazı ile

belirlenmiştir (Şekil 5.13). Cihaz, akışkan hareketlerini zamana bağlı olarak kaydederek ölçüm işlemini gerçekleştirmektedir.

Çalışma kapsamında temas açısı ölçüm cihazının kabul ettiği numune ölçülerine göre plakalar hazırlanarak yüzeyleri hidrofobik solüsyonlar ile kaplanmıştır. Ölçüm doğruluğunu en üst düzeyde sağlamak için her bir yüzey kaplama parametresi için üç numune örneği hazırlanarak ölçüm yapılmış ve değerlerin tutarlılığı incelenerek uygun temas açısı değeri belirlenmiştir.



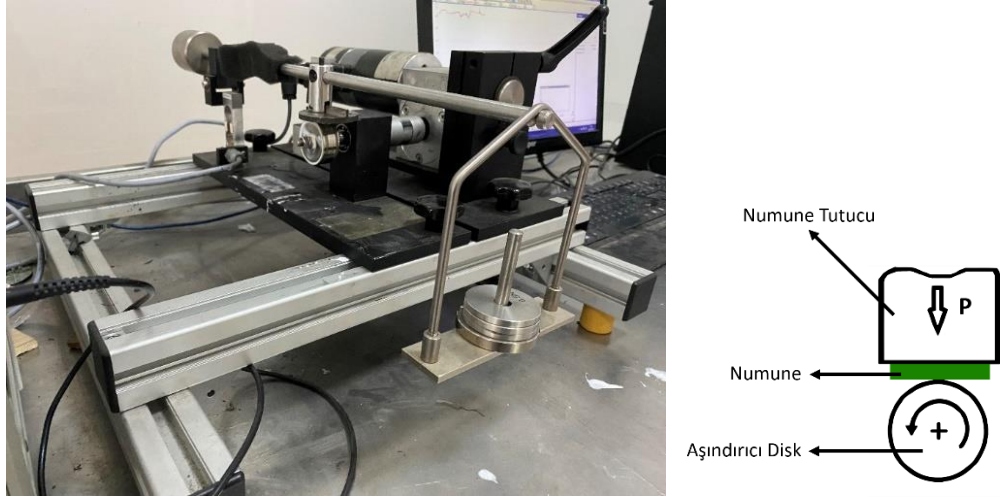
Şekil 5.13. Optik Tensiyometre (Temas Açısı Ölçer Cihazı)

5.8.1. Aşınma Testi

Aşınma testleri için kullanılan universal test cihazı (GUNT TM260) birçok farklı sürtünme ve aşınma testini gerçekleştirebilmektedir. Fakat yatay şekilde ve kalınlıkları ince numunelerin boyutları cihazın normalde kullanılan numune boyutlarından farklı olduğu için plaka şeklindeki numunelerin bağlanmasını sağlayan bir tutucu tasarlanarak CNC tezgâhta üretilmiş ve numuneler cihaza kusursuz bir şekilde bağlanabilmektedir. Cihaz üzerinde yer alan disklerin aşınma durumları göz önünde bulundurularak deneyler esnasında disk yüzeyleri kontrol edilerek kağıt zımpara ile şekil ve yüzey bozuklukları giderilmiştir. Şekil 5.14’te aşınma test düzeneği genel hatlarıyla gösterilmektedir.

Aşınma testi öncesi ve sonrasında numune ağırlıkları hassas terazi ile tartılarak kütle kayıpları da belirlenmiştir. Kaplama işlemi uygulanmamış ve hidrofobik

kaplanmış aşınma deney numunelerinin uygulanan kuvvete göre gerçekleşen aşınma değerleri ve yüzeyden kopan kaplama ağırlıkları hesaplanmıştır.



Şekil 5.14. Aşınma test düzeneği

Aşınma cihazında testler yapılırken aşınma oranlarını kıyaslamak için birtakım parametrelerin hesaplanması gerekmektedir. Bu parametreler genel olarak sürtünme kuvveti ve katsayısı, kütle değişimi, aşınma direnci ve oranı olarak belirtilebilir.

Aşınma testleri 40 mm çapında disk, 10 N yük altında ve 200 devir/dk hızda 20 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aşınma testi öncesi kütlesi (m_1) ve test sonrası kütleleri (m_2) ölçülerek ve (5.1) denklemi kullanılarak kütle kaybı (Δm) hesaplanmıştır.

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (5.1)$$

Aşınma cihazında gerçekleştirilen testlerde incelenen numunelerin kütle kayıpları ölçülerek hacimsel aşınma değerleri hesaplanabilmektedir. Hacimsel aşınma değeri (ΔV), malzemede gerçekleşen kütle kaybının (Δm), deneysel yoğunluğa (ρ_D) bölümüyle belirlenir (5.2).

$$\Delta V = \Delta m / \rho_D \quad (5.2)$$

Kayma mesafesi (L) ise numunenin döner disk merkezine olan uzaklığı (r), aşındırıcı diskin dönme hızı (n) ve toplam dönüş süresini (t) kullanarak (5.3) denklemi ile hesaplanabilmektedir.

$$L = 2\pi r \cdot n \cdot t \quad (5.3)$$

Kaplama malzemeleri arasındaki aşınma miktarını kıyaslamak için aşınma oranı (W) ifadesi kullanılmaktadır. Aşınma oranı (W), birim mesafe ve yükteki hacimsel aşınma olarak söylenebilir. Hacimsel aşınma miktarı (ΔV), uygulanan yük değeri (P) ve kayma mesafesine (L) göre Eşitlik (5.4)'deki gibi yazılabilir. Aşınma oranının birimi ($\text{mm}^3/(\text{Nm})$) veya ($\text{cm}^3/(\text{Nm})$) olarak verilmektedir.

$$W = \Delta V / (P \cdot L) \quad (5.4)$$

Yüzey kaplamalarında aşınma oranının (W) düşük olması istenilen bir özellik olup bu sonuca göre malzemenin aşınma önleyici olduğu ifade edilebilir.

5.8.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

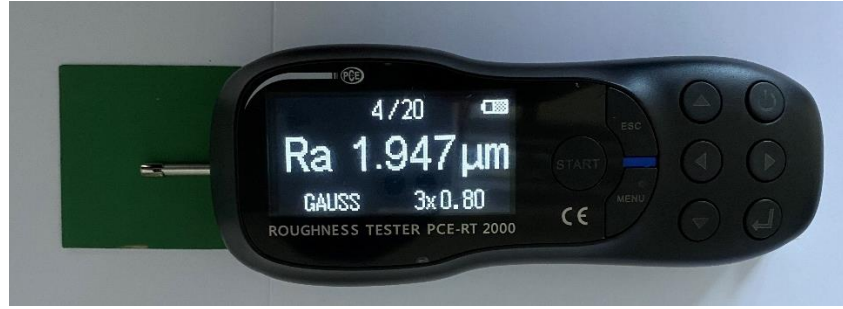
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bir elektron demetinin numune yüzeyine odaklanarak yüzeyi taraması ile görüntü elde eden bir tür elektron mikroskobudur. Numune yüzeyindeki atomlarla etkileşen elektron demeti hem yüzey topografisi hem de karşılaşılan malzeme kompozisyonunu etkileşim sonucunda ortaya çıkan sinyaller aracılığı ile iletmektedir. SEM cihazları 1 nm'den daha yüksek çözünürlüğe ulaşabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen kaplama yüzey görüntülemeleri için OMÜ Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi (KİTAM)'nde bulunan taramalı elektron mikroskobu (Jeol JSM7001F) cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

5.8.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış plaka yüzeylerinin yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri PCE-RT 2000 marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5.16). Plakalar eğimi kontrol edilmiş düz bir zemin üzerine sabitlenmiş ve cihaz plaka üzerine konumlandırılarak ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm doğruluğu açısından ölçüm noktaları plaka üzerinde farklı konumlardan tekrarlanmıştır. Ra ölçümleri her bir deney için 5'er kez Gauss 3x0.8 standardında alınarak ortalama değerler kaydedilmiştir.



Şekil 5.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

5.8.1. Kaplama Kalınlık Ölçümü

Hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış plaka yüzeylerinin kaplama kalınlıkları WURTH 3000M marka boya kalınlık ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5.17). Plakalar düz bir zemin üzerine konumlandırılmış ve cihaz plakalar üzerine bastırılarak ölçüm işlemi yapılmıştır. Kaplama kalınlıklarının homojen yapısını kontrol etmek için plakalar üzerinde en az 4 farklı noktadan ölçüm gerçekleştirilmiş ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Cihazın ölçüm hata toleransı $\pm 2 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 5.17. Kaplama kalınlık ölçüm cihazı

5.9. Contalı Plakalı Isı Değiştiricilerin Termodinamik Analizi

Isı değiştiriciler, en genel anlamda çok az kalınlığa sahip katı malzemeden oluşan ısı transfer yüzeyi ile ayrılmış aralarında belirli bir sıcaklık farkı olan akışkanların akışını içermektedir. Isı değiştiricilerde ısı geçişi, sıcak akışkandan plaka yüzeyine taşınımla, plaka içerisinde iletimle ve plakadan soğuk akışkana tekrar taşınımla sağlanır. CPID’lerin ısı analizini gerçekleştirmek (boyutlandırma, performans, dayanım ve enerji verimliliği) amacıyla temel ısı transferi denklemleri kullanılmıştır.

5.9.1. Isı Geçişi Miktarı

Plakalı ısı değiştiricilerin boyutlarının tasarlanması ve performanslarının belirlenebilmesi amacıyla toplam ısı geçişi, akışkanların giriş-çıkış sıcaklık değerleri, toplam ısı transfer katsayısı ve transferin gerçekleştiği alan arasında genel bir formül gereklidir. Bir ID sistemindeki ısı transferinin, yalnız akışkanlar arasında olduğu sistemin yalıtımlı ve herhangi bir ısı kaybının oluşmadığı kabul yapılsa, CPID’de meydana gelen ısı geçişi aşağıdaki bağıntılarla yazılabilir (Kılıç, 2013).

$$Q = U A \Delta T_m \quad (5.5)$$

Yukarıdaki eşitlikte Q (W) ısı değiştiriciden geçen ısı, U (W/m²C) toplam ısı transfer katsayısı, A (m²) ısı transferinin gerçekleştiği toplam yüzey alanı ve ΔT_m logaritmik ortalama sıcaklık farkı olarak açıklanabilir.

Sıcak ve soğuk akışkanların soğuma ve ısınma durumlarında verilen ve alınan ısılar, her iki akışkanın kütlesel debi değerleri ile birlikte giriş ve çıkış entalpi farkından şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = \dot{m} (h_i - h_o) \quad (5.6)$$

Sistemde ısının alınıp verilmesi esnasında akışkanların sıcaklıkları değişiyorsa ID’deki toplam ısı geçişi sıcak ve soğuk akışkan için ayrı ayrı şu şekilde yazılabilir:

$$Q = \dot{m}_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = \dot{m}_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \quad (5.7)$$

Isı değiştiricilerin belirli bir süre çalışması sonrasında CPID plaka yüzeyleri üzerine akışkan içindeki bazı parçacıklar, metal partiküller, çeşitli kimyasal bileşenler birikebilir. Bazı durumlarda ise korozyon nedeniyle, plaka yüzeylerinde oksidasyon tabakası meydana gelebilir. Plaka yüzeylerinde oluşan tüm bu kirlenme ve korozyon

tabakaları, ısı geçişi esnasında ilave direnç oluşturur. Kirlilik faktörü (R_f) olarak ifade edilen bu değer, ısı değiştirici plaka yüzeylerinin kirli ve temiz durumlarında oluşan ısı dirençlerin farkından şu şekilde belirlenir:

$$R_f = \frac{1}{U_k} - \frac{1}{U_t} \quad (5.8)$$

Plaka yüzeylerinde kirlenme gibi durumlar sonucunda oluşan pürüzlülük, plaka yüzeyleri arasındaki etkileşimi azaltarak bu yüzeylerde bir temas direnci meydana getirir. Plaka yüzeylerinde oluşan direnç etkileri sıcaklık değerlerinin azalmasına neden olur. Isı değiştirici uygulamalarında bu direnç etkilerini değerlendirebilmek için aşağıdaki formül yazılabilir:

$$R_f = \frac{(T_A - T_B)}{\frac{Q}{A}} \quad (5.9)$$

En genel anlamda, CPID yüzeyindeki toplam ısı transfer katsayısı tüm parametrelerin yer aldığı aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir (Kılıç, 2013):

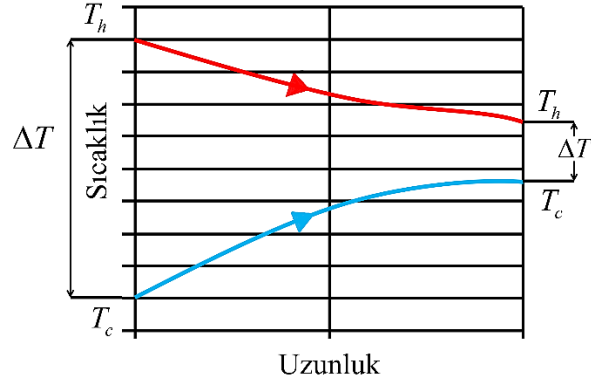
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_1} + R_{f1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + R_{t,1-2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + R_{t,2-3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{f2} \quad (5.10)$$

CPID kullanılan sistemlerin termodinamik hesaplarının gerçekleştirilmesinde Denklem (5.6) kullanıldığında ortalama logaritmik sıcaklık farkı (ΔT_m) parametresinin tanımlanması gerekmektedir. LMTD değeri, ısı değiştiricide gerçekleşen akış özelliğine bağlı olarak belirlenmektedir.

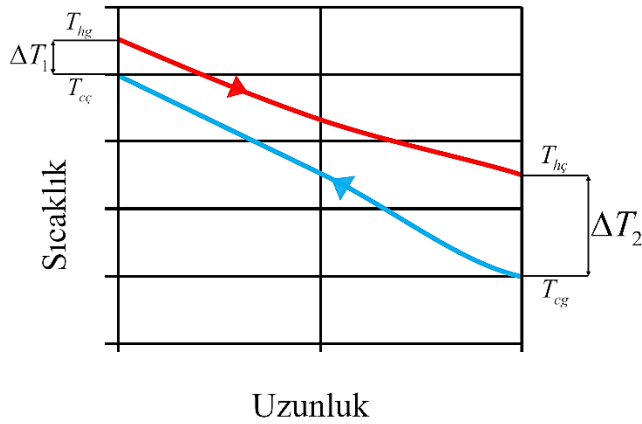
5.9.2. Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı (LMTD)

Contalı plakalı ısı değiştiricilerde akışkanların sıcaklık değerleri plaka yüzeyi boyunca değişmektedir. Sıcak ve soğuk akışkan arasında meydana gelen sıcaklık farkı değeri ne kadar yüksek olarak gerçekleşirse, ısı transferi de o miktarda artacaktır. ID içerisinde sıcaklık farkının değişkenlik göstermesi nedeniyle, LMTD metodunun kullanılması gerekmektedir. Paralel ve ters (karşıt) akış özelliğine sahip plakalı ısı değiştiricilerin logaritmik ortalama sıcaklık farkı hesaplamaları birbirinden farklıdır (Danışman, 2010).

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da CPID içerisinde gerçekleşen akış yapısının paralel ve karşıt akışlı olduğu durumlar için ID içerisindeki sıcaklık dağılımları grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Paralel akış yapısına sahip ısı değiştiricide sıcaklık dağılımı (Kılıç, 2013)



Şekil 5.19. Ters akış yapısına sahip ısı değiştiricide sıcaklık dağılımı (Kılıç, 2013)

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı (ΔT_m) şu formül ile ifade edilebilir:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}} \quad (5.11)$$

ΔT_m değeri denklem 5.6'da yerine taşınırsa CPID gerçekleşen ısı geçişi ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q = \frac{UA(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (5.12)$$

Plakalı ısı değiştirici uygulamalarında belirli giriş ve çıkış sıcaklık değerleri için ters akış yapısına sahip ısı değiştiriciye ait LMTD değeri paralel akış yapısına sahip ısı değiştiricinin aynı parametre değerine kıyasla daima daha büyüktür. Bu sayede ters akış yapısına sahip contalı plakalı ısı değiştiricilerde aynı yüzey alanı ve plaka sayısı ile daha yüksek kapasitede ısı transferi gerçekleştirilebilir (Çengel vd., 2011).

5.9.3. ϵ -NTU Metodu

Contalı plakalı ısı değıştircilerde, akışkanların giriş ve çıkış sıcaklıkları biliniyorsa LMTD metodu kullanılarak ısı hesaplamalar yapılabilir. Endüstride bazı durumlarda ise akışkan giriş ve çıkış sıcaklık değeri bilinmeyebilir. Bu durumda LMTD metodundan faydalanılacaksa deneme yanılma yöntemi kullanılabilir. Fakat kesin sonuç vermeyen metotlar yerine, etkinlik-NTU yöntemi olarak isimlendirilen doğruluğu daha yüksek sonuçlar veren bir yöntemin kullanılması daha etkili bir çözüm olacaktır. ϵ -NTU metodunun en önemli avantajı aynı proseste çalışacak ısı değıştircilerin birbirleri ile karşılaştırılmasını gerçekleştirerek uygulama için en iyi çalışma performansını sağlayacak cihazın kullanılmasını sağlar (Genceli, 2005).

ϵ -NTU metodu kullanıldığında sıcak akışkandan soğuk akışkana gerçekleşen ısı geçişi aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$Q = \epsilon C_{min}(T_{hi} - T_{ci}) = \epsilon C_{min}\Delta T_{max} \quad (5.13)$$

Burada C_{min} değeri, C_h ve C_c değeri içinde en küçük olan parametre değeri. ΔT_{max} ise sıcak akışkanın ısı değıştiriciye girdiği sıcaklık değeri soğuk akışkanın giriş sıcaklığına olan farkıdır. ϵ , ısı değıştirici etkinliği şeklinde ifade edilebilir. ısı değıştirici etkinliği genel anlamda aktarım birim değeri (NTU) ve ısı kapasite oranı (C^*) parametreleri ile ID içindeki akış yapısına bağlıdır. Etkinlik kavramı incelenirken ID verimi ile karıştırılmamalıdır. ID'nin verimi, soğuk akışkanın elde ettiği ısı miktarının, sıcak akışkanın verdiği ısı miktarına oranı olup, aradaki fark ısı değıştiriciden ortama verilen ısı miktarıdır. Etkinlik değeriye, ısı değıştiricinin normal işletme şartları altında sergilediği performansın, ideal olarak kabul edilen proses şartlarındaki performans değeriye oranı olarak ifade edilebilir (Danışman, 2010).

5.9.4. ısı Değıştirici Etkinliği (ϵ)

Etkinlik (ϵ), herhangi bir contalı plakalı ısı değıştiricide belirli akış şartlarında meydana gelen ısı geçişinin, mümkün olabilecek maksimum ısı geçişine oranı olarak belirtilebilir. ID etkinliği (ϵ) genel anlamda, ısı değıştiricinin sergilediği termal performans olarak ifade edilebilir (Shah ve Sekulic, 2003).

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (5.14)$$

Yukarıdaki denklemde, Q contalı plakalı ısı değıştiricide gerçekleşen ısı geçişi, Q_{max} ise mümkün olabilecek maksimum ısı geçişi olarak ifade edilebilir.

ε , genel anlamda 0 ile 1 arasında bir değer alabilir. $\varepsilon = 1$ olduğu durumda ısı değiştiricide düşük ısıl kapasitedeki akışkanın çıkış sıcaklık değeri, yüksek ısıl kapasitedeki akışkanın giriş sıcaklık değerine erişecektir (Kakac vd., 2002).

Ters akış yapısında çalışan CPID kullanılan bir sistemde, ısıl kapasite ile enerji dengesi şu şekilde tanımlanır:

$$Q = C_h(T_{hi} - T_{ho}) = C_c(T_{co} - T_{ci}) \quad (5.15)$$

Yukarıdaki denklemde $C_h < C_c$ olduğunda, sıcak akışkanın olduğu bölgede daha yüksek ısıl farkı meydana gelecek ve sonsuz ısı transfer alanı için sıcak akışkana ait çıkış sıcaklık değeri, soğuk akışkan giriş sıcaklık değerine eşitlenecektir. Bu durumda sonsuz ısı transfer alanına sahip ters akışlı ID için Q_{max} formülü aşağıdaki gibidir:

$$Q_{max} = C_{min}(T_{hi} - T_{ci}) = C_{min}\Delta T_{max} \quad (5.16)$$

Denklem 5.15 ve 5.16’da verilen bilgilere göre ısı değiştirici etkinliği:

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{hi} - T_{ho})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})} = \frac{C_c(T_{co} - T_{ci})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})} \quad (5.17)$$

olarak yazılabilir. ε tanımlaması için sadeleştirilmiş denklem aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{UA}{C_{min}} \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T_{max}} \quad (5.18)$$

Verilen denklemler değerlendirildiğinde sonsuz büyüklükte ısı transfer alanına sahip CPID’de soğuk akışkanın çıkış sıcaklık değeri en çok sıcak akışkan giriş sıcaklık değerine eşitlenecektir. Isı değiştiricide gerçekleşen toplam ısı transferi miktarı bu sıcaklık farkları ile ısıl kapasite değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu kapsamda ID’de elde edilecek en yüksek ısı transferini belirleyen parametre ısıl kapasite oranı olarak söylenebilir. Akışkanların özgül ısıları eşit olduğu durumlarda ise debi değerleri maksimum ısı transferi değerini belirlemektedir.

5.9.5. Isıl Kapasite Oranı (C^*)

Isı değiştirici uygulamalarında C^* ifadesi iki akışkandan düşük ısıl kapasitedeki akışkanın ısıl kapasite oranının, yüksek ısıl kapasitedeki akışkanın ısıl kapasite oranına bölümü şeklinde açıklanabilir. Bu ifade değerlendirildiğinde C^* için hiçbir zaman

1'den büyük bir değer alamayacağı ($C^* \leq 1$) söylenebilir. $C^*=1$ olduğu zaman ise ID sistemi kararlı hale gelmiş olarak kabul edilir.

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{(\dot{m}_{cp})_{min}}{(\dot{m}_{cp})_{max}} = \begin{cases} (T_{co} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{ho}) & C_h = C_{min} \text{ için} \\ (T_{hi} - T_{ho}) / (T_{co} - T_{ci}) & C_c = C_{min} \text{ için} \end{cases} \quad (5.19)$$

Yukarıdaki denklemde belirtildiği gibi C_{max} değerine sahip akışkanın giriş-çıkış sıcaklık değerlerinin farkı, C_{min} değerine sahip akışkanın giriş-çıkış sıcaklık değerlerinden daha düşük olacaktır.

C^* değeri, CPID sistemlerinde performansı belirleyen önemli bir parametredir ve sistemdeki akışkan debi değerleri, özgül ısıları ile ilişkilidir.

5.9.6. Aktarım Birim Sayısı (NTU)

Aktarım birim sayısı (NTU) değeri, ortalama ısı iletkenliğinin, akışkanların düşük ısı kapasite oranına (C_{min}) bölümü ile belirlenir. Boyutsuz bir parametre değeri olup, ID tasarım çalışmalarında oldukça önemli bir etkiye sahiptir (Shah ve Sekulic, 2003). Isı değiştiricilerin analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (5.20)$$

NTU değeri için ID boyutsuz ısı transfer kapasitesi olarak da ifade edilebilir. Bu nedenle tasarım parametresi olarak kabul edilir. NTU değeri ısı değiştiricinin yapısal olarak büyüklüğünü değil ID'deki ısı transferi ve transferin gerçekleştiği alanın büyüklüğünü ifade etmektedir.

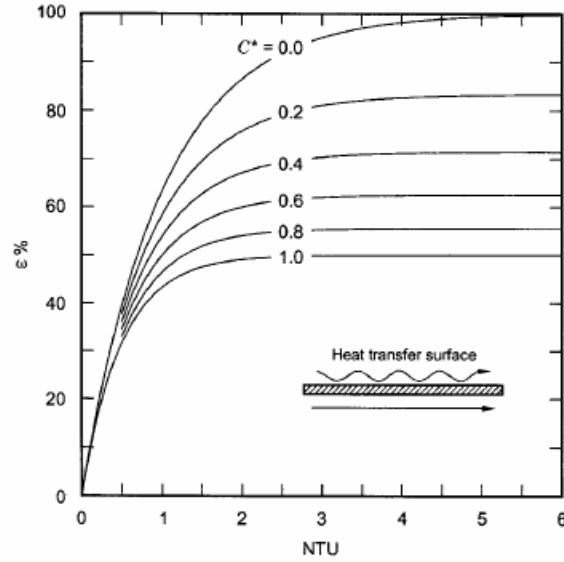
Denklem 5.19'da görüldüğü gibi NTU değeri U ve A parametre değerlerinin artırılması ile veya C_{min} parametresinin azaltılması sonucunda iyileştirilebilir. Düşük NTU değerlerinde CPID'nin etkinlik değerleri de düşüktür ve artan NTU değerleri ile etkinlik yükselir. İdeal bir ısı değiştiricide NTU değeri sonsuza ulaşacaktır, bunun nedeni ideal kabul edilen ID'de ısı transfer alanının da sonsuz değere sahip olmasıdır. Bu durum sonucunda ideal kabul edilen CPID etkinlik değeri (ϵ) ise %100 olacaktır.

5.9.7. Etkinlik (ϵ) - Aktarım Birim Sayısı (NTU) ilişkisi

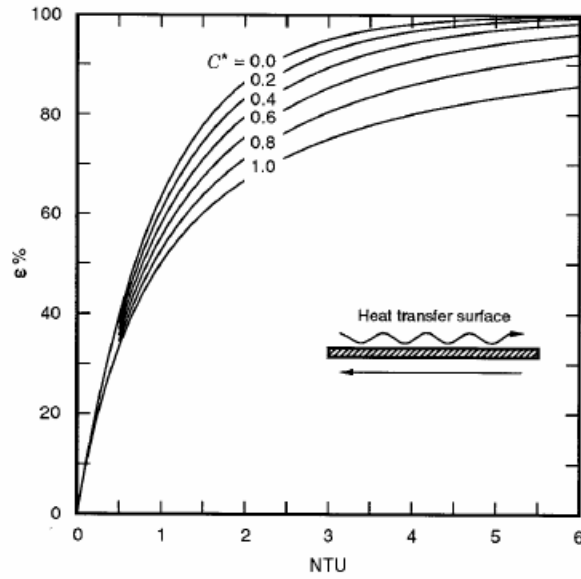
Contalı plakalı ısı değiştiricilerinde ϵ -NTU arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$NTU = \frac{1}{C-1} \ln \left[\frac{(\epsilon-1)}{(C-1)} \right] \quad (5.21)$$

Isı değiştirici sistemlerinde etkinlik ve NTU parametreleri ile C^* değerlerinin birbirleriyle ilişkisini görebilmek için aşağıda verilen grafikler göz önünde bulundurulmalıdır.



şekil 5.20. Paralel akışlı ısı değiştiricide NTU- C^* 'nin fonksiyonu olarak ϵ değerleri (Kakaç vd., 1983)



şekil 5.21. Ters akışlı ısı değiştiricide NTU- C^* 'nin fonksiyonu olarak ϵ değerleri (Kakaç vd., 1983)

Yukarıda verilen grafikler göz önüne alındığında, sabit bir C^* değerinde ısı değiştirici etkinliği, artan NTU değerlerine paralel olarak artmaktadır. $\epsilon = 1$ olduğu durum için ise NTU değerinin sonsuza ulaştığı ifade edilebilir. ϵ değeri, ters akış yapısındaki ID dışındaki diğer ısı değiştiricilerde (zellikle çapraz paralel akış yapılarında) hiçbir şekilde NTU=1 (%100) olamaz. Paralel akış yapısına sahip ısı değiştiricilerde NTU=1 olmamasının nedeni, akışın yapısı gereği soğuk su çıkış

sıcaklık değerinin hiçbir zaman sıcak su giriş sıcaklık değerine ulaşamayacak olması olarak söylenebilir.

Genel olarak belirli bir NTU ve C^* değerinde ters akışlı ısı değiştirici etkinliği diğer ID çeşitleri ile kıyaslandığında daha yüksek değerlere sahiptir. Aynı şekilde ters akış yapısına sahip değiştiricilerin verim değerleri de diğer ısı değiştiricilere kıyasla daha yüksektir. Bu kapsamda sadece ters akışlı ID sistemlerinde akışkanlar arası maksimum ısı geçişi elde edilebilmektedir.

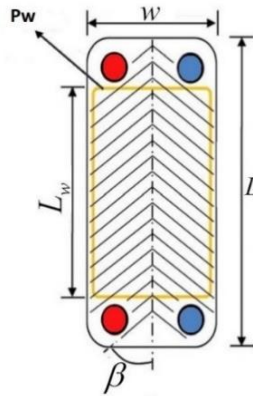
Isı değiştiricilerin sahip olunabilecek en yüksek etkinlik değerinde olup olmaması ID tasarımları ve üretim maliyetleri ile alakalıdır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan birçok modeldeki ısı değiştiriciler tüm yararlarına rağmen yüksek etkinlik değerlerine sahip değildir. Birçok endüstriyel uygulamada ID'sine ait ε değerinin olabilecek maksimum değerleri alması gerekmediği gibi bunu sağlayacak cihazların maliyeti de oldukça yüksektir. İşletme maliyetlerinin üstleneceği göreve göre önemli olduğu prosesler için $NTU \leq 2$ ve $\varepsilon \leq \%60$ özelliklerini sağlayan ID seçilmesi iyi bir performans sağlayarak maliyetleri önemli ölçüde azaltacaktır.

5.9.8. Kanal Hidrolik Çapı

Contalı plakalı ısı değiştiricilerde kanal hidrolik çapı (D_h) şu şekilde hesaplanır:

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (5.22)$$

Burada P_w ısı değiştirici plakası ıslak bölgesi olarak ifade edilir. ID plakasının contaları arasında kalan ve akışkanın genel olarak plaka yüzeyinde temas ettiği bölge Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. Isı değiştirici plakası akışkan temas bölgesi (ıslak bölge)

5.9.9. Basınç Düşüşü

Isı değıştirci uygulamalarının hemen hemen hepsinde ısı transferi ile basınç düşüşü arasında fiziksel ve en önemlisi de ekonomik açıdan bir ilişki bulunmaktadır. Sabit bir ısı kapasiteye sahip ısı değıştircide, akış hızlarının yükseltilmesi taşınım katsayısını artırır ve çok küçük ısı geçiş yüzeyine sahip (kompakt) tasarımların yapılmasına olanak sağlar. Bu sayede daha düşük maliyetlerde aynı kapasiteye sahip boyutları oldukça küçük veya daha kompakt yapıda ID tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilebilir. Fakat akışkan hızlarının artırılması ısı değıştirci sistemlerinde basınç kayıplarının da yükselmesine yol açar. Bu durum sistemde akışkan hareketini sağlayan pompanın gücünü artıracığından, pompa kapasitesinin büyümesi ve ek enerji tüketimi nedeniyle yatırım ve işletme maliyetlerini yükseltir. Bu nedenler ID tasarımları gerçekleştirilirken, ısı geçişı ile basınç düşüşü parametreleri birlikte düşünölmeli ve proses için bir optimizasyon yapılmalıdır.

Bütün ısı değıştirci sistemlerinde akış yapıları çok karmaşık formda olduğundan, basınç kayıplarının belirlenmesinde teorik hesaplamaların yanında deneysel verilerden ve uygulama örneklerinden yararlanılmalıdır. Bir ID sistemi içerisindeki toplam basınç kayıpları, akış hatlarında gerçekleşen basınç düşüşü ve yerel basınç kayıpları olarak iki parametre şeklinde düşünölebilir. Akış borularında meydana gelen basınç kayıpları, değışmeyen kesitteki borularda veya borular ile akışkan arasındaki sürtünmelerden oluşan basınç düşüşlerini ifade eder. Yerel basınç kayıpları ise akış gerçekleşirken kesit ve yön değıştirmelerin sebep olduğu kayıplardır. Aynı sıcaklık değerine sahip akışkanlardan farklı olarak, ısı değıştirci içerisindeki sıcaklık dağılımlarının oluşturduğu doğal taşınımlar da sistemde ilave bir basınç kaybı oluşturur. CPID’lerde meydana gelen toplam basınç kaybı, ID sisteminin tüm bölgelerinde meydana gelen basınç kayıplarının toplanması ile elde edilir.

5.9.10. Yerel Kayıplar

Isı değıştirci içerisinde akan akışkanların akış esnasında kesit değıştirmesi, dönüş yapması, ayrılması, birleşmesi sistemde basınç kayıpları meydana getirir. Tüm bu kayıplar genel anlamda yerel kayıplar olarak ifade edilir. Akışkanın hızında ve yönündeki meydana gelen değışimler, enerji kaybına sebep olan girdap hareketlerinin oluşmasına yol açar. Yerel kayıplar özellikle kısa mesafelerde meydana gelmesine

rağmen, akış boyunca oldukça uzun bir mesafede etkilerini gösterirler. Yerel kayıp değeri ise aşağıdaki şekilde formüle edilir:

$$\Delta P_y = K \frac{\rho v^2}{2} \quad (5.23)$$

Burada K yerel kayıp katsayısı olarak adlandırılır ve şu şekilde ifade edilir:

$$K = \frac{\Delta P D_h^2 \rho}{Re^2 \mu^2} \quad (5.24)$$

Denklem 5.24 de yer alan Re sayısı ise:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (5.25)$$

şeklinde hesaplanır.

5.9.11. Basınç Kaybı

Contalı plakalı ısı değiştiricilerinde basınç kaybı, kanal içindeki akış için aşağıdaki eşitlikten bulunabilir:

$$\Delta P_{CPIE} = f \frac{L_p \rho v^2}{d_h 2} \quad (5.26)$$

Plakalı ısı değiştirici sistemlerinde türbülanslı akış halinde sürtünme faktörü aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$f_{CPIE} = 1,22 Re^{-0,252} \quad (5.27)$$

Plakalar üzerindeki çıkıntılar nedeniyle, akış düz çıkıntısız kanallarda verilen değerlerden daha küçük Reynolds sayılarında türbülansa geçebilmektedir. Bu nedenle contalı plakalı ısı değiştiricilerinde $Re > 100-400$ gibi Reynolds sayısının düşük değerlerinde akış, türbülanslı kabul edilir (Kılıç, 2013).

5.9.12. Pompa Gücü

Isı değiştirici sistemlerinde akışkan tanklarından plakalı ısı değiştiricinin girişine kadar olan akış tesisatında meydana gelen basınç kayıpları tek tek hesaplandıktan sonra bunların toplamı hesaplanarak, ID sistemi içerisinde akışkan hareketini sağlamak için gereken pompa gücü aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$N_p = \frac{\dot{m} \sum (\Delta P)_t}{\rho \eta} \quad (5.28)$$

Yukarıdaki formülde pompa gücü değeri N_p , akışkanın kütleli debi değeri $\dot{m}$, sistemde oluşan toplam basınç kaybı $\sum(\Delta P)_t$, akışkanın ortalama sıcaklık değeri T göre yoğunluğu ρ ve kullanılan pompanın verimi ise η ile ifade edilmektedir.

Contalı plakalı ısı değıştircilerin kullanıldığı sistemlerde plaka yüzeylerinde oluşan kirlenme, plakaları yüzeyinde yer alan kanallarda kesit daralmalarına dolayısıyla da basınç kayıplarına neden olmaktadır. Kirlenme ve basınç düşüşü sebebiyle sistemde akışkan hareketini sağlayan pompalar daha yüksek güçlerde çalışarak elektrik tüketimini artıracaktır.

Sistemde meydana gelen basınç kayıplarının etkilerini gidermek için, daha büyük kapasite değerlerinde kullanılacak olan pompalar daha fazla güç çekecek ve ek enerji tüketimi gerçekleştirerek genel maliyetleri artıracaktır. Çevresel etkiler düşünüldüğünde sistem tarafından ihtiyaç duyulan ek enerjinin sağlanması doğaya fazladan karbondioksit (CO_2) emisyonu salınmasına sebep olacaktır.

5.10. Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışma sonucunda bulunan sonuçlar bazı ölçüm işlemlerinden meydana gelmektedir. Ölçümlerin yapıldığı aletler üreticiler tarafından belirlenen bazı doğruluk ve tolerans değerlerine sahiptirler. Bu değerler çalışmamızın sonuçlarını direkt olarak etkileyen belirsizliklerdir. Elde edilen deney sonuçlarındaki belirsizlik değerlerinin hesaplanması ile deney sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği pekiştirilecektir. Çalışmanın genelindeki belirsizliklerin hesaplanmasında standart hata analizi metodu kullanılmıştır (Kline ve McClintock, 1953).

Belirsizlik analizi gerçekleştirilecek deney sonuçları birden fazla bağımsız değişkene bağlı olabilir. İstenilen deneyisel sonuç değerleri bu bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Denklem 5.29'da sonuçları etkileyen bağımsız değişkenler gösterilmiştir.

$$Z = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.29)$$

Denklem 29'da Z istenilen sonuç değerinin ve x ise bağımsız değişkenleri göstermektedir. Her bir bağımsız değişkenin tek tek belirsizlik değerlerini w olarak belirtirsek, bu belirsizlik değerlerinin aynı sonuç üzerindeki toplam belirsizliği R için belirsizlik denklemi Denklem 5.30'daki gibi yazılabilir.

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.30)$$

Gerçekleştirilen çalışmada deneysel sonuçları etkileyen ölçüm parametreleri sıcaklık, ısı iletim katsayısı, basınç ve debi değerleridir. Bu ölçümler yardımıyla belirlenen temel sonuç Reynolds (Re) sayısıdır. Reynolds (Re) sayısının belirsizlik değerleri Denklem 5.31’de gösterilmiştir.

$$Re = (V, \nu, D) \quad (5.31)$$

Deneylerde kullanılan sıcaklık ölçer, debi metre, basınç transmitteri, wattmetre gibi ölçüm aletlerinin üretici firmaların oluşturduğu kullanım kılavuzlarındaki hassasiyet ve tolerans değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmamız kapsamında gerçekleştirilen ölçümler ve bu ölçümlere ait belirsizlikler Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Ölçümler ve belirsizlikler

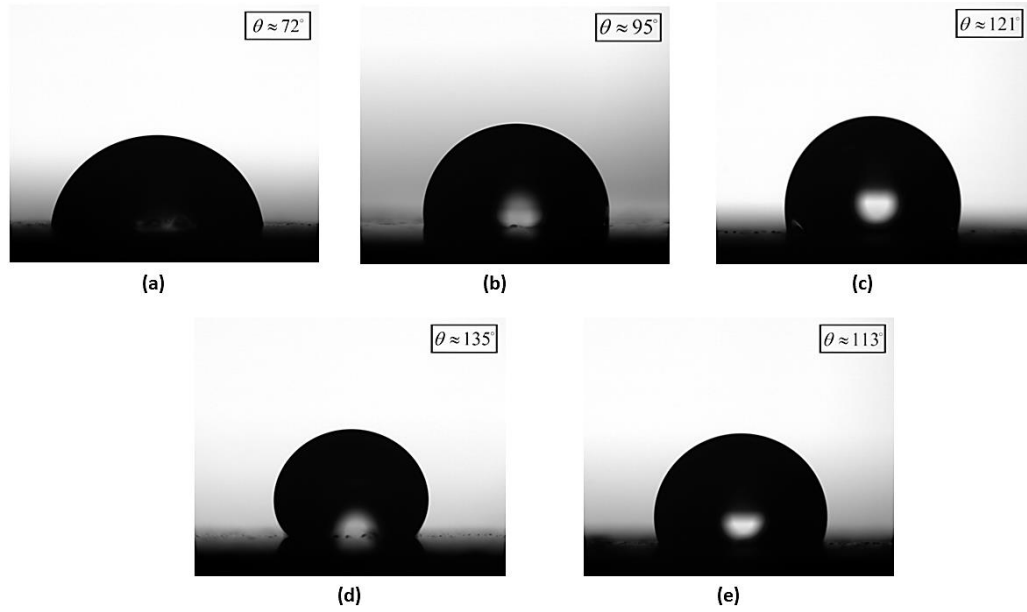
Değişkenler	Belirsizlikler
Sıcaklık	% 0.5
Hacimsel Debi	% 0.6
Geçiş birim sayısı	% 4
Etkinlik	% 4
Basınç	% 4.2
Wattmetre	% 0.2
Reynolds sayısı	% 5

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışması kapsamında farklı temas açısı değerlerine sahip hidrofofik yüzey kaplama solüsyonu sentezi gerçekleştirilerek, contalı plakalı ısı değiştiricinin mevcut tasarımı değiştirilmeden plaka ıslak yüzeyleri kaplanarak yapılmış olan deneysel çalışma sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan hidrofofik yüzey kaplama solüsyonlarının temas açısı ölçüm sonuçları, aşınma test sonuçları, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve SEM-EDX analizleri de bu bölümde değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen tüm sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

6.1. Hidrofofik Kaplamaların Temas Açısı (θ) Ölçüm Sonuçları

Temel bazda FEP malzeme ve içerisine belirli oranlarda kütlece % h-BN nano partikül toz eklenerek elde edilen hidrofofik yüzeylerin temas açıları (θ), optik tensiyometre cihazında dinamik ölçüm metodu kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler sonucu elde edilen temas açısı değerleri Şekil 6.1’de ve Tablo 6.1’de verilmiştir.



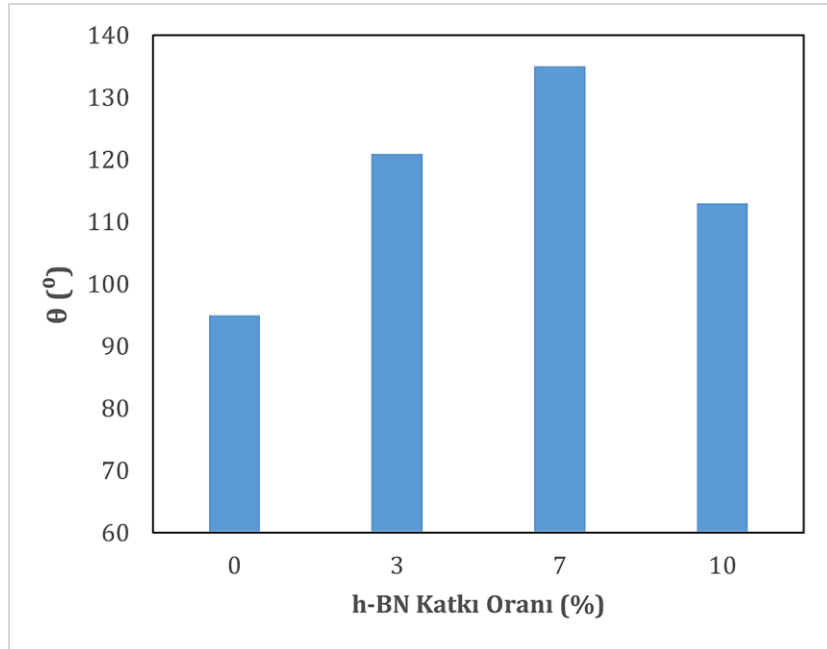
Şekil 6.1. Hidrofofik kaplama temas açısı değerleri: (a) UNC, (b) FEP, (c) FH3, (d) FH7, (e) FH10

Tablo 6.1. Temas açısı ölçüm sonuçları

Kaplama Kodu	Katkı Oranı (kütlece %)	Temas Açısı, θ ($^\circ$), ($\approx$)
UNC	-	72 $^\circ$
FEP	0	95 $^\circ$
FH3	%3	121 $^\circ$
FH7	%7	135 $^\circ$
FH10	%10	113 $^\circ$

Elde edilen temas açısı ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde h-BN nanopartikül tozlar ile hidrofobiklik değerinin artırılabilceği tespit edilmiştir. Burada en önemli parametrenin temel bazdaki solüsyona takviye edilen nanopartikül tozun kütlece % ekleme oranı olduğu belirlenmiştir. Temel bazda FEP malzeme içine % kütlece eklenen h-BN temas açısı değerini yani hidrofobikliği artırmıştır. Fakat kütlece ekleme oranının belirli bir değeri aşması ile temas açısı değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Nanopartikül eklenen solüsyonlar incelendiğinde, en düşük temas açısı değeri kütlece %10 h-BN eklenen solüsyonda 113° , en yüksek temas açısı değeri ise kütlece %7 h-BN eklenen solüsyonda 135° olarak ölçülmüştür.

Hidrofobik yüzey kaplama solüsyonu içerisine % kütlece eklenen h-BN oranına göre ısı değiştirici plakalarının temas açısı değerlerinin değişimi Şekil 6.2’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde temel bazda FEP içerisine eklenen h-BN nanopartiküller ile temas açısının arttığı fakat %10 eklenen durumda artışın azaldığı belirlenmiştir. Bunun nedeni ise kaplama malzemesi içine eklenen daha yüksek oranlardaki tozların yüzeyde pürüzlülük oluşturması sonucu plaka yüzeyinin gözenekli bir yapıya dönüşmesi ve yüzeydeki kaplama kalınlığının artması olarak açıklanabilir. Yüzeyde meydana gelen pürüzlülük, kaplama yüzey enerjisini bozarak su damlasının yüzey ile yaptığı açığı yani hidrofobiklik değerini etkilemektedir.



Şekil 6.2. Temas açısı değerlerinin h-BN katkı oranlarına göre değişimi

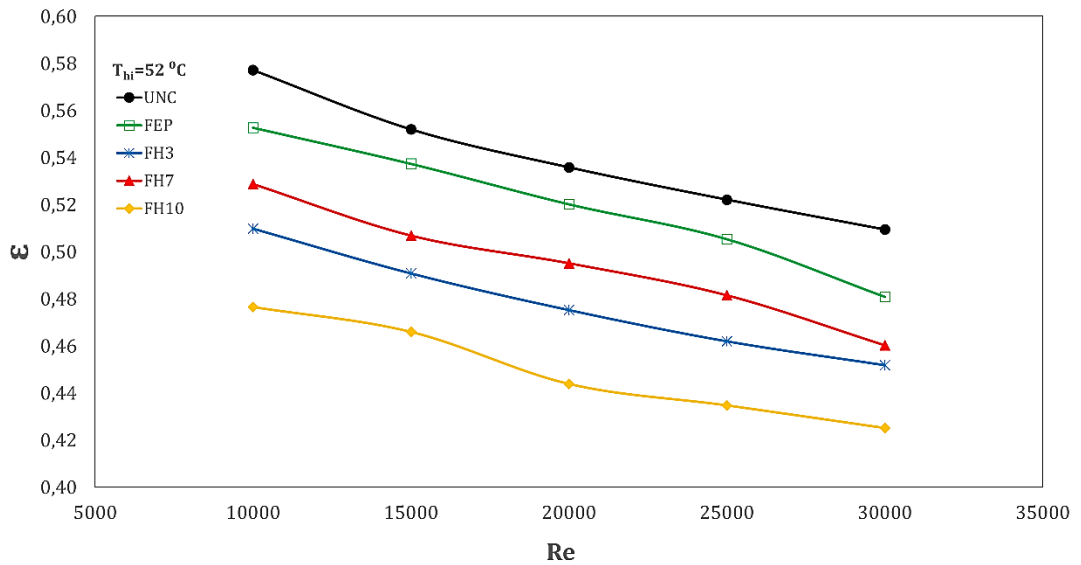
6.2. Isı Transferi Bulguları

Contalı plakalı ısı değiştiricide sıcak ve soğuk taraflar için ısı yükler, deney düzeneğinde ölçülen sıcak ve soğuk akışkanların giriş/çıkış sıcaklıklarına göre temel ısı transferi denklemleri kullanılarak, enerjinin ve kütlenin korunumu prensipleri dahilinde hesaplanmıştır. Hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış ve kaplanmamış ısı değiştiricide gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler ile ısı değiştiricide gerçekleşen ısı transferi sonuçları grafikler ile ifade edilmiştir.

6.2.1. ϵ -Re Sonuçları

Deney düzeneğinde akışkan giriş sıcaklığının 52-62-72 °C olduğu durumlarda elde edilen verilere göre CPID'ne ait etkinlik değerleri hesaplanmış ve Reynolds sayısına bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının ID performansına etkisini analiz etmek için hidrofobik malzeme ile kaplanmış ve kaplanmamış ısı değiştiricilerin etkinlik değerleri hesaplanarak Re sayısına bağlı olarak değişimi incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

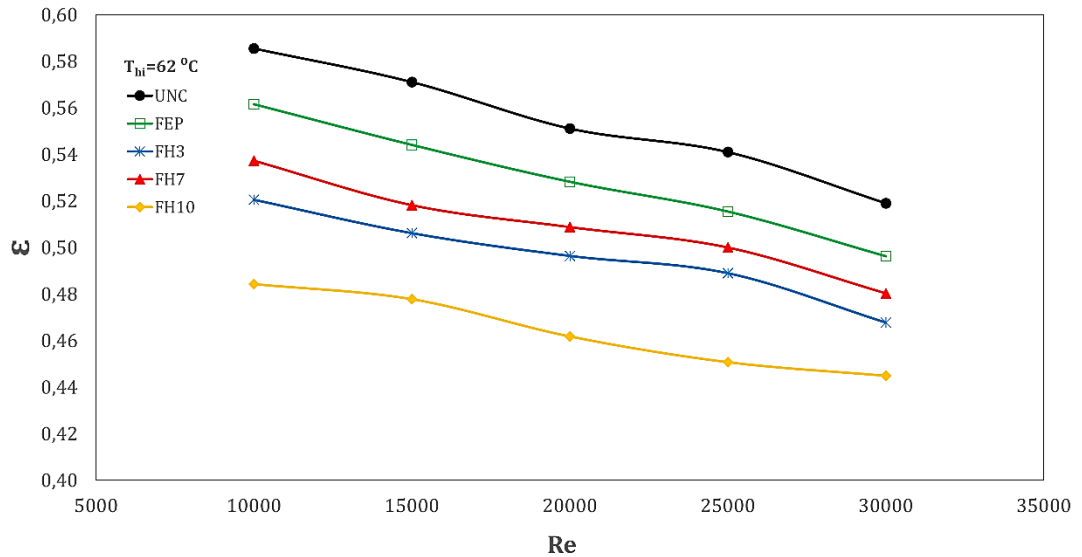
Akışkan giriş sıcaklığının 52 °C olduğu durumda ısı değiştirici etkinlik değerlerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ °C}$)

Şekil 6.3 incelendiğinde, ısı değiştirici etkinliğinin Re değerlerinin artması ile daha düşük değerlerde gerçekleştiği görülmektedir. En yüksek etkinlik değeri herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide 0.577 olarak belirlenmiştir. En düşük etkinlik değeri ise FH10 kaplı ısı değiştiricide 0.484 olarak elde edilmiştir. En iyi hidrofobik performansa sahip FH7 solüsyon ile yüzey kaplama işlemi uygulanmış ID etkinliği 0.529 olarak gerçekleşmiştir. FH7 ve FH3 kaplı ısı değiştiricilerin etkinlik değerlerini birbirine yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. FH7 kaplı ID etkinliği, FH3 kaplı ısı değiştiriciye göre %3.59 ve FH10 kaplı ısı değiştiriciye göre de yaklaşık %5.22 daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Akışkan giriş sıcaklığının 62 °C olduğu durumda contalı plakalı ısı değiştiriciye ait etkinlik değerleri Reynolds sayısına bağlı olarak Şekil 6.4'te verilmiştir.

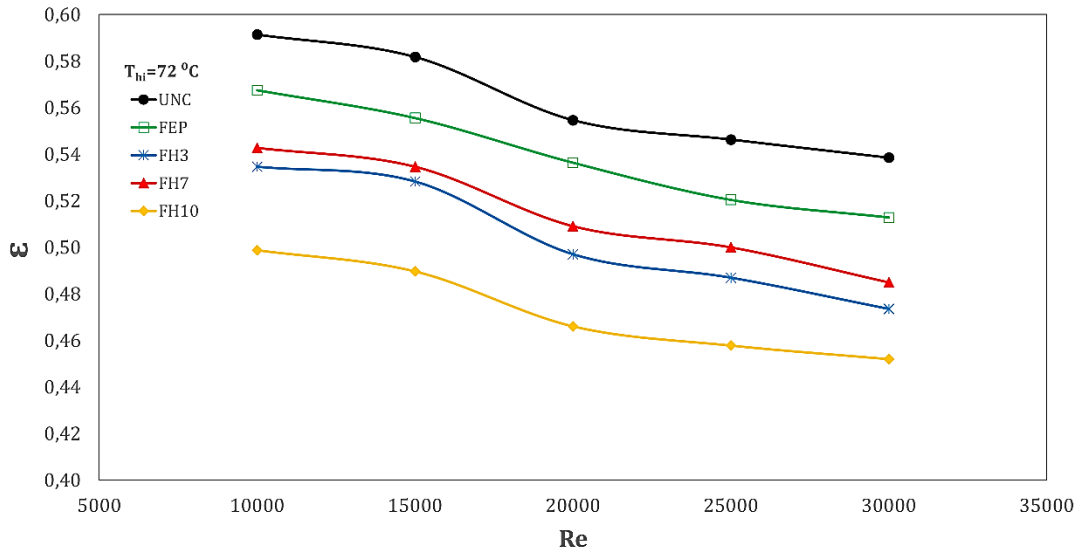


Şekil 6.4. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Yukarıdaki grafik incelendiğinde, artan Re değerlerinde ID etkinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Isı değiştiricisine ait etkinlik değerlerinin düşük Re sayılarında daha hızlı azalırken, Re=20000 değerinden sonra ise değişim hızı yavaşlamıştır. Şekil 6.4 incelendiğinde herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış contalı plakalı ısı değiştirici etkinlik değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek etkinlik değeri kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide 0.581, en düşük etkinlik değeri ise FH10 kaplama için 0.484 olarak gerçekleşmiştir. Hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, temas açılarının artması ile ID etkinliklerinin daha yüksek değerlerde meydana geldiği tespit edilmiştir.

En iyi temas açısına sahip FH7 solüsyon ile kaplanmış ID etkinlik değeri en yüksek 0.543, FH3 kaplı ısı değiştiricide 0.535 ve FH10 kaplı ısı değiştiricide ise 0.499 olarak belirlenmiştir. Temas açısı değerleri birbirine oldukça yakın olan FH7 ve FH3 kaplama solüsyonları için ısı değiştiricilerden elde edilen etkinlik değerlerinin de birbirine yakın olduğu görülmüştür. Hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış ID etkinlik değerleri karşılaştırıldığında FH7 kaplı ısı değiştiricinin FH10 kaplı ısı değiştiriciye göre % 8.1 daha yüksek etkinlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

$T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda farklı yüzey kaplamaları için ısı değiştirici etkinliğinin Re sayısına göre değişimi Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.5. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 6.5 incelendiğinde, artan Re değerlerinde ısı değiştirici etkinliğinin tüm durumlarda azaldığı belirlenmiştir. CPID etkinlik değerlerinin düşük Re değerlerinde daha hızlı azaldığı, $Re=20000$ değerinden sonra ise değişim hızının azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 6.5'te de görüldüğü üzere, kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricilerdeki etkinlik değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek etkinlik değeri kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide 0.591, en düşük etkinlik değeri ise FH10 kaplı ısı değiştiricide 0.452 olarak gerçekleşmiştir. Hidrofobik etkinin göstergesi olan temas açıları dikkate alındığında, temas açılarının artması etkinlik değerinin yükselmesine neden olmuştur. En yüksek temas açısına sahip FH7 solüsyon ile kaplanmış ID, FH3 ve FH10 solüsyon kaplı ısı değiştiriciler ile karşılaştırıldığında sırasıyla etkinlik farkları, %2.39 ve % 8.83 daha düşük olarak gerçekleşmiştir.

Yapılan deneylerde Re değerinin artması ısı değiştirici içerisindeki akışkanların ısı kapasite hızının artmasını sağlamıştır. Bu sebeple akışkanlar arası sıcaklık değişimi azalmış, bu durum ise etkinlik değerinin azalmasına sebep olmuştur. Yüksek Re sayılarında ısıyı transferini sağlamak için daha kısa süre olduğundan sıcaklık değişimi düşecektir. Bunun sonucunda ısı transferi daha düşük gerçekleştiği için etkinlik değeri düşük Re sayılarına kıyasla daha düşük olacaktır. Bu nedenle akışkan giriş sıcaklıklarının tüm değerlerinde, Reynolds sayısının artması ile etkinlik değerleri azalmıştır. En yüksek etkinlik değerleri akışkan giriş sıcaklığının en yüksek ve Re değerinin en düşük olduğu durumda elde edilmiştir. Yapılan tüm deneylerde sistemdeki akışkanın giriş sıcaklığının artması ile ID etkinlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. En yüksek etkinlik değeri $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Re=10000$ ve yüzey kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide 0.591 olarak elde edilmiştir. En düşük etkinlik değeri ise $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Re=30000$ ve FH10 solüsyon ile kaplanmış durumda 0.425 olarak belirlenmiştir. Yüzey kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricilerin etkinlik değerleri incelendiğinde en yüksek etkinlik $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda 0.591, en düşük etkinlik değeri ise $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda 0.509 olarak tespit edilmiş ve yaklaşık %13.87 iyileşme elde edilmiştir.

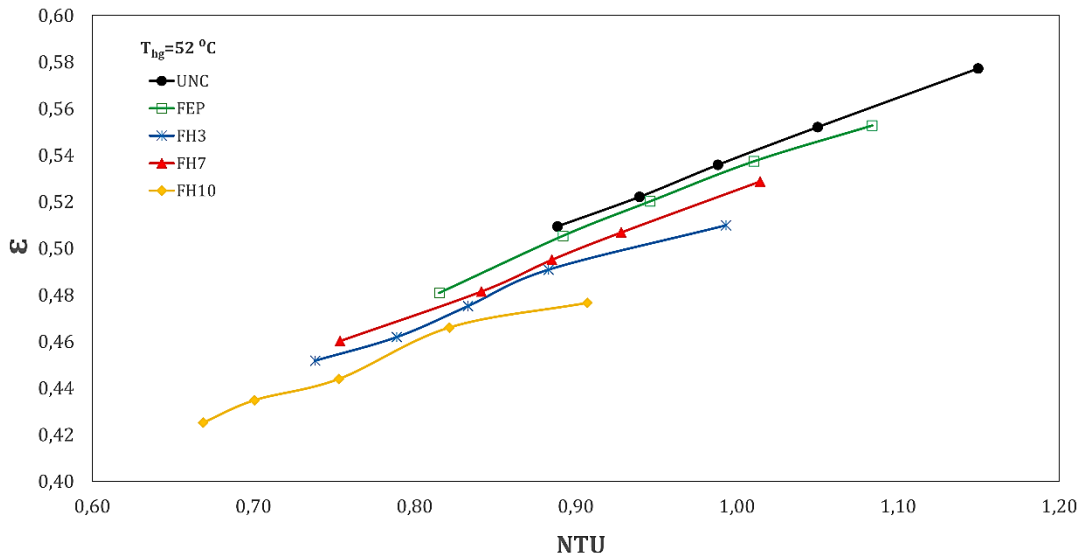
Tüm grafikler incelendiğinde, hidrofobik kaplamaların plaka yüzeylerinde oluşturduğu film kalınlığı etkisi ile plakalar arası geçişinin zorlaşarak ısı transferini düşürmesi sonucunda hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış contalı plakalı ısı değiştiricilerin etkinlik değerleri kaplama işlemi uygulanmamış ID etkinlik değerlerine oranla azaldığı tespit edilmiştir. Yalnızca hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerin etkinlikleri değerlendirildiğinde ise tüm akışkan giriş sıcaklık değerlerinde temas açısının artması ile etkinlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde en yüksek etkinlik değeri FH7 kaplı ısı değiştiricide $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Re=10000$ olduğu durumda 0.543, en düşük etkinlik değeri ise FH10 kaplı ısı değiştiricide $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Re=30000$ olduğu durumda 0.425 olarak belirlenmiş ve yaklaşık %21.73 iyileşme tespit edilmiştir.

En iyi performansların elde edildiği $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ için kaplanmamış ısı değiştiricinin etkinliği 0.591, $\theta=135^{\circ}$ temas açısı değerine sahip FH7 solüsyon ile plaka yüzeyleri kaplanmış ısı değiştiricinin etkinliği ise 0.543 olarak elde edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğine hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı değiştirici etkinliğini yaklaşık olarak %8.12 oranında düşürdüğü belirlenmiştir.

6.2.2. ϵ -NTU Sonuçları

Akışkan giriş sıcaklıklarının 52-62-72 °C olduğu durumlarda elde edilen verilere göre contalı plakalı ısı değiştiricilerine ait etkinlik ve NTU değerleri hesaplanmıştır. Grafik üzerinde ϵ ile NTU değerlerinin kesiştiği nokta ısı kapasite oranını (C^*) ifade etmektedir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı kapasiteye etkisini analiz etmek için tüm akışkan giriş sıcaklıkları için hidrofobik malzeme ile kaplanmış ve kaplanmamış ısı değiştiricilerin etkinlik değerlerinin NTU değerlerine göre değişimi incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Akışkan giriş sıcaklığının 52 °C olduğu durumda ters akış yapısına sahip contalı plakalı ısı değiştiricide meydana gelen ϵ -NTU değişimi farklı yüzey kaplamaları için aşağıdaki grafik ile ifade edilmiştir.

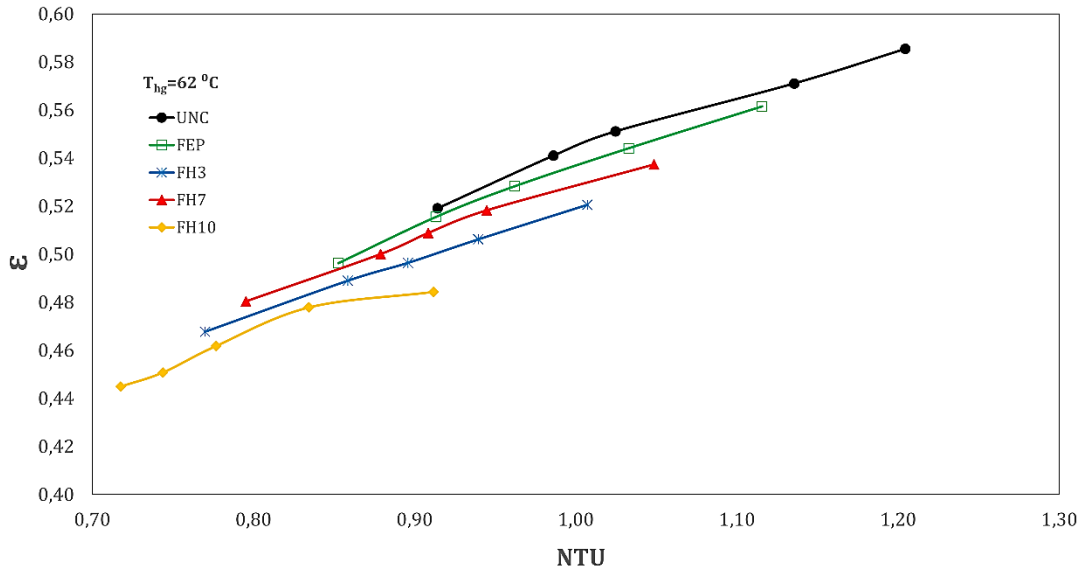


Şekil 6.6. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin NTU değerine göre değişimi ($T_{hi}=52$ °C)

Şekil 6.6 değerlendirildiğinde NTU değerlerinin artması ile kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricinin ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış contalı plakalı ısı değiştiricilerin etkinlik değerleri de artmaktadır. En yüksek artış kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide ve buna yakın olarak FEP kaplı ısı değiştiricide tespit edilmiştir. Hidrofobik kaplama işlemi uygulanmamış ID etkinlik değerlerinin daha yüksek olması sebebiyle, bu ısı değiştiricilerin ϵ -NTU değişimleri de daha yüksek olarak meydana gelmiştir.

Hidroforbik kaplamaların etkisi incelendiğinde ise artan temas açısı değerleri ile ID etkinliğin arttığı ve buna bağılı olarak C^* değerlerinin daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumda en yüksek ε -NTU değişimi FH7 kaplı ısı değiştiricide elde edilmiştir. Grafikte FH7 kaplı ısı değiştirici ile FH3 kaplı ısı değiştiricinin ε -NTU değişim değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Etkinlik değeri düşük olan FH10 kaplı ısı değiştiricide ise C^* değerlerinin oldukça düşük kapasitelerde olduğu belirlenmiştir. NTU=1 olduğu durumda kaplamasız ID etkinliği 0.536, FH7 kaplı ısı değiştiricide ise 0.520 olarak belirlenmiş ve yaklaşık olarak %2.98 düşüş tespit edilmiştir.

Akışkan giriş sıcaklığının 62 °C olduğu durumda farklı yüzey kaplamaları için contalı plakalı ısı değiştiricilerin ε -NTU değişimi Şekil 6.7’de görülmektedir.



Şekil 6.7. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin NTU değerine göre değişimi ($T_{hi}=62$ °C)

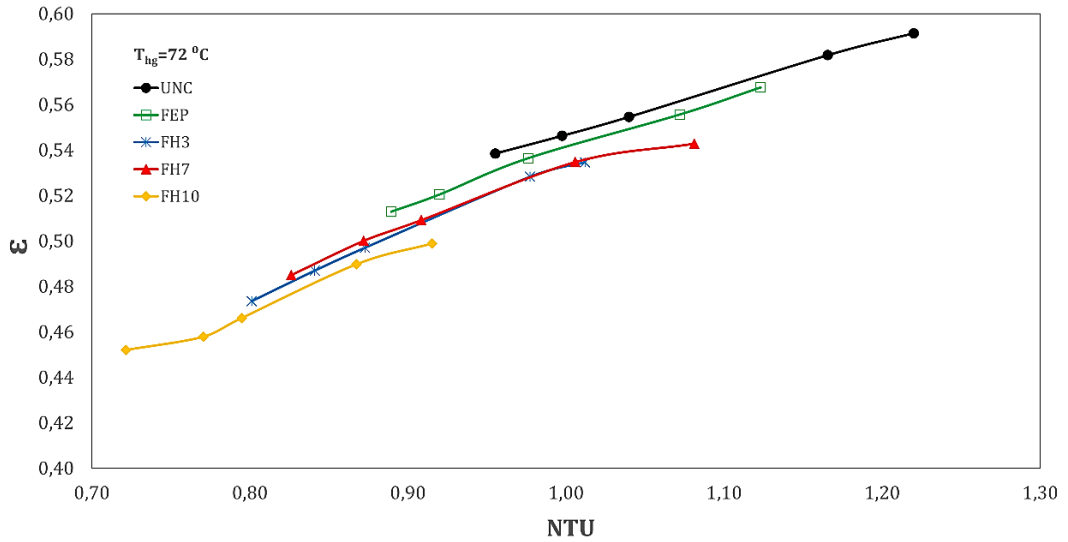
Yukarıdaki grafik incelendiğinde, ısı değiştirici etkinlik değerlerinin artması ile tüm durumlarda NTU değerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek ısı kapasitenin ise kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide meydana geldiği belirlenmiştir. Yüksek etkinlik değerine sahip ısı değiştiricilerde ε -NTU değişiminin de en yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir. En düşük ısı kapasite oranı (C^*) değeri ise etkinlik değeri oldukça düşük olan FH10 kaplı ısı değiştiricide meydana gelmiştir.

Hidroforbik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerin değişimi incelendiğinde ise en iyi performans FH7 kaplı ısı değiştiricide elde edilmiştir. Temas

açı değerleri birbirine yakın olan FH7 ve FH3 kaplı ısı değiştiricilerin ϵ -NTU değişimleri de birbirine yakın olarak gerçekleşmiştir. İçerisine herhangi bir nanopartikül eklenmemiş olan FEP solüsyon ile kaplanmış ısı değiştiricinin ϵ -NTU değişim değerleri kaplanmamış ısı değiştirici değerlerine yakın olarak belirlenmiştir.

NTU=1 olduğu durumdaki ısı kapasite oranları değerlendirildiğinde, kaplamasız ısı değiştiricide 0.548, en yüksek temas açısı değerine sahip FH7 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricide ise 0.53 olarak belirlenmiş ve yaklaşık %3.28 düşüş tespit edilmiştir.

Şekil 6.8’de akışkan giriş sıcaklığının 72 °C olduğu durumda farklı yüzey kaplamaları için plakalı ısı değiştiricinin ϵ -NTU değişimi verilmiştir.



Şekil 6.8. Farklı yüzey kaplamaları için etkinliğin NTU değerine göre değişimi (T_h=72 °C)

Şekil 6.8 incelendiğinde NTU değerinin artması ile hidrofobik kaplamalı ve kaplamasız tüm contalı plakalı ısı değiştiricilerin etkinlik değerleri de artmaktadır. En yüksek artış kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide meydana gelmiştir. Bunun sebebi kaplamasız ısı değiştiricilerde etkinlik değerlerinin daha yüksek olmasıdır. Sadece hidrofobik yüzey kaplamaların etkisi incelendiğinde ise artan hidrofobiklik değerleri ile ID etkinliğin arttığı belirlenmiştir. Bu durumda en yüksek artış FH7 kaplı ısı değiştiricide elde edilmiştir. Grafikte FH7 kaplı ID ile FH3 kaplı ısı değiştiricilerin ϵ -NTU değişim değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. NTU=1 olduğu durumda kaplamasız ID etkinliği 0.555, en iyi hidrofobikliğe sahip FH7 kaplama için ise 0.535 olarak belirlenmiş ve %3.6 düşüş tespit edilmiştir.

Yukarıdaki ε -NTU değişim grafikleri incelendiğinde, tüm akışkan giriş sıcaklık değerleri için birim ısı transfer değeri (NTU) artışı ile tüm durumlarda contalı plakalı ısı değiştiricilerin etkinlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılan ters akışlı ısı değiştiricilerde NTU ve C^* 'ın fonksiyonu olarak ε değerleri literatür ile uyum içerisinde (Kakaç vd., 1983).

Artan akışkan giriş sıcaklık değerlerinde ısı değiştirici etkinliğinin artması nedeniyle C^* daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek ε -NTU değişimleri ise yüzey kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricilerde elde edilmiştir. Bunun nedeni ID etkinlik değerlerinin yüksek olmasıdır. En yüksek C^* değeri $T_{hi}=72$ °C ve kaplamasız ısı değiştiricide NTU=1.22 için 0.528 olarak belirlenmiştir. En düşük C^* değeri $T_{hi}=52$ °C ve FH10 kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricide NTU=0.67 için yaklaşık 0.488 olarak tespit edilmiştir.

Hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiriciler değerlendirildiğinde FH7 kaplı ID ile FH3 kaplı ısı değiştiricilerin ε -NTU değişim değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. FH10 kaplı ısı değiştiricisine ait değerlerin çok daha düşük olduğu belirlenmiştir. Hidrofobik kaplı ısı değiştiricilerde, en düşük ε -NTU değişimi FH10 kaplı durumda NTU=0.669 için $C^*=0.425$, en yüksek ε -NTU değişimi FH7 kaplı ısı değiştiricide NTU=1.08 için $C^*=0.543$ olarak elde edilmiştir.

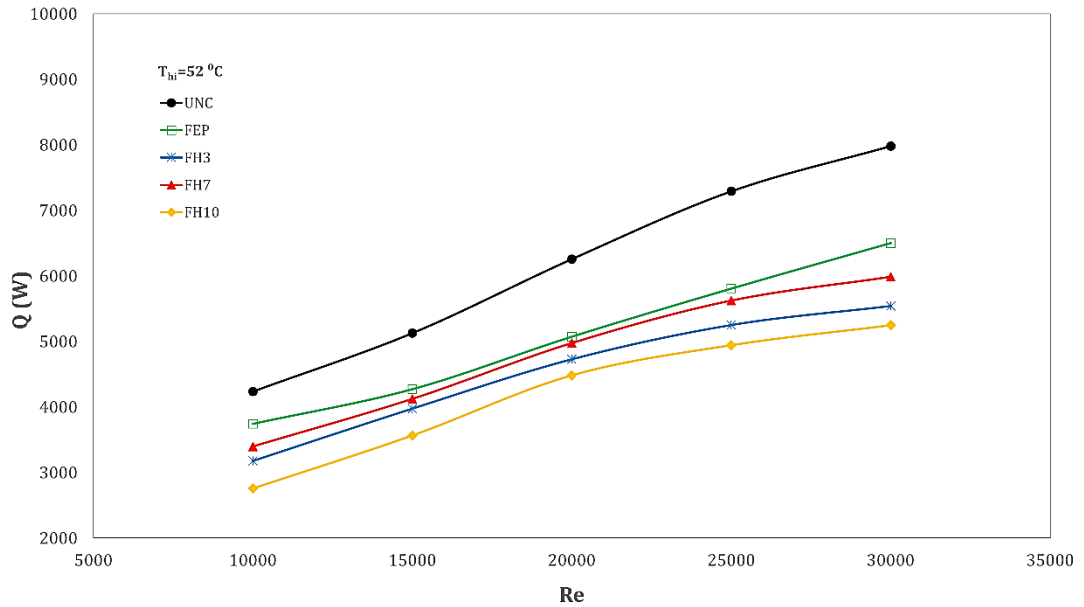
Grafikler değerlendirildiğinde ısı değiştirici etkinliğinin ortalama %40 ve daha az değerlere sahip olduğunda C^* değerindeki artış ve düşüşlerin, etkinlik üzerindeki etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni ε değerinin %40 ve daha düşük olduğu durumda NTU değerinin 0'a yaklaşması ve etkinlik değerlerinde belirleyici bir etkiye sahip olmasıdır (Danışman, 2010). Yine bu kapsamda tüm durumlar için contalı plakalı ısı değiştirici etkinlik değerlerinin artan NTU değerleri ile birlikte artacağı da grafiklerden anlaşılmaktadır.

ε -NTU grafikleri genel anlamda değerlendirildiğinde düşük ısıl kapasitedeki akışkanın debi değerinin daha fazla düşürülerek, akışkanın contalı plakalı ısı değiştirici içerisinde daha uzun süre dolaşımı sağlanabilir. ID sistemi içerisinde akışkan çıkış sıcaklık değerinin eğer sıcak akışkan ise daha da düşmesi, soğuk akışkan ise de daha da yükselmesi sağlanarak ısı değiştiricilerin etkinlikleri artırılabilir. Isı değiştirici etkinliğinin artırılması ile sistem ısıl kapasite oranları da buna bağlı olarak artacaktır.

6.2.3. Q-Re Sonuçları

Akışkan giriş sıcaklık değerlerinin 52-62-72 °C olduğu durumlarda elde edilen verilere göre contalı plakalı ısı değiştiricilerin ısı transfer değerleri hesaplanmıştır. Hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı değiştiricilerinde gerçekleşen ısı transferine etkisini analiz etmek için hidrofobik malzeme ile kaplanmış ve kaplanmamış ısı değiştiricilerde elde edilen sıcaklık değişimleri ve ısı transferi değerleri hesaplanmış, Re sayısına bağlı olarak değişimi incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

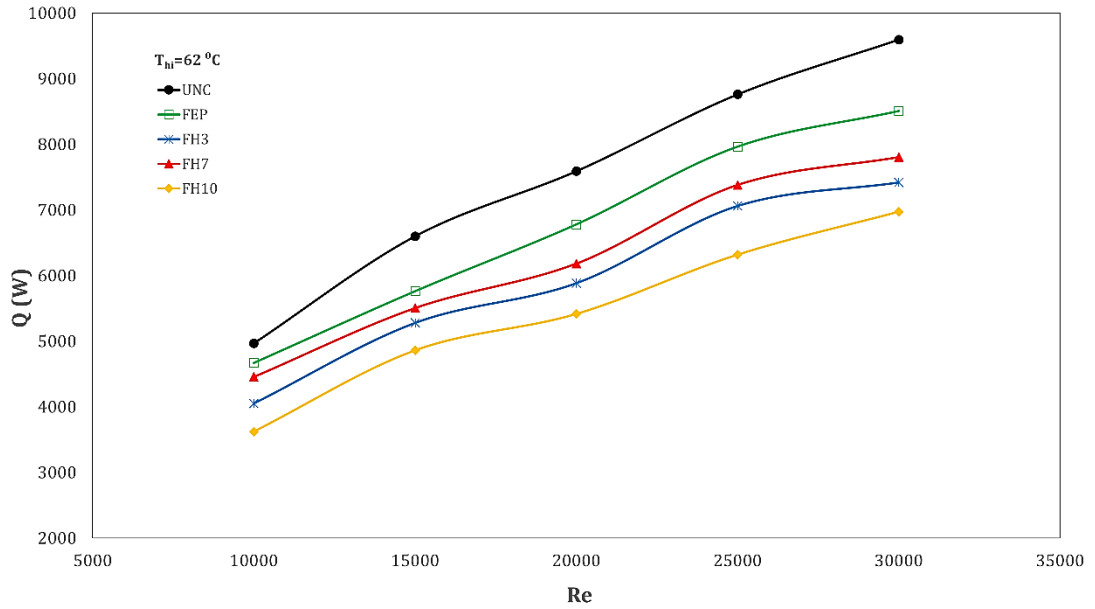
Akışkan giriş sıcaklığının 52 °C olduğu durumda ısı değiştiricilerinde meydana gelen toplam ısı transferinin Re sayısına göre değişimi Şekil 6.9'da belirtilmiştir.



Şekil 6.9. Farklı yüzey kaplamaları için ısı transferinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52$ °C)

Şekil 6.9 incelendiğinde, kaplamasız ve hidrofobik yüzey kaplamalı ısı değiştiricide artan Re değerlerinde toplam ısı transfer miktarının arttığı görülmektedir. En yüksek ısı transferi kaplamasız ısı değiştiricide $Re=30000$ değerinde 7983 W olarak meydana gelmiştir. En düşük ısı transferi miktarı ise FH10 kaplamalı ısı değiştiricide $Re=10000$ değerinde yaklaşık 2800 W olarak gerçekleşmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile contalı plakalı ısı değiştiricilerinde meydana gelen ısı transfer miktarlarının düştüğü tespit edilmiştir.

Akışkan giriş sıcaklığının 62 °C olduğu durumda contalı plakalı ısı değiştiricilerinde meydana gelen ısı transfer değerlerinin Re sayısına göre değişimi Şekil 6.10'da görülmektedir.



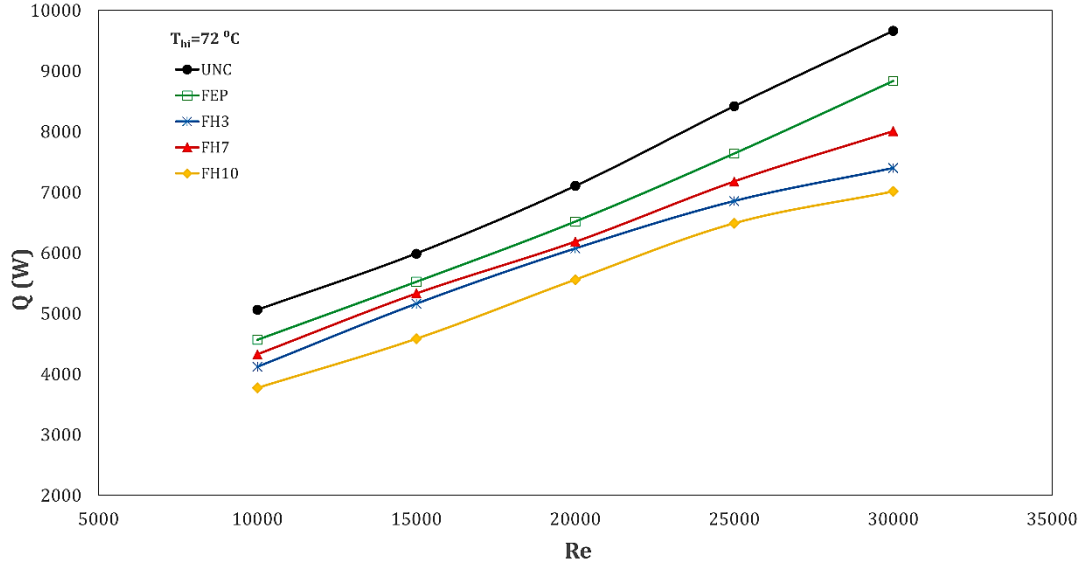
Şekil 6.10. Farklı yüzey kaplamaları için ısı transferinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ °C}$)

Yukarıdaki grafik incelendiğinde, kaplama işlemi uygulanmamış ve hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde artan Re değerlerinde toplam ısı transfer miktarının arttığı görülmektedir. En yüksek ısı transferi herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide Re=30000 değerinde 9590 W olarak belirlenmiştir. En düşük ısı transferi miktarı FH10 kaplamalı ısı değiştiricide Re=10000 değerinde yaklaşık 3625 W olarak gerçekleşmiştir.

Hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiriciler incelendiğinde ise artan temas açısı değerleri ile ısı transferi miktarının da arttığı tespit edilmiştir. Hidrofobik kaplamaların sürtünmeyi azaltarak akış hızını artırması ile artan hidrofobiklik değerlerinde toplam ısı transfer miktarı da artmıştır. Kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde en yüksek ısı transferi FH7 kaplı ID için Re değerinin en yüksek olduğu durumda 7805 W olarak elde edilmiştir. Temas açısı değerleri birbirine yakın olan FH7 ve FH3 kaplı ısı değiştiricilerin ısı transfer değerleri tüm Re değerlerinde birbirine yakın olarak gerçekleşmiştir. FH7 kaplı ısı değiştiricilerde elde edilen ısı transferinin FH3 kaplı duruma göre %4.93, FH10 kaplı ısı değiştiriciye göre ise yaklaşık %10.67 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Re=30000 için, FH7

kaplı ısı değıştiricide meydana gelen toplam ısı transferi kaplanmamış ısı değıştiriciye göre yaklaşık %18.65 daha düşük olarak elde edilmiştir.

$T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda farklı yüzey kaplamaları için ısı değıştiricide meydana gelen ısı transferinin Re sayısına göre değışimi Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Farklı yüzey kaplamaları için ısı transferinin Re sayısına göre değışimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 6.11 incelendiğinde, hidrofobik kaplamalı ve kaplamasız tüm durumlarda artan Re değerlerinde toplam ısı transfer miktarının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni ise contalı plakalı ısı değıştiriciye giren akışkan hızının artması ile Reynolds sayısının daha yüksek değerlere sahip olmasıdır. En yüksek ısı transferi kaplama işlemi uygulanmamış ısı değıştiricide $Re=30000$ değerinde 9663 W olarak belirlenmiştir. En düşük ısı transferi FH10 kaplamalı ısı değıştiricide $Re=10000$ değerinde yaklaşık 3773 W olarak gerçekleşmiştir.

Hidrofobik yüzeylerin kaplamasız yüzeylere göre ısı transferinde düşüşe neden olmasına rağmen temas açısı değerlerindeki artışa bağlı olarak ısı transferinde artış olması dikkat çekicidir. Şekil 6.11’de FH7 kaplamasının FH3 ve FH10’a göre ısı transferindeki değışime bakıldığında, FH3 kaplamasına göre %7.58 ve FH10 kaplamasına göre yaklaşık %12.41 daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Aynı Re değerlerinde, FH7 kaplı ısı değıştiricide meydana gelen ısı transferinin kaplanmamış duruma göre yaklaşık %17.14 daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Hidrofobik yüzey kaplamaları değerlendirildiğinde ise en yüksek temas açısı değerine sahip FH7 kaplı ısı değiştiricinin en iyi termal performansa sahip olduğu görülmektedir. $Re=30000$ değerinde FH7 kaplı ısı değiştiricide elde edilen toplam ısı transferi 5987 W olarak belirlenmiştir. FH7 kaplı ısı değiştiricilerde elde edilen ısı transferinin FH3 kaplı ısı değiştiriciye göre %7.41, FH10 kaplı ısı değiştiriciye göre ise yaklaşık %12.34 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. $Re=30000$ için, FH7 kaplı ısı değiştiricide meydana gelen toplam ısı transferinin kaplanmamış duruma göre yaklaşık %18.65 daha düşük olarak gerçekleştiği belirlenmiştir.

Yapılan deneyler sonucu elde edilen tüm veriler değerlendirildiğinde hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde ve kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricileri için tüm durumlarda artan Re değerlerinde toplam ısı transfer miktarının arttığı görülmektedir. Vaisi vd., (2011) ısı değiştiriciye giren akışkan hızının artmasının Reynolds sayısını arttırdığını dolayısıyla da ısı transfer katsayısının arttığını bunun sonucu olarak da toplam ısı transfer miktarının arttığını belirlemişlerdir. Toplam ısı transfer miktarlarının tüm durumlarda artan akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Kaplamasız ısı değiştiricide en yüksek Re değerinde ısı transferi, $T_{hi}=72$ °C için 9663 W iken $T_{hi}=52$ °C için 7983 W olarak elde edilmiş ve akışkan giriş sıcaklığına göre ısı transferinde yaklaşık %17.38 azalma olduğu belirlenmiştir. En yüksek ısı transferi kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide $T_{hi}=72$ °C ve $Re=30000$ değerinde 9663 W olarak elde edilmiştir. En düşük ısı transferi miktarı ise FH10 solüsyon ile kaplanmış ısı değiştiricide $Re=10000$ ve $T_{hi}=52$ °C için 5248 W olduğu tespit edilmiştir.

Hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferine etkisi incelendiğinde ise, kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde daha düşük ısı transferinin meydana geldiği belirlenmiştir (Salem, 2018). Bunun nedeni uygulanan kaplamanın plaka yüzeyleri üzerinde bir film tabakası oluşturması ve bu nedenle ısı geçişinin zorlaşmasıdır. Hidrofobik kaplamaların plaka ıslak yüzeylerinde oluşturduğu film kalınlığı nedeniyle ısı transfer hızlarında düşüş olmuştur (Rainieri vd., 2009). Kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerinde en yüksek ısı transferi FH7 kaplı ısı değiştiricide $T_{hi}=72$ °C ve $Re=30000$ için 8006 W olarak belirlenmiştir. En düşük ısı transferi FH10 kaplı ısı değiştiricide meydana gelmiştir. Aynı parametre değerlerinde FH7 kaplı ısı değiştiricide FH10 kaplı duruma göre yaklaşık %14.17 oranında daha

yüksek ısı transferi gerçekleşmiştir. Tüm durumlarda FH7 ve FH3 kaplı ısı değiştiricilerde elde edilen veriler birbirine yakın olarak belirlenmiştir.

Toplam ısı transferi değerleri incelendiğinde kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide $Re=30000$ değerinde ısı transferi miktarı 9663 W iken en iyi temas açısı değerine sahip FH7 yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricide 8006 W olarak elde edilmiştir. Aynı parametre değerleri için ısı transferinde hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile yaklaşık %17.14 azalma olduğu belirlenmiştir.

Q-Re grafikleri incelendiğinde tüm durumlarda ısı transfer artış oranı $Re=20000$ değerinden sonra yavaşlamıştır. Bunun nedenlerinden birisi deney düzeneğinde kullanılan contalı plakalı ısı değiştirici kapasitesi ile yüksek Re değerlerinde ortaya çıkan bazı uyumsuzluklardır. Diğer bir neden ise devir daim pompalarının contalı plakalı ısı değiştirici girişlerine çok yakın olmasından dolayı akışkanın ısı değiştiriciden çok hızlı şekilde geçerek ısı transferinin uygun bir şekilde gerçekleşmesine imkân vermemesidir. Bu durumda yüksek Re değerleri için bir üst kapasiteli contalı plakalı ısı değiştiricinin tercih edilmesinin sistem performansı ve çalışma verimliliği açısından daha uygun olacaktır.

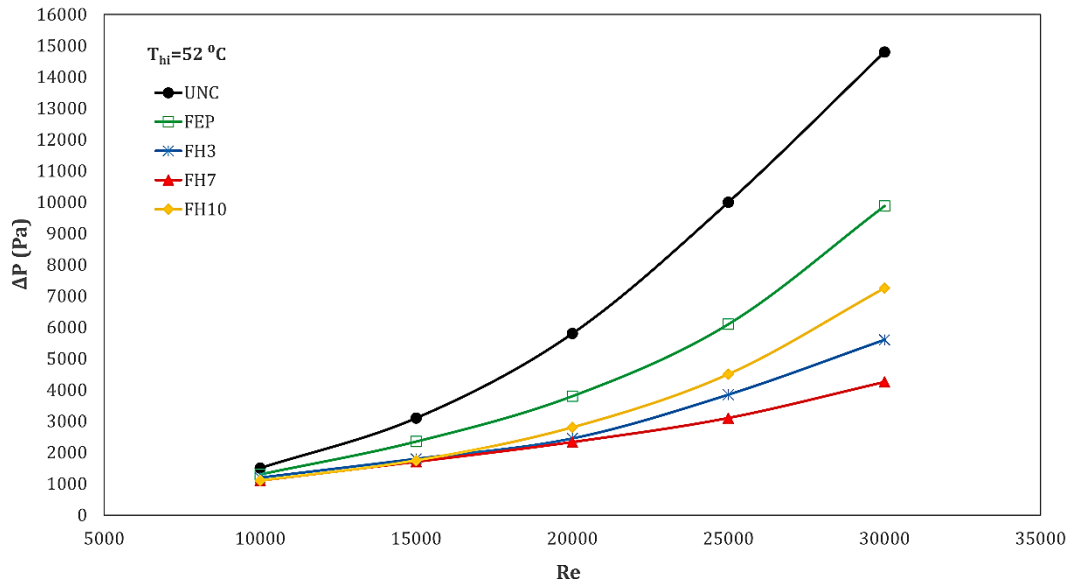
Hidrofobik kaplamaların ısı değiştirici plakalarının yüzeyinde oluşturduğu film kalınlığının toplam ısı direnci azaltması sonucunda meydana gelen ısı transferindeki düşüşün, hidrofobik yüzeylerde oluşan türbülans etkileriyle azaldığı belirlenmiştir. Contalı plakalı ısı değiştiricide gerçekleşen ısı transferi sonuçları değerlendirildiğinde, kullanılan yüzey kaplama malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile temas açısı değerlerinin oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

6.3. Basınç Kaybı Bulguları

Isı değiştiricilerin kullanıldığı sistemlerde ısı transferi ile basınç düşüşü arasında çok yakın tasarımsal ve ekonomik bir ilişki vardır. Sabit bir ısı kapasitesi için tasarımı yapılmak istenilen ısı değiştirici için akışkan hızlarının artırılması ile daha küçük boyutlarda kompakt bir yapı sağlanabilir. Tasarımsal iyileşmeye karşılık akışkanların hızlarının artması ısı değiştirici içerisindeki basınç düşüşünün de artmasına neden olur. Artan basınç kayıpları ile sistemde akışkan hareketini sağlayan pompaların gücü artacağından yatırım masrafları da artacaktır. Bu nedenle, ısı değiştirici tasarımı veya seçimi yapılırken, ısı transferi ile basınç düşüşü birlikte düşünülmeli ve uygulama için en uygun çözüm aranmalıdır.

Yapılan çalışmada, farklı temas açısı değerlerine sahip hidrofofik yüzey kaplamalarının contalı plakalı ısı değıştirici sistemindeki basınç değışimlerine ve kayıplarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler farklı akışkan sıcaklık değışimlerinde hidrofofik kaplama işlemi uygulanmış ve kaplamasız ısı değıştiriciler için karşılaştırmalar yapılarak değışlendirilmiştir.

Akışkan giriş sıcaklığının 52 °C olduğu durumda contalı plakalı ısı değıştiricide meydana gelen basınç kayıplarının Re sayısına göre değışimi Şekil 6.12’de verilmiştir.

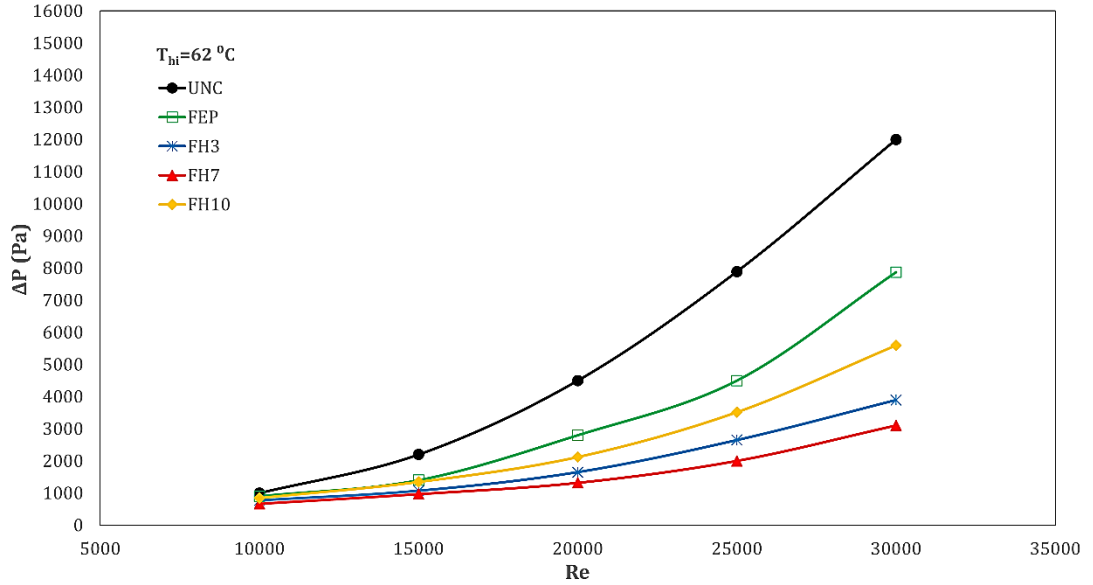


Şekil 6.12. Farklı yüzey kaplamaları için basınç kayıplarının Re sayısına göre değışimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Yukarıdaki grafik incelendiğinde, artan Re değışimlerinde basınç kayıplarının da arttığı görülmüştür. Düşük Re değışimlerinde hidrofofik kaplı ısı değıştiricilerin basınç kayıplarının birbirine yakın iken $Re=20000$ değışiminden sonra aradaki fark belirginleşmiştir. Bu değışim noktası akış yapısının değışerek türbölanslı hale geçtiği durumdur. En yüksek basınç kaybı kaplamasız ısı değıştiricide $Re=30000$ değışiminde 14800 Pa olarak belirlenmiştir. Hidrofofik kaplı ısı değıştiricilerde ise basınç düşüşlerinde önemli düzeyde iyileşmeler olduğu görülmüştür. En iyi hidrofofik özellikte olan FH7 solüsyon ile kaplanmış ısı değıştiricide $Re=30000$ değışim için 4250 Pa olarak belirlenmiştir. FH7 kaplı ısı değıştiricide elde edilen veriler kaplamasız ID ile karşılaştırıldığında basınç kayıplarında %71.28 iyileşme tespit edilmiştir. Hidrofofik özelliği düşük olan FH10 ve FEP kaplı ısı değıştiricilerde basınç kayıpları daha yüksek değışimlere sahip olduğu belirlenmiş ve hidrofofik etki ile basınç kayıplarının engellenebileceği görülmüştür. Hidrofofik özelliği benzer olan FH3 ve

FH7 solüsyonları ile kaplı ısı değiştiricilerin basınç kayıp değerleri de beklenildiği gibi birbirlerine yakın değerler almışlardır.

Akışkan giriş sıcaklık değerinin $T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda, ısı değiştiricide meydana gelen basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi kaplamasız ve hidrofobik kaplanmış ısı değiştiriciler için Şekil 6.13'te verilmiştir.

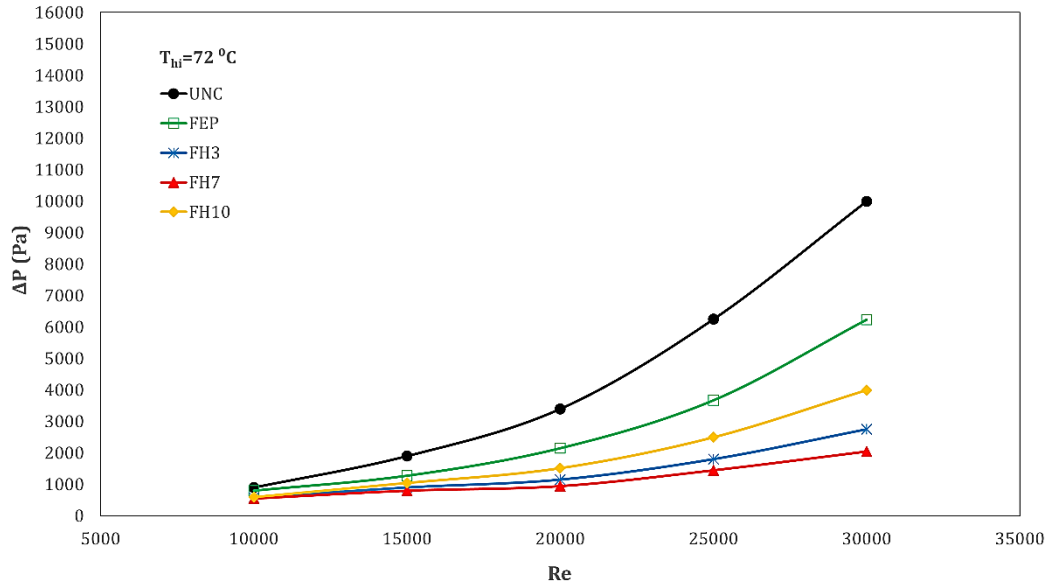


Şekil 6.13. Farklı yüzey kaplamaları için basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 6.13 incelendiğinde, kaplamasız ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış tüm ısı değiştiricilerinde, artan Re değerleri ile basınç kayıplarının da arttığı görülmektedir. Düşük Re değerlerinde basınç düşüşlerinin oldukça az ve birbirine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni düşük Re değerlerinde akış yapısının türbülanslı duruma henüz geçmediğinden akışın yapısında bozulmaların fazla olmamasıdır. Re değeri yükseldikçe akış yapısında meydana gelen türbülans etkileri ile basınç kayıpları artmıştır ve hidrofobik kaplamaların sağladığı olumlu etki de belirgin hale gelmiştir. En yüksek basınç kaybı kaplamasız ID Re=30000 değerinde 12000 Pa olarak belirlenmiştir. Aynı Re değerinde en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 kaplı ısı değiştiricide basınç düşüşü 3100 Pa olarak elde edilmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile basınç düşüşlerinde yaklaşık %74.16 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. En düşük basınç kaybı ise yine FH7 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış CPID'de Re=10000 değeri için 670 Pa olarak meydana gelmiştir. Basınç kaybı değerlerinin Re=25000 değerinden sonra akış yapısındaki bozulmanın

hızlanması sonucu türbülans etkileri ile daha belirgin bir yükseliş eğrisine sahip olduğu grafikte görülmektedir.

Akışkan giriş sıcaklığının 72 °C olduğu durumda ısı değiştiricide meydana gelen basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi tüm akışkan giriş sıcaklıkları için Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.14. Farklı yüzey kaplamaları için basınç kayıplarının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72$ °C)

Yukarıdaki grafik incelendiğinde, kaplamasız ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricilerde, artan Re değerlerinde basınç kayıplarının arttığı görülmektedir. En yüksek basınç kaybı herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide, $Re=30000$ değerinde 10000 Pa olarak belirlenmiştir. En düşük basınç kaybı en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplanmış ısı değiştiricide $Re=30000$ için 2050 Pa olarak ölçülmüştür. Sistemin genel olarak en düşük basınç kaybı değeri FH7 kaplama için $Re=10000$ değeri için 550 Pa olarak meydana gelmiştir. Temas açısı değerleri birbirine yakın olan FH3 ve FH7 solüsyonların kullanıldığı ısı değiştiricilerde basınç düşüş değerleri de birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Hidrofobik kaplamaların etkisi ile sistem içerisinde meydana gelen basınç düşüşlerinde %79.5 iyileşme tespit edilmiştir. Basınç kaybı değerlerinin düşük Re sayılarında birbirlerine oldukça yakın olduğu fakat akışkan hızının artması sonucu oluşan türbülanslı yapı ile daha belirgin farklı değerlerde elde edilmiştir.

Isı değiştirici uygulamalarında kullanılan akışkanların fiziksel ve kimyasal özellikleri ısı transferini, performansı ve kullanım ömrünü etkileyen önemli bir

parametredir. Isı transfer katsayısı ve sistemdeki basınç kaybı değerlerinin yüksek olması daha düşük ısı transferinin gerçekleşmesine neden olur. Bu durum ise ısı değiştiricinin etkinliğini düşürerek çalışma performansını etkiler. Basınç kaybı grafikleri incelendiğinde tüm durumlar için akışkan giriş sıcaklığının artması ile basınç düşüşlerinde iyileşmeler olduğu görülmüştür. Kaplamasız ısı değiştiricide $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$ için en yüksek basınç kaybı 14800 Pa iken $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ için bu değer 10000 Pa olarak meydana gelmiştir ve sıcaklığın etkisi ile basınç kayıplarında %32.43 iyileşme sağlanmıştır. Kaplamasız ısı değiştiricide $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$ için en düşük basınç kaybı değeri ise 1500 Pa iken $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ için bu değer 900 Pa olarak meydana gelmiştir ve basınç kayıplarında %39.99 iyileşme sağlanmıştır. Düşük Re değerlerinde basınç kayıplarının daha az meydana geldiği belirlenmiştir (Tsai vd., 2009).

Basınç kaybı değerlerinin düşük Re sayılarında birbirlerine oldukça yakın olduğu fakat akışkan hızının artması sonucu oluşan türbülanslı yapı ile daha belirgin farklı değerlerde elde edilmiştir. Düşük Re değerlerinde basınç değişimlerinin akışkanın giriş sıcaklığından çok fazla etkilenmediği ancak yüksek Re değerlerinde basınç kayıplarının büyümesi ile akışkan sıcaklığının da etkili olduğu belirlenmiştir (Da Silva vd., 2021). En iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplı ısı değiştirici için $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $Re=10000$ olduğu durumda en yüksek basınç kaybı 1100 Pa iken $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ için bu değer 550 Pa olarak meydana gelmiştir ve sıcaklığın etkisi ile basınç kayıplarında yaklaşık olarak %49.99 iyileşme elde edilmiştir.

Elde edilen tüm basınç kayıp grafikleri incelendiğinde en yüksek basınç kayıpları herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricilerde Re sayısının maksimum olduğu durumda meydana gelmiştir. En düşük basınç kaybı ise en iyi hidrofobikliğe sahip FH7 kaplanmış ısı değiştiricilerinde elde edilmiştir. Uygulanan hidrofobik solüsyonunun sahip olduğu düşük sürtünme ve katı yağlayıcı özellikler ile plaka yüzeylerinde akışkanlar daha hızlı ederek basınç kayıpları azaltılmıştır.

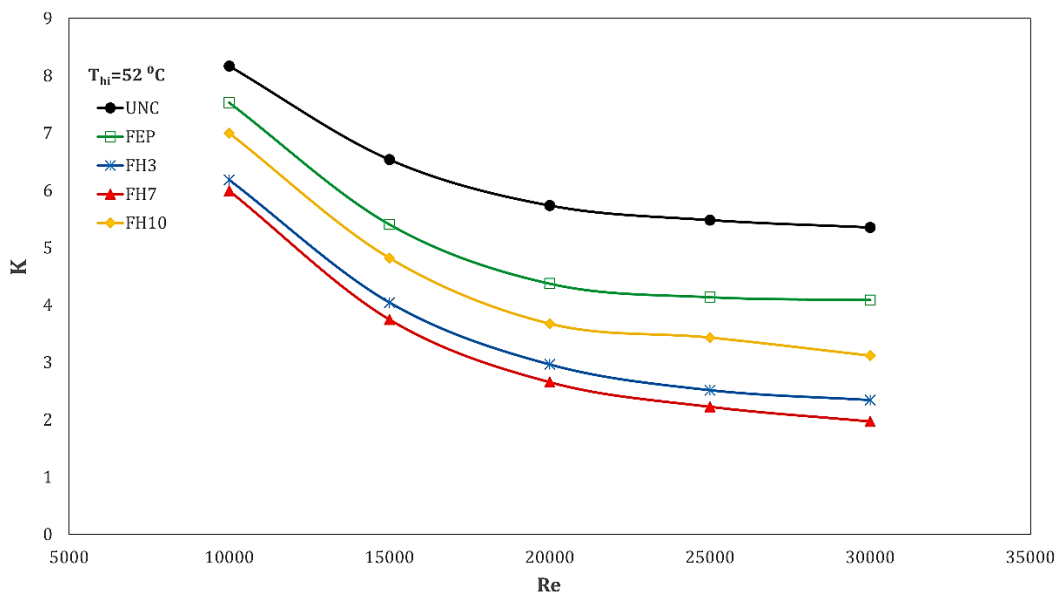
Plaka yüzeylerine uygulanan hidrofobik kaplamaların etkisi ile akışkanın türbülanslı hale geçişi hızlandırılmış ve daha düşük Re sayılarında akışın yapısının değişmesi sağlanmıştır. Tüm bunlar değerlendirildiğinde hidrofobik yüzey kaplamaları kullanarak basınç kayıpları azaltılarak ısı değiştirici sistemlerinin performansı iyileştirilebilir. Basınç kayıplarının azaltılması ile az plaka kullanılarak daha düşük yatırım maliyetlerinde ısı değiştirici dizaynı yapılabilir.

6.4. Yerel Kayıp Bulguları

Isı değiştiricilerin kullanıldığı sistemlerde meydana gelen tüm kayıplar ısı değiştirici performansını ciddi bir şekilde etkilemektedir. ID içerisinde akışkanların tesisat boyunca akarken kesit değiştirmesi, dönmesi, ayrılması, birleşmesi kayıplara sebep olur ve bu tüm bu kayıplar genel anlamda yerel kayıplar olarak adlandırılır. Akışkanın hızında, ısı değiştirici içerisindeki giriş ve çıkış yönündeki değişiklikler enerji kaybına sebep olan bazı girdapların ve akış bozukluklarının oluşmasına neden olur. Yerel kayıplar çok kısa mesafede oluşmasına karşın, akış hattı boyunca uzun bir mesafede sisteme etkilerini sürdürürler. ID sistemlerinde ortaya çıkan yerel kayıplar, ısı değiştirici tasarımı veya seçimi yapılırken, ısı transferi ve basınç düşüşü ile birlikte dşnlmelidir. ID seçiminde yerel kayıplar dikkate alınmazsa kapasite yetersizliği ile karşılaşılabilir veya büyüklük nedeniyle yüksek maliyetler oluşabilir.

Yapılan çalışmada, contalı plakalı ısı değiştiricinin plaka yüzeylerine hidrofobik kaplama işlemi uygulayarak ısı değiştiricinin bir sistem elemanı olarak sebep olduğu kayıplar ve değişimler incelenmiştir. Isı değiştiricinin sebep olduğu kayıplar denklem (5.24) kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler farklı akışkan sıcaklık değerlerinde, farklı temas açı değerlerine sahip hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış ve kaplamasız ısı değiştiriciler için karşılaştırmalar yapılarak değerlendirilmiştir.

Akışkan giriş sıcaklık değerinin $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda, sistemde meydana gelen yerel kayıpların Re sayısına göre değişimi şekil 6.15'te verilmiştir.

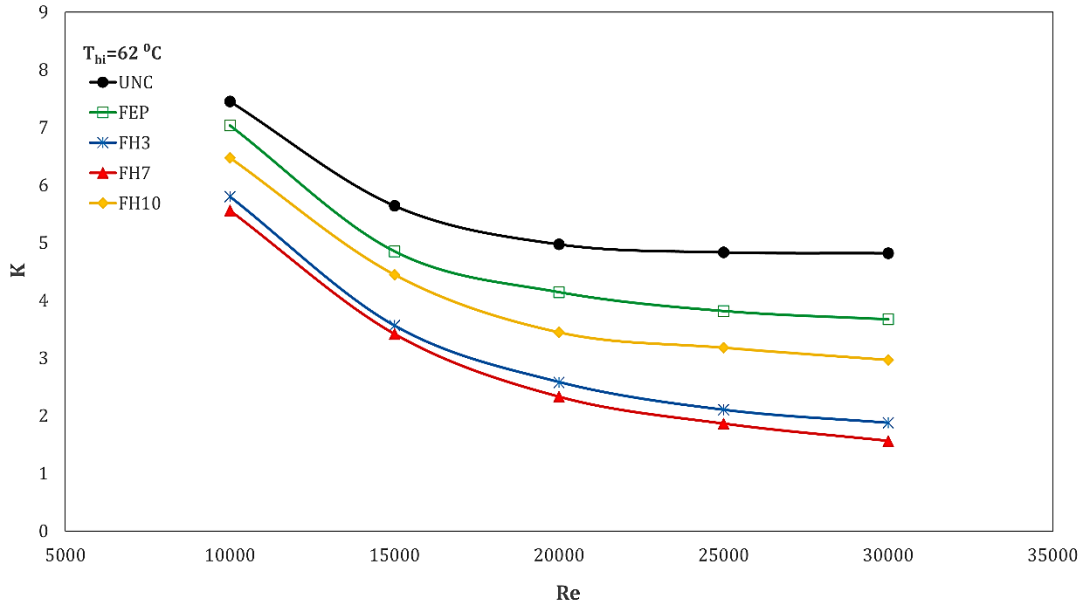


şekil 6.15. Farklı yüzey kaplamaları için kayıp katsayısının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 6.15 değerlendirildiğinde, kaplama işlemi uygulanmamış ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış tüm ısı değiştiriciler için, artan Re değerleri ile yerel kayıplarının da azaldığı görülmektedir. Düşük Re değerlerinde oluşan yerel kayıp katsayı değerlerinin birbirine yakın belirlenmiştir. Hidrofobik özelliğine paralel bir şekilde FH3 ve FH7 solüsyonları ile kaplanmış ısı değiştiricilerde en az kayıplar meydana gelmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının sürtünmeyi azaltarak akışı yönlendirmesi ile ısı değiştirici sisteminde kayıplar daha az oluşmaktadır.

Re=10000 değerinde en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplanmış ısı değiştiricide yerel kayıp katsayısı yaklaşık 5.99 olarak elde edilmiştir. En yüksek yerel kayıp katsayısı ise kaplamasız ısı değiştiricide Re=10000 değerinde 8.16 olarak belirlenmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile ısı değiştiricilerinde meydana gelen yerel kayıplarda yaklaşık %26.59 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. En düşük yerel kayıp katsayı değeri ise en iyi hidrofobik özelliğe sahip olan FH7 solüsyon ile yüzey kaplama işlemi uygulanmış contalı plakalı ısı değiştiricide Re=30000 değerinde yaklaşık 1.97 olarak tespit edilmiştir.

Isı değiştirici sisteminde akışkan giriş sıcaklığının $T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda farklı yüzey kaplamalarında ısı değiştiricinin sistem bileşeni olarak değerlendirilerek elde edilen yerel kayıp değerinin Re sayısına göre değişimi aşağıda verilmiştir.

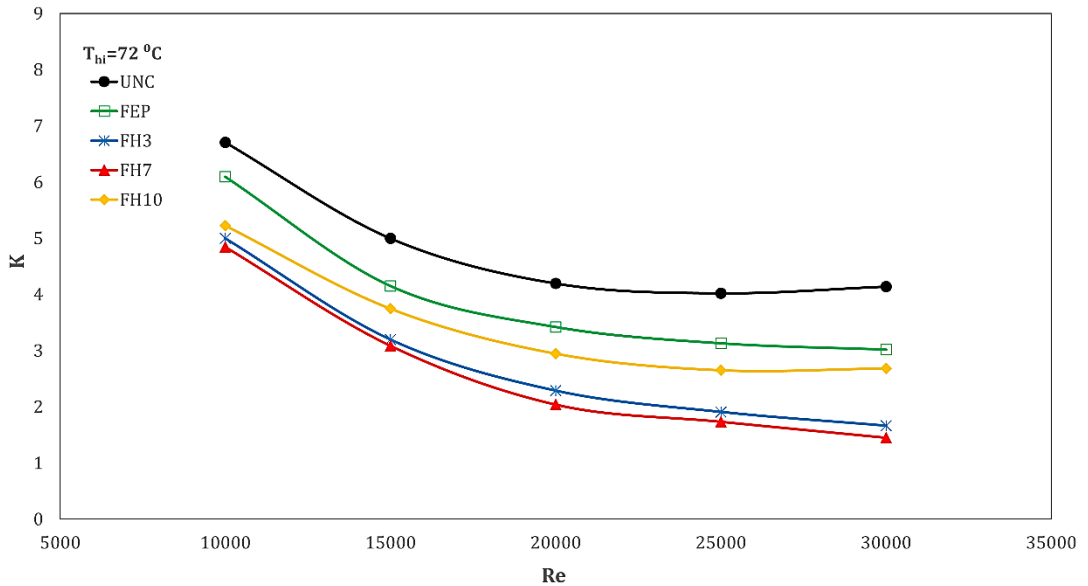


Şekil 6.16. Farklı yüzey kaplamaları için kayıp katsayısının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=62\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Yukarıdaki grafikte görüldüğü üzere, kaplama işlemi uygulanmamış ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış tüm ısı değiştiriciler için artan Re değerleri ile yerel kayıplarının da azaldığı görülmektedir. Düşük Re değerlerinde oluşan yerel kayıpların birbirine yakın değerlerde olduğu ve en yüksek değeri aldıkları belirlenmiştir. Hidrofobik özellikleri birbirine yakın olan FH3 ve FH7 solüsyon ile kaplama işlemi yapılmış ısı değiştiricilerde meydana gelen kayıp değerlerinin oldukça yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca $Re=25000$ değerinden sonra yerel kayıp katsayısında değişimin az olduğu da grafikten anlaşılmaktadır.

En yüksek yerel kayıp katsayısı yüzey kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide $Re=10000$ değerinde 7.45 olarak belirlenmiştir. Aynı Re değerinde en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplanmış durumda yerel kayıp katsayısı 5.55 olarak elde edilmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile ısı değiştiricide meydana gelen yerel kayıplarda yaklaşık %25.5 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. En düşük yerel kayıp katsayısı değeri ise en iyi hidrofobik özelliğe sahip olan FH7 solüsyon ile yüzey kaplama işlemi uygulanmış contalı plakalı ısı değiştiricide en yüksek Re değerinde 1.56 olarak tespit edilmiştir.

Akışkan giriş sıcaklığının $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda ısı değiştiricinin neden olduğu yerel kayıpların Re sayısına göre değişimi Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.17. Farklı yüzey kaplamaları için kayıp katsayısının Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 6.17 incelendiğinde, kaplamasız ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış tüm ısı değiştiriciler için artan Re değerleri ile yerel kayıplarının da

azaldığı görülmektedir. Düşük Re değerlerinde oluşan yerel kayıpların birbirine yakın değerlerde olduğu ve en yüksek değeri aldıkları belirlenmiştir. Re değeri yükseldikçe ısı değiştirici içerisinde akışkan sirkülasyonu artmış ve hidrofobik kaplamaların sağladığı olumlu etki de belirgin hale gelmiştir.

Hidrofobik yüzey kaplamaların mükemmel sürtünme özellikleri sayesinde artan Re değerlerinde kayıp katsayılarında düşüş meydana gelmiştir. En yüksek yerel kayıp katsayısı kaplamasız ısı değiştiricide $Re=10000$ değerinde 6.7 olarak belirlenmiştir. Aynı Re değerinde en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplı durumda yerel kayıp değeri 4.84 olarak elde edilmiştir. Hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile ısı değiştiricide meydana gelen yerel kayıplarda yaklaşık %27.76 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. En düşük yerel kayıp katsayı değeri ise en iyi hidrofobik özelliğe sahip olan FH7 solüsyon ile yüzey kaplama işlemi uygulanmış contalı plakalı ısı değiştiricide 1.44 olarak tespit edilmiştir. h-BN katkılı FH10 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştiricide yerel kayıplar hidrofobik özelliğin düşük olması sebebiyle daha yüksek değerlerde meydana gelmiştir.

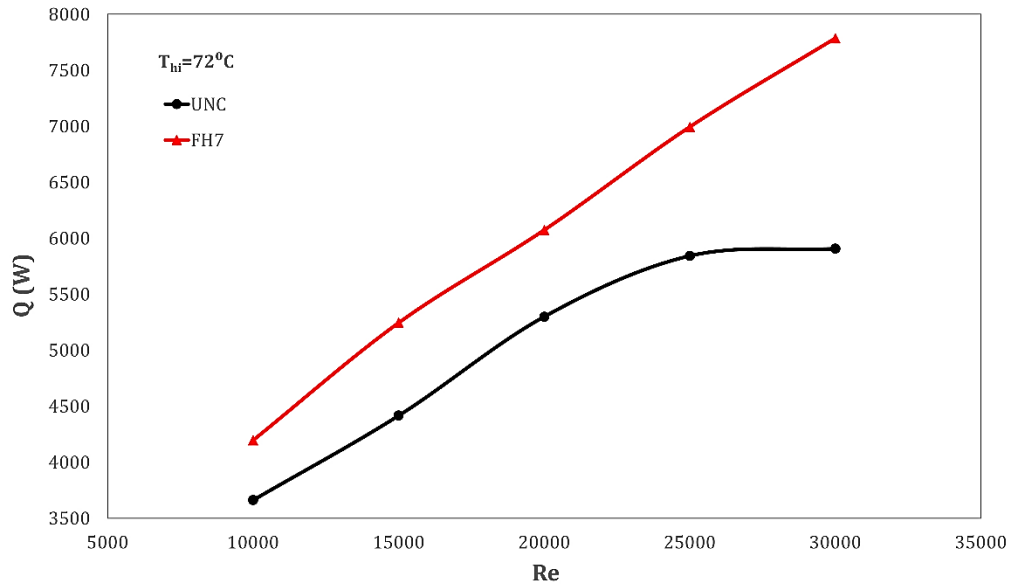
Yerel kayıp katsayı grafikleri incelendiğinde, tüm durumlarda artan Re değerlerinde kayıp katsayı değerinin azaldığı görülmüştür. Akış hızının artması ile ve akışkanın ısı değiştirici sistemi içerisinde dolaşım süresinin azalması sonucu daha az kayıplar meydana gelmiştir (Dvořák ve Vít, 2017). Yerel kayıp katsayılarının akışkan giriş sıcaklığına çok fazla bağlı olmadığı daha çok hidrofobik özelliğe bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle yerel kayıp katsayı değerlendirmeleri plaka yüzeylerine uygulanan farklı kaplama türlerine göre karşılaştırmalar yapılarak gerçekleştirilmiştir.

En yüksek kayıp katsayısı kaplamasız ısı değiştiricide $T_{hi}=52$ °C ve $Re=10000$ değerinde 8.16 olarak tespit edilmiştir. Kaplamasız ve FEP kaplı ısı değiştiricilerin kayıp katsayı değerleri hidrofobik özelliği yüksek diğer kaplamalara oranla oldukça yüksek değerlerde gerçekleşmiştir. Aynı Re değerinde FH7 kaplı ısı değiştiricide kayıp katsayısı 5.99 olarak meydana gelmiştir. En düşük kayıp katsayısı ise temas açısı değeri en yüksek FH7 kaplanmış ısı değiştiricide $T_{hi}=72$ °C ve $Re=30000$ değerinde 1.44 olarak belirlenmiştir. Hidrofobik kaplamaların etkisi ile ısı değiştiricinin sistem elamanı olarak sebep olduğu kayıplarda yaklaşık %26.59 iyileşme sağlanmıştır. Hidrofobik yüzey kaplamalarının ID plaka yüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak sistem içerisindeki yerel kayıpları önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

6.5. Kirlenme Bulguları

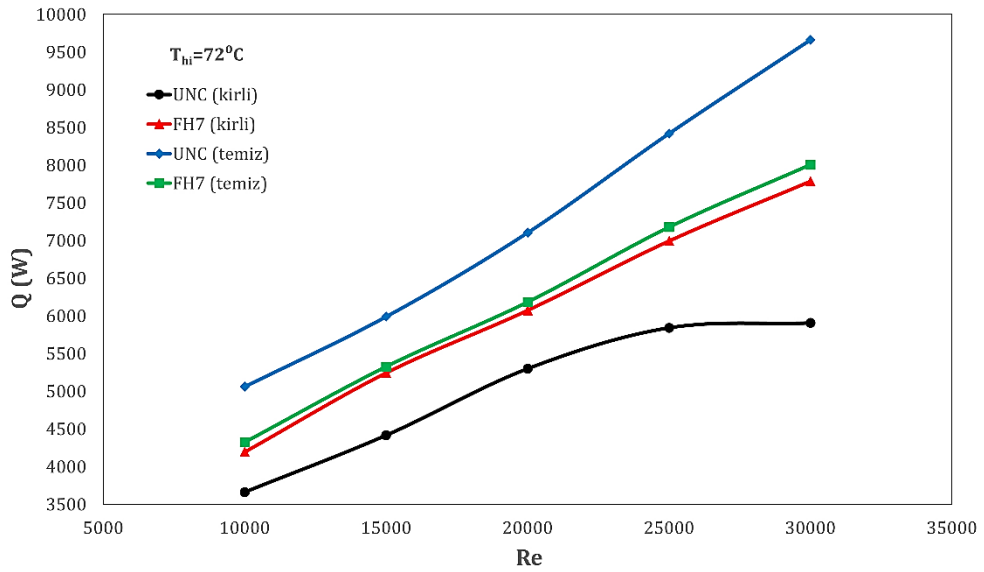
Isı değiştirici uygulamalarında, uzun süreli çalışma saatlerinden sonra ID plaka yüzeylerine akışkan içerisinde bulunabilen bazı parçacıklar, metal tozlar veya çeşitli malzemeler (kireç, tortu) birikebilir. Plaka akış kanalları üzerinde ve akış geçiş boğazlarında oluşan kirlenme ısı transferini dūřürüp basınç kayıplarını artırarak contalı plakalı ısı değiştiricinin performansının azalmasına neden olur. Ayrıca oluşan kirlenme sonucunda akış hızını artırmak için ek pompalama gücü gerekecek ve dolayısıyla daha fazla enerji tüketimi meydana gelecektir. Yapılan çalışmada plaka yüzeylerine kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştirici ve en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştirici 50 saat periyot ile beř farklı Re değerinde çalıştırılarak ısı transferi değerleri belirlenmiştir. ID plakaları her 50 saat sonunda sökölerek görüntüler alınmış ve kirlenme bulguları incelenmiştir. Elde edilen değerlerin Re değerine ve hidrofobik özelliğe göre değerlendirmeleri yapılmıştır. Kirlenmenin yüksek sıcaklıklarda daha fazla oluşmasından dolayı ve deney işlemlerinin çok uzun süreli olması sebebiyle sadece akışkan giriş sıcaklığının 72 °C için deneyler gerçekleştirilmiştir.

$T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda, ısı değiştiricide meydana gelen kirlenmenin toplam ısı transferine etkisinin Re sayısına göre değişimi kaplanmamış ve FH7 kaplanmış ısı değiştiriciler için şekil 6.18’de verilmiştir.



şekil 6.18. Kirlenme oluşumunun ısı transferine etkisinin Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=72^{\circ}\text{C}$)

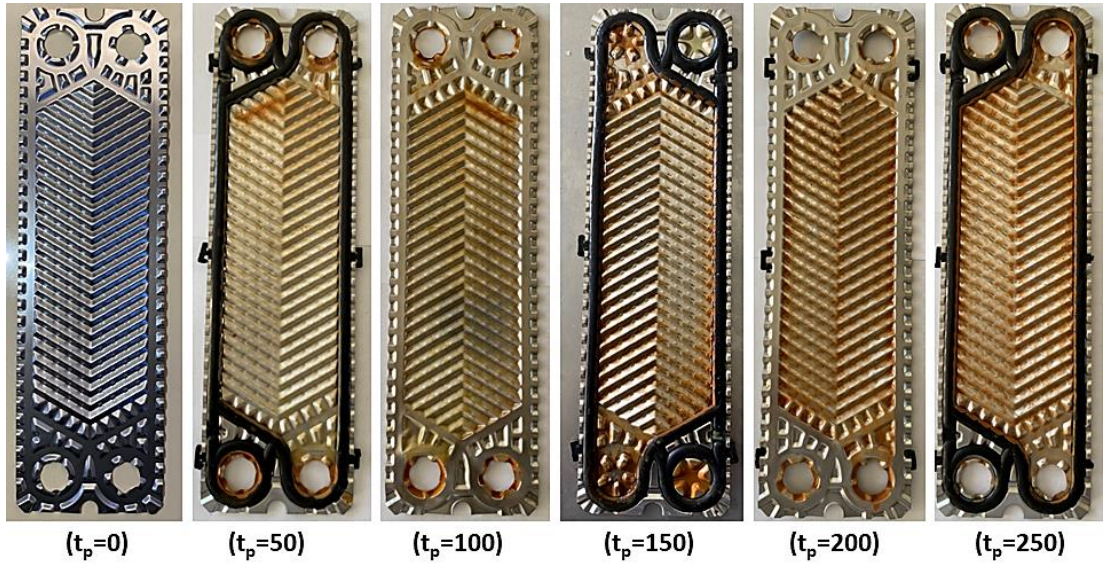
Düşük Re değerlerinde, kirlenme etkilerinin az olması nedeniyle ısı transferi değerleri kaplamasız ve hidrofobik kaplı ısı değiştiricilerde birbirine yakın değerlerdedir. Uygulama süresinin artması ile yüzeylerde kirlenme oluşmaya başlamış ve ısı transferindeki farklar da belirginleşmeye başlamıştır. $Re=30000$ değerinde kaplamasız durumda ısı transferi 5632 W iken FH7 kaplı ısı değiştiricide bu değer 7785 W olarak elde edilmiştir. Hidrofobik kaplamaların etkisi ile kirlenme ve birikinti oluşumu engellenerek ısı transferinde %38.22 iyileşme sağlanmıştır.



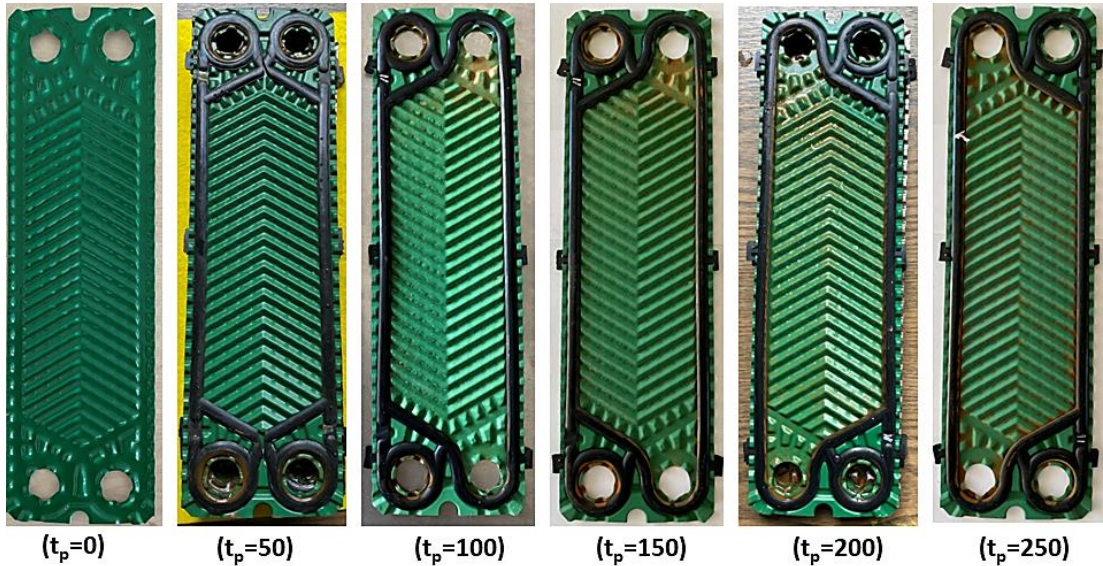
Şekil 6.19. Kirlı ve temiz durumlar için ısı transferinin Re sayısına göre değışimi ($T_{hi}=72^{\circ}C$)

Kirlenme deneyinde elde edilen veriler normal şartlarda yapılan ısı transferi deneyleri ile karşılaştırıldığında FH7 kaplı ısı değiştiricide meydana gelen ısı transferinin neredeyse aynı değerlerde olduğu ve kirlenmenin etkisi ile çok az düştüğü belirlenmiştir. Kaplanmamış ısı değiştiricide ise plaka yüzeylerinde oluşan kirlenmenin etkisi ile çok fazla ısı transferi kaybı olduğu görülmüştür. $Re=30000$ değerinde kirlenme öncesi ısı transferi 8006 W iken kirlenme sonrası bu değer 7785 W olarak tespit edilmiştir. Kirlenmenin ve birikinti oluşumunun etkisi ile ısı transferi değerinde yaklaşık %2.76 düşüş olmuştur. Hidrofobik kaplamaların etkisi ile kirlenme belirli bir miktar ısı transferi kaybına neden olsa da bu değerler göz ardı edilebilecek aralıktadır. Kirlenme öncesi kaplamasız ısı değiştiricide $Re=30000$ değerinde gerçekleşen transferi 9663 W iken kirlenme oluşumu sonrası bu değer 5632 W olarak gerçekleşmiştir. Kirlenme etkileri nedeniyle ısı transferinde %42' ye varan kayıplar meydana gelmiş ve contalı plakalı ısı değiştiricinin performansı düşmüştür.

Kirlenme oluşumunun etkilerinin daha iyi anlaşılması ve görsel olarak desteklenmesi için her 50 saat deneysel çalışmadan sonra ısı değiştirici plakaları sökülerek görüntüleri çekilmiş ve sonrasında plakalar sızdırmazlık göz önünde bulundurularak tekrar montaj edilmiştir. Plaka yüzeylerine herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ID için zamana bağlı olarak kirlenme oluşum fotoğrafları Şekil 6.20’de verilmiştir. En iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile yüzeyleri kaplanmış olan ısı değiştirici plakalarına ait kirlenme oluşum fotoğrafları zamana bağlı olarak Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



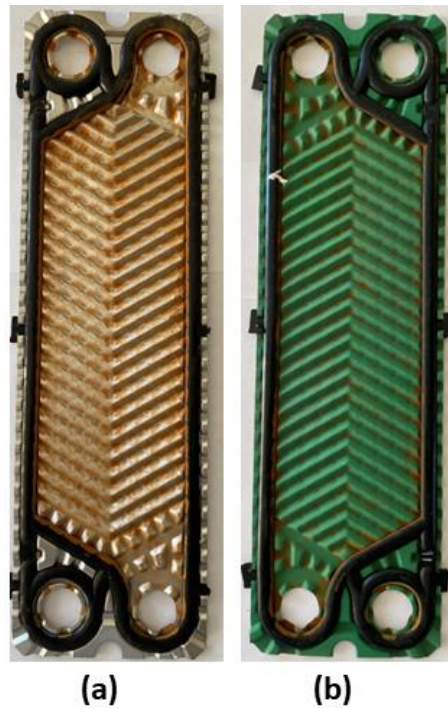
Şekil 6.20. Kaplama işlemi uygulanmamış plakalarda kirlenme oluşumu



Şekil 6.21. FH7 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış plakalarda kirlenme oluşumu

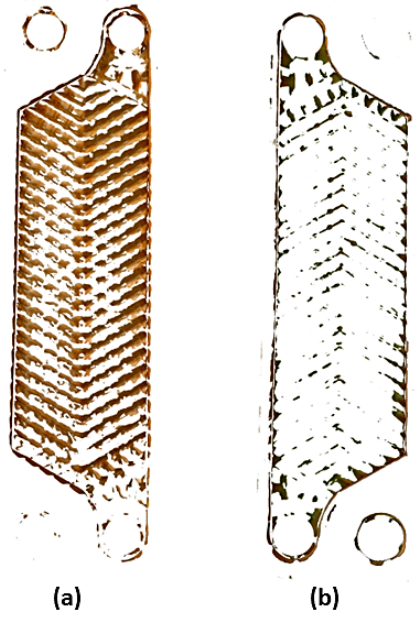
Isı değiştirici plaka yzeyinde oluşan kirlenmeye ait görüntüler incelendiğinde çalışma süresinin (t_p) artması ile kirlenmenin arttığı ve tüm plakanın ıslak bölge alanına yayıldığı gözlemlenmiştir. Kirlenme özellikle herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştirici plakalarında daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise akışkan içerisinde partiküllerin ve yabancı cisimlerin plaka yzeyine tutunarak o bölgelerde birikmesidir. Hidrofobik kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştirici plakalarında ise hidrofobik etki ile akışkan teması azaldığı için yzey üzerinde herhangi bir malzeme tutunması oluşmamış ve kirlenme belirli bölgelerde çok az bir şekilde meydana gelmiştir. Hidrofobik malzemelerin en bilinen özelliklerinden biri olan kendi kendini temizleme özelliği sayesinde kirlenme oluşumu, çökelti birikmesi ve korozyon oluşumu önemli ölçüde engellenmiştir.

Kirlenme oranlarının tespiti için kaplama işlemi uygulanmamış ve en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplanmış ısı değiştirici plakalarının görüntüleri 250 saat çalışma periyotu sonunda görüntüleri çekilmiştir (şekil 6.22).



şekil 6.22. $t_p=250$ saat sonunda kirlenmiş plaka görüntüleri a) Kaplanmamış b) FH7 kaplanmış

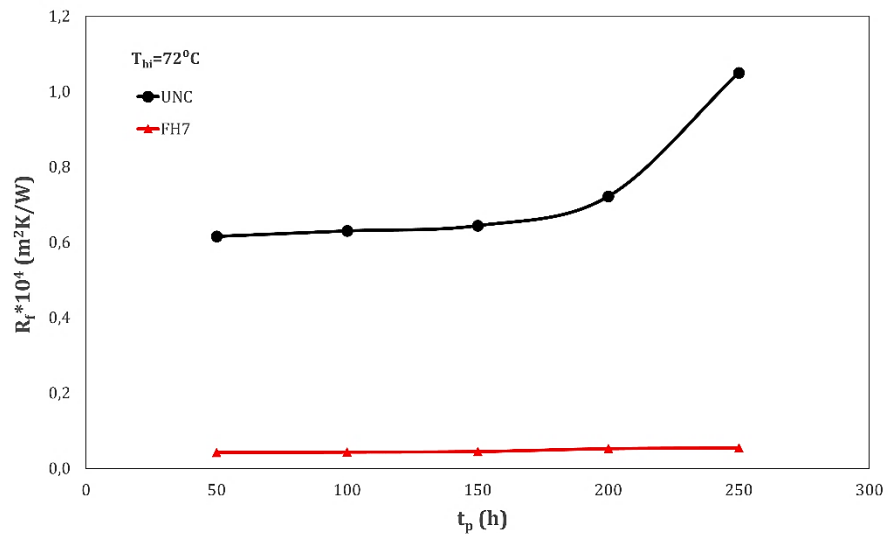
Bu görüntüler MATLAB 2021b platformunda görüntü işleme kütüphanesi kullanılarak işlenmiş ve plaka yzeylerinde meydana gelen kirlenme miktarı tespit edilmiştir. Programdan elde edilen renk ayırımına göre ısı değiştirici plakalarının görüntüleri şekil 6.23'te verilmiştir.



Şekil 6.23. Görüntü işleme ile kirlilik tespiti a) Kaplanmamış plaka b) FH7 kaplı plaka

Gerçekleştirilen görüntü işleme sonucunda kaplanmamış plaka yüzeyinde FH7 kaplı duruma göre %82 oranında daha yüksek kirlenme olduğu tespit edilmiştir. Kirlenmenin özellikle ID plakasının çıkıntılı kısımlarında biriktiği belirlenmiştir.

CPID uygulamalarında kirlenme süreci çok karmaşık ve ölçülmesi zor bir işlem olduğundan Denklem 5.8 kullanılarak temiz ve kirli durumlar için kirlilik faktörü (R_f) hesaplanmıştır. Bu şekilde kullanılan akışkan türüne ve prosese özel kirlilik faktörü tespiti gerçekleştirilmiştir. Çalışma süresine göre ısı değiştiricilerin kirlilik faktörü değerlerinin değişimi Şekil 6.24’te verilmiştir.



Şekil 6.24. Çalışma süresine bağlı olarak ısı değiştiricide kirlilik faktörünün değişimi

Şekil 6.24 incelendiğinde, kaplamasız ısı değiştirici için $R_f=0.000105 \text{ (m}^2\text{.K/W)}$, FH7 solüsyon ile kaplanmış ısı değiştirici için ise $R_f=0.00000498 \text{ (m}^2\text{.K/W)}$ olarak bulunmuştur. Hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile kirlenme oranlarında %95.25 iyileşme elde edilmiştir. Kirlilik faktörünün zamana bağlı olarak arttığı ve özellikle $T_p=200$ saat sonrasında çok yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bunun nedeni ise kirliliğin zamanla artması sonucunda plakalar üzerinde akışkan hareketi yavaşlaması ile plakalar arasında gerçekleşen ısı transferi miktarının azalmasıdır.

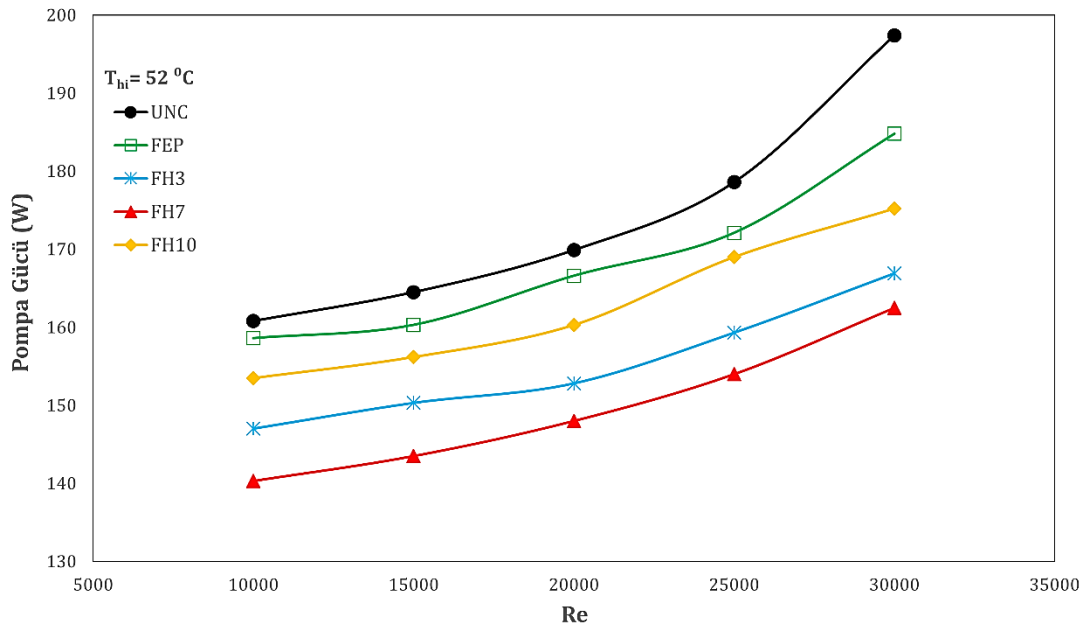
Kirlenme oluşumu ile akışın gerçekleştiği kesitler daralarak, basınç kayıplarını yükseltirken ısı transferini azaltmaktadır. 9 mm kalınlıkta bir kirlenme tabakası oluşmuş bir kazanın ısınması için yaklaşık %53 daha fazla enerji gereklidir (Awad, 2011). Tam performans ile çalışan ısı değiştiricilerinde oluşan kirlenme etkileriyle ek enerjiye ihtiyaç duymakta ve %50 daha düşük performans ile çalışmaktadır. Bu sebeple ID sistemlerinde meydana gelen kirlenme etkilerinin anlaşılabilmesi hem ısı değiştirici üreticileri hem de endüstrideki uygulamalar için çok büyük önem arz etmektedir. Kirlenmenin ısı transferi ve basınç üzerindeki etkilerinin bir sonucu olarak ısı değiştiricinin performansına ek bir maliyet eklenir. Isı değiştiricide oluşan kirlenme, enerji kayıpları, verimlilik kaybı, insan gücü ve temizlik giderleri gibi çok büyük maliyetlere neden olur (Varlıca, 2018). Contalı plakalı ısı değiştiricileri, kullanıldıkları sistemlerin en önemli parçalarıdır ve bu cihazların performansının düşmesi genel olarak tüm sistemi etkilemektedir. Kirlenme sonucu ortaya çıkan ek işletme maliyetleri, kirlenmenin tespiti ve temizlenmesi, plakaların sökölüp takılmasında geçen süre ve işçilik ve en önemlisi çalışma prosesinin durdurulmasından kaynaklı iş kayıpları olarak özetlenebilir. Bu nedenle hidrofobik yüzey kaplamalarının kirlenme üzerine olumlu etkileri dikkat çekmektedir.

Hidrofobik yüzey kaplamaları kullanılarak ısı değiştirici sistemlerinde kirlenme maliyetleri ortadan kalkacak ve sistemin durmasından kaynaklı iş kayıpları da giderilmiş olacaktır (Santos vd., 2013). Kirlenmenin ve korozyon oluşumun engellenmesi ile contalı plakalı ısı değiştirici sistemlerinde plakaların montaj ve demontaj işlemleri çok sık bir şekilde yapılmayacağından plaka kullanım ömürleri uzayacak ve ısı değiştirici performansı da artmış olacaktır. Isı değiştirici plakaları özellikle paslanmaz ve titanyum malzemelerden imal edildiğinden çok yüksek maliyetlere sahiptirler. Bu nedenle ısı değiştirici sistemlerinde plaka kullanım süresi ne kadar uzun olursa işletme maliyetleri o ölçüde azalacaktır.

6.6. Pompa Enerji Tüketimi ve Maliyet Bulguları

Ülkemizde sanayi uygulamalarında kullanılan elektriğin beşte biri pompalar tarafından kullanılmaktadır (ESEN ve Müdürlüğü, 2015). Pompaların kullanıldığı uygulamalarda yapılan en büyük hata, pompa seçimi ve pompa hattı tasarımındaki yanlışlardır. Bu uygulamalarda sağlanacak iyileştirmeler ile önemli ölçüde enerji tasarrufu elde edilebilecektir. Deneysel çalışmada yüzey kaplama işlemi uygulanmamış ve hidrofobik kaplama uygulanmış ısı değiştiricilerde, sistem içerisinde akışkan hareketini sağlayan sirkülasyon pompalarının enerji tüketimleri ölçülmüştür. Elde edilen enerji tüketim değerleri karşılaştırılarak hidrofobik yüzey kaplamalarının pompalama gücüne ve enerji tüketimine etkileri belirlenmiştir.

Pompa debi değerlerinin en yüksek olduğu akışkan giriş sıcaklığı $T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu durumda elde edilen sirkülasyon pompalarına ait toplam güç değerlerinin Re sayısına göre değişimi Şekil 6.25'te ifade edilmiştir.



Şekil 6.25. Farklı yüzey kaplamaları için pompa gücünün Re sayısına göre değişimi ($T_{hi}=52\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 6.25 incelendiğinde, Re değerinin artması ile pompa gücü ve enerji tüketimi artmıştır. En yüksek pompa gücü herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiricide $Re=30000$ değerinde 197.4 W olarak meydana gelmiştir. Nanopartikül takviyesi olmayan FEP solüsyon kaplı durumda ise aynı Re değerinde 184.8 W olarak belirlenmiştir. En iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyonu ile kaplanmış ısı değiştiricide pompa gücü en yüksek Re değerinde 162.5 W olarak ölçülmüştür.

Hidrofobik yüzey kaplamaların etkisi ile pompa gücü değerlerinde %17.67 iyileşme sağlanmıştır. En düşük pompa gücü ise en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 kaplı ısı değiştiricide $Re=10000$ olduğu durumda 140.3 W olmuştur.

Endüstriyel ısı değiştirici uygulamalarında genellikle akışkan hareketi elektrik enerjisi tüketen pompalarla sağlanır. Bu pompalar akışkanı basma yüksekliğine ve debisine bağlı olarak birçok kapasitede olabilirler. Pompaların tükettikleri enerji miktarları günümüzde artan enerji fiyatları sebebiyle çok daha önemli bir hale gelmiştir. Burada enerjiden edilecek her tasarruf işletmeye kazanç olarak yansımaktadır. Bu nedenle sistemlerin enerji verimliliği ve maliyet analizi yapılmalıdır. Deneysel çalışmada kullanılan sirkülasyon pompaları için kaplamasız ve FH7 kaplamalı durumlar için enerji maliyet analizleri yapılmıştır.

Sürekli çalışan bir ısı değiştiricinin kullanıldığı endüstriyel uygulamada, İşletme maliyeti = pompalama gücü (kW) x çalışma süresi (h) x elektrik birim fiyatı (₺/kWh) şeklinde hesaplanabilir. Firmanın bir yılda 300 gün, günde 2 vardiya (16 saat) çalıştığı kabulü yapılmıştır. Elektrik birim fiyatı 2023 Ocak dönemi için 4.63 ₺/kWh alınmıştır.

Bu formül ile deneysel çalışmada kullanılan sirkülasyon pompalarının kaplamasız ve hidrofobik kaplı ısı değiştirici kullanıldıkları durumlar için enerji tüketim miktarları hesaplanıp maliyet analizi yapılarak Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Pompa enerji tüketim ve maliyet hesabı

Kaplama Türü	Güç (kW)	Çalışma süresi (h)	Elektrik Birim Fiyat (₺/kWh)	Maliyet (₺)
UNC	0.197	4800	4.63	4378.12
FH7	0.162	4800	4.63	3600.28

Yukardaki tabloda güç değerleri kaplamasız ve FH7 kaplı durumlar için öncesinde ölçülmüş ve güç hesabı yapılmıştır. Çalışmada kullanılan sirkülasyon pompalarının enerji tüketimleri maliyetleri değerlendirildiğinde FH7 hidrofobik solüsyon ile kaplı ısı değiştiricide herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ısı değiştiriciye göre %17.76 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Isı değiştirici sisteminin yıllık enerji tüketim maliyetleri incelendiğinde hidrofobik yüzey kaplamalarının etkisi ile yıllık enerji giderinde 777.84 ₺ tasarruf elde edilmiştir.

6.1. Hidrofobik Kaplama Prosesi Bulguları

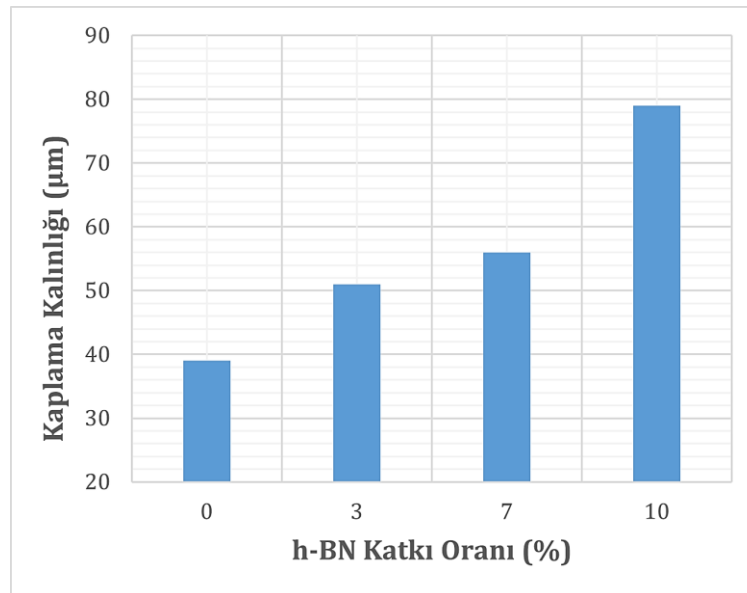
6.1.1. Kaplama Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

Hidrofobik yüzey kaplamalarının uygulanmasında en önemli parametrelerden birisi kaplama kalınlığıdır. Sprey kaplama yöntemi ile gerçekleştirilen kaplama prosesinde solüsyonun tüm plaka yüzeyine homojen bir şekilde dağıtılarak aynı film kalınlığının sağlanması oldukça önemlidir. Tablo 6.3'te farklı oranlarda nanopartikül takviyeli hidrofobik solüsyonların sprey kaplama prosesi sonrası plaka yüzeyinde oluşturduğu kaplama film kalınlığının WURTH 3000M boya kalınlık ölçüm cihazı ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 6.3. Hidrofobik yüzey kaplama ortalama kalınlık değerleri

Kaplama Türü	Kaplama Kalınlığı (μm)
FEP	39
FH3	51
FH7	56
FH10	79

Şekil 6.26'da ise elde edilen ortalama kaplama kalınlıklarının solüsyon içerisine takviye edilen h-BN nanopartikül oranına göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Solüsyon içerisine takviye edilen h-BN oranına göre kaplama kalınlığı değişimi

Kaplama kalınlık ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde içerisinde nanopartikül eklenmemiş FEP kaplamasının en düşük kalınlığa sahip olduğu belirlenmiştir. İçerisine yaklaşık olarak aynı oranda h-BN takviye edilen FH3 ve FH7 solüsyonların kaplama kalınlığı da birbirine yakın değerler almıştır. FH10 kaplamada ise solüsyon içerisinde eklenen nanopartikül miktarının çok fazla olması sonucunda yüzeyde oluşan pürüzlülük ile kaplama kalınlığının FEP malzemeye göre yaklaşık %102, FH3 kaplamaya göre %54.9 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kaplama kalınlık değerlerini farklı olması kaplama işlemi gerçekleştiren kişinin plaka yüzeyine uyguladığı kaplama miktarı, uygulama açısı ve mesafesi, uygulama süresi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca kaplama kalınlık değerlerindeki değişimin en önemli sebebi kaplama solüsyonu içerisinde eklenen nanopartikül oranıdır. Bu partikül tozları kaplama içerisinde farklı bölgelerde yığılma gerçekleştirerek homojen dağılımın bozulmasına ve buna bağlı olarak kaplama film kalınlığının artmasına sebep olmuştur.

6.1.2. Kaplama Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Pürüzlülük, plakaların yüzeylerinin uygulanan kaplama teknikleriyle ya da başka faktörler sonucunda oluşan küçük aralıklı yüzey düzensizlikleridir. Yüzeyde meydana gelen pürüzlülük, kaplama prosesine ve kaplama homojenliğine, kaplama solüsyonu içerisinde bulunan nanopartikül özelliklerine bağlı olarak gözle görülebilir ya da dokunulduğunda elle hissedilebilir özelliktedirler. Pürüzlülük (Ra) ölçümleri her bir deney için 5'er kez Gauss 3x0.8 standardında alınarak ortalama değerleri kaydedilmiştir. Tablo 6.4'te farklı oranlarda nanopartikül takviyeli hidrofobik solüsyonların kaplama prosesi sonrası plaka yüzeyinde oluşturduğu pürüzlülük değerlerinin PCE-RT 2000 marka portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Hidrofobik kaplama ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Kaplama Türü	Yüzey Pürüzlülüğü, Ra (µm)
FEP	1.94
FH3	2.07
FH7	2.23
FH10	4.54

Tablo 6.4 değerlendirildiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değeri FEP solüsyon ile uygulanan kaplamalarda elde edilmiştir. Bunun nedeni bu solüsyon içerisine herhangi bir nanopartikül eklenmemiş olmasıdır. FH3 ve FH7 solüsyonları kullanılarak yapılan hidrofobik kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 2.07 ve 2.23 μm olarak belirlenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri ise içerisine en yüksek oranda h-BN nanopartikül eklenilen FH10 solüsyon ile kaplanmış plakalarda meydana gelmiştir. Solüsyon içerisine eklenilen nanopartikül oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür (Cai vd., 2016). Eklenilen nanopartikül oranı belirli bir miktardan geçtikten sonra, kaplama yüzeyine homojen bir şekilde dağılmayarak belirli bölgelerde topaklanmalar oluşturmakta ve yüzeyin bozularak pürüzlü bir yapıya dönüşmesine neden olmaktadır. FH10 kaplanmış yüzeyler FEP solüsyon ile kaplanmış yüzeylere göre yaklaşık %57 daha pürüzlü yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.

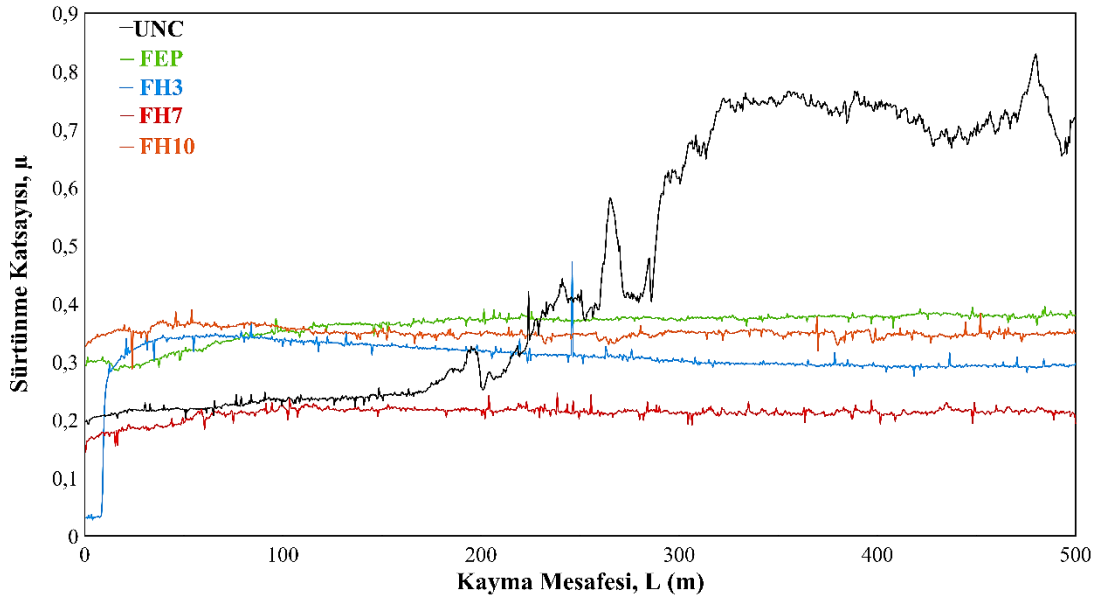
6.2. Hidrofobik Kaplamalarının Mekanik Bulguları

Hidrofobik kaplamaların mekanik dayanımlarının sağlanması konusunda en yaygın strateji; yüzey topolojisi ile ilişkili olan geometrik özellikleri ve hidrofobik kompozisyonu ile ilişkili olan yüzey kimyasını koruyarak yapısal kuvvetlere karşı koyan yüzeyler üretmektir. Hidrofobik kaplamaların mekanik dayanım performansları, yüzeye yapışma özellikleri, teğetsel aşındırıcı kuvvetlere ve dinamik darbelere karşı direnç gösterme kabiliyeti olarak değerlendirilebilir. Burada önemli olan hidrofobik yüzey kaplamaların dayanım özellikleri iyileştirilirken, hidrofobik özelliklerinin kaybolmamasıdır. Bu yüzey kaplamalarında malzeme kaybı sonucunda yeni bir kimyasal yapı veya geometrik topoloji ortaya çıkmakta ve hidrofobik özellik ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle hidrofobik yüzey kaplamaları nanopartiküller ile takviye edilerek mekanik özellikleri iyileştirilmeli ve buna ek olarak katı yağlayıcılık özelliğinin artırılarak aşınma sonucu kaplamanın yüzeyden kopmaması sağlanmalıdır.

Hidrofobik kaplamalar temel olarak zayıf mekanik dayanıma ve saydam olmama problemlerine sahiptir. Zayıf mekanik özelliklerin aşılması için endüstriyel uygulamalarda hidrofobik kaplama içerisine aşınma ve katı yağlayıcı özellikleri yüksek nanopartiküller eklenerek sentezlenmektedir. Çalışmada kapsamında üretimi gerçekleştirilen h-BN nanopartikül takviyeli kaplama solüsyonu kullanılarak kaplama işlemi uygulanmış plakaların aşınma testleri yapılmıştır. Daha sonra bu plakaların SEM görüntüleri çıkarılmış ve EDX haritalama ile de malzeme içerikleri incelenmiştir.

6.2.1. Aşınma Test Sonuçları

Bu bölümde kaplama işlemi uygulanmamış ve farklı hidrofobik özelliklere sahip solüsyonlar ile kaplama işlemi uygulanmış ısı değiştirici plakalarının $P=20$ N yük altında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm testler kuru şartlar altında yapılmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış plakalar ile yüksek mukavemetli paslanmaz aşındırıcı çelik disk arasındaki kuru sürtünme katsayı değerleri aşınma testi ile tespit edilmiştir. Yapılan testler sonucunda, 20 dakika boyunca sürtünme katsayısı verileri kaydedilmiştir. Sürtünme katsayı verilerine göre kayma mesafesi (L) yaklaşık 500 m (0.5 km) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi Şekil 6.27’de verilmiştir.



Şekil 6.27. Sürtünme katsayısının hareket mesafesine göre değişimi

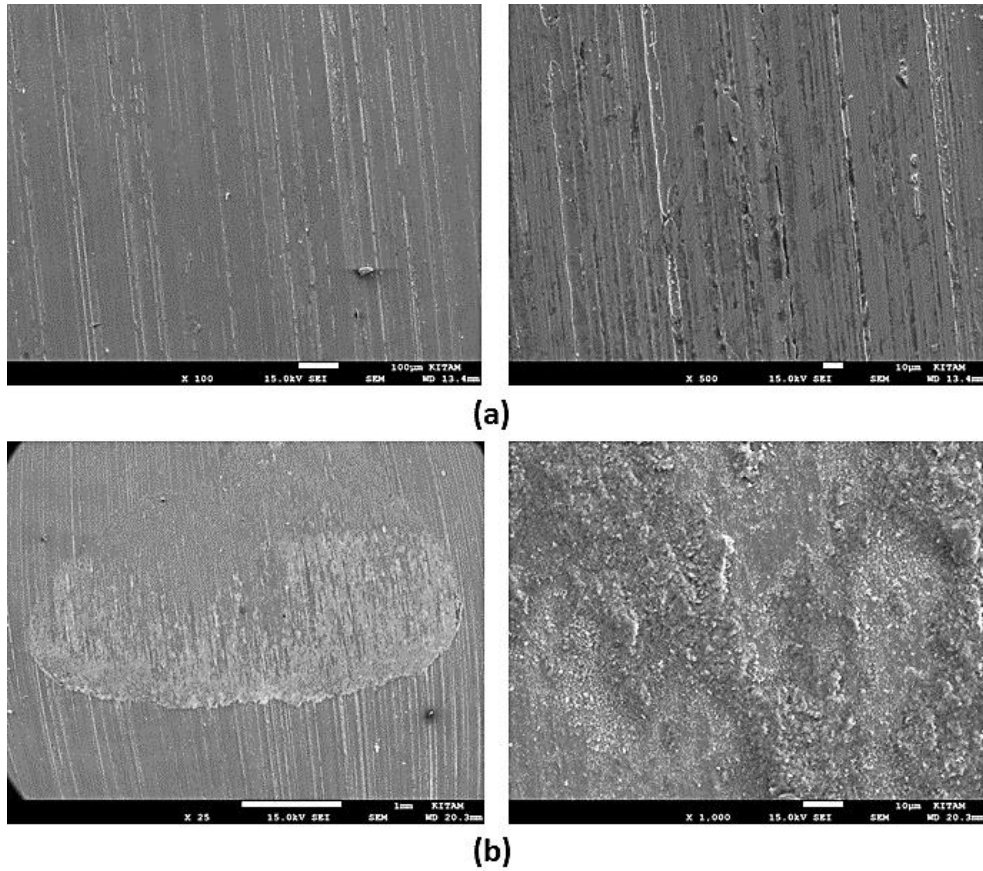
Şekil 6.27 incelendiğinde kaplanmamış plakaların aşınma değerlerinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Kaplanmamış plakalarda sürtünme katsayısı en yüksek 0.83 olarak elde edilmiştir. Kaplama işlemi uygulanmamış plakalarda sürtünme değeri başlarda düşük iken kayma mesafesinin artması ile sürtünme değeri de artmıştır. En düşük sürtünme değeri ise FEP malzemeye kütlece %7 h-BN eklenen FH7 solüsyon ile kaplanmış plakalarda yaklaşık 0.21 olarak belirlenmiştir. Solüsyon içerisine takviye edilen h-BN nanopartiküllerin kaplamanın mekanik dayanımını artırarak sürtünme katsayılarını düşürdüğü belirlenmiştir. Fakat FH10 solüsyonda içerisine eklenen nanopartikül oranının yüksek olması sebebiyle kaplama yüzeyinde oluşan pürüzlülük ile sürtünme katsayısı daha yüksek olmuştur. Bu nedenle kaplama içerisine takviye

edilen nanopartiküllerin kütlece % eklenme oranlarının oldukça önemli olduğu görülmüştür. FH10 kaplı plakanın sürtünme değerinin FH7 kaplı plakaya göre yaklaşık %38.36 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En iyi mekanik dayanıma sahip FH7 solüsyonun sürtünme katsayısının kaplama işlemi uygulanmamış plakaya göre %74.69 daha düşük olduğu belirlenmiştir. FEP kaplamanın kaplamasız duruma göre sürtünme katsayı değerinin %54.21 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

6.2.2. SEM Analiz Sonuçları

Bu bölümde, herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış ve hidrofobik yüzey kaplama işlemi uygulanmış plakaların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiştir. Hidrofobik kaplanmış plakalardan FH3 ve FH7 kaplamaların genel özelliklerinin benzer olması sebebiyle en iyi özelliklere sahip FH7 kaplama SEM analizinde kullanılmıştır. İncelemede, kaplanmış plaka yüzeyleri ve aşınma test işlemi sonrası oluşan aşınma bölgeleri de kullanılmıştır.

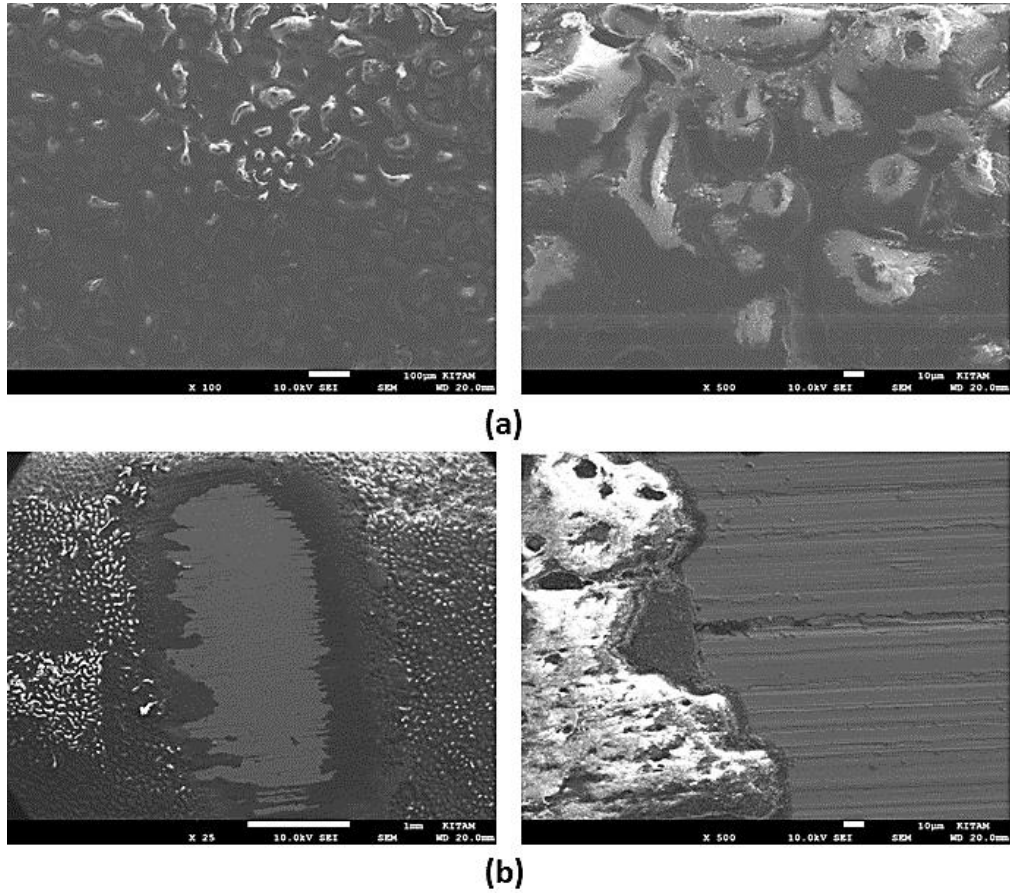
Şekil 6.28’de herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamış plakanın farklı büyütmelerdeki görüntüleri ve aşınma bölgesi detayları verilmiştir.



Şekil 6.28. Kaplamasız plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi

Yukarıdaki görüntüler incelendiğinde kaplama işlemi uygulanmamış AISI 304 paslanmaz ısı değiştirici plakası normal yüzeyi ve aşınma işlemi gerçekleştirilen bölgeler görülmektedir. Plaka normal yüzeyinde bazı çizikler ve pürüzlülük yapıları gözlemlenmiştir. Aşınma bölgesi incelendiğinde plaka yüzeyinden kopmalar olduğu ve kenar bölgelere doğru yığılma olduğu belirlenmiştir. Plaka yüzeyindeki aşınmaların çizgisel olarak değil daha derin bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür.

İçerisinde herhangi bir h-BN nanopartikül takviyesi bulunmayan FEP solüsyon ile kaplanmış plakaların SEM görüntüleri Şekil 6.29'da verilmiştir.

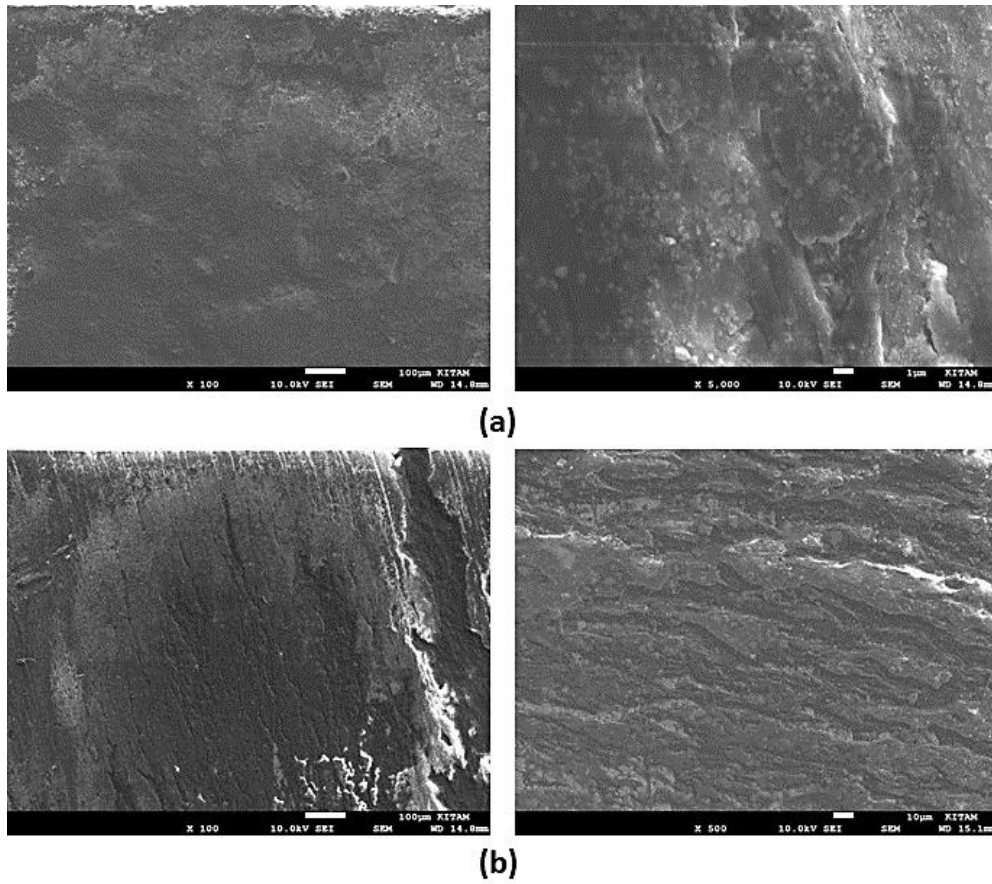


Şekil 6.29. FEP kaplı plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi

Şekil 6.29 (a) incelendiğinde karbon bazlı FEP malzemenin iç yapısı incelendiğinde nano desenli yapılar görülmektedir. Plaka yüzeyinde uygulanan FEP kaplamanın homojen yapıda olduğu görüntülerden söylenebilir. Ayrıca nano yapılar arasında boşluklar olduğu görülmüştür ve bu boşlukların temas açısı değerinin düşmesinin temel sebebi olduğu belirlenmiştir. Aşınma bölgesindeki görüntüler incelendiğinde ise FEP kaplamanın mekanik dayanımının düşük olması sebebiyle kaplamanın tamamen yüzeyden koparak paslanmaz metal yüzeye kadar inildiği

görülmektedir. Temelde FEP malzemelerin katı yağlayıcı ve yüzeye sağlam bir yapıda yapışma özellikleri olsa da aşınma işlemi sırasında kaplamanın yüzeyde tutunamadığı ve yüzeyden ayrıldığı tespit edilmiştir. Aşındırma diskinin yönüne paralel olarak FEP kaplı plaka yüzeyinde abrasif aşınma çizgilerinin meydana geldiği belirlenmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri FEP kaplamaların sürtünme değerlerinin yüksek olduğunu ve mekanik dayanımının düşük olduğunu doğrular niteliktedir.

Şekil 6.30'da en iyi hidrofobik özelliğe sahip FH7 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış plakanın farklı büyütmelerdeki görüntüleri ve aşınma bölgesine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.

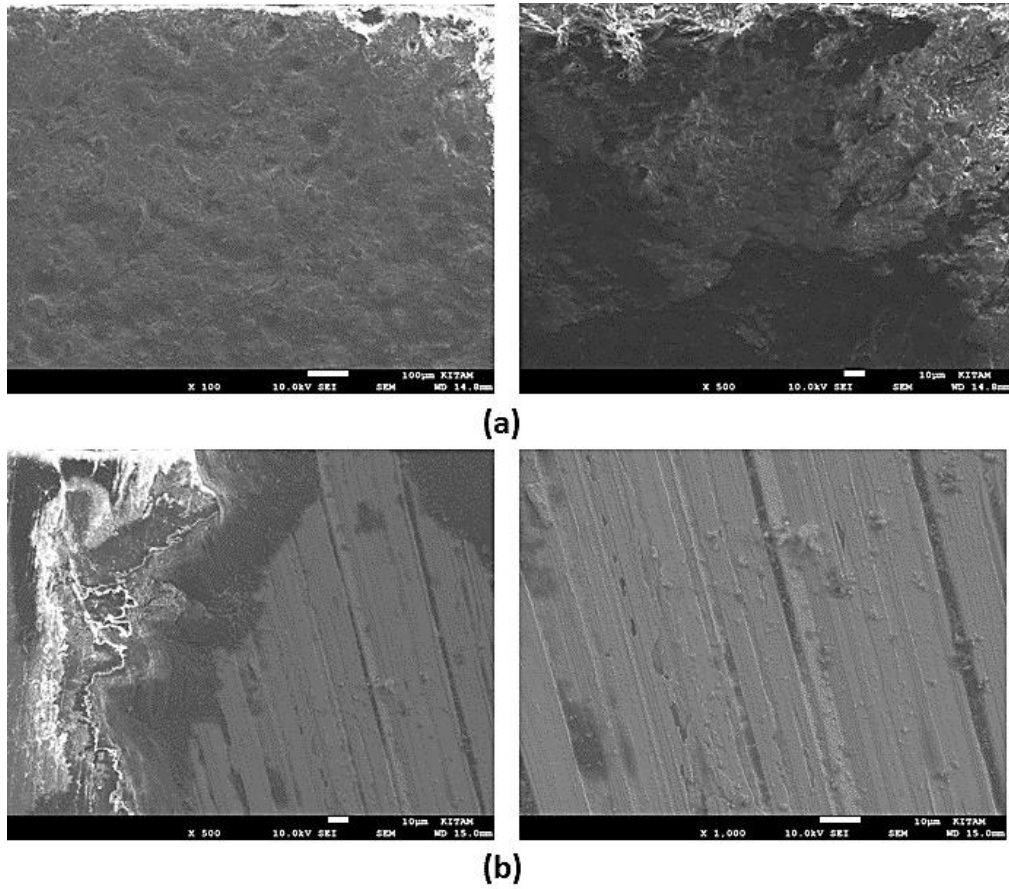


Şekil 6.30. FH7 kaplı plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi

FH7 kaplamaya ait SEM görüntüleri incelendiğinde solüsyon içerisine eklenmiş h-BN parçacıkları x5000 yakınlıktırda görülmektedir. Eklenen nanopartiküllerin dağılımının oldukça homojen bir şekilde olduğu belirlenmiştir. Yüzeyde nano desenli yapıların ve yapılar arası boşlukların bulunmadığı ve bu sebeple FH7 solüsyonunun yüksek hidrofobik özellikte olduğu söylenebilir.

FH7 solüsyon ile kaplanmış plakaların aşınma bölgeleri incelendiğinde ise aşınmanın oldukça az gerçekleştiği görülmüştür. Yüzeyde herhangi bir kaplama malzemesi kopmamış ve alt metale inme durumu olmamıştır. Bunun nedeni FEP malzeme içerisine eklenen ve katı yağlayıcı özelliği artıran h-BN nanopartikülleridir. FEP malzemenin katı yağlayıcı özelliği bir süre sonra kaybolsa da takviye edilen h-BN yapıları yüksek katı yağlayıcı görev görmekte ve aşınmayı önlemektedir.

Şekil 6.31’de içerisine yüksek oranda h-BN takviye edilen FH10 solüsyon ile kaplama işlemi uygulanmış plakanın farklı yakınlaştırmadaki görüntüleri ve aşınma bölgesine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.31. FH10 kaplı plakaya ait SEM görüntüleri (a) Aşınmasız bölge (b) Aşınma bölgesi

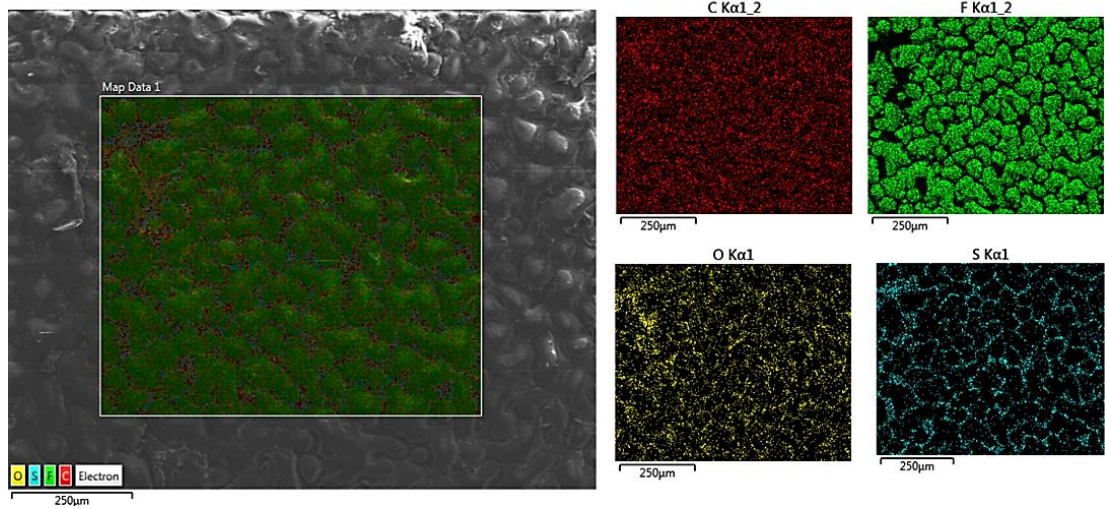
FH10 solüsyon ile kaplanmış plakaya ait SEM görüntüleri incelendiğinde solüsyon içerisine eklenmiş h-BN parçacıkları ve kaplama içerisindeki dağılımı görülmektedir. Eklenen nanopartiküllerin dağılımının homojen bir yapıda olmadığı ve belirli bölgelerde topaklanmaların olduğu belirlenmiştir.

FH10 solüsyon ile kaplanmış plakaların aşınma bölgeleri incelendiğinde ise aşınmanın oldukça fazla olduğu ve kaplamanın yüzeyden koparak alt plaka malzemesine kadar aşınmanın gerçekleştiği görülmüştür. Bunun nedeni kaplama solüsyonu içerisine takviye edilen h-BN nanopartiküllerin sebep olduğu topaklanma yapılarıdır. Bu topaklı yapılarda bütün şekilde kırılma ve kopmalar meydana geldiğinden aşınma oranını artmaktadır. Topaklanma ile oluşan yüzey pürüzlülüğü de FEP ve h-BN yapıların katı yağlayıcı özelliğın kaybolmasına neden olmaktadır. Abrasif aşınma çizgileri incelendiğinde ise metal üzerinde derinleştiğı belirlenmiştir.

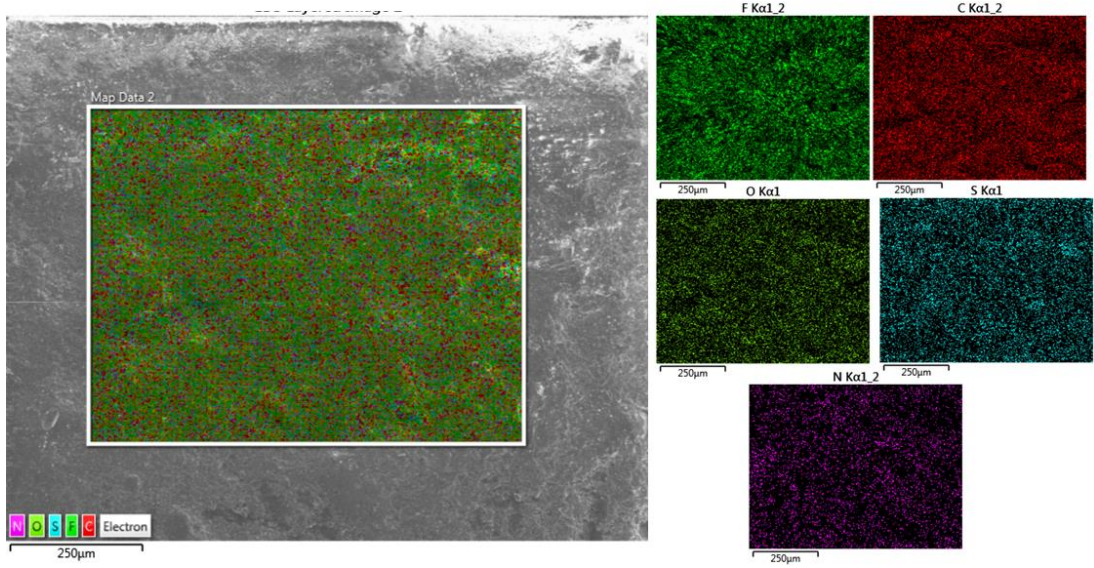
6.2.3. EDX Analiz Sonuçları

Bu bölümde, solüsyon temel malzemesi olan FEP solüsyon ve h-BN nanopartikül katkılı solüsyon ile kaplanmış plakaların SEM analizinde belirlenen en uygun bölgelerine SEM-EDX haritalama yapılarak element dağılımları analiz edilmiştir. Kaplanmamış plaka ve en iyi hidroforbik özelliğė sahip FH7 solüsyon ile kaplama işlemin uygulanmış plakanın incelemesi yapılmıştır.

Şekil 6.32’de FEP solüsyon ve Şekil 6.33’te FH7 solüsyon ile kaplanmış plakaların SEM-EDX haritalama metodu kullanılarak elde edilen element dağılım analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.32. FEP kaplamanın SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi



Şekil 6.33. FH7 kaplamanın SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi

SEM-EDX haritalama metodu ile FEP ve FH7 yüzey kaplamalarının element dağılım incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde elementler farklı renklerle ifade edilmiş olup solüsyon içerisinde hangi elementlerin yer aldığı ve solüsyon içerisindeki dağılımları kolaylıkla ayırt edilerek belirlenebilmektedir.

FEP kaplamanın SEM-EDX haritalama incelemesinde karbon (C) elementi kırmızı renkte, oksijen (O) elementi sarı renk, flor (F) elementi yeşil renk ve kükürt (S) elementi turkuaz renk ile ifade edilmiştir. Temel bazda karbon içerikli olan FEP solüsyonuna ait element içerik analizi tutarlı bir şekilde gerçekleşmiştir. FEP kaplama içerisinde tüm elementlerin hemen hemen homojen bir şekilde dağıldığı görülmüş olup bor (B) veya azot (N) elementlerine rastlanılmamıştır. FH7 kaplamanın SEM-EDX haritalamayla dağılımında ise karbon (C) elementi kırmızı renkte, flor (F) elementi yeşil renk, kükürt (S) elementi turkuaz renk, oksijen (O) elementi sarı renk ve azot (N) elementi mor renk ile belirtilmiştir. Temel bazda FEP malzeme ve içerisine takviye edilen h-BN nanopartikülleri tüm elementleri ile analizde tespit edilmiştir. FH7 kaplamanın analizinde Bor (B) elementinin çok hafif olması sebebiyle SEM-EDX haritalama metodu ile görüntülenememiştir. Fakat h-BN içerisinde yer alan azot (N) elementi kaplama içerisinde analiz edilmiştir. Kaplama içerisinde tüm elementlerin homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. SEM-EDX analizi incelendiğinde; FEP kaplama solüsyonu dağılımı içerisinde yer almayıp FH7 kaplama solüsyonu dağılımı içerisinde yer alan taneciklerin h-BN nanopartikülleri olduğu tespit edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı değiştirici sistemlerinde uygulamaları ve ID performans deneyleri yapılmıştır. Öncelikle konu ile alakalı detaylı literatür araştırması yapılmış, literatürdeki eksik noktalar belirlenmiş ve bu eksikliklerin giderilmesi için bu çalışma ile yapılacaklar planlanmış, kullanılacak yapılan kabullere göre bazı bağlantılar elde edilmiştir. Sonrasında çalışmaya uygun deney düzeneği imalatı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılacak solüsyon nanopartiküller ile takviye edilerek sentezlenmiş ve hidrofobik yüzey kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. ID uygulamalarında performans açısından önemli parametrelerinden biri olan ısı değiştirici etkinliği incelenmiştir. Isı değiştirici etkinlik değeri ile aktarım birim sayısı (NTU) ve ısı kapasite oranı (C^*) arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca literatürdeki en büyük eksikliklerden olan ve çalışmalarda genellikle göz ardı edilen fakat ID sistemlerinde oldukça önemli bir yeri olan basınç kayıpları, kirlenme durumları ve pompa enerji verimliliği parametreleri incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda belirlenmez akışkan giriş sıcaklık değerleri ve çıkış sıcaklık değerleri ölçülmüş, elde edilen sıcaklık değerlerine göre ID değişkenleri ve parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen verilere ve hesaplama sonuçlarına göre çizdirilen grafikler üzerinden, hidrofobik yüzey kaplama uygulamaları ile contalı plakalı ısı değiştiricilerin çalışma performansının nasıl etkilendiği ve diğer sistem parametreleriyle olan ilişkileri literatür ile desteklenerek açıklanmıştır.

- FEP malzeme içerisine eklenen h-BN toz nanopartiküller ile hidrofobiklik değerinin arttığı belirlenmiştir. Fakat kütlece katkı oranı %10 olduğunda temas açısı değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Nanopartikül oranının artmasıyla kaplama yüzeyinde oluşan pürüzlülük ve film kalınlığı nedeniyle hidrofobik etkinin azaldığı belirlenmiştir.
- Hidrofobik yüzey kaplamalarının ısı transferini %17.14 oranında azalttığı belirlenmiştir. Sadece hidrofobik kaplamalar kendi arasında değerlendirildiğinde ise artan hidrofobiklik değeri ile ısı transferinin arttığı belirlenmiştir. FH7 kaplı ısı değiştiricide gerçekleşen ısı transferi FH3 ve FH10 kaplı ısı değiştiricilere göre sırasıyla %7.41 ve %12.34 daha yüksek değerlerde elde edilmiştir.

- Isı değiştirici etkinliği artan Re değeri ile azalmıştır. En yüksek etkinlik değeri kaplamasız ısı değiştiricide $T_{hi}=72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $Re=10000$ değerinde 0.591 olarak belirlenmiştir. FH7 kaplamada aynı şartlarda etkinlik değeri 0.543 olarak belirlenmiş ve kaplamasıza göre etkinlik %8.12 azalmıştır.
- Hidrofobik özelliğin artması ile basınç düşüşlerinin azaldığı belirlenmiştir. FH7 kaplı ısı değiştiricide meydana gelen basınç kaybı kaplamasız duruma göre %79.5 daha düşük olarak gerçekleşmiştir.
- Artan Re değerlerinde yerel kayıpların azaldığı belirlenmiştir. En yüksek yerel kayıp katsayısı kaplamasız ısı değiştiricide 8.16 iken FH7 kaplı ısı değiştiricide bu değer 5.99 olarak elde edilmiştir. Hidrofobik kaplamaların etkisi ile yerel kayıp katsayılarında yaklaşık %26.59 iyileşme sağlanmıştır.
- Hidrofobik yüzey kaplamalarının kirlenme oluşumunu önlediği belirlenmiştir. FH7 kaplı ısı değiştiricide elde edilen ısı transferi değerinin uzun süreli çalışma periyotu sonunda kaplamasız ısı değiştiriciye göre $Re=30000$ değerinde %38.22 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Plaka yüzeylerde oluşan kirlenme miktarları incelendiğinde kaplanmamış plakalarda FH7 kaplı plakalara göre yaklaşık %82 daha yüksek kirlenme oluşumu meydana gelmiştir.
- Kirlenme olmadığı şartlarda en iyi termal performans kaplamasız ısı değiştiricide iken kirlenme oluşumu ile yaklaşık %42 ısı transferi kaybı olduğu belirlenmiştir. FH7 kaplı ısı değiştiricide ise bu düşüşün %2.76 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.
- $Re=30000$ değerinde FH7 kaplama uygulanmış ısı değiştiricide kaplamasız ısı değiştiriciye göre sirkülasyon pompa g tüketimlerinde yaklaşık %17.67 enerji tasarrufu elde edilmiştir.
- FEP solüsyon içerisine takviye edilen h-BN nanopartikül miktarı arttıkça kaplama kalınlığının ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir.
- Solüsyon içerisine takviye edilen nanopartikül eklenme oranı arttıkça aşınma değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. En yüksek sürtünme değeri kaplamasız plakada 0.83 iken FH7 kaplı plakalarda 0.21 olarak tespit edilmiştir. Hidrofobik kaplamanın etkisi ile sürtünme değerlerinde %75'e varan iyileşme elde edilmiştir.

7.1. Tez Sonrasında Yapılabilecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Yapılan çalışma ile elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında contalı plakalı ısı değiştiricilerinde hidrofobik yüzey kaplamaları kullanarak ısı transferini iyileştirme, kirlenme ve basınç kayıplarını önleme çalışmaları için yeni ve özgün bir metot geliştirilmiştir. Bu çalışmanın ısı değiştirici sistemlerinde gerçekleştirilecek yeni çalışmalar, endüstriyel uygulamalar ve üretici firmalar için bir veri kaynağı olacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda yeni çalışma önerileri, çalışmalarda ve uygulamalarda dikkat edilmesi gereken durumlar hakkında açıklamalar sunulmuştur.

- Daha yüksek temas açısına sahip, süperhidrofobik özellikte yüzey kaplama malzemeleri ile çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Yüzey kaplama işleminin uygulanmasında farklı kaplama metotları kullanılabilir.
- Yüzey kaplama solüsyonları içerisine takviye edilen nanopartiküllerinin boyutları nano seviyede kullanılarak yüzey pürüzlülüğü sorununun giderilmesi sağlanabilir.
- Hidrofobik yüzey kaplamaları ısı değiştirici plakalarının tüm yüzey bölgesine değil de sadece akışın başladığı ve dağıldığı port çevresine yakın bölgelere daha dar bir alanda uygulanarak etkileri değerlendirilebilir.
- Farklı malzeme özelliklerine, yüzey geometrilerine, chevron açlarına sahip ısı değiştirici plakaları kullanılarak bu parametreler ile yüzey kaplamalarının ısı değiştirici sistemlerine etkileri incelenebilir.
- Çalışmada kullanılacak akışkan olarak endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan yağ vb. gibi akışkanlar tercih edilerek akışkan çeşidinin etkileri incelenebilir.
- Contalı plakalı ısı değiştirici modellemesi yapılarak, ısı değiştirici plaka yapıları tasarlanarak sonlu elemanlar metodu ile daha gelişmiş ve kapsamlı çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Çok fazla deneysel verinin olması durumunda yapay zeka yöntemleri kullanılarak uygulama hatalarının giderilmesi sağlanabilir ve ara sıcaklıklar için veriler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbasiasl, T., Chehrghani, M.M., Sadaghiani, A.K., ve Koşar, A. (2021). Gradient mixed wettability surfaces for enhancing heat transfer in dropwise flow condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 179 .
- Ahn, H.S., Kim, K.M., Lim, S.T., Lee, C.H., Han, S.W., Choi, H., Koo, S., Kim, N., Jerng, D.-W., ve Wongwises, S. (2019). Anti-fouling performance of chevron plate heat exchanger by the surface modification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 144 . 118634.
- Akıncı, A., Akbulut, H., ve Yılmaz, F. (2003). Floropolimer (Teflon) kaplamaların yapı ve özellikleri. *UCTEA J. Chamb. Metall. Mater. Eng.* 133 . 53–59.
- Alammar, A.A., Al-Dadah, R.K., ve Mahmoud, S.M. (2017). Effect of hydrophobicity on enhancement of condensation heat transfer-numerical investigation. *2016 International Conference for Students on Applied Engineering, ICSAE 2016*. 190–195.
- Awad, M.M. (2011). *Fouling of heat transfer surfaces*. INTECH Open Access Publisher.
- Betz, A.R., Jenkins, J., Kim, C.J., ve Attinger, D. (2013). Boiling heat transfer on superhydrophilic, superhydrophobic, and superbiphilic surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 57 (2). 733–741.
- Bonanno, A., Raimondo, M., ve Pinelli, M. (2019). Use of nanostructured coating to improve heat exchanger efficiency. *Factories of the Future: The Italian Flagship Initiative*. 275–292.
- Boyina, K.S., Mahvi, A.J., Chavan, S., Park, D., Kumar, K., Lira, M., Yu, Y., Gunay, A.A., Wang, X., ve Miljkovic, N. (2019). Condensation frosting on meter-scale superhydrophobic and superhydrophilic heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 145 . 118694.
- Budakli, M., Salem, T.K., Arik, M., Dönmez, B., ve Menciloglu, Y. (2021). An experimental study on the heat transfer and wettability characteristics of micro-structured surfaces during water vapor condensation under different pressure conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 120 (December 2020).
- Cai, C., Sang, N., Teng, S., Shen, Z., Guo, J., Zhao, X., ve Guo, Z. (2016). Superhydrophobic surface fabricated by spraying hydrophobic R974 nanoparticles and the drag reduction in water. *Surface and Coatings Technology*. 307 . 366–373.
- Çelik, Ç. (2010). *Nano boyutta titanyum diborür katkılı sıcak preslenmiş hegzagonal bor nitrür–titanyum diborür kompozitlerinin özelliklerinin incelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çengel, Y.A., Tanyıldızı, V., ve Dağtekin, İ. (2011). *Isı ve kütle transferi*. Güven Kitabevi.
- CENGİZ, U. (2017). Kendi kendini temizleyen yağ itici cam ve seramik yüzeylerin sentezi.
- Černe, L., Simončič, B., ve Željko, M. (2008). The influence of repellent coatings on surface free energy of glass plate and cotton fabric. *Applied Surface Science*. 254 (20). 6467–6477.
- Chambers, L.D., Stokes, K.R., Walsh, F.C., ve Wood, R.J.K. (2006). Modern approaches to marine antifouling coatings. *Surface and Coatings Technology*. 201 (6). 3642–3652.
- Chatterjee, A., Derby, M.M., Peles, Y., ve Jensen, M.K. (2013). Condensation heat transfer on patterned surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 66 . 889–897.
- Chatterjee, A., Derby, M.M., Peles, Y., ve Jensen, M.K. (2014). Enhancement of condensation heat transfer with patterned surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

- Chaudhury, K., Ghosh, U., ve Chakraborty, S. (2013). Substrate wettability induced alterations in convective heat transfer characteristics in microchannel flows: An order parameter approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 67 . 1083–1095.
- Choi, C. ve Kim, M. (2011). Wettability Effects on Heat Transfer. *Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling*.
- Da Cruz, L.G., Ishiyama, E.M., Boxler, C., Augustin, W., Scholl, S., ve Wilson, D.I. (2015). Value pricing of surface coatings for mitigating heat exchanger fouling. *Food and Bioproducts processing*. 93 . 343–363.
- Da Silva, R.P.P., Mortean, M.V. V, de Paiva, K. V, Beckedorff, L.E., Oliveira, J.L.G., Brandão, F.G., Monteiro, A.S., Carvalho, C.S., Oliveira, H.R., ve Borges, D.G. (2021). Thermal and hydrodynamic analysis of a compact heat exchanger produced by additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*. 193 . 116973.
- Danışman, C. (2010). *Plakalı eşanjör etkinlik parametrelerinin deneysel analizi*. ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Das, S., Kumar, S., Samal, S.K., Mohanty, S., ve Nayak, S.K. (2018). A review on superhydrophobic polymer nanocoatings: recent development and applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 57 (8). 2727–2745.
- Davar, H., Nouri, N.M., ve Navidbakhsh, M. (2021). Effects of Superhydrophobic, Hydrophobic and Hybrid Surfaces in Condensation Heat Transfer. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 14 (4). 1077–1099.
- Deng, W., Ahmad, S., Liu, H., Chen, J., ve Zhao, J. (2022). Improving boiling heat transfer with hydrophilic/hydrophobic patterned flat surface: A molecular dynamics study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 182 . 121974.
- Derby, M.M., Chatterjee, A., Peles, Y., ve Jensen, M.K. (2014). Flow condensation heat transfer enhancement in a mini-channel with hydrophobic and hydrophilic patterns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 68 . 151–160.
- Drelich, J., Chibowski, E., Meng, D.D., ve Terpilowski, K. (2011). Hydrophilic and superhydrophilic surfaces and materials. *Soft Matter*. 7 (21). 9804–9828.
- Dvořák, V. ve Vít, T. (2017). Evaluation of CAE methods used for plate heat exchanger design. *Energy Procedia*. 111 . 141–150.
- Ebin, B. (2007). Hexagonal boron nitride. *Hard Metal Compounds Lecture, İTÜ İstanbul*.
- ESEN, G.K. ve Müdürlüğü, E.L.G. (2015). Türkiye Ve Dünyada Elektrik Motorları Enerji Tüketimi Ve İlgili Teknik Mevzuat. *Gebze, Kocaeli: Türk Standartları Enstitüsü, Elektroteknik Laboratuvarı Gebze Müdürlüğü*.
- Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z.Y., Van Bael, J., Salenbien, R., Verbeken, K., ve De Paepe, M. (2019). Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion reviews*. 37 (2). 131–155.
- Farhadi, S., Farzaneh, M., ve Kulinich, S.A. (2011). Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces. *Applied Surface Science*. 257 (14). 6264–6269.
- Genç, Y. (2014). *Plakalı ısı değiştirgeçlerinin had simülasyonlarının yapılması ve deneysel verilerle doğrulanması*. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Genceli, O. (1999). *Isı Değiştiricileri*. Birsan Yayınevi, İstanbul, Turkey. Turkish.
- Genceli, O.F. (2005). *Isı değiştiricileri*. Birsan Yayınevi.

- Hsieh, S.S. ve Lin, C.Y. (2009). Convective heat transfer in liquid microchannels with hydrophobic and hydrophilic surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52 (1–2). 260–270.
- Huo, J., Xiao, J., Kirk, T. V, ve Chen, X.D. (2019). Effects of Fluorolink® S10 surface coating on WPC fouling of stainless steel surfaces and subsequent cleaning. *Food and Bioproducts Processing*. 118 . 130–138.
- Hwang, H.S., Kim, N.H., Lee, S.G., Lee, D.Y., Cho, K., ve Park, I. (2011). Facile fabrication of transparent superhydrophobic surfaces by spray deposition. *ACS applied materials & interfaces*. 3 (7). 2179–2183.
- Jeevahan, J., Chandrasekaran, M., Britto Joseph, G., Durairaj, R.B., ve Mageshwaran, G. (2018). Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges. *Journal of Coatings Technology and Research*. 15 (2). 231–250.
- Jhee, S., Lee, K.S., ve Kim, W.S. (2002). Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*. 25 (8). 1047–1053.
- Kakaç, S., Bergles, A.E., Mayinger, F., ve Yüncü, H. (2013). *Heat transfer enhancement of heat exchangers*. c. 355 Springer Science & Business Media.
- Kakac, S., Liu, H., ve Pramuanjaroenkij, A. (2002). *Heat exchangers: selection, rating, and thermal design*. CRC press.
- Kakaç, S., Shah, R.K., ve Bergles, A.E. (1983). *Low Reynolds number flow heat exchangers: advanced study institute book*. Hemisphere publishing corporation.
- Khan, T.S., Khan, M.S., Chyu, M.-C., ve Ayub, Z.H. (2010). Experimental investigation of single phase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations. *Applied Thermal Engineering*. 30 (8–9). 1058–1065.
- Kibar, A. (2016). Süperhidrofobik ve hidrofobik yüzeyler üzerinde sıvı damlası gaz kabarcığı ve sıvı jeti dinamiğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 22 (7). 613–619.
- Kim, K., Kim, M.H., Kim, D.R., ve Lee, K.S. (2014). Thermal performance of microchannel heat exchangers according to the design parameters under the frosting conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 71 . 626–632.
- Kim, K. ve Lee, K.S. (2013). Frosting and defrosting characteristics of surface-treated louvered-fin heat exchangers: Effects of fin pitch and experimental conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 60 (1). 505–511.
- Kılıç, B. (2013). *Plakalı ısı eşanjörlerinde plaka geometrisi ile dinamik ve etrmal parametrelerin ısı transferine etkilerinin deneysel olarak araştırılması*. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kline, S. ve McClintock, F. (1953). Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering*. 75 . 3–8.
- Kukulka, D.J. ve Leising, P. (2010). Evaluation of heat exchanger surface coatings. *Applied Thermal Engineering*. 30 (16). 2333–2338.
- Kumar, N., Britto, N., ve Richaredsion, B. (2020). Design and Analysis of Heat Exchanger with Nano Coating. 294–298.
- Kumar S, S.C. ve Suresh, S. (2012). Heat Transfer Enhancement by Nano Structured Carbon Nanotube Coating. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 3 (6). 1–5.
- Kumar, V., Tiwari, A.K., ve Ghosh, S.K. (2015). Application of nanofluids in plate heat

- exchanger: a review. *Energy conversion and management*. 105 . 1017–1036.
- Lara, J.R. ve Holtzapple, M.T. (2011). Experimental investigation of dropwise condensation on hydrophobic heat exchangers. Part II: Effect of coatings and surface geometry. *Desalination*. 280 (1–3). 363–369.
- Lee, W.J., Bae, K.J., ve Kwon, O.K. (2020). Effect of hydrophobic surfaces on frost retardation in fin-tube heat exchangers with various fin pitches. *Applied Thermal Engineering*. 176 (April). 115424.
- Li, W., Zhou, K., Manglik, R.M., Li, G.-Q., ve Bergles, A.E. (2016). Investigation of CaCO₃ fouling in plate heat exchangers. *Heat and Mass Transfer*. 52 (11). 2401–2414.
- Li, Y. (2018). *Investigation of the Effect of Superhydrophobic Coatings on the Performance of Heat Exchangers*. Queen's University Belfast. Faculty of Engineering and Physical Sciences, July.
- Lin, H.Y., Wu, Y.L., Yang, K.S., Tseng, C.Y., ve Wu, S.K. (2020). The Effect of Surface Modification on Heat Transfer of Heat Exchanger. *Journal of Physics: Conference Series*. 1500 (1).
- Lu, M.C., Lin, C.C., Lo, C.W., Huang, C.W., ve Wang, C.C. (2017). Superhydrophobic Si nanowires for enhanced condensation heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 111 . 614–623.
- Luo, Y., Yuan, L., Li, J., ve Wang, J. (2015). Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications. *Micron*. 79 . 59–73.
- Lv, F.Y. ve Zhang, P. (2016). Drag reduction and heat transfer characteristics of water flow through the tubes with superhydrophobic surfaces. *Energy Conversion and Management*. 113 . 165–176.
- Ma, M. ve Hill, R.M. (2006). Superhydrophobic surfaces. *Current opinion in colloid & interface science*. 11 (4). 193–202.
- Ma, X., Ding, G., Zhang, Y., ve Wang, K. (2007). Effects of hydrophilic coating on air side heat transfer and friction characteristics of wavy fin and tube heat exchangers under dehumidifying conditions. *Energy conversion and management*. 48 (9). 2525–2532.
- Mahvi, A.J., Boyina, K., Musser, A., Elbel, S., ve Miljkovic, N. (2021). Superhydrophobic heat exchangers delay frost formation and enhance efficiency of electric vehicle heat pumps. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 172 .
- Majety, S., Cao, X.K., Dahal, R., Pantha, B.N., Li, J., Lin, J.Y., ve Jiang, H.X. (2012). “Semiconducting hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonics”. *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX*. c. 8268 SPIE. ss. 607–614.
- Meikandan, M., Malarmohan, K., ve Hemachandran, E. (2017). Experimental investigation on thermal performance of nano coated surfaces for air-conditioning applications. *Thermal Science*. 23 (00). 175–175.
- Oberli, L., Caruso, D., Hall, C., Fabretto, M., Murphy, P.J., ve Evans, D. (2014). Condensation and freezing of droplets on superhydrophobic surfaces. *Advances in colloid and interface science*. 210 . 47–57.
- Ono, S. ve Kondo, S. (1960). “Molecular theory of surface tension in liquids”. *Structure of Liquids/Struktur der Flüssigkeiten*. Springer. ss. 134–280.
- Özbey, M., Gürbüz, M., ve Karakurt, U. (2021). Hidrofobik çark yüzeylerinin santrifüj tip bir pompa performansına etkilerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 36 (1). 267–274.

- Patil, M.S., Seo, J.H., ve Lee, M.Y. (2017). Heat transfer characteristics of the heat exchangers for refrigeration, air conditioning and heap pump systems under frosting, defrosting and dry/wet conditions—A review. *Applied Thermal Engineering*. 113 . 1071–1087.
- Rafferty, K.D. ve Culver, G. (1998). Heat exchangers.
- Rainieri, S., Bozzoli, F., ve Pagliarini, G. (2009). Effect of a hydrophobic coating on the local heat transfer coefficient in forced convection under wet conditions. *Experimental heat transfer*. 22 (3). 163–177.
- Rosengarten, G., Cooper-White, J., ve Metcalfe, G. (2006). Experimental and analytical study of the effect of contact angle on liquid convective heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 49 (21–22). 4161–4170.
- Rungraeng, N., Cho, Y.C., Yoon, S.H., ve Jun, S. (2012). Carbon nanotube-polytetrafluoroethylene nanocomposite coating for milk fouling reduction in plate heat exchanger. *Journal of Food Engineering*. 111 (2). 218–224.
- Sadaghiani, A.K. (2019). *Micro/Nano-engineered techniques for enhanced pool boiling heat transfer*.
- Salem, T.K.S. (2018). An investigation into hydrophobic micro-textured surfaces on heat transfer and surface wetting phenomenon during vapor condensation.
- Santos, O., Anehamre, J., Wictor, C., Tornqvist, A., ve Nilsson, M. (2013). “Minimizing crude oil fouling by modifying the surface of heat exchangers with a flexible ceramic coating”. *Proc. Heat Exchanger Fouling & Cleaning X*. ss. 79–84.
- Senthilkumar, R., Nandhakumar, A.J.D., ve Prabhu, S. (2013). Analysis of natural convective heat transfer of nano coated aluminium fins using Taguchi method. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. 49 (1). 55–64.
- Shah, R.K. ve Sekulic, D.P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons.
- Sikarwar, B.S., Khandekar, S., ve Muralidhar, K. (2012). Effect of Surface Hydrophobicity on Heat Transfer During Dropwise Condensation: A Numerical Study. *International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer*. 1 (June). 3–7.
- Sundén, B. ve Manglik, R.M. (2007). *Plate heat exchangers: design, applications and performance*. c. 11 Wit Press.
- Tang, Y., Tang, B., Li, Q., Qing, J., Lu, L., ve Chen, K. (2013). Pool-boiling enhancement by novel metallic nanoporous surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 44 . 194–198.
- Taurino, R., Fabbri, E., Messori, M., Pilati, F., Pospiech, D., ve Synytska, A. (2008). Facile preparation of superhydrophobic coatings by sol–gel processes. *Journal of colloid and interface science*. 325 (1). 149–156.
- Tay, S.N. ve Yang, C. (2006). Assessment of the hydro-ball condenser tube cleaning system. *Hydro-Ball Technics Sea Pte. Ltd, Singapore*.
- Tokunaga, A. ve Tsuruta, T. (2020). Enhancement of condensation heat transfer on a microstructured surface with wettability gradient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 156 . 119839.
- Tsai, Y.-C., Liu, F.-B., ve Shen, P.-T. (2009). Investigations of the pressure drop and flow distribution in a chevron-type plate heat exchanger. *International communications in heat and mass transfer*. 36 (6). 574–578.
- Vaisi, A., Esmaeilpour, M., ve Taherian, H. (2011). Experimental investigation of geometry effects on the performance of a compact louvered heat exchanger. *Applied Thermal*

Engineering. 31 (16). 3337–3346.

- Varlıca, O. (2018). *Kombi eşanjörlerinde kireçlenme oluşumu ve performansa etkisinin deneysel yollarla incelenmesi*. Sakarya Üniversitesi.
- Wagemann, E., Wang, Y., Das, S., ve Mitra, S.K. (2020). Wettability of nanostructured hexagonal boron nitride surfaces: molecular dynamics insights on the effect of wetting anisotropy. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 22 (4). 2488–2497.
- Wajs, J. ve Mikielwicz, D. (2016). Influence of metallic porous microlayer on pressure drop and heat transfer of stainless steel plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 93 . 1337–1346.
- Wang, C.C. ve Chang, C.T. (1998). Heat and mass transfer for plate fin-and-tube heat exchangers, with and without hydrophilic coating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41 (20). 3109–3120.
- Wang, F., Liang, C., Yang, M., Fan, C., ve Zhang, X. (2015). Effects of surface characteristic on frosting and defrosting behaviors of fin-tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 75 . 1126–1132.
- Wang, S., Liu, K., Yao, X., ve Jiang, L. (2015). Bioinspired surfaces with superwettability: new insight on theory, design, and applications. *Chemical reviews*. 115 (16). 8230–8293.
- Wang, S., Yu, X., Liang, C., ve Zhang, Y. (2018). Enhanced condensation heat transfer in air-conditioner heat exchanger using superhydrophobic foils. *Applied Thermal Engineering*. 137 (April). 758–766.
- Wen, R., Li, Q., Wu, J., Wu, G., Wang, W., Chen, Y., Ma, X., Zhao, D., ve Yang, R. (2017). Hydrophobic copper nanowires for enhancing condensation heat transfer. *Nano Energy*. 33 (November 2016). 177–183.
- Whyman, G., Bormashenko, E., ve Stein, T. (2008). The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon. *Chemical Physics Letters*. 450 (4–6). 355–359.
- Williams, A. (2016). Enhanced Laminar Convective Heat Transfer using Microstructured Superhydrophobic Surfaces. *Mechanical Engineering ETDs*.
- Yang, K.S., Lin, K.H., Tu, C.W., He, Y.Z., ve Wang, C.C. (2017). Experimental investigation of moist air condensation on hydrophilic, hydrophobic, superhydrophilic, and hybrid hydrophobic-hydrophilic surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 115 . 1032–1041.
- Zhang, P. ve Lv, F.Y. (2015). A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*. 82 . 1068–1087.
- Zhang, Y., Chen, Y., Shi, L., Li, J., ve Guo, Z. (2012). Recent progress of double-structural and functional materials with special wettability. *Journal of Materials Chemistry*. 22 (3). 799–815.
- Zhu, Z., Li, J., Peng, H., ve Liu, D. (2021). Nature-inspired structures applied in heat transfer enhancement and drag reduction. *Micromachines*. 12 (6).

ÖZ GEÇMİŞ

Salih DAĞLI, 2013 yılında Karabük Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2016 yılında Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Yüksek Lisans programını bitirdi. Sonrasında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği doktora programına başladı. Lisans öğrenimi sonrasında makine imalat sektöründe Ar-Ge mühendisi ve tasarım müdürü olarak çalıştı. 2021 yılında Sinop Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Makine Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Temel ilgi ve çalışma alanları ısı transferi, enerji, yeni nesil nano malzemeler ve bilgisayar destekli tasarım/üretimdir (24.01.2023).

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0003-3805-5130

Yayınlar:

1. Dağlı S., Özbey M., Experimental Investigation of the Effect of Hydrophobic Coating on Heat Transfer and Gasketed Plate Heat Exchanger Performance, Journal of Process Mechanical Engineering, 2023
2. Kshitij, G., Khanna, N., Yıldırım, Ç. V., Dağlı, S., Sarıkaya, M., Resource conservation and sustainable development in the metal cutting industry within the framework of the green economy concept: An overview and case study, Sustainable Materials and Technologies, 2022

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. Hidrofobik Yüzeylerin Isı Transferi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Yürütücü: Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY, Araştırmacı: Salih DAĞLI, 2021/2022 PYO. MUH. 1904.22.006
2. Farklı Kanal Geometrilerinde Kanal Yüzeyindeki Engellerin Isı Transferine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yürütücü: Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN, Araştırmacı: Salih DAĞLI, 2015/2016 MUH19004.15.010