

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT KANALLI BURULMUŞ ŞERİT EKLENMİŞ DÜZ BORU
İÇERİSİNDE HİBRİT NANO PARTİKÜLLÜ SU AKIŞINDA ISI
TRANSFERİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜNÜN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Osman Alperen TÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Kasım, 2020

T.C
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT KANALLI BURULMUŞ ŞERİT EKLENMİŞ DÜZ BORU
İÇERİSİNDE HİBRİT NANO PARTİKÜLLÜ SU AKIŞINDA ISI
TRANSFERİ VE BASINÇ DÜŞÜMÜNÜN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Osman Alperen TÜRK tarafından hazırlanan tez çalışması 25.11.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Zeynep Dürriye BİLGE, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Ali CELEN, Üye

Erzincan Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Dört Kanallı Burulmuş Şerit Eklenmiş Düz Boru İçerisinde Hibrit Nano Partiküllü Su Akışında Isı Transferi ve Basınç Düşümünün Deneysel Olarak İncelenmesi başlıklı çalışmada gerçekleştirilen tüm deneyler sonucunda elde edilen sonuçlarına ve verilerine ilişkin sahtecilik ve/veya çarpıtma yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik kurallarına ve ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde karşılaşacağım yasal sonuçları kabul ederim.

Osman Alperen TÜRK

İmza

Aileme,

TEŞEKKÜR

Başta tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ'a çalışmalarım boyunca verdiği destekten, bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösterdiği için minnettar olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca sadece tezimde yardımcı olmakla kalmayıp destekleri sayesinde akademik çalışmalar gerçekleştirmemi sağladığı için teşekkürü içtenlikle bir borç bilirim. Bu çalışmanın tamamlanmasında gösterdiği sonsuz destekten ve bana değerli laboratuvarında çalışma fırsatı sağladığı için King Mongkuts University of Technology Thonburi'den Prof. Dr. Somchai WONGWISES'e sonsuz teşekkürlerimi sunmak isterim. King Mongkuts University of Technology Thonburi'deki çalışmalarım sırasında içten yardım ve destekleri için Thermal Engineering ve Multiphase Flow Research Lab (FUTURE) ekibindeki herkese, özellikle hem gösterdiği dostluk hem de deneyleri yapmamdaki yardımları için minnettarım.

Osman Alperen TÜRK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
2 TEK FAZLI AKIŞLAR	7
2.1 Tek Fazlı Akışlar	7
2.2 Tek Fazlı Akışlarda Isı Transferi	8
2.2.1 İletim ile Isı Transferi	8
2.2.2 Taşınım ile Isı Transferi.....	9
2.2.3 Işınım ile Isı Transferi	11
2.3 Isı Transferi İyileştirme Yöntemleri	13
2.3.1 Pasif Yöntemler.....	16
2.3.2 Aktif Yöntemler.....	27
2.4 Tek Fazlı Akışlarda Basınç Düşümü.....	27
3 DENEY SETİ VE KULLANILAN METOT	28
3.1 Deney Seti.....	28
3.2 Deneyde Kullanılan Metotlar	31
3.2.1 Nano Akışkanın Termal Özellikleri	32
3.2.2 Isı Transfer Katsayısının Hesaplanması.....	33
4 BULGULAR VE TARTIŞMALAR	35
4.1 Deneyden Elde Edilen Sonuçların Doğrulanması	36

4.2 Taşınım ile Isı Transferinin Değerlendirilmesi	40
4.3 Regresyon Denklemlerinin Türetilmesi	49
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKÇA	52
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	55

SİMGELİSTESİ

ΔP	Basınç düşümü (Pa)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
φ	Hacimsel konsantrasyon (%)
α	Isıl yayılma (m ² /s)
ε	Tüp pürüzlülüğü (m)
ρ	Yoğunluk (kg/m ²)

KISALTMA LİSTESİ

A	Test düzeneği çalışma alanı (m ²)
c _p	Özgül ısı (J/kgK)
Di	Tüp iç çap uzunluğu (m)
d	Tüp çap uzunluğu (m)
f	Sürtünme Faktörü
h	Isı transfer katsayısı (W/m ² K)
I	Elektrik akımı (A)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
l	Burulmuş şerit uzunluğu (m)
L	DeneySEL testin tüp uzunluğu (m)
m	Ağırlık, kg
ṁ	KütleSEL debi (kg/s)
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
SE	Standart hata
Q	Isı transferi (W)
QCTT	Dört kanallı burulmuş şerit
Re	Reynolds sayısı
R2	Determinasyon katsayısı
T	Sıcaklık (°C)
u	Hız (m/s)
V	Elektrik voltajı (V)

İndisler

Ave	Ortalama
Bf	Ana sıvı
Corr	Korelasyon
Exp	Deney
Hnf	Hibrit nano akışkan
İn	İç
Np	Nano partikül
Out	Dış
Ss	Paslanmaz çelik
Sup	Arz
Wi	İç duvar
Wo	Dış duvar

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Laminer ve türbülanslı akış gösterimi [23]	7
Şekil 2.2	Sonsuz uzunluktaki duvarda ısı iletimi [23]	9
Şekil 2.3	Siyah cisim ışıması [23]	12
Şekil 2.4	Kanatlı yüzey gösterimi [24]	14
Şekil 2.5	Borulardaki kirlenme gösterimi [24]	15
Şekil 2.6	Basit yüzey alanı arttırma yöntemleri gösterimi [24]	16
Şekil 2.7	Burulmuş şerit (PLA maddesinde üretilmiştir)	17
Şekil 2.8	Nano akışkan elde edilme yöntemi basit gösterimi [35]	19
Şekil 2.9	Tek adım yöntemi [35]	19
Şekil 2.10	Burulmuş şerit kalınlığı gösterimi	24
Şekil 2.11	Burulmuş şerit adım uzunluğu ve çap gösterimi	24
Şekil 2.12	Saat ve saatin tersi yönünde burulmuş şerit	26
Şekil 2.13	Çiftli burulmuş şerit	26
Şekil 2.14	Helisel vida burulmuş şerit	26
Şekil 3.1	Deney düzeneğinin şematik gösterimi	30
Şekil 3.2	Dört kanalı burulmuş şeritlerin üstten görünümü	31
Şekil 4.1	Düz borudaki Su için literatürden Nusselt korelasyonları ile deneylerin doğrulanması	36
Şekil 4.2	Düz borudaki nano akışkan için literatürden Nusselt korelasyonları ile deneylerin doğrulanması	37
Şekil 4.3	Düz boruda su için literatürden sürtünme faktörü korelasyonları ile deneylerin doğrulanması	39
Şekil 4.4	Düz boruda su için literatürden sürtünme faktörü korelasyonları ile deneylerin doğrulanması	39
Şekil 4.5	Düz boru akışındaki ısı transfer katsayısı ve kütleli debinin karşılaştırılması	41
Şekil 4.6	Düz boru akışındaki Nusselt ve Reynolds sayılarının karşılaştırılması ..	42
Şekil 4.7	Burulmuş şerit eklenmiş (14 cm) boruda çeşitli su ve hibrit nano akışkan hacim konsantrasyonları için kütleli debi ile ısı transfer katsayısı karşılaştırılması	43
Şekil 4.8	Çeşitli uzunluktaki burulmuş şeritler %1 konsantrasyondaki nano akışkan ile ısı transfer katsayıları karşılaştırması	44
Şekil 4.9	Su ve çeşitli hibrit nano akışkan konsantrasyonlarında 28 cm burulmuş şerit bulunan çalışmaların Nusselt ve Reynolds sayılarının karşılaştırılması	45
Şekil 4.10	Çeşitli uzunluktaki burulmuş şeritler ve düz boruda 0.5% nano akışkan sıvı ile Nusselt ve Reynolds sayılarının karşılaştırılması	46
Şekil 4.11	Burulmuş şerit bulunan boruda nano akışkan konsantrasyonun sürtünme faktörü ve Reynolds sayısına etkisi	47

Şekil 4.12 Burulmuş şerit uzunluğunun sürtünme faktörü ve Reynolds sayısına olan etkisi.....	47
Şekil 4.13 Nano akışkan konsantrasyonunun basınç farkına olan etkisi.....	48
Şekil 4.14 Burulmuş şerit uzunluğunun basınç düşümüne etkisi	48
Şekil 4.15 Nusselt sayısı için deneysel dataların regresyon denklemi ile karşılaştırılması.....	50
Şekil 4.16 Sürtünme faktörü için deneysel dataların regresyon denklemi ile karşılaştırılması.....	50

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Partikül özellikleri.....	29
Tablo 3.2 Belirsizlik parametreleri.....	30
Tablo 3.3 Burulmuş şerit geometrik özellikleri	31
Tablo 3.4 Deney çalışma koşulları	34

Dört Kanallı Burulmuş Şerit Eklenmiş Düz Boru İçerisinde Hibrit Nano Partiküllü Su Akışında Isı Transferi ve Basınç Düşümünün Deneysel Olarak İncelenmesi

Osman Alperen TÜRK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Gerçekleştirilen bu çalışmada, dört kanallı burulmuş şerit eklenmiş ve eklenmemiş yatay düz bir boruda hibrit nano partiküllü su akışının türbülanslı ısı transfer özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Hibrit nano akışkan iki farklı nano parçacık kullanılarak elde edilmiştir: Baz sıvı olarak saf su ile Silisyum dioksit (%60) ve Grafit (%40). Deneyler, sırasıyla %0,5 ve %1,0 olmak üzere iki farklı hacim konsantrasyonu için gerçekleştirildi. Dört kanallı burulmuş şerit eklerinin uzunluğu 0 ile 42 cm arasındadır ve sabit büküm oranları 5'tir. Reynolds Sayısı 3.400 ile 11.000 arasında değişmektedir. Sonuçlara göre, kütleli debi ve hacim konsantrasyonu arttıkça Nusselt Sayısı artmaktadır. Ayrıca, burulmuş şerit uzunluğu arttıkça ısı transfer katsayısı artmaktadır. Bunlara ek olarak, hacim konsantrasyonu ve Reynolds Sayısı arttıkça sürtünme faktörü artmaktadır ayrıca burulmuş şerit uzunluğu arttıkça sürtünme faktörü artmaktadır. Basınç düşümü, artan kütleli debi ve artan hacim konsantrasyonu ile artmaktadır. Son olarak

regresyon denklemlerinin, Nusselt sayısı için $\pm\%5$ ve sürtünme faktörü için $\pm\%10$ sapma bandı içindeki deneysel verilerle iyi eletiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hibrit nano akışkan, burulmuş şerit, sürtünme faktörü, ısı transferi iyileştirme

An Experimental Investigation on Heat Transfer Characteristics of Graphite-SiO₂/Water Hybrid Nanofluid Flow in Horizontal Tube with Various Quad-Channel Twisted Tape Inserts

Osman Alperen TÜRK

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

In this study, the turbulent heat transfer properties of the hybrid nanoparticle water flow in a horizontal smooth tube with and without quad-channel twisted tape (QCTT) inserts is investigated experimentally. The hybrid nanofluid is obtained using two different nanoparticles: Siliciumdioxide (60%) and Graphite (40%) with pure water as base fluid. Experiments are conducted for two different volume concentrations, 0.5% and 1%, respectively. The length of quad-channel twist tape inserts are between 0 and 42 cm with constant twist ratios of 5. The Reynolds number is varied from 3.400 to 11.000. According to the results, Nusselt number of the case with hybrid nanofluid increased with increasing mass flow rate and volume concentration. Also, heat transfer coefficient increased with increasing length of twisted tape insert. Moreover, friction factor increases with increasing volume

concentration for increasing Reynolds number whereas and friction factor increases with increasing the length of tape inserts. Pressure drop increases with increasing mass flow rate and increasing volume concentration. Finally, the regression equations are found to be well-matched with the experimental data within the deviation band of $\pm 5\%$ for Nusselt number and $\pm 10\%$ for friction factor, respectively.

Keywords: Hybrid nanofluid, twisted tape insert, friction factor, heat transfer enhancement

1.1 Literatür Araştırması

Günümüzde ısı transferi endüstri ve yaşam alanlarında en başta ısı değiştiricilerde olmak üzere büyük çaplı öneme sahip bir konudur. Isı transferinin iyileştirilmesi özellikle endüstriyel uygulamalarda zaman ve maliyete olan etkisi sebebi ile önemini gün geçtikçe arttırmaktadır. Bunun yanında yapılacak iyileştirme çalışmaları sayesinde ısı değiştirici boyutlarını küçültme olasılığımızda ortaya çıkmaktadır.

En genel pasif ısı transferi arttırma yöntemlerinden ikisi: nano akışkan ve burulmuş şeritlerdir (Türbülator). Isı değiştiricileri çalışmalarında ise genellikle kullanılan ana akışkanlar: su, propilen, glikol, etilenin hibrit nano parçacık karışımları glikol ve motor yağı ile arttırılarak, böylece ısı değiştiricilerin hem soğutma yükleri arttırılabilir aynı zamanda boyutları azaltılabilir. Literatürde hibrit nano akışkanların hazırlanması ve özellikleri ile bunların ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkisi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Nano akışkan termal özelliklerinin [1-4] ve nano akışkan uygulamalarına [5-8] ilişkin yazarların seçilmiş yayınlarından bazılarını literatürde bulabilirsiniz.

Açık kaynaklardaki pratik çalışmaların etkilerini araştırmak ısı transfer performansı ve sürtünme faktörü üzerindeki ısı değiştiricilerindeki akış tipi ve tasarımı ile birlikte farklı türdeki nano parçacıklar bu bölümde özetlenmiştir. Sundar ve diğ. [9], sabit ısı akısı için yuvarlak bir borudaki türbülanslı bir MWCNT-Fe₃O₄ / su hibrit nano akışkanın akışının ısı transferi ve sürtünme faktörü özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, Reynolds Sayısı (3000 <Re <22,000) ve hibrit nano akışkanın iki farklı parçacık yükünü (%0,1 ve %0,3) değiştirmek için yapılır. Sonuçlar saf su ile karşılaştırıldığında, pompalama gücünün %18 arttığı Re = 22.000 ile %0,3 partikül yüklemesi için Nusselt Sayısında %31,1'lik bir artış gözlemlendiğini gösterdiler. Duangthongsuk ve Wongwises [10], %0,2 hacim

konsantrasyonuna sahip TiO_2 -su nano akışkanı için yatay çift borulu bir ters akışlı ısı değıştiricilerin ısı transfer katsayısını ve sürtünme faktörünü incelediler. Isı transferi artışının su ile karşılaştırıldığında basınç düşümü çok az ölçüm hatası ile %6-11 olduğu görülmektedir.

Farklı termal yükler altında, nano akışkan özellikleri bir dizi çalışmada incelenmiştir. Ho ve diğ. [11], Khoshvaght-Aliabadi ve Eskandari [12], hacimsel konsantrasyonları ve kütle akış fraksiyonlarını değıştirmek için nano akışkanların yoğunluğunu, dinamik viskozitesini, özgül ısı kapasitesini ve termal iletkenliğini tablo haline getirmişlerdir. Ho ve diğ. Khoshvaght-Aliabadi Al_2O_3 nano akışkan / su karışımı ve Eskandari Cu-su karışımı kullanmıştır. Kim ve diğ. [13], alümina ve amorf karbonik nano parçacıklarının, sabit bir ısı akısı altında farklı hacim konsantrasyonları için dairesel düz bir tüp içinde konvektif ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Değişen giriş sıcaklığının verimlilik endeksi üzerindeki etkisi $3800 < \text{Re} < 12,000$ için araştırılmış ve yatay dairesel bir borudan akan %0.5, 1 ve 2 SiO_2 / su nano akışkan hacimsel konsantrasyonları Jumholkul ve diğ. [14] tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Çıkan sonuçlara göre, verimlilik endeksinin en yüksek değeri, 9000'den yüksek Reynolds sayısı, %2'lik nano akışkan hacim konsantrasyonunda ve 35 °C giriş sıcaklığında ulaşıldığını gösterdi.

Azmi ve diğ. [15], deneysel çalışmada farklı burulma oranlarında burulmuş şeritlerin ısı transferi katsayısına ve TiO_2 /su nano akışkanının (30 °C'deki ve 1%-3% konsantrasyonlarında) sürtünme faktörü düz bir boruda etkisi incelenmiştir. Isı transfer katsayılarında %23,2 oranında önemli bir artış, hacimce %1 TiO_2 'de gözlenmiştir. Sonuçlar ısı transferi katsayısının hem saf su hem de nano akışkan çalışmaları için burulma oranında düşüşle arttığını göstermiştir.

Yuvarlak boruda laminar akışta ısı transferi ve sürtünme faktörü farklı burulmuş şerit kalınlıklarında deneysel bir çalışma Esmailzadeh et al. [16] tarafından $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ /su nano akışkan kullanarak gerçekleştirmiştir. Isı akısı sabit tutulur, hacimsel konsantrasyonlar %0,5 ve %1 olarak seçilir, Reynolds sayısı 150'den 1600'e kadardır ve şerit kalınlıkları 0,5 mm, 1 mm ve 2 mm'dir ve sabit burulma oranı 3,21'dir. Şeridin artan kalınlığı hem konvektif ısı transfer katsayısını hem de sürtünme faktörünü arttırdı. Artan konsantrasyon ayrıca termal performansı da

arttırdı. Maddah ve diğ. [17], burulmuş şeridin geometrisini Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısındaki ilerleme oranları ve Al_2O_3 nano akışkanı olan yatay bir çift borulu ısı değiştiricide deneysel olarak araştırılmıştır. Büküm oranının azaldığı, ısı transfer katsayısının %12'den %52'ye ve sürtünme faktörünün sabit burulma oranına göre %5'den %28'e yükseldiği bildirilmektedir. Artan burulma oranı hem ısı transferini hem de sürtünme faktörünü sırasıyla 0,6 ila 0,92 ve 0,75 ila 0,95 oranında zayıflatmıştır. Man ve diğ. [18], takılan şeridin alternatif burulmanın etkisini deneysel olarak incelemiş ve tipik bükümlü bant ekleri ile sonuçları, suyun çalışma sıvısı ve akışın çalkantılı olduğu çift tip ısı değiştiricilerin termal performansı üzerinde karşılaştırmıştır. Sonuçlarına göre, burulmadaki değişimin termal performansı artırdı ve maksimum performans değerlendirme kriterleri değerine 1.42'de ulaşıldı.

Bir dizi deneysel çalışmada Ravi Kumar ve diğ. [19-20] tarafından Fe_3O_4 /Su karışımının hacimsel konsantrasyonu, burulmuş şerit burulma oranının Reynolds sayısına etkisini araştırıldı. İlk çalışmada Ravi Kumar ve diğ. [19], Fe_3O_4 / su nano akışkanının ve burulmuş şerit ile U bükümlü ısı değiştiricilerin $16,000 < Re < 32,000$, partikül hacim konsantrasyonu %0,005 ile %0,006 ve burulmuş şerit oranı için $H / D = 10, 15$ ve 20 deneysel olarak araştırdılar. Burulmuş şerit olmadan, en düşük burulmuş şerit oranı ve saf su çalışmalarında en yüksek Reynolds number ve hacimsel konsantrasyonda Nusselt sayısında %38,72'lik bir artış olduğu rapor edildi. İkinci çalışmada [20] parametre aralığı genişletilmiş ve Nusselt sayısını maksimuma çıkarmak için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çıktılarına göre Nusselt sayısı daha düşük H / D oranı için daha da arttığı gözlemlenmiştir. $H / D = 5$ için, ek ve saf su çalışmalarına göre %51,88 daha yüksektir.

TiO_2 / su nano akışkan ve $5400 < Re < 15,200$ 'ün benzer hacim konsantrasyonları için farklı burulma oranına sahip şeritlerin ısı transfer performansı üzerine etkisi deneysel olarak Eiamsa-ard ve diğ. [21] tarafından incelenir. Sonuçlara göre, azalan burulma oranının ve artan hacim konsantrasyonunun konveksiyon ısı transferini arttırdığını ve Nusselt sayısını artırdığını gösterdi. Yukarıda belirtilen tüm deneysel çalışmalar, karşılık gelen Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için ampirik ilişkiler

ortaya koymuş ve deneysel ölçümlerin hata bantları içinde %8-10 aralığında olduğunu bildirmiştir.

Literatürde, burulmuş şerit ekleri ve nano akışkanların kombine etkisini araştıran önemli miktarda çalışma mevcuttur; ancak şerit eklerinin geometrik özelliklerine ve malzemelerine odaklanan sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu çalışmada, son teknoloji ürünü dört kanallı bükümlü bant eki tasarlanmakta ve polilaktik asitten (PLA) 3-D yazıcı tarafından üç farklı uzunluk basılmaktadır. Ayrıca, literatürde grafit ve SiO₂ ile ilgili birçok çalışma vardır, ancak bu çalışma, deneysel olarak ısı transferi ve basınç düşüşünü etkilerini göstermek için hibrit formlarıyla ilgili sonuçlara odaklanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma yazarların hibrit nano akışkanların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi konusundaki önceki çalışmaları üzerinde bir süreklilik olarak düşünülmelidir. Ek olarak, iki farklı hacim konsantrasyonu Grafit-SiO₂ / Su hibrit nano akışkanın bir işletim sıvısı olarak değerlendirilir (Silisyum dioksit %60, Grafit %40). Kombine etkileri türbülanslı akış koşulu altında ısı transferi ve basınç düşmesi karakteristiği üzerinde bahsedilen faktörler deneysel olarak incelenmiştir. Isı transfer katsayısı, Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve Reynolds sayısı ile basınç düşmesi, çeşitli hacim konsantrasyonlarına göre kütle akış hızı ve burulmuş şerit uzunlukları gibi çeşitli önemli parametrelerin değişimi araştırılmış ve çıktıların mevcut gözlemlerle uyumlu olduğu bulunmuştur. Son olarak, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörleri için regresyon denklemleri ölçülen veriler kullanılarak elde edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde gelişen teknoloji ile yeni teknolojinin de karmaşıklığı artmaktadır. Özellikle endüstride ve enerji sektörlerinde bu karmaşıklık ve daha yüksek performans beklentisi daha çok soğutma veya ısıtma yükü oluşturmaktadır. Aynı zamanda bu ısıtma ve soğutma yüklerini sağlayabilmek için enerji harcanmakta ve günümüzde enerji veriminin öneminin artmasıyla birlikte pasif ısı transferi artırma yöntemleri gün geçtikçe popüleritesini arttırmaktadır. Nano akışkanlar ve burulmuş şeritler (turbülatörler) en bilindik pasif ısı transferi artırma yöntemlerinden ikisidir. Hali hazırda güneş enerjisinden ısıtma da yararlanma tekniklerinde nano

akışkanlar sıklıkla kullanılmaktadır. Buna ek olarak türbülator yardımıyla akışkana verilen türbülasyon sayesinde ısı transferi arttırılabilmektedir.

Nano akışkanlar, ana bir akışkanın genelde saf su, alkol, yağ vb. içerisine belirli yüzdelerde nano partikül eklenerek oluşturulan akışkanlardır. Partikül tek bir çeşit olabileceği gibi farklı partiküllerin belirli oranlarda birleştirilerek hibrit şeklinde de kullanılabilmektedir. Nano partiküller ana sıvının termal iletkenliğini arttırır bu sayede ısı transferinde iyileşme gerçekleşmiş olur.

Burulmuş şeritler günümüzde birçok farklı geometri ve yapıya sahip çalışmalar mevcuttur. Farklı parametrelere sahip olan burulmuş şeritler genel olarak akıştaki türbülasyon miktarını arttırarak ısı transferine olumlu ama bunun yanında basınç düşümüne olumsuz etkisi sebebiyle parametreleri üzerinde çalışma gerektiren bir konudur.

Bu tezin amacı sistemdeki pasif ısı transferi artışı sağlayarak hem ısı değiştiricilerin boyutlarında küçültülmesini sağlayabilme hem de aynı enerji ile daha fazla ısıtma yükü alabilmeyi hedeflemiştir. Ayrıca literatürde daha önce deneysel olarak incelemesi zor olan bir burulmuş şerit geometrisini gelişen 3D teknolojisi sayesinde PLA maddesinde üreterek deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sayede burulmuş şerit çalışmalarına yeni bir boyut kazandırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Tek fazlı akışlarda nano akışkanların ve burulmuş şeritlerin ısı transferi ve basınç düşümüne etkisi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Konuya farklı bir bakış açısı kazandırmak adına daha önce termal özellikleri aynı laboratuvar ortamında Dalkılıç ve diğ. [22] tarafından bulunan Grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkanı kullanılarak ve dört kanallı burulmuş şeritler 3D printerden PLA maddesi kullanılarak üretilerek literatürdeki çalışmalara ek olarak nano akışkan ve burulmuş şerit çalışmalarına farklı bir bakış açısı kazandırılmıştır.

Bu çalışma, gelişen 3D teknolojisi ve farklı malzemelerden üretililecek hibrit nano akışkanlar sayesinde ümit ederim ki ileride bu konularda çalışma gerçekleştirecek araştırmacılar için önemli bir kaynak olacaktır.

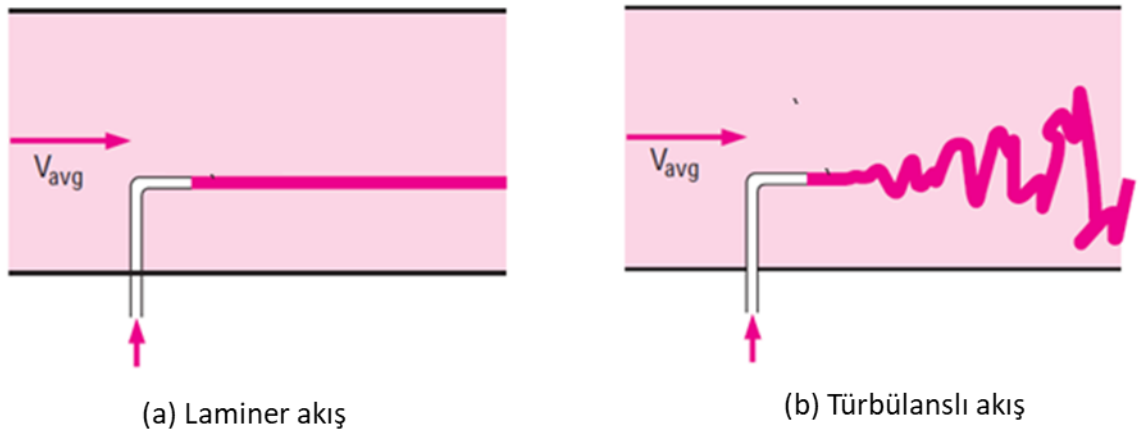
Ek olarak Dalkılıç ve diğ. [22] çalışmasında kullanılan nano akışkan bu çalışmada kullanılmıştır, bu sebeple gerçekleştirilen çalışmanın devamı niteliğinde kabul edilebilir.

2.1 Tek Fazlı Akışlar

Fizikten bir maddenin 3 ana aşamada bulunur: katı, sıvı ve gaz. (Çok yüksek sıcaklıklarda plazma olarak da bulunur.) Sıvı veya gaz fazındaki bir maddeye akışkan denir. Bu iki fazdaki maddelerin bir noktadan bir noktaya gitmesine akış denir.

Tek fazlı akışlar su, hava, buhar gibi tek bir fazın akışı üzerine yoğunlaştığı bir akıştır. Sıvı akışında bazı önemli yerlerde eşzamanlı sıvı ve gaz akışı meydana geldiğinde, problem iki fazlı (çoklu akış) akışa evirilmektedir. Kısacası tek fazlı akışlar akışı tek bir fazda tamamlarken iki fazlı akışlarda ise akışkan hem sıvı hem de gaz olarak akışını tamamlamaktadır.

Tek fazlı akışlar genelde bir boru içerisindeki akış üzerinde incelenmektedir. Düz borularda ki akış ise genel anlamda ikiye ayırabiliriz: Düz (laminer) ve türbülanslı akış. Şekil 2.1.'de iki akışın farklılığı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Laminer ve türbülanslı akış gösterimi [23]

2.2 Tek Fazlı Akışlarda Isı Transferi

Isı, sistem içerisindeki farklı kısımlar arasında veya bir sistemden başka bir sisteme aktarılır enerji olarak tanımlanmaktadır. Isı transferi ise ele alınan bir kontrol hacminde ya da bir sistemde meydana gelen ısı değişimleri (ısı girişi veya çıkışı) ile ilgilenmektedir.

Isı transferinin gerçekleşmesini sağlayan başlangıç koşul sistemler veya kontrol hacminde sıcaklık farkının oluşmasıdır. Doğal ısı transferi sistemler arasındaki sıcaklık farkı eşitleninceye kadar ısı transferi devam etmektedir ve ısı yüksek sıcaklıktaki sistemden düşük sıcaklıktaki sisteme doğru hareket etmektedir. Yani bir sistemden ısı çıkışına karşılık diğer sisteme ısı girişi bulunmaktadır. Isı transferini 3 farklı yöntem ile gerçekleştirmektedir: İletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıyım (radyasyon).

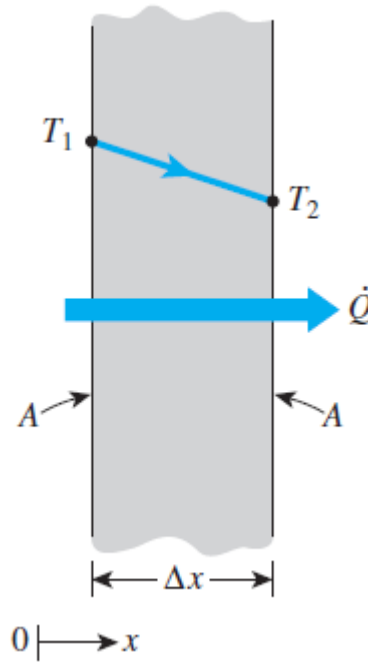
2.2.1 İletim ile Isı Transferi

İletim, farklı sıcaklıklardaki iki nesne birbiriyle temas ettiğinde meydana gelir. Isı, her ikisi de aynı sıcaklıkta olana kadar ısıtıcıdan soğutucuya akar. İletim, bir maddenin içinden moleküllerin çarpışmasıyla ısının hareketidir. İki nesnenin temas ettiği yerde, daha sıcak nesnenin daha hızlı hareket eden molekülleri, daha serin nesnenin daha yavaş hareket eden molekülleriyle çarpışır. Çarpıştıkça, daha hızlı moleküller enerjilerinin bir kısmını daha yavaş moleküllere bırakırlar. Daha yavaş moleküller daha fazla termal enerji kazanır ve daha soğuk nesnede diğer moleküller ile çarpışır. Bu işlem, daha sıcak nesneden gelen ısı enerjisi, soğutucu nesne boyunca yayılınca kadar devam eder. Bazı maddeler ısıyı diğerlerinden daha kolay iletir. Katılar sıvılardan daha iyi iletkenlerdir ve sıvılar gazlardan daha iyi iletkenlerdir. Metaller çok iyi ısı iletkenleridir, hava ise çok zayıf ısı iletkenidir. Cildinizden daha sıcak veya daha soğuk bir şeye dokunduğunuzda iletim yoluyla ısı transferini yaşarsınız; Ellerinizi ılık veya soğuk suda yıkadığınızda.

Sonsuz düz duvardaki iletim ile olan ısı transferini Şekil 2.2'de görebilirsiniz. Ayrıca meydana gelen ısı transferi denklem (2.1) ile gösterilmiştir.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Bu denklem, iletimle ısı transferi tanımı bulan bilim adamı J.B. Fourier'den ismini alan 'Fourier Isı İletim Kanunu' olarak tanınmaktadır. q_x'' , x yönündeki saniyedeki birim alandan olan ısı transferini belirtmektedir. $\frac{dT}{dx}$, ise x yönündeki sıcaklık gradyanını belirtmektedir. Denklemdeki k ise malzemenin ısıl iletkenlik katsayısıdır ve ısı transfer olan yüzeyin malzemesine, sıcaklığına ve kimyasal yapısına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.2 Sonsuz uzunluktaki duvarda ısı iletimi [23]

2.2.2 Taşınım ile Isı Transferi

Sıvılarda ve gazlarda konveksiyon genellikle ısıyı transfer etmenin en etkili yoludur. Konveksiyon, bir sıvının veya gazın daha sıcak alanları, sıvı veya gazdaki daha soğuk alanlara yükseldiğinde meydana gelir. Bu olduğunda, daha yüksek olan daha sıcak alanların yerini daha soğuk sıvı veya gaz alır. Bu döngü sürekli bir sirkülasyon modeliyle sonuçlanır ve ısı daha serin alanlara aktarılır. Bir tavada suyu kaynattığınızda konveksiyon görürsünüz. Yükselen su kabarcıkları, suyun tavanın üst kısmındaki daha serin su alanına yükselen sıcak kısımlarıdır. Muhtemelen "Sıcak hava yükselir ve soğuk hava yerini almak için düşer" ifadesini

duymuşsunuzdur bu atmosferdeki konveksiyonun bir açıklamasıdır. Isı enerjisi havanın dolaşımı ile aktarılır.

Taşınım ile ısı transferi ikiye ayrılmaktadır: Doğal ve zorlanmış taşınım ile ısı transferi. Doğal taşınımda akışkana dışarıdan bir kuvvet (fan, pompa vs.) gibi bir etki olmadan bir nevi kendiliğinden meydana gelen taşınım ile ısı transferi yöntemidir. Ancak zorlanmış taşınım ise dışarıdan bir enerjinin veya kuvvetin akışkana kazandırılmasıyla oluşan ısı transferine ise zorlanmış taşınım ile ısı transferi denir. Zorlanmış taşınım ile oluşan ısı transfer hızı doğal taşınım ile oluşan ısı transfer hızına göre bir nevi daha yüksektir. Akışkana verilen güç arttıkça yani akışkana daha fazla hız kazandırdıkça aradaki fark yükselmektedir.

Taşınım ile ısı transferi miktarı şu denklem ile bulunmaktadır:

$$q'' = h(T_d - T_\infty) \quad (2.2)$$

Denklemdeki q'' , birim yüzeyden taşınım ile gerçekleşen ısıyı temsil etmektedir. T_∞ ise akışkanın sıcaklığını ve T_d , ise akışkan ile temas eden yüzeyin sıcaklığını temsil etmektedir. Denklemdeki h ısı taşınım katsayısıdır ama iletim ile ısı transferinde olduğu gibi sadece malzeme özelliklerine bağlı değildir. Taşınımdaki h ifadesi akışın hızı, şekli ve geometrisi gibi birçok parametreye bağlıdır.

Isı taşınım katsayısının belirlenmesi taşınım ile olan ısı transferi problemlerinin asıl amaçlarında birisidir. Birçok bağlantı sadece ısı taşınım katsayısının belirlenmesi için üretilmiştir. Bu bağlantıların anlaşılmasını ve daha kolay çözülmesini sağlamak için birkaç farklı boyutsuz sayılar üretilmiştir ve kullanılmaktadır. Bunlardan en temel olanı ise Nusselt sayısıdır. Her iki taşınım ile ısı transferi yöntemi olan doğal ve zorlanmış akışlar için kullanılmaktadır. Nusselt sayısı, taşınımla gerçekleşen ısı transferinin iletim ile ısı transferi miktarının oranını gösterir. Nusselt sayısının genelleşmiş formülü şu şekildedir:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (2.3)$$

Nusselt için her sisteme özel denklemler mevcuttur. Bu denklemlerdeki bağlantılar yardımı ile Nusselt sayısı belirlendikten sonra denklem (2.2) yardımı ile ısı taşınım katsayısı hesaplanabilmektedir.

Doğal ve zorlanmış taşınım için Nusselt denklemleri sırası ile şu şekildedir:

$$Nu = C Re^n \quad (2.4)$$

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (2.5)$$

Buradaki C, n ve m değerleri akışın tipine göre değişiklik gösteren katsayılardır. Bu katsayılar yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen değerler ile literatürde yerlerini almaktadır. Re, Reynolds ve Pr ise Prandtl sayılarını temsil etmektedir. Yine bu sayılar akışın özelliklerine göre değişiklik gösteren boyutsuz sayılardır.

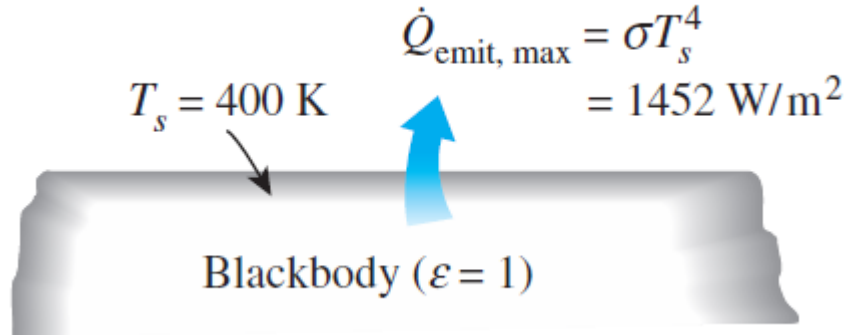
2.2.3 Işınım ile Isı Transferi

Hem iletim hem de konveksiyon, ısıнын aktarılması için madde gerektirir. Radyasyon, ısı kaynağı ile ısıtılan nesne arasında herhangi bir teması dayandırmayan bir ısı transferi yöntemidir. Örneğin, güneşe dokunmasak da güneşten gelen ısıyı hissediyoruz. Isı, boş alandan termal radyasyon ile iletilebilir. Termal radyasyon (genellikle kızılötesi radyasyon olarak adlandırılır) bir tür elektromanyetik radyasyon (veya ışık)'tır. Radyasyon, ışık hızında hareket eden elektromanyetik dalgalardan oluşan bir enerji taşıma şeklidir. Kütle değişimi yapılmaz ve ortam gerekmez.

Daha yüksek atom seviyesindeki yüksek enerjili elektronlar daha düşük enerji seviyelerine düştüğünde nesneler radyasyon yayar. Kaybolan enerji ışık veya elektromanyetik radyasyon olarak yayılır. Bir atom tarafından emilen enerji, elektronlarının daha yüksek enerji seviyelerine "atlamasına" neden olur. Tüm nesneler radyasyonu emer ve yayar. (İşte bir atomun radyasyonu nasıl emdiğini ve yaydığını gösteren bir java uygulamasıdır) Enerji emilimi, enerji emisyonunu dengelediğinde, bir nesnenin sıcaklığı sabit kalır. Enerjinin emilimi, enerji emisyonundan daha büyükse, bir nesnenin sıcaklığı artar. Enerjinin emilimi enerji emisyonundan daha azsa, bir nesnenin sıcaklığı düşer.

‘Stefan-Boltzmann Kanunu’ ile ışınlımla ısı transferi açıklanmıştır. Siyah cisim için yayma gücü şu şekilde hesaplanır:

$$E_b(T) = \sigma T^4 [W / m^2] \quad (2.6)$$



Şekil 2.3 Siyah cisim ışıması [23]

Denklemdaki σ , Stefan-Boltzmann sabitidir ve her durumda $5,670373 \times 10^{-8} [W / m^2 T^4]$ değerine eşittir. Buradaki T ise cismin yüzey sıcaklığına eşittir. Fakat bu denklem direk olarak gerçek cisimlerin ışınlım yayma miktarını ölçmek için kullanılamamaktadır. Çünkü kara cisimler ışınlımın hepsini soğurduğu kabul edilen bir malzeme gibi düşünülür. Gerçek cisimlerde ise durum bu şekilde değildir. Gerçek cisimlerin ışınlım miktarını hesaplamak için ise şu denklem kullanılmaktadır:

$$E_b(T) = \epsilon \sigma T^4 [W / m^2] \quad (2.7)$$

Denklemdaki ϵ , cismin yayıcılığını temsil etmektedir. Bu değeri cismin malzemesine, yüzey pürüzlülüğüne, yüzeydeki kirletici faktörlere ve yüzeydeki korozyon miktarına gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmekte ve 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Diğer ısı transferi yöntemlerinde olduğu gibi ışınlım ile ısı transferinin temel mantığı cisimler arasındaki sıcaklık farkıdır. Işınlım ile ısı transferi hesaplaması şu şekilde yapılabilir:

$$q''_{rad} = \epsilon \sigma (T_{cy}^4 - T_{çevre}^4) \quad (2.8)$$

Denklemdaki T_{cy} , cismin yüzey sıcaklığını ve $T_{\text{çevre}}$ ise çevre sıcaklığını göstermektedir. [23]

2.3 Isı Transferi İyileştirme Yöntemleri

Isı transferinin iyileştirilmesi sistem genelinde daha az enerji ile daha çok ısı transferi yapılabilmesi imkanı sağlamaktadır. Bu sebeple endüstrilerde ısı transferinin iyileştirilmesi sistemlerin işeyişindeki maliyetleri azaltacağı için büyük önem arz etmektedir. Endüstrilerde kullanılan sistemleri devasa olduğu ve gerekli ısı transferinin elde edilmesi için çok fazla enerji harcadığı düşünüldüğünde ısı transferi iyileştirmeleri hem ülkemize ekonomik fayda sağlamasının yanında dünyadaki artan kirliliğinde önlenmesi açısından da büyük öneme sahiptir.

Isı değiştiricilerde veya ısıнын transfer edildiği sistemlerde ısı transfer katsayısının arttırılması esas amaçlardandır. Isı transferindeki iyileştirmeler bazen sadece enerji tasarrufu sağlarken bazen de boyut açısından küçültölme gibi ihtiyaçları karşılamaktadır. Tabi ki hangi amaçla olursa olsun çevreye olan zararlı gazların salınımı azaltması sebebi ile ısı transferi iyileştirmelerinin faydaları tartışılmaz kılmaktadır.

En temel ısı transferi arttırma yöntemlerinden birisi etkileşim yüzey alanının arttırılmasıdır. Isı transferini iyileştirmenin faydalarının çok fazla olması ve sistem tasarımını doğrudan etkilemesi sebebi ile iyileştirme oranı adında “E” bir oran gelişmiştir. Bu sayede sistemdeki iyileşme oranını karşılaştırabilme imkanı doğmuştur. Bu oran kısaca yüzeyin arttırılmış alanı ile sade durumdaki alanına oranı olarak da bilinmektedir.

$$Q_{\text{toplamsı}} = hA(T_{wi} - T_{nf}) = (hA)_s (T_{wi} - T_{nf}) \quad (2.9)$$

$$E = \frac{hA}{(hA)_s} \quad (2.10)$$

İyileştirme oranı E sayısının arttırılması için uygulanan bazı yöntemler şu şekildedir:

- Isı transfer katsayısını arttırmak,
- Yüzey alanını arttırmak,

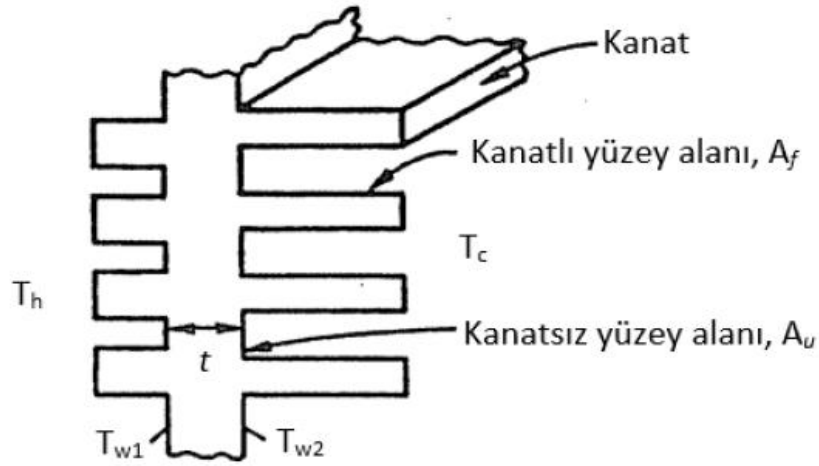
- Isı transfer katsayısı ve yüzey alanını birlikte arttırmak.

Öncelikle yüzey alanını arttırma yöntemi üzerinde durmamız gerekirse, sabit bir ısı transfer katsayısı ile gerçekleşen bir sistemde kanatlı bir yapıya geçerse toplam ısı transferi ve sistemin toplam verimi şu denklemler yardımı ile bulunabilir:

$$Q_{\text{toplamısıtransferi}} = \eta_{\text{yeni}} h A \Delta T \quad (2.11)$$

$$\eta_{\text{yeni}} = \left[1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \right] \quad (2.12)$$

Denklemdaki η_{yeni} kanat verimini, ΔT yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı ve A ise toplam ısı transfer yüzey alanını temsil etmektedir.

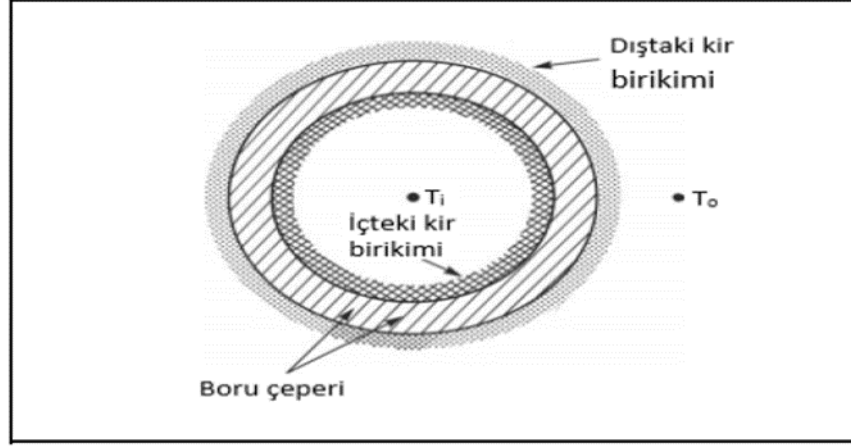


Şekil 2.4 Kanatlı yüzey gösterimi [24]

Isı transferi iyileştirme yöntemlerini olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden birisi kirlenmedir. (Nano akışkanlar bölümünde de bu konu üzerinde ayrıca durulacaktır.) Kirlenme ısıl direnci arttırmaktadır bu sebeple ısı transferinde azalma meydana gelmektedir. Bundan dolayı ısı değiştiricisi veya ısı transfer sistemi tasarımı sırasında kirlenme faktörü göz önüne alınmalı ve sistem tasarımları bu faktör göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Bir ısı transfer sisteminde ısıl direnç arttıkça ısı transferinde azalma meydana gelecektir. Isıl direnç değerinde düşüş sağlanması durumunda ısı transferi sisteminde yapılabilecek bazı tasarımsal değişiklikler şu şekilde sıralanabilir.

- Isı transfer alanı ve akışkan giriş sıcaklık değeri sabitken ısı transferi miktarında artış,
- Toplam ısı yük ve toplam ısı transferi alanında değişiklik olmadan akışkanın çıkış sıcaklığının düşürülmesi,
- Sabit ısı yük, ısı transferi alanı ve akışkan sıcaklıkları sabitken pompa gücünün azaltılması.



Şekil 2.5 Borulardaki kirlenme gösterimi [24]

Ayrıca kontrol hacminin her iki yönü de dikkate alındığında ısı transferi için ısı direnç şu şekilde yazılabilir:

$$R_{\text{ısı direnç}} = \frac{1}{UA} = \frac{1}{\eta_i h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{\eta_i A_i} + R_w + \frac{1}{\eta_o h_o A_o} + \frac{R_{fo}}{\eta_o A_o} \quad (2.13)$$

Isı transfer sistemleri için dikkate alınması gerek bir diğer parametre ise hidrolik performanstır. Isı transferi iyileştirme çalışmalarında tasarımın hidrolik performansı olumsuz anlamda etkilememesine ayrıca dikkat edilmesi gerekmektedir. Basınç düşümü arttıkça sisteme verilen güç (sıvılar için pompalama gazlar için fan) artmakta bu da sistemin performansını düşürmektedir. Buda ayrıca hidrolik performansı olumsuz etkileyecektir. Tek fazlı akışlarda en genel haliyle pompalama yani hidrolik gücü denklem (2.14) şeklinde yazabiliriz:

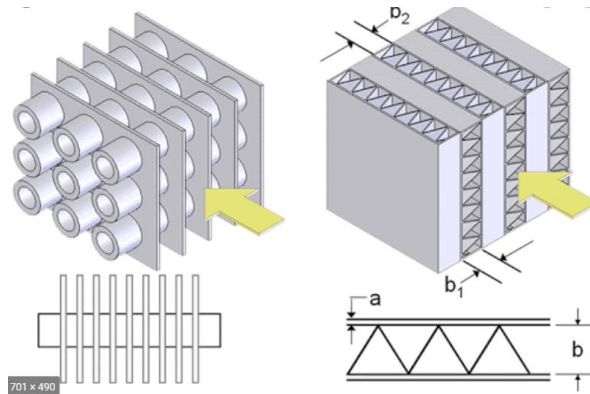
$$H_p = \frac{\dot{m} \Delta P}{\eta_p \rho} \quad (2.14)$$

Isı transferi iyileştirme çalışmaları günümüzde hızını kesmeden devam etmektedir. İyileştirme yöntemleri en genel hali ile pasif ve aktif yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır.

2.3.1 Pasif Yöntemler

Isı transferinin ek enerji kullanmadan arttırılmasında kullanılan yöntemler pasif yöntemler olarak tanımlanır. Literatürde yüzlerce farklı pasif ısı transferi iyileştirme yöntemleri bulunmakla birlikte bu kısımda bazı popüler yöntemler üzerinde durulacaktır. Ayrıca bu tezde kullanılan iki yöntem: Nano akışkan ve burulmuş şerit üzerine detaylı araştırma yapılmıştır. En çok kullanılan yöntemleri şu şekilde sıralayabiliriz.

- Yüzey alanı arttırma, en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Akışkanın temas ettiği yüzey genelde sınırlı bir alana sahiptir. Kanat kullanımı gibi yüzey alanını arttıracak yüzey tasarımları sayesinde ısı transfer alanı dolayısıyla ısı transferinde iyileşme meydana gelmektedir.

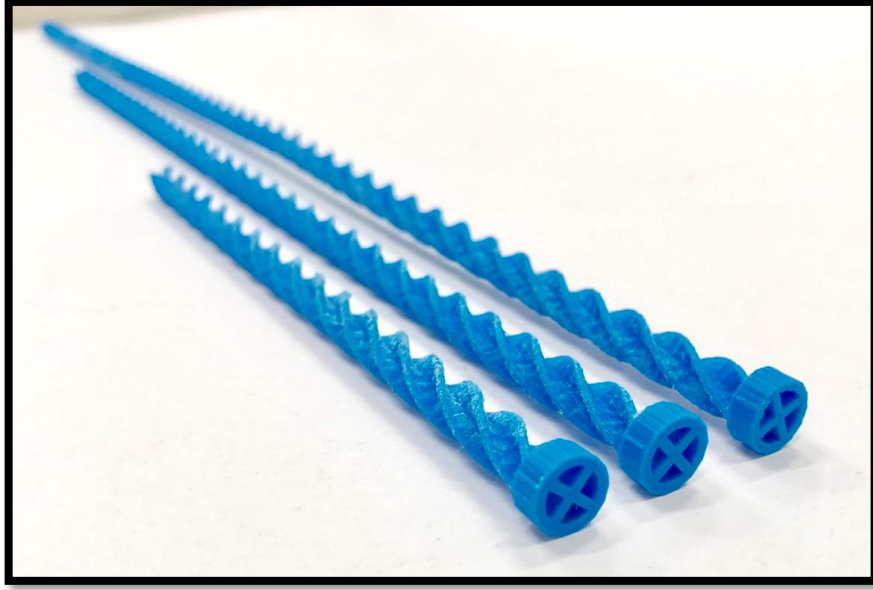


Şekil 2.6 Basit yüzey alanı arttırma yöntemleri gösterimi [24]

Yüzeyin pürüzlü hale getirilmesi, bu yöntemdeki amaç ısı transfer yüzey alanını arttırmaktan daha çok tek fazlı akıştaki yüzeye yakın bölgelerdeki akışın kararsızlaşmasını sağlayarak ısı transferinin artmasını sağlamaktadır.

- Türbülator kullanımı, bu yöntemde ise akışın türbülasyon miktarı arttırılarak ısı transferi yüzeyine değen akışkan moleküllerin yerini değiştirerek bir nevi ısı transferi olacak moleküllerin yer değiştirmesi sağlanır ve bu sayede ısı transferi artmaktadır.

- Yüzey gerilim oluşturma, bu ısı transferi artırma yönteminde ise yardımcı cihazlar yardımı ile yüzey gerilim oluşturarak meydana gelir. Oluşan ısı taşınım katsayısı oluşturulan film kalınlığı ile ters orantılıdır.
- Burulmuş şeritler, burulmuş şeritler genelde borulara akışkanın girdiği kısma eklenerek akışkanın boru girişinde türbülasyon miktarını arttırırlar ve bu sayede ısı transferinde iyileşme meydana gelir. Birçok parametreye sahiptirler.



Şekil 2.7 Burulmuş şerit (PLA maddesinde üretilmiştir)

- Akışkanlara eklenen katkı maddeleri, bu yöntemde ise temel amaç akışkanın ısı transferi özelliklerini iyileştirerek sistemde enerji sarfiyatına sebep olmadan ısı transferinde iyileşme sağlanmasıdır. En yaygın kullanılanlar nano partiküllerin saf su gibi ana akışkana eklenerek ana akışkanın ısı iletkenliğinin arttırılması yöntemi literatürde sıklıkla çalışılan konulardan birisidir.

Bu tez çalışmasında nano akışkanlar ve burulmuş şeritli yapılar üzerine çalışıldığı için bu iki konu daha detaylı olarak incelenmiştir.

2.3.1.1 Nano Akışkanlar

Nano teknolojiler ve nano parçacıklar günümüzde çok yüksek bir popüleriteye sahip olmakla birlikte birçok araştırmaya da konu olmaktadır. Birçok teknoloji alanında nano parçacık veya nano malzemelerin kullanılmaya başlandığını görebiliriz.

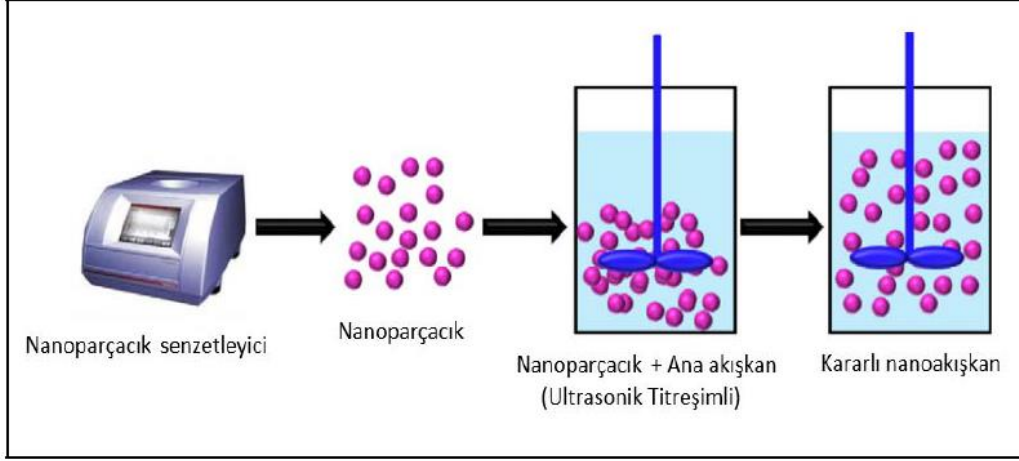
Isı transferi gün geçtikçe özellikle endüstrilerdeki ihtiyaçların artmasıyla önem kazanmaktadır. Durum bu şekilde olunca nano teknolojinin ısı transferi üzerine araştırmaların başlaması kaçınılmaz bir hal almıştır. Önceki konularda da bahsedildiği gibi ısı iletkenlik ısı transferini etkileyen ve sınırlayan en önemli parametre konumundadır. Bu sebeple akışkanların ısı iletkenliğini arttırmak için uzun yıllardır akışkanlara mikro ve nano ölçülerde parçacıklar eklenerek, akışkanların ısı iletkenliği artırma çalışmaları gerçekleşmiş ve günümüzde halen bu çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir. Ancak nano parçacıklarında bazı olumsuz ve zorlu yanları bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi çökelme gibi durumların ısı transferine olan negatif etkileridir. Bu durumu ortadan kaldırmak için malzeme teknolojisi daha küçük mertebelerde parçacıklar üretmeye odaklanmıştır.

2.3.1.2 Nano Akışkanların Elde Edilmesi Yöntemleri

Çok çeşitli nano akışkanların bulunması sebebi ile birbirinden farklı nano akışkan üretim teknikleri oluşmuştur. Nano akışkanların üretim tekniklerini üç ana grupta inceleyebiliriz.

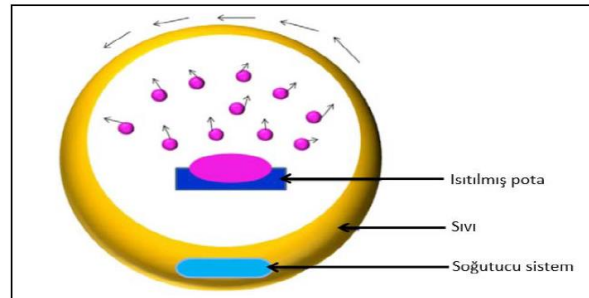
İki adım yöntemi, nano akışkan üretiminde kullanılan en genel yöntem olarak bilinir. Nano parçacıklar bazı fiziksel ve kimyasal işlemler sonrasında toz haline getirilir. Daha sonra elde edilen bu nano parçacık tozları ana akışkan (genelde saf su, yağ vb.) içerisine enjekte edilir. Yüzey alanı boyutlarının büyüklüğü ve yüzey hareketliliği sebebi ile nano parçacıklar ana sıvı içerisinde birbirine yapışma (bir bölgede toplanma) eğilimleri sebebi ile bazı kullanılan maddeler yardımı ile nano parçacıkların taneler halinde ana sıvı içerisinde eşit dağılıma sahip olması sağlanabilmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklar bu malzemelerin kullanılmasına engel oluşturabilmektedir ve bu sebeple başka üretim metotları da geliştirilmiştir. Olumsuz yanlarına rağmen toz halinde nano parçacık üretiminin maliyetinin diğer yöntemlere göre uygun olması sebebi ile araştırmalarda kullanımı daha yaygındır.

Diğer bir nano akışkan elde etme yöntemi ise tek adım yöntemidir. Tek adım yönteminin temel mantığı tek seferde daha kararlı bir nano akışkanın elde edilmesi sağlanır.



Şekil 2.8 Nano akışkan elde edilme yöntemi basit gösterimi [35]

Bu yöntemde iki adım yönteminde olduğu önce nano parçacık sonra karışım elde edilme yöntemi yerine, tek seferde nano akışkan sıvısı elde edilmektedir. Sıvı kimyasal metotla veya buhar biriktirme teknikleri ile nano parçacıklar üretilmektedir. Bu yöntem ile hem çökelme hem de nano parçacıkların belirli bir bölgede toparlanması oldukça azalmaktadır. Ancak endüstride çok küçük boyutlardaki nano parçacıkların daha çok kullanılması sebebi ve bu yöntemde gerekli boyutlarda parçacık üretimi zorluğu ve maliyeti sebebi ile günümüzde çok tercih edilen bir yöntem değildir.



Şekil 2.9 Tek adım yöntemi [35]

Bu iki yöntem dışındaki yöntemi ise şu şekilde özetleyebiliriz. Ultrasonik ve mikrodalga ışınlamalar yardımı ile öncü madde dönüştürme yöntemi bu iki yöntem dışında çok seyrek kullanılan yöntemlere örnek teşkil etmektedir.

2.3.1.3 Nano Akışkan Türleri

Nano akışkanların sınıflandırılması akışkanın içerdiği nano partiküle göre yapılmaktadır. Nano partiküller çeşitli malzemelerden elde edilebildiği gibi laboratuvar ortamında da hazırlanabilmektedir. Nano akışkan türlerini şu şekilde özetleyebiliriz.

Saf metalik nano akışkanlar, saf metalik nano parçacıkların kullanıldığı bu nano akışkanlar literatürde sayılı sayıda çalışmada kullanılmıştır. Ancak ısı iletkenliğini arttırması özelliği sebebi ile üzerinde çalışmalar gerçekleştirilebilecek bir akışkandır.

Seramik bazlı nano akışkanlar, üretim açısından kolay olması ve kimyasal özellikleri nedeniyle kararlılık açısından uygun olan seramik partiküllerin kullanıldığı nano akışkanlardır. Kendi içerisinde oksitli, oksitsiz ve her iki türünde bir arada kullanıldığı oksitsiz-oksitli alt türleri bulunmaktadır.

Karbon bazlı nano akışkanlar ise neredeyse bakır elementinin (doğadaki en yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerden birisidir) yaklaşık 10 katı kadar ısı iletkenliğine sahip olabilen nano parçacıklardan oluşan nano akışkanlardır. Çok yüksek ısı iletkenliğinin yanında metallere göre düşük yoğunluğu sebebi ile endüstriyel çalışmalarda sıklıkla kullanılan nano akışkan türüdür. Nano tüpler olarak bilinen türleri ise arka arkaya birleşerek bir zincir yapı oluşturması sebebiyle farklı çalışmalarda kullanılan bir karbon nano partiküllerdir, kimi zaman akışkan içerisindeki oluşturdıkları uzunluklar dünyayı birkaç kere saracak uzunluğa erişebilmektedir. Akışkanın ısı iletkenliğini yükseltmesinin yanında partiküller arası etkileşimin fazla olması sebebi ile çökelme ya da akışkanın bir noktasında toplanma gibi problemleri bulunmaktadır. Maliyet açısından pahalı partiküller sınıfındadır.

Alaşım bazlı nano akışkanlar, metaller arasındaki alaşım oluşturması temel mantığı ile kullanılan nano akışkan türleridir. Bu nano akışkan türü kullanım açısından yapılacak uygulamaya göre ısı iletkenliği ayarlanabilmesi sebebiyle farklı parametrelerde çalışmalara olanak sağlamaktadır.

2.3.1.4 Nano Akışkanların Olumsuz Yanları

Nano akışkanlar üzerine sayısız çalışma gerçekleştirilmiştir. Ancak günümüzde halen nano akışkanların avantaj ve dezavantajları tartışılmaya devam etmektedir. Nano akışkanlar üzerine özellikle deneysel çalışma gerçekleştirirken dikkat edilmesi gereken önemli noktalar şu şekilde sıralanabilir.

Nano parçacıkların boyutları ve şekilleri, ana akışkana katılacak nano partikülün termal özellikleri ne kadar iyi olsa bile partikül boyutunun, sistemin parametrelerine de bağlı olmakla birlikte, ısı transferi açısından büyük öneme sahiptir. Partikül boyutu arttıkça çökme ihtimali arttığı için ısı transferini olumlu etkilemektense olumsuz yönde etki oluşturabileceği dikkate alınmalıdır. Nano akışkan şeklini seçerken de aynı noktalara dikkat etmek gerekmektedir. Şekil ile sistem arasındaki bağlantılar iyi analiz edilmeli ve nano partikül boyutu sisteme göre seçilmelidir.

Partikül derişimi, ana sıvıya katılan nano partiküller belirli bir oranda katılmaktadır. Matematiksel olarak partikül derişimi arttıkça ısı iletim katsayısı doğrusal olarak artmaktadır ancak burada yine çökme ihtimali sebebiyle bir üst limit değeri gelmektedir. Yapılan birçok çalışmada nano partikül derişim oranının çok arttırılması ısı transferini olumsuz etkilediği görülmüştür. Sadece çökme sebebi ile değil ısı transfer yüzeyini kirletme oranı arttığı için bir nevi izolasyona sebebiyet vermektedir.

Nano akışkan kararlılığı, nano akışkanlar için en temel sorunlardan birisi olan çökme durumunun en önemli parametresi kararlılıktır. Nano parçacıkları üretim sırasında oluşan parçacıklar arasındaki Van Der Waals etkileşimi sebebiyle parçacıkların belirli bir noktada toplanması ve çökme meydana gelmesinin en temel sebebi olarak ortaya çıkmaktadır. Çökme durumunu azaltmak için bazı yöntemler kullanılmaktadır:

- Nano parçacıkların pH değerini sisteme göre ayarlamak,
- Parçacık yüzeylerini kimyasallar yardımı ile düzenlemek,
- Bu çalışmada da kullanılan ve en basit yöntem olan ultrasonik titreşim yöntemi çökme miktarını azaltmak için kullanılan yöntemlerdir.

Nano partiküllerin molekül yapısının bozulması, nano partiküller uzun süreler sıcak veya soğuğa maruz kaldığında termal özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Bu da sistemlerin tasarımında sıkıntılar yaratmaktadır. Ayrıca sürekli bakım ve yeni taze partiküllerin sisteme entegre edilmesi kaynaklı maliyete sorunları ortaya çıkmaktadır.

Nano akışkanların insan sağlığı ve çevreye olan zararları, nano partiküller çok küçük boyutlarda oldukları için deneysel çalışmalar sırasında dikkat edilmemesi sonucunda çevredeki kişilerin partikülleri yutması içten bile olmayacaktır. Ayrıca hem üretimi sırasında hem de partiküllerin doğaya karışma ihtimali sebebiyle çevrede olumsuz olarak etkilenmektedir.

Maliyet, gün geçtikçe daha küçük boyutlarda ve farklı geometrilerde nano akışkanlar üzerinde çalışılma isteği üretim zorlukları sebebiyle maliyetleri arttırmaktadır. Bu sebeple endüstriyel sistemler dışında ufak çaplı sistemlerde kullanıldığında kar maliyet analizlerinde genelde olumsuz sonuçlar alınmaktadır.

2.3.1.5 Nano akışkanların Kullanım Alanları

Pasif ısı transferi iyileştirmesine olanak sağladığı için ısı transferi ihtiyacını olduğu proseslerde kullanım alanları oldukça yaygındır. Ancak büyük sistemlere olan büyük katkıları sebebiyle daha çok büyük sistemlerde kullanılmaktadır. Klima buzdolabı gibi ev tipi ve endüstriyel sistemlere göre oldukça küçük ısı yükleri için kullanımları kar maliyet açısından çok uygun değildir. Nano akışkanların bazı kullanım alanları şu şekildedir:

Güneş enerjisinde ısıtmada yararlanma sistemlerinde oldukça revaçta olan bir uygulamadır. Endüstriyel soğutma, nükleer sistemler, bina soğutmalarında, binaların ısıtma sistemlerinde kullanım alanları mevcuttur.

Elektronik soğutma sistemlerinde de mikro boyutlarda oldukları için kullanımlarını mümkün kılar ve güncel çalışmalar mevcuttur.

Enerji depolama sistemlerinde özellikle termal depolama uygulamalarında ve bu sisteme entegre ısıtma soğutma akışkanlarında kullanımları mevcuttur. Ayrıca batarya sistemlerinin soğutma kısımlarında uygulamalar ve büyük çalışmalar halen devam etmektedir.

Mekanik uygulamalarda ise frenlemede sürtünme azaltılması gibi farklı konularda kullanımı mevcuttur.

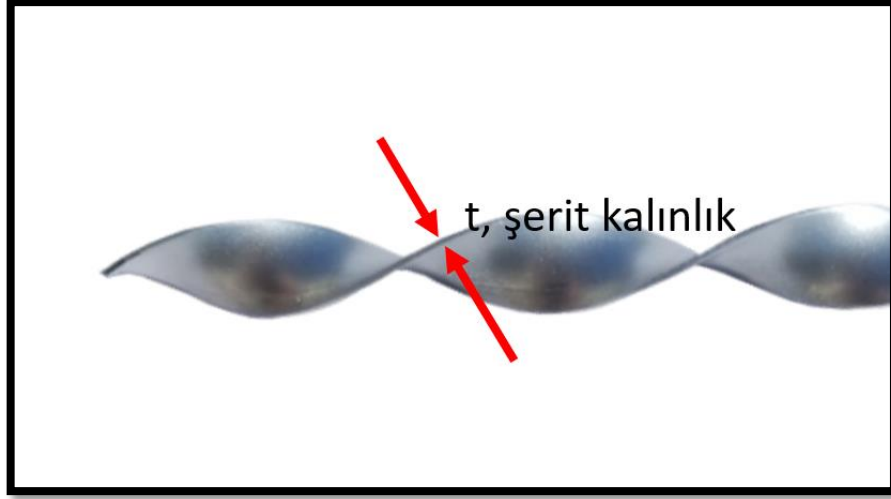
2.3.1.6 Burulmuş Şerit (Türbülator)

Burulmuş şerit yapıları pasif ısı transferi artışı sağlaması sebebi ile endüstriyel uygulamalarda, soğutma sistemlerinde, havalandırma sistemlerinde ısı değiştiricilerde, kimyasal reaksiyonlar gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Isı değiştiriciler günümüzde çok yaygın olarak kullanıldıkları önceki bölümlerde bahsedildi. Yine burulmuş şeritler yardımı ile ısı değiştiricilerin ısı transferi iyileştirme çalışmaları yapılabilmekte ve bu çalışmaları pasif ısı transferi artışı ile yapmaktadır. Bunun anlamı ek olarak hiçbir enerji ihtiyacı duymadan ısı değiştiricinin daha fazla ısıyı transfer etmesi sağlanmaktadır. Ancak burulmuş şeritler sisteme fazladan basınç düşümü getirdiği için ısı transferi artış ile pompalama gücü arasında bir optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bu sebeple literatürde hangi burulmuş şerit yapısının daha iyi performans sağladığına karar verememişlerdir. Her sistemin farklı parametreleri olması sebebiyle burulmuş şerit kullanımında en çok dikkat edilen noktanın ısı transferi ve basınç düşümü veya pompalama gücü arasındaki optimizasyondur. Bu sebeple burulmuş şeritler arasındaki performans farklarının daha iyi anlaşılması için farklı parametreler geliştirilmiştir.

2.3.1.7 Burulmuş Şerit Parametreleri

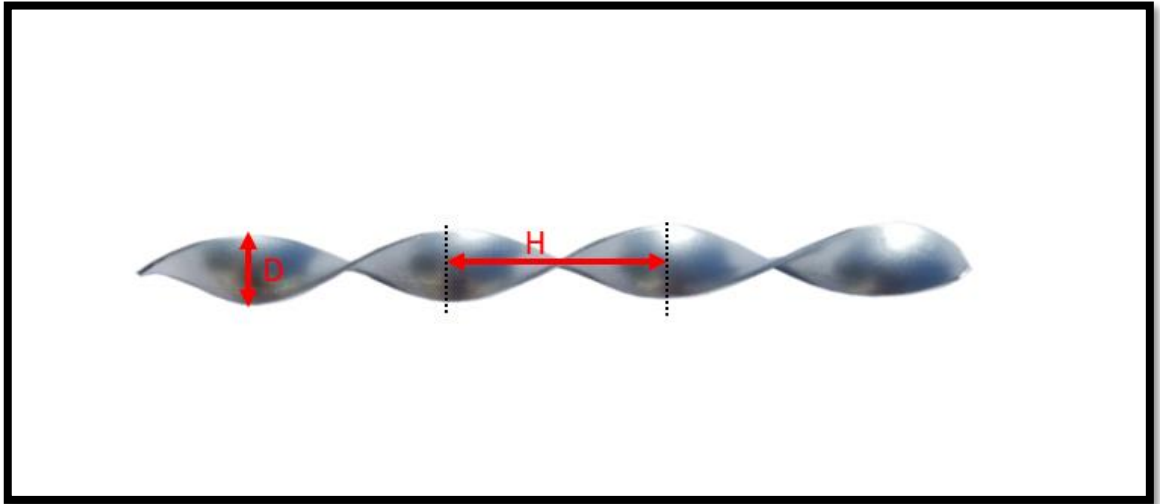
Burulmuş şerit için farklı çeşitli parametreler mevcuttur bazıları günümüzde halen üzerinde çalışılan konularda olmakla birlikte ana parametreler şu şekildedir.

- **Reynolds sayısı (Re):** Reynolds diğer akış problemlerinde olduğu gibi twisted tape ile olan çalışmalarda da önemi büyüktür burada Reynolds sayısı düz borudaki değeri göstermektedir. Bu parametre ile akışlar arasındaki farkı ortaya çıkarabiliriz.
- **Burulmuş şerit kalınlığı (t):** Şerit kalınlığı üzerinde birçok çalışma mevcuttur kalınlık arttıkça akışkanın giriş alanı azalmakta ve basınç düşüşü değerleri yükselmektedir.



Şekil 2.10 Burulmuş şerit kalınlığı gösterimi

- **Şerit adım uzunluğu (H):** Şerit adım uzunluğu her bir burulmanın 360 dereceye tamamlandığı uzunluk olarak tarif edilir. Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Burulmuş şerit adım uzunluğu ve çap gösterimi

- **Burulmuş şerit çapı (D):** Burulmuş şerit çapı çoğunlukla boru çapı ile aynı olacak veya 1 mm kadar daha küçük alınacak şekilde seçilir.
- **Burulmuş şerit oranı (y):** Burulmuş şerit oranı şerit adım uzunluğunun şerit çapına bölünmesi ile bulunur. Eşitlik (2.15)’de gösterilmiştir.

$$y = \frac{H}{D} \quad (2.15)$$

- **Şerit uzunluğu (L):** Burulmuş şerit uzunluğudur, boru uzunluğu kadar olabileceği gibi sadece giriş kısmına denk gelecek kadar uzunluğa sahip olabilir.

Yukarıda bahsedilen parametreler dışında çok farklı parametrelerde mevcuttur (saat yönünde, saatin tersi yönünde, kanal sayısı vb.), tasarımlarda yapılan yenilikler yeni parametreler ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

2.3.1.8 Kullanılan Malzeme Çeşitleri

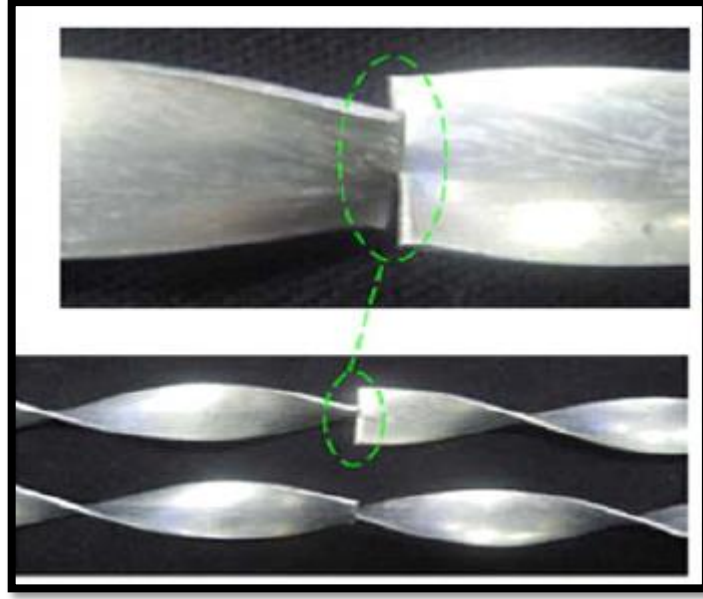
Burulmuş şeritler için kullanılan malzemeler çeşitlilik göstermektedir. Genellikle metallere üretilen burulmuş şeritler bu çalışmanın da konusu olan PLA maddesinde 3D yazıcı teknolojilerinden yararlanılarak da üretim yapılabilmektedir. Normal üretim teknolojileri ile üretilmeyecek tasarımların hem üretilmesi olanak sağlamaktadır hem de maliyete açısından çok uygun bütçelere çalışmaların gerçekleşmesi sağlanabilmektedir. Burulmuş şerit üretiminde kullanılan bazı malzemeler şu şekilde sıralanabilir.

- Alüminyum,
- Karbon alaşımlı çelik,
- Paslanmaz çelik 304, 316,
- Bakır
- Diğer paslanmaz çelik türleri,
- PLA

2.3.1.9 Burulmuş şerit çeşitleri

Çok sayıda burulmuş şerit çeşidi bulunmaktadır. Bunun en büyük sebebi çok sayıda parametreye sahip olmasıdır. Ayrıca farklı tasarım çalışmasına uygun olması da bir diğer önemli etkidir. Kısaca burulmuş şerit türlerini şu şekilde sıralayabiliriz.

- Sade tipik burulmuş şerit,
- Saat yönünde ve saatin tersi yönünde,



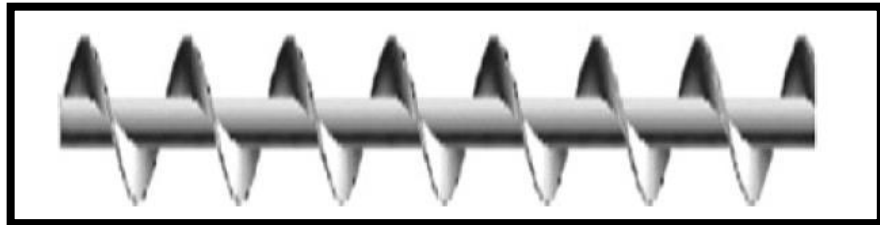
Şekil 2.12 Saat ve saatin tersi yönünde burulmuş şerit

- Orta kanatlar ve alternatif eksenler,
- Çiftli burulmuş şerit,



Şekil 2.13 Çiftli burulmuş şerit

- Helisel vida,



Şekil 2.14 Helisel vida burulmuş şerit

- Tırtıklı burulmuş şerit,

- Kare kesim burulmuş şerit,
- Tel sarmal burulmuş şerit, gibi daha birçok farklı türde burulmuş şerit türü bulunmaktadır. Günümüzde 3D teknolojisi sayesinde burulmuş şerit çeşitlerinin artması içten bile değildir.

2.3.2 Aktif Yöntemler

Isı transferi artışı için ek güç verilmesi gereken sistemler aktif ısı transferi iyileştirme uygulamaları olarak bilinir. Bazı örnek uygulamalar şu şekildedir:

- Jet akış sağlanması,
- Akışkana titreşim verilmesi,
- Yüzeye titreşim verilmesi,
- Elektrostatik alanlar oluşturarak akışın enerjisinin yani ısı transferinin artırılmasını sağlayan gibi birçok yöntem mevcuttur.

2.4 Tek Fazlı Akışlarda Basınç Düşümü

Isı transferinin incelendiği çalışmalarda bir diğer önemli nokta ise basınç düşümü değeridir. Basınç düşümü değeri sistem tasarımına doğrudan etkisi olması sebebi ile ısı değiştiricilerinde çok önemli bir konumu bulunmaktadır. İlerleyen aşamalarda daha ayrıntılı bir şekilde bu çalışmada basınç düşümünün nasıl bulunduğunu ve hesaplamaların nasıl yapıldığı hakkında bilgiler verilecektir.

Bu çalışmada farklı derişime sahip nano akışkan ve farklı uzunluktaki burulmuş şeritlerin düz bir boruda ısı transferi ve basınç düşümü deneysel olarak incelenmiştir. Bu bölümde, kullanılan deney düzeneği ve bu çalışmada kullanılan metotlardan bahsedilecektir. İlk bölüm olan deney seti kısmında deney düzeneğinde kullanılan ekipmanlar detaylı olarak incelenmiştir.

3.1 Deney Seti

Bu çalışmada da Grafit-SiO₂/su hibrit nano akışkanın kullanılmıştır. Hibrit nano akışkan içerisinde Grafit %40 ve SiO₂ %60 olacak şekilde nano partikül karışım oranıyla birlikte %0,5 ve %1,0 hacim konsantrasyonunda ve ayrıca ana akışkan olarak saf su olacak şekilde hibrit nano akışkan kullanılmıştır. Bu çalışmada Grafit SiO₂'ye göre daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Bu sebeple grafit partiküllerinin daha fazla çökmeye sebep olacağı aşık bir durumdur. Bu sebeple genel anlamda nano akışkanın yoğunluğunu düşürmek için grafit yanına SiO₂ kullanılmıştır.

Ek olarak, nano akışkan ve ana akışkan ağırlıkları hassas terazide 60 saniye boyunca akışın kap içerisinde doldurularak ölçülmüştür. Bunun yanında yeterince homojen bir karışım elde etmek için tüm deneylerden önce karışım 2 saat boyunca ultrasonik titreşim banyosunda bekletilmiştir. Çalışmada kullanılan nano partiküllerin ortalama çapı, yoğunlukları, termal iletkenliği ve özgül ısıları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Bu bölümde tamamen mafsallı rotora sahip, 4 palli, 2 ton ağırlığında olan bir helikopterin ana rotor tasarımı yapıp, maksimum uçuş yükleri altında ana rotor göbeğinin dayanımı için kurulan sonlu eleman modelleri anlatılacaktır.

Sonuçların çıkarıldığı deney setinin şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Testte kullanılan tüp 2 metre uzunluğunda, iç çapı 0,007 m, dış çapı 0,0095 m ve paslanmaz çelik 304 türünden malzemedendir yapılmıştır. Ultrasonik titreşim banyosu

hem 6 litrelik bir su tankı hem de hibrit nano akışkanın çökmesini önlemek için kullanılmıştır. Tüp üzerine sabit ısı akısı DC güç ünitesi tarafından sağlanmaktadır.

Tablo 3.1 Partikül özellikleri

	Ortalama Partikül Çapı	Yoğunluk	Termal İletkenlik	Özgül Isı
	[nm]	[kg/m ³]	[W/mK]	[J/kgK]
SiO ₂	7	2200	1.40	765
Grafit	6- 10	2620	25	720

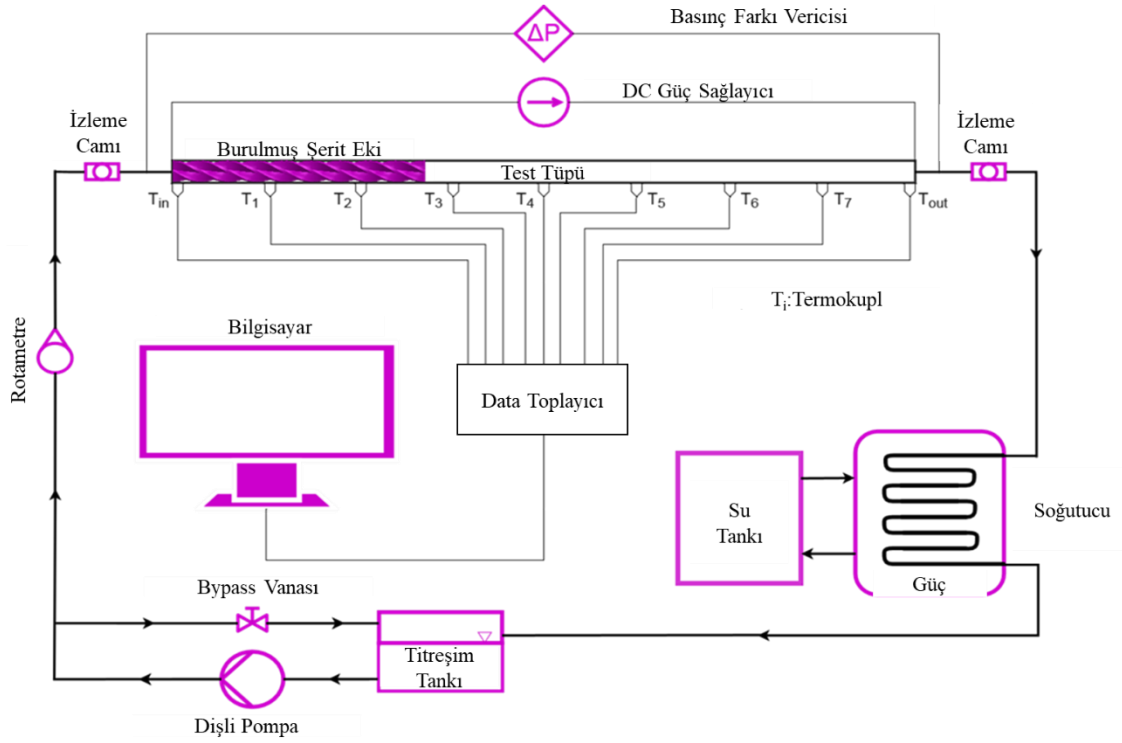
Güç kontrolü voltmetre ile kontrol edilmektedir. Chiller soğutma ünitesi sabit akışkan giriş sıcaklığı sağlamak için su tankı ve pompadan önce konumlandırılmıştır. Soğutma ünitesi sayesinde testler sabit giriş sıcaklığında yapılabilmektedir. Akışkan gücü manyetik dişli pompası ile sağlanmaktadır. Duvar sıcaklıkları 20 cm aralıklarla dizilmiş 7 T-type sıcaklık ölçer ile sağlanmıştır, ısı ölçerler tüpün dış yüzeyine yerleştirilmiştir. Akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları PT100 sıcaklık ölçerler yardımı ile ölçülmüştür. Isı kayıplarını azaltmak için cam elyaf bez ve kauçuk yalıtım malzemeleri kullanılmıştır. Akışkan debisi, ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak ölçülmüştür; her akışkan debisi için 60 saniye boyunca ölçüm yapılmıştır. Test bölümünün girişi ve çıkışı arasındaki basınç düşüşünü belirlemek için bir diferansiyel basınç vericisi kullanılmıştır.

Ölçülen veriler, kararlı rejime ulaşıldıktan sonra bir veri kaydedici kullanılarak 10 dakika süreyle kaydedilmiştir. Deneysel ekipmanlara bağlı bazı önemli parametrelerin hesaplanan belirsizlikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Bu çalışmada ve daha önce yapılmış çalışmada kullanılan bazı burulmuş şeritlerin normal üretim teknikleri ile üretim zorluğu sebebiyle bu çalışmada kullanılan dört kanallı burulmuş şeritler (QCTT) PLA maddesinden 3D yazıcılarda 14, 28 ve 42 cm uzunluklarında ve sabit burulma oranında üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Testlerde kullanılan burulmuş şeritlerin gösterimi Şekil 3.2'da gösterilmiştir. Şeritlerin geometrik özellikleri Tablo 3.3'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2 Belirsizlik parametreleri

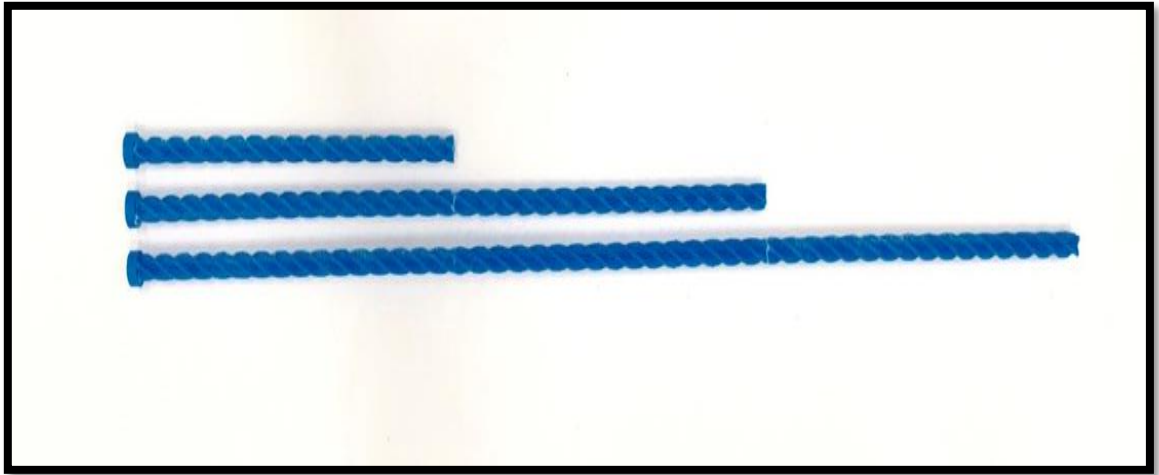
Parametreler	Belirsizlik
Sıcaklık (°C)	± 0.1
Basınç düşümü (Pa)	± 7
Kütleli debi (kg/s)	± 0.0035
Elektrik gücü (W)	± 7.1
Nusselt sayısı	$\pm 8.6\%$
Sürtünme faktörü	$\pm 0.9\%$



Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Tablo 3.3 Burulmuş şerit geometrik özellikleri

Özellikler	Değer
Kanal sayısı	4
Uzunluk QCTT (cm)	14, 28 ve 42
Kalınlık (T) (mm)	1
Burulma oranı (H/D)	5
Malzeme	PLA



Şekil 3.2 Dört kanalı burulmuş şeritlerin üstten görünümü

3.2 Deneyde Kullanılan Metotlar

Bu kısımda ise bu deneysel çalışmada kullanılan eşitlikler ve denklemler ayrıntılı olarak incelenecektir. Deneysel çalışmalarda dataların doğru bir şekilde alınması kadar o datalar ile doğru sonuçlara ulaşmakta bir o kadar önemlidir. Sırasıyla nano akışkanın termal özellikleri, ısı transfer katsayısı ve sürtünme faktörü değerlerinin nasıl bulundukları açıklanacaktır.

3.2.1 Nano Akışkanın Termal Özellikleri

Öncelikle çalışmanın en temel maddelerinden birisi olan nano akışkanın farklı hacimsel derişim ile çalışmasından dolayı hacimsel konsantrasyonun hesaplanması gerekliliğı görölmüştür. Nano akışkanın hacimsel konsantrasyonu şu şekilde hesaplanır. [22]

$$\varphi \times 100 = \left[\frac{\left(\frac{m_{np1}}{\rho_{np1}} \right) + \left(\frac{m_{np2}}{\rho_{np2}} \right)}{\left(\frac{m_{np1}}{\rho_{np1}} \right) + \left(\frac{m_{np2}}{\rho_{np2}} \right) + \left(\frac{m_{bf}}{\rho_{bf}} \right)} \right] \quad (3.1)$$

Eşitlikteki ağırlık değeri her bir partikül (SiO₂ ve Grafit) için gösterilmiştir. Yoğunluk için ise her bir partikül için olan değeri alınmıştır. Alt kısımdaki değeri ise ana akışkan yani saf suyun ağırlığını ve değeri ise saf suyun yoğunluğunu göstermektedir.

Nano akışkanın yoğunluğu ise takip eden eşitlik ile hesaplanmıştır. [22]

$$\rho_{nf} = \varphi_{np1} \rho_{np1} + \varphi_{np2} \rho_{np2} + (1 - \varphi_{np1} - \varphi_{np2}) \rho_{bf} \quad (3.2)$$

Buradaki φ_{np1} ve φ_{np2} her bir nano partikülün hacimsel konsantrasyonunu temsil etmektedir.

Nano akışkanın özgül ısısı ise şu şekilde hesaplanmaktadır [22]:

$$\rho_{nf} = \varphi_{np1} \rho_{np1} + \varphi_{np2} \rho_{np2} + (1 - \varphi_{np1} - \varphi_{np2}) \rho_{bf} \quad (3.3)$$

SiO₂-Grafit/Su nano akışkanının viskozitesi ise Dalkılıç ve diğ. [22] tarafından geliştirilen şu eşitlik yardımı ile bulunur:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1.00527 \times (T^{0.00035}) \times (1 + \varphi)^{9.36265} \times \left(\frac{m_{np1}}{m_{np2}} \right)^{-0.028935} \quad (3.4)$$

Denklemdaki T ortalama sıcaklık, φ hacimsel konsantrasyon ve m ise ağırlıktır.

Hibrit nano akışkanın ısı iletkenlik katsayısı ise literatürde bulunan eşitlik (3.5) ile hesaplanır.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0.852870218 \times (T^{0.052797513}) \times (1 + \varphi)^{6.591412917} \times \left(\frac{m_{np2}}{m_{np1}} \right)^{0.022254808} \quad (3.5)$$

3.2.2 Isı Transfer Katsayısının Hesaplanması

Bu kısımda ise ısı transfer katsayısı hesabında kullanılan eşitlikler ve denklemler üzerinde durulacaktır.

Elektrik ısıtıcısından sağlanan güç miktarı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Q_{sup} = IV \quad (3.6)$$

Eşitlikteki Q_{sup} sağlanan elektrik gücünü, I elektriksel akımı ve V ise elektrik voltajını temsil etmektedir.

Tüp giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farktan elde edilen hibrit nano akışkandan olan ısı transfer miktarı şu eşitlik yardımı ile bulunur:

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} c_{p,nf} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (3.7)$$

Eşitlikteki Q_{nf} ısı transferi miktarını, $\dot{m}_{nf}$ ise hibrit nano akışkanının kütledebisini temsil etmektedir.

Ortalama ısı transferi miktarı ise şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{ave} = \frac{Q_{sup} + Q_{nf}}{2} \quad (3.8)$$

Buradaki Q_{ave} 'in anlamı ise ısıtıcıdan ve nano akışkandan gelen ortalama ısı transferini temsil etmektedir.

Isı transfer katsayısı, Reynolds sayısı ve Nusselt sayısı sırasıyla eşitlik (3.9), (3.10) ve (3.11)'de gösterilmiştir:

$$h_{nf} = \frac{Q_{ave}}{A_{wi} (T_{wi} - T_{nf})} \quad (3.9)$$

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} D_i}{k_{nf}} \quad (3.10)$$

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} u_{nf} L}{\mu_{nf}} \quad (3.11)$$

Buradaki u_{nf} hibrit nano akışkanın yuvarlak borudaki hızını temsil etmektedir. L ise tüp uzunluğunu gösterir.

Tüp dış kabuk sıcaklığı 7 ısı ölçer yardımıyla ölçülmüştür. İç kabuk sıcaklığı ise takip eden eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır:

$$T_{wi} = T_{wo} - \frac{Q_{ave} \ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi L k_{ss}} \quad (3.12)$$

Buradaki r_o ve r_i sırasıyla tüpün dış ve iç yarıçaplarını temsil etmektedir. Ayrıca $k_{ss} = 14.4 \text{ W / mK}$ ise paslanmaz çelik 304 için alınmıştır.

Bu çalışmadaki deneysel koşullar Tablo 3.4’da özetlenmiştir.

Tablo 3.4 Deney çalışma koşulları

Giriş Sıcaklığı	(°C)	25
Ortalama Isı Akısı	(W/m ²)	5457
Kütlesek Debiler	(kg/s)	0.020, 0.025, 0.030, 0.035, 0.040, 0.045, 0.050

Bu kısımda deneysel çalışmadan çıkarılan sonuçlar irdelenecektir. Çıkarılan bulgular çoğunlukla grafikler üzerinden gösterilerek daha kolay anlaşılması amaçlanmıştır. Çıkan sonuçların nedenleri ile yine bu bölümde açıklanmaya çalışılacaktır.

Nano akışkanlar endüstriyel soğutmalardaki ısı transferi uygulamalarında, akıllı sıvılar, nükleer reaktörler, jeotermal güç ve diğer enerji kaynaklarının çıkarılması, otomotiv, biyomedikal ve elektronik uygulamalar ve daha birçok uygulamada kullanım alanı olması sebebiyle büyük öneme sahiptir. Nano parçacık yığılması, çökme ve erozyon gibi bazı sentez ve kararlılık ile ilgili olumsuz yanları da bulunmaktadır. Partikül büyüklüğü, boyut dağılımı, şekil ve kümeleme deneysel çalışmalarda partikül seçiminde ana faktörlerdir. Nano akışkanların çeşitli uygulamalarda kullanımının yakın gelecekte özellikle biyomedikal mühendisliği ve biyobilimlerde kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir.

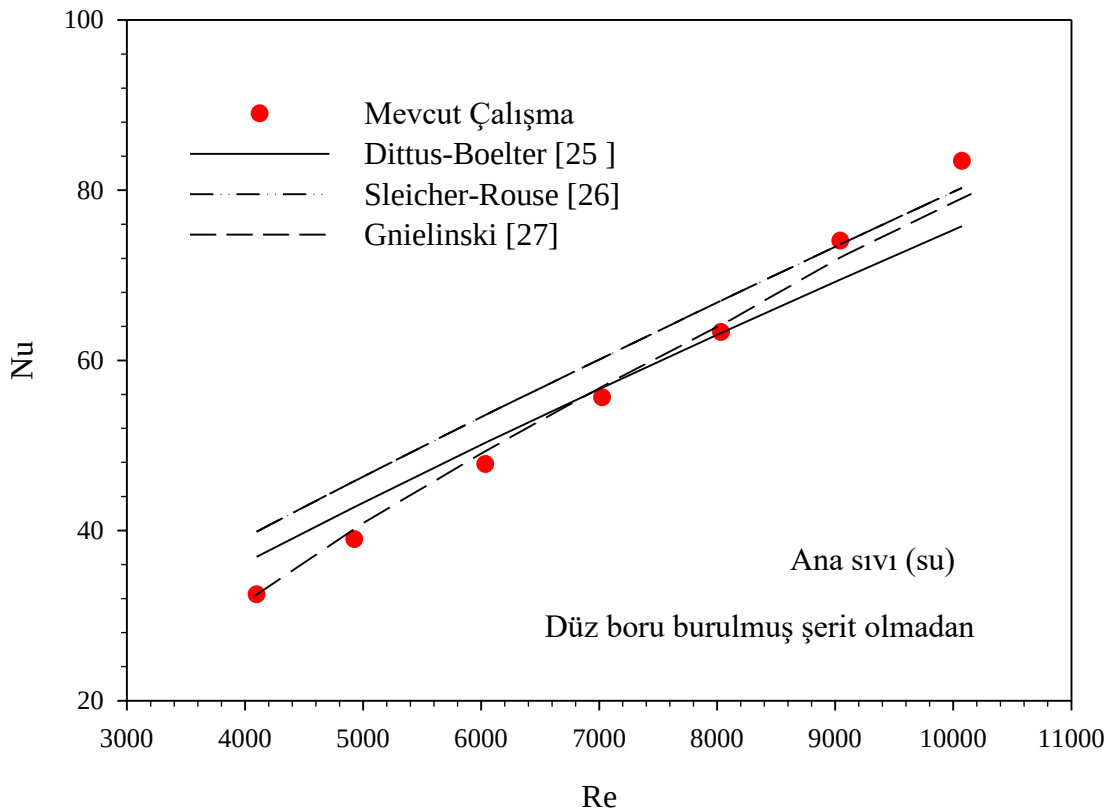
Tüplere ve kanallara burulmuş şerit veya türbülator eklenmesi, kolay üretim ve uzun vadede fazla bakım gerektirmemesi ile gelecek vadeden bir pasif ısı transferi arttırma yöntemidir. Bobin teli, fırça, ağ, şerit ve burulmuş şerit ekleri gibi yüksek güvenilirliğe sahip türbülatorler, ısı değiştiricilerinin verimini arttırma yöntemlerinden bazılarıdır. Burulmuş şeritler genellikle yüksek basınç düşüşlerine neden olan kare borulardaki düşük Re koşulları için önerilir. Ayrıca son yıllarda otomobil, buzdolabı, güneş kolektörü, ısı motoru, hava koşulları, termik santral, elektronik soğutma, süt fabrikası, kimyasal proses endüstrileri vb. gibi uygulamalarda kullanımlarına yönelik yüksek potansiyele sahiptirler.

Bu çalışmada, nano akışkan ve burulmuş şerit eklerinin kullanımının ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler sadece saf su veya nano akışkan ve burulmuş şerit eklenmiş veya eklenmemiş çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda nano akışkanın ve burulmuş şeritlerin pasif ısı transferine etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

4.1 Deneyden Elde Edilen Sonuçların Doğrulanması

Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için deneyden elde edilen sonuçların doğruluğu daha önce yapılmış çalışmalar ile karşılaştırıldı. İlk olarak düz borudaki saf su için Nusselt sayısı Şekil 4.1’de karşılaştırıldı.



Şekil 4.1 Düz borudaki Su için literatürden Nusselt korelasyonları ile deneylerin doğrulanması

Sonuçlar literatürdeki iyi bilinen çalışmalar (Dittus and Boelter [25], Sleicher and Rouse [26], Gnielinski [27], sırasıyla eşitlikler (4.1), (4.2) ve (4.3) aşağıda verilmiştir.) ile deney sonuçları karşılaştırıldı.

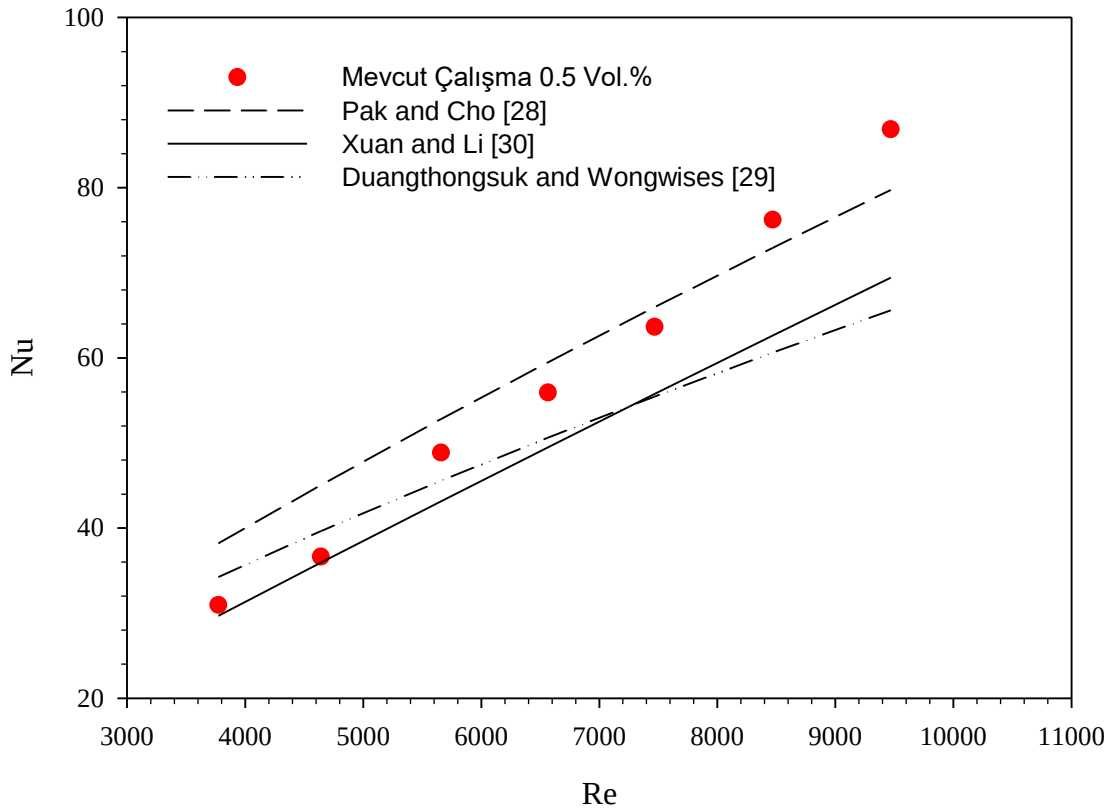
$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (4.1)$$

$$Nu = 5 + 0.015Re^a Pr^b, \quad a = 0.88 - 0.24 / (4 + Pr), \quad b = 1/3 + 0.5e^{-0.6Pr} \quad (4.2)$$

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \quad (4.3)$$

$$f = (1.58 \ln(Re) - 3.82)^{-2}, 2300 < Re < 10^6, 0.5 < Pr < 2000$$

Artan Reynolds sayısına karşılık gelen Nusselt sayısı değerleri literatürde iyi bilinen denklemler ile uyum göstermektedir, Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları hem eğilimleri hem de Nusselt sayısının değerleri bu rakam üzerinde makul bir görünüme sahiptir. Gnielinski [27] denklemi bu çalışma sonuçlarına göre deneylerle en uyumlu denklemdir.



Şekil 4.2 Düz borudaki nano akışkan için literatürden Nusselt korelasyonları ile deneylerin doğrulanması

İkinci olarak, Şekil 4.2’de (Pak ve Cho [28]) (Duangthongsuk ve Wongwises [29]) ve Cu nanofluid (Xuan ve Li [30]) tarafından Al_2O_3 - TiO_2 için türetilen korelasyon Grafit- SiO_2 / Su hibrit nano akışkanı için pürüzsüz tüp ve %0,5 hacimsel konsantrasyon ile burulmuş şerit için Nusselt sayıları mevcut denklemler ile karşılaştırıldı.

$$Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.5} \quad (4.4)$$

$$10^4 < Re < 10^5, 6.54 < Pr < 12.23, 0 < \phi < 3.0\%$$

$$Nu = 0.074Re^{0.707}Pr^{0.385}\phi^{0.074} \quad (4.5)$$

$$3000 < Re < 18000, 0 < \phi < 2.0\%$$

$$Nu = 0.059\left(1 + 7.628\phi^{0.6886}Pe_d^{0.001}\right)Re_{nf}^{0.9238}Pr_{nf}^{0.4} \quad (4.6)$$

Şekil 3b'de, sonuçların yukarıdaki korelasyonlarla elde edilenlerle uyumlu olduğu ve çalışma koşullarına sahip farklı nano akışkanlar için türetilmiş olmalarına rağmen, Reynolds sayılarını arttırmak için Nusselt sayısı değerleri için benzer bir eğilim gösterdiği bulunmuştur. Geçiş bölgesi çevresindeki düşük Reynolds sayıları için, sonuçlar Duangthongsuk ve Wongwises [29] ile daha iyi uyuşmaktadır, diğer yandan Pak ve Cho'dan elde edilenlerle daha fazla benzerliğe sahip olduğu görülmüştür [28]. Bu şekil ayrıca literatürde hibrit nano akışkanlar için yeni korelasyonların gerekliliğini göstermektedir.

Benzer bir şekilde Şekil 4.3'te sürtünme faktörü içinde validasyon çalışması yapılmıştır. Düz boru ve saf su için sürtünme faktörü değerleri basınç düşümü içeren Eşitlik (4.7) ile hesaplanmıştır. Literatürdeki iyi bilinen (Petukhov [31], Blasius [32] and Filonenko [33], eşitlikler sırasıyla şöyledir: (4.8), (4.9) ve (4.10)) eşitlikler ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{\rho v^2}{2}\right)} \quad (4.7)$$

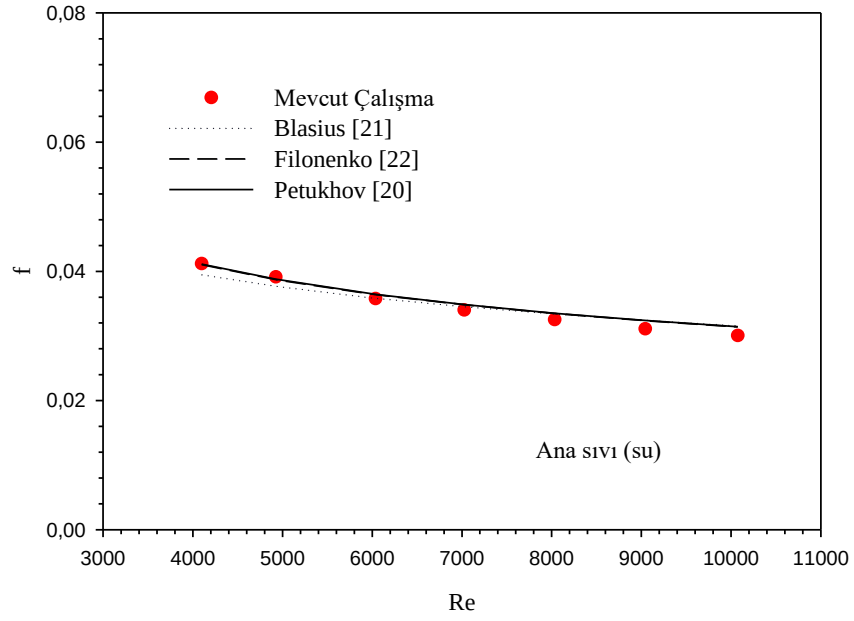
$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (4.8)$$

$$3000 < Re < 10^6$$

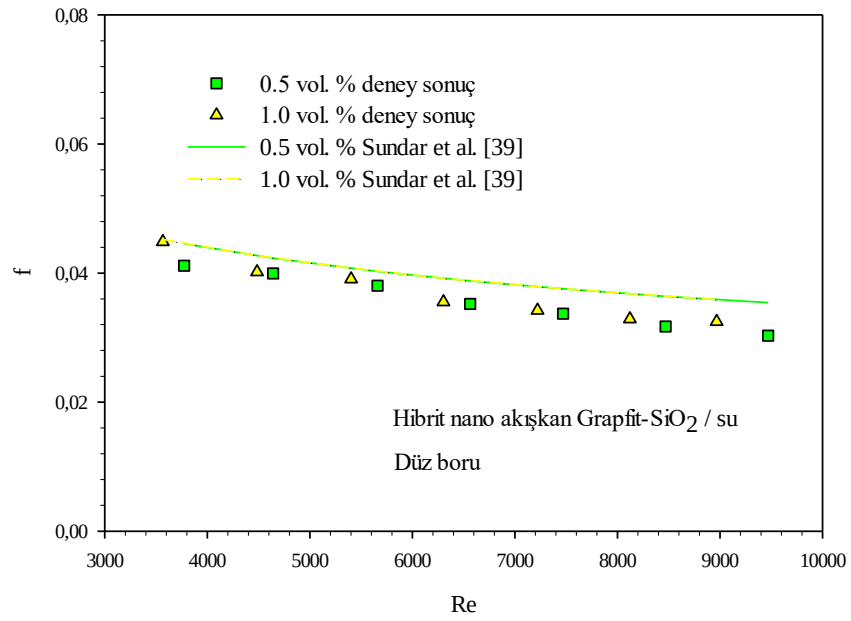
$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (4.9)$$

$$3000 < Re < 10^5$$

$$f = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2} \quad (4.10)$$



Şekil 4.3 Düz boruda su için literatürden sürtünme faktörü korelasyonları ile deneylerin doğrulanması



Şekil 4.4 Düz boruda su için literatürden sürtünme faktörü korelasyonları ile deneylerin doğrulanması

Şekil 4.4, deney sonuçlarının yukarıdaki eşitlikler ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Düz boru ve saf su için olan deney sonuçlarının literatürdeki iyi

bilinene eşitliklerle karşılaştırıldığında yüksek bir uyumluluk gösterdiği ortaya konulmuştur.

Sürtünme faktörü ayrıca hacimsel konsantrasyonu%0,5 olan Grafit-SiO₂ / Su hibrit nano akışkan için Sundar ve diğ. [34] yaptığı çalışma ile karşılaştırıldı. Sundar ve diğ. [34] ile yapılan karşılaştırmada bazı farklılıkların çıkma sebebi farklı çalışma koşullarından kaynaklandığı fark edilmiştir ancak diğer sonuçlar yüksek uyumluluk göstermiştir. Eşitlik (4.11) ile verilen denklem ile sonuçlar elde edilmiştir.

$$f = 0.3491Re^{-0.25} (1.0 + \varphi)^{0.1517} \quad (4.11)$$
$$3000 < Re < 22000, \quad 3.72 < Pr < 6.50, \quad 0 < \varphi < 0.6\%$$

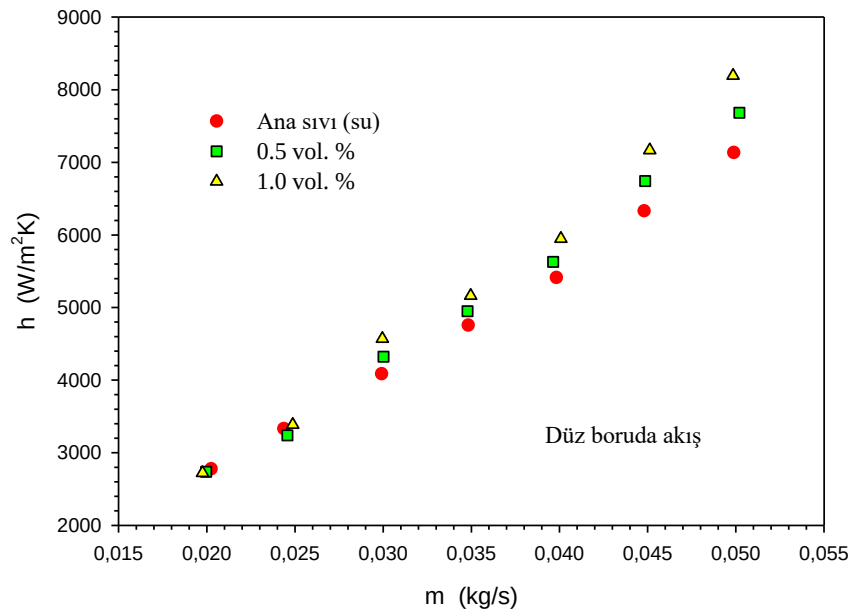
4.2 Taşınım ile Isı Transferinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, nano akışkan ve burulmuş şerit eklerinin ısı transferi üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Aynı vakalara sadece burulmuş şerit ve burulmuş şerit olmadan akışkanın saf su olduğu çalışmalarda dahil edilmiştir. Ayrıca, burulmuş şerit eklerinin ısı transferi üzerindeki etkisi, akışkan hibrit nano akışkan ile çalışırken incelenmiştir.

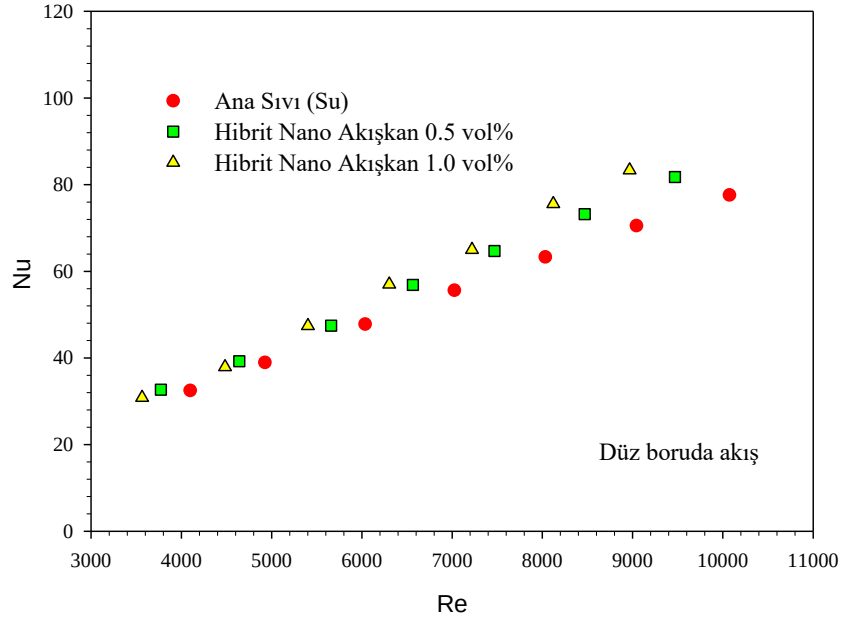
Bu bölümde hibrit nano akışkanın hacim konsantrasyonunun ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Giriş sıcaklığı 25°C'ye ayarlanmıştır. Grafit-SiO₂ / Su hibrit nano akışkan kullanılmış ve iki farklı hacimsel konsantrasyon %0,5 ve %1 olarak incelenir. Ek olarak, üç farklı uzunluk (14 cm, 28 cm ve 42 cm) dört kanallı burulmuş şerit uçları, sabit büküm oranı 5 olacak şekilde araştırılmıştır.

Şekil 7a'da artan kütleli debi için Eşitlik (3.9) ile hesaplanan ısı transferi katsayıları farklı hacimsel konsantrasyonlar için gösterilmiştir. Çıkan sonuçlara göre hem saf su hem de nano akışkanın farklı konsantrasyon değerlerinde (%0,5 ve %1,0) kütleli debi arttığında ısı transfer katsayısında artış gözlenmiştir. Düşük kütle akış hızları (0.02-0.025 kg/s) için, ısı transfer katsayısı, nano parçacıkların ilavesiyle ve hacim konsantrasyonunda artışla önemli bir değişiklik göstermemiştir. Kütleli debinin (0.03, 0.035 ve 0.040 kg/s) olduğu değerler için kütleli debi arttıkça eklenen nano parçacık ile ısı transfer katsayısında açık bir şekilde artış görülmüştür. Kütle akış hızı arttığında, ısı transfer katsayısı artar çünkü kütle akış hızının artması,

akıştaki türbülansın artmasına etki eder. Saf su ve %1 hacim konsantrasyonları arasındaki ısı transfer katsayısı için fark Şekil 4.5'da da görüleceği üzere %15 civarındadır. Isı transferi ve termal iletkenlik arasında anlamlı bir ilişki vardır. Hibrit nano akışkan konsantrasyonu arttığında, çalışma akışkanının termal iletkenliği de ısı transfer oranını arttıran arttırır. Akış hızları daha da arttığında (0.045 ve 0.050 kg/s), hibrit nano parçacıkların artan hacim konsantrasyonu ısı transfer katsayısını önemli ölçüde arttırdı. Bu durumda, saf su ve %1 hacim konsantrasyonları arasındaki ısı transfer katsayısı için fark yaklaşık %21'dir. Benzer şekilde, nano partiküllerin Reynolds sayısını arttırmak için Nusselt sayısı üzerindeki etkisi, burulmuş şerit olmayan düz tüp k için Şekil 4.6'de gösterilmiştir. Hacim konsantrasyonunu arttırmak için Eşitlik (3.10) tarafından hesaplanan Nusselt sayısı, beklendiği gibi Reynolds sayısının artmasıyla artmaktadır. Ayrıca Eşitlik (3.5) tarafından elde edilen, Eşitlik (3.10) farklı hibrit nano akışkanlar için deneysel termal iletkenlik korelasyonu kullanımının bir sonucu olarak hata olasılığını içermektedir.



Şekil 4.5 Düz boru akışındaki ısı transfer katsayısı ve kütleli debinin karşılaştırılması

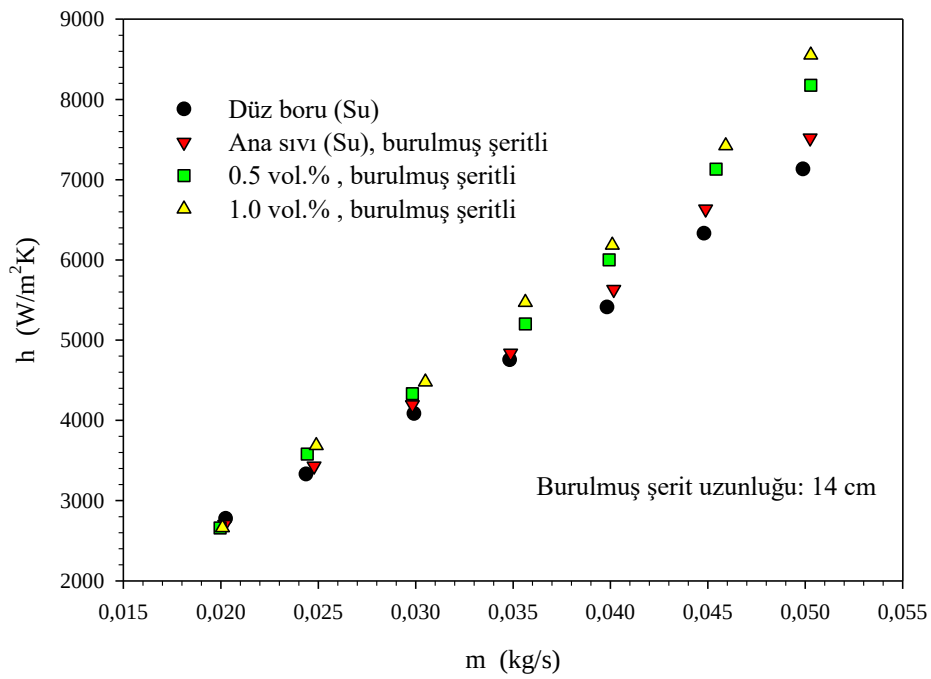


Şekil 4.6 Düz boru akışındaki Nusselt ve Reynolds sayılarının karşılaştırılması

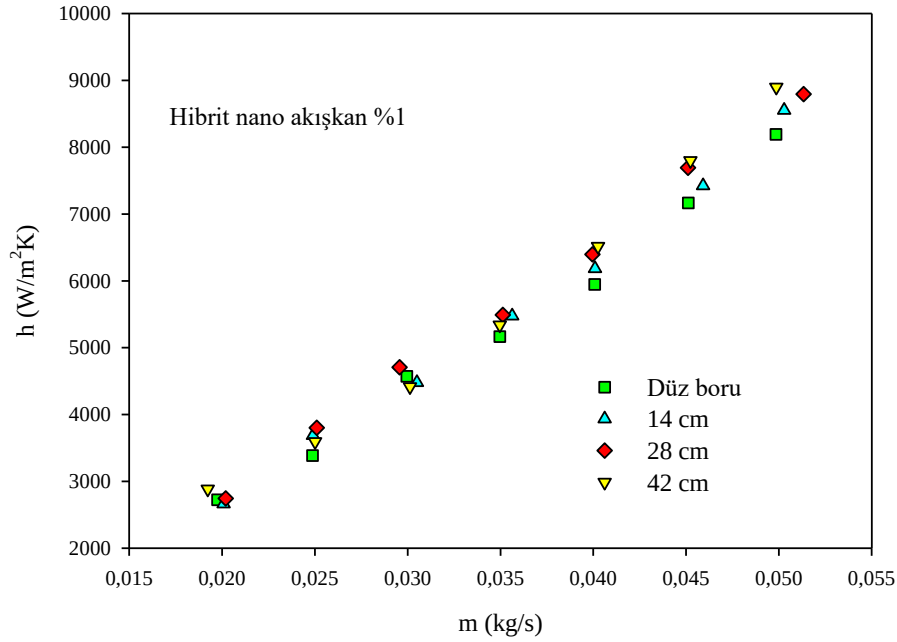
Şekil 4.6'da melez nano parçacıkların ve 14 cm uzunluğa sahip burulmuş şerit eklerinin ve hacimsel konsantrasyonunun ısı transfer katsayısı üzerindeki kombine etkisi gösterilmiştir. Düşük kütle akış hızı değerleri (0.02 kg/s) için, şerit ekinin etkisi ve hacim konsantrasyonunun artması ısı transfer katsayısını önemli ölçüde etkilemez. Artan kütle akış hızları ile, saf su kasalı düz tüp ile burulmuş şerit ve %1 hacim konsantrasyonu arasındaki ısı transfer katsayılarındaki fark daha belirgin hale gelir. Saf su ile pürüzsüz tüp ve ısı transfer katsayısı için bant eki ile %1 hacim konsantrasyonları arasındaki fark bu şekilde %26 civarındadır. Ayrıca, Şekil 4.6 ile hibrit nano akışkan kullanımı ile burulmuş şerit ekleri ile pasif ısı transferi geliştirmesinin bir örneğini göstermektedir. Nano akışkan kullanımının basınç düşmesi üzerindeki etkisi çok azdır, ancak ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ek olarak, ısı transferinin nano akışkanla burulmuş şeridin daha da fazla kullanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar, bükülmüş bant eki ve nano akışkanın pasif ısı transferi arttırması için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Ek olarak, Şekil 4.7'de ise dört kanallı burulmuş şerit ek parçasının uzunluğunun ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi, hibrit nano akışkan %1 hacim konsantrasyonu için kütle debinin artışıyla olan değişimi incelenmiştir. Düşük akış hızlarında şerit eki uzunluğunun etkisi göz ardı edilebilir olduğu görülmektedir. Orta akış hızı

değerlerinde (0.025, 0.03, 0.035 kg/s), ısı aktarım katsayısı değeri 28 cm'lik şerit uzunluğu için daha yüksektir ve ısı aktarım katsayısı farklı çalışma durumları arasında hafif bir değişiklik gösterir. Daha yüksek kütle debi hızları (0.04, 0.045, 0.05 kg/s) için, ısı transfer katsayısı değerleri için daha düzenli bir hizalama gözlenir. En düşük ısı transfer katsayısı, pürüzsüz boru için gözlenmiştir ve şerit ekinin uzunluğu arttıkça ısı transferinde beklendiği gibi artış gözlenmiştir. Burulmuş şerit kullanımı akışkanın türbülansını arttırdığı için ısı aktarım katsayısını yükselme meydana gelmektedir.



Şekil 4.7 Burulmuş şerit eklenmiş (14 cm) boruda çeşitli su ve hibrit nano akışkan hacim konsantrasyonları için kütleli debi ile ısı transfer katsayısı karşılaştırılması

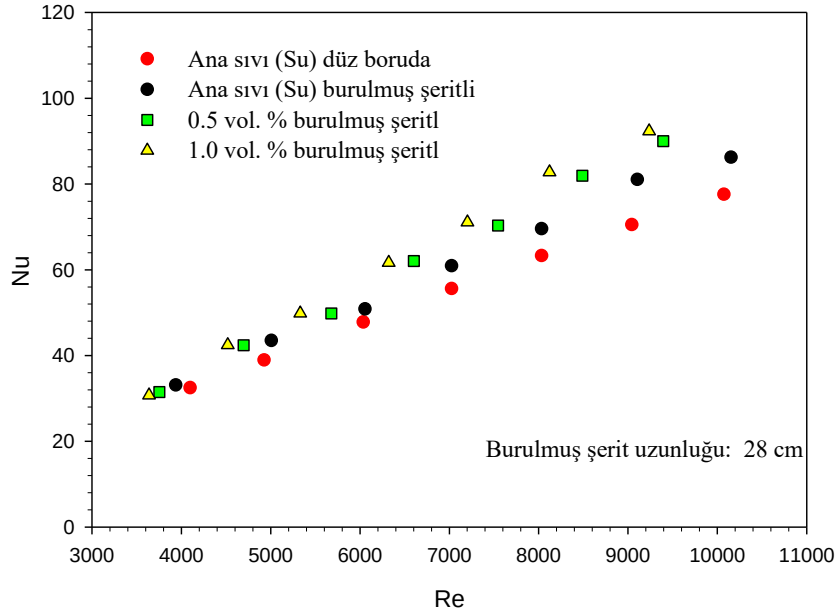


Şekil 4.8 Çeşitli uzunluktaki burulmuş şeritler %1 konsantrasyondaki nano akışkan ile ısı transfer katsayıları karşılaştırması

Reynolds sayısını arttırmak için hibrit nano parçacıkların ilave edilmesiyle ve hacim konsantrasyonunun Nusselt sayısı üzerindeki etkisi 28 cm dört kanallı burulmuş şerit eki için olan grafik Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Düşük Reynolds sayıları için ($3500 < Re < 4000$), hibrit nano parçacık ilavesinin etkisi anlamlı olmadığı fark edilmiştir. Orta Reynolds sayıları için ($4500 < Re < 7000$), %1'lik hacim konsantrasyonu en yüksek Nusselt sayısına sahiptir, ancak etki hala önemli bir seviyede değildir (maksimum fark %6'dan azdır). Daha yüksek Reynolds sayıları için ($7500 < Re < 10000$), Nusselt sayıları için daha düzenli bir artış gözlenir. En düşük Nusselt sayısı saf su ile pürüzsüz tüp için gözlenir ve hacim konsantrasyonu arttıkça bu şekilde beklendiği gibi Nusselt sayısı da artar. %0.5 hacim konsantrasyonuna sahip hibrit nano akışkan için, burulmuş şerit eklerinin uzunluğunun Reynolds sayısını arttırmak için Nusselt sayısı üzerindeki etkisi Şekil 4.10'de gösterilmektedir.

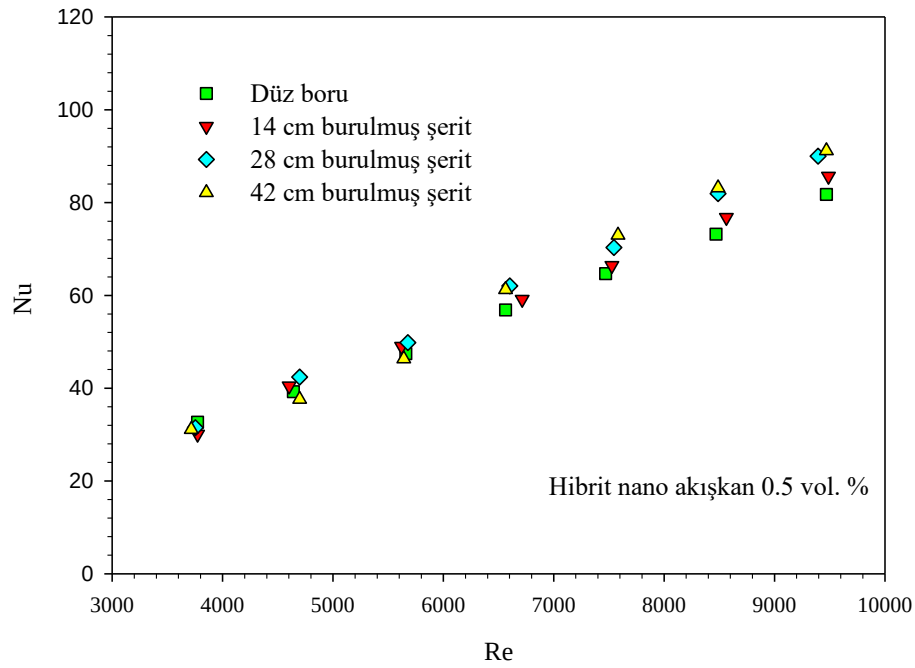
Düşük Reynolds sayıları için ($3500 < Re < 4000$), burulmuş şerit eklerinin Nusselt sayısı üzerindeki etkisi önemli değildir. Orta Reynolds sayıları için ($4500 < Re < 7000$), 28 cm'lik şerit uçları ile olan deneyler en yüksek Nusselt sayısına sahiptir, ancak etki hala önemli değildir (maksimum fark %10'dan azdır). Daha yüksek

Reynolds sayıları için ($7500 < Re < 10000$), Nusselt sayıları için daha düzenli bir artış gözlenir. En düşük Nusselt sayısı pürüzsüz boru için gözlenir ve şerit ekinin uzunluğu arttıkça Nusselt sayısı da beklenen şekilde artmaktadır.



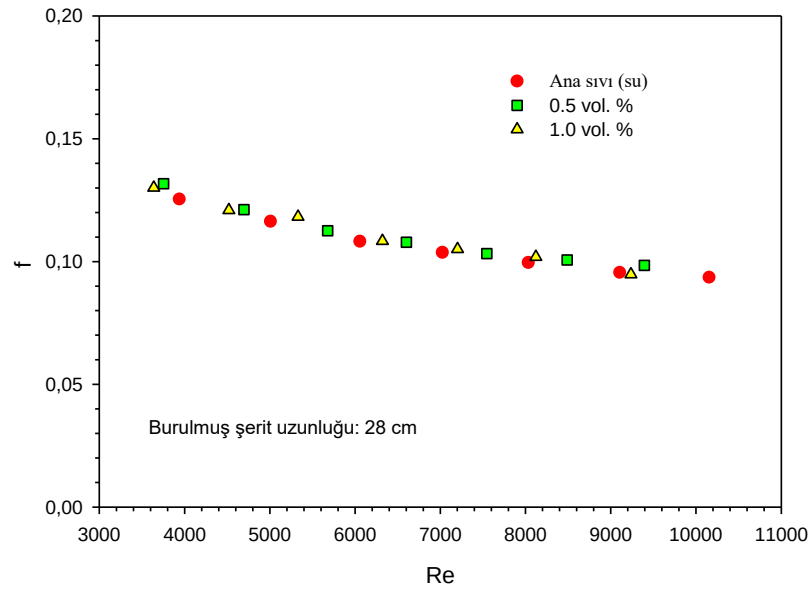
Şekil 4.9 Su ve çeşitli hibrit nano akışkan konsantrasyonlarında 28 cm burulmuş şerit bulunan çalışmaların Nusselt ve Reynolds sayılarının karşılaştırılması

Hibrit nano parçacıkların ilave edilmesinin ve artan hacim konsantrasyonunun, Reynolds sayısı arttıkça Eşitlik (4.7)'dan elde edilen sürtünme faktörü üzerindeki etkisi Şekil 4.11'da gösterilmiştir. Reynolds sayısını arttıkça için sürtünme faktörü azaldığı ve $Re > 8500$ 'den sonra bir platoya ulaştığı görülmüştür. Her durumda sürtünme faktörü saf su durumunda en küçüktür, beklediği gibi hacim konsantrasyonu ile artmaktadır. Artan Reynolds sayısının ($3400 < Re < 9500$) burulmuş şerit eklerinin uzunluğu (sürtünme, 14cm, 28cm ve 42cm) için sürtünme faktörü üzerindeki etkisi Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Burulmuş şerit ekinin uzunluğu arttığında, daha büyük temas yüzeyi ve serbest akış alanını azalttığı için basınç düşümü ve sürtünme faktörü artmaktadır. Pürüzsüz tüp için, sürtünme faktörü beklediği gibi artan Reynolds sayısı ile önemli ölçüde değişmemektedir. Bununla birlikte, şerit ekleri ile artan Reynolds sayısı ile sürtünme faktörü azalır ve artan Reynolds sayısı ile 42 cm'lik bant ekleme uzunluğu için sürtünme faktörü, en düşük ve en yüksek Reynolds sayısı vakaları arasında yaklaşık %23 azalmıştır.

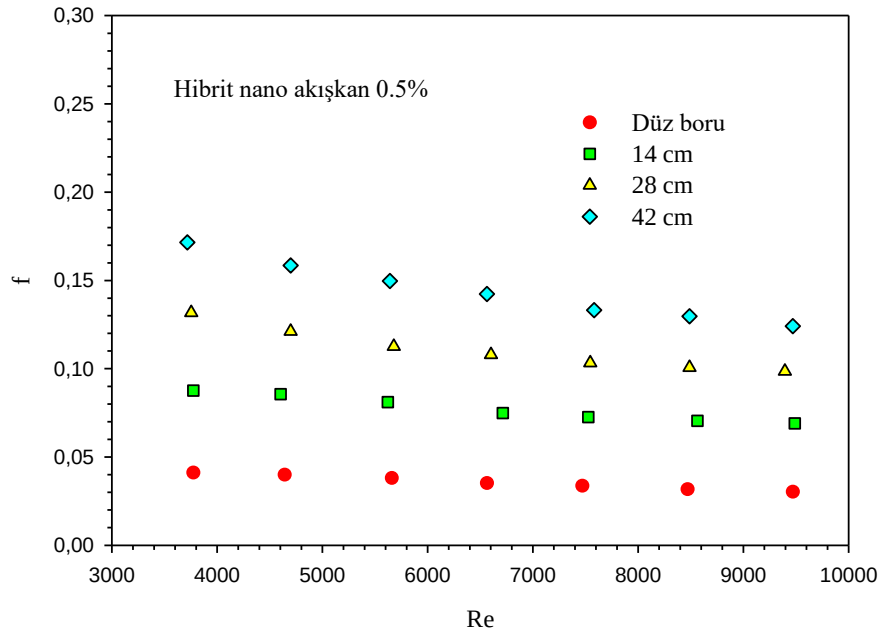


Şekil 4.10 Çeşitli uzunluktaki burulmuş şeritler ve düz boruda 0.5% nano akışkan sıvı ile Nusselt ve Reynolds sayılarının karşılaştırılması

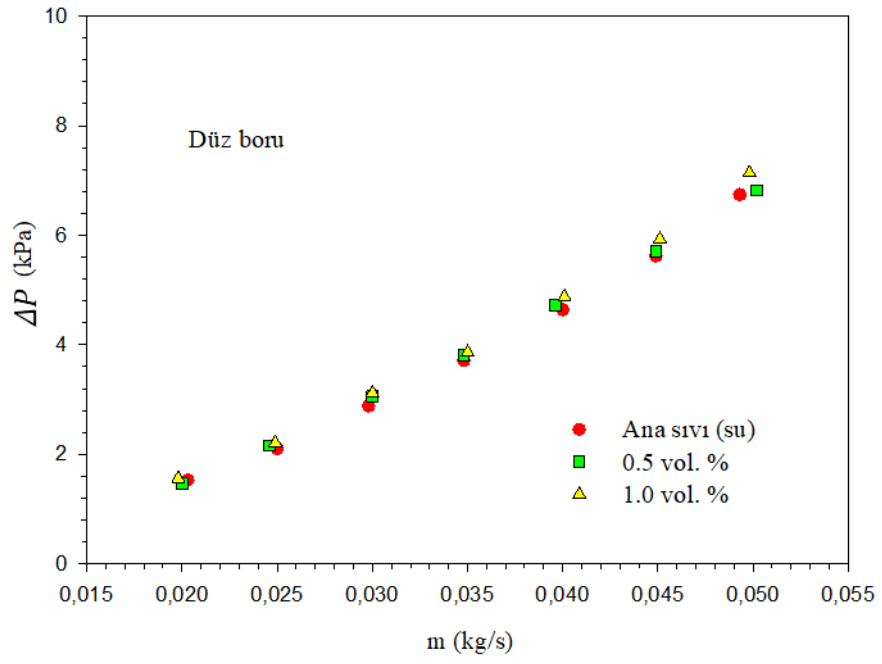
Şekil 4.13'deki basınç düşüşü, hibrit nano parçacıkların kütsel debisinin ve hacimsel konsantrasyonunu artmasıyla olan ilişkisi gösterilmiştir. Bu şekilde gösterildiği gibi, düşük kütsel debi değerleri için, basınç düşmesi değeri hibrit nano parçacık ilavesiyle önemli bir değişiklik göstermezken, ancak daha yüksek kütle akış hızları için daha yüksek hacim konsantrasyonu, en yüksek basınç düşüşü değeriyle sonuçlanmıştır. Artan kütsel debi için şerit ekleme uzunluklarının arttırılması ile basınç düşüşünün karşılaştırılması Şekil 4.14'de verilmektedir. Basınç düşüşü her durum için artan kütsel debi ile artar ve basınç düşüşü şerit uzunluğunu arttırıldığında basınç düşümü dramatik olarak yükselmektedir.



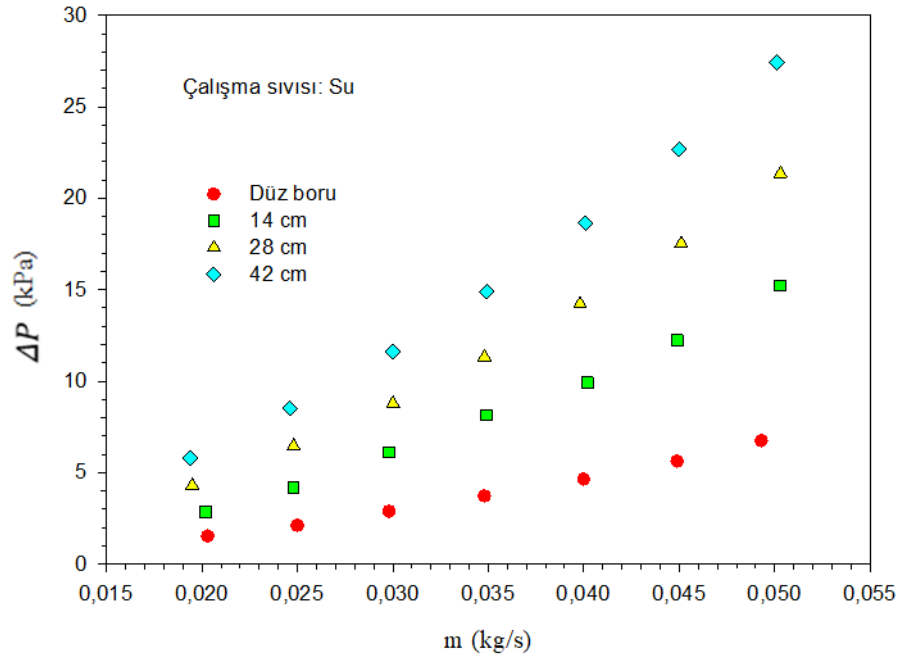
Şekil 4.11 Burulmuş şerit bulunan boruda nano akışkan konsantrasyonun sürtünme faktörü ve Reynolds sayısına etkisi



Şekil 4.12 Burulmuş şerit uzunluğunun sürtünme faktörü ve Reynolds sayısına olan etkisi



Şekil 4.13 Nano akışkan konsantrasyonunun basınç farkına olan etkisi



Şekil 4.14 Burulmuş şerit uzunluğunun basınç düşümüne etkisi

4.3 Regresyon Denklemlerinin Türetilmesi

Literatürde, hemen hemen her deneysel çalışmada, farklı nano akışkanlar ve farklı geometrik özelliklere sahip burulmuş şerit ekleri için Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleri için korelasyonlar önerilmiştir. Bu deneysel çalışmada, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için regresyon denklemleri önerilmiş ve farklı hacimsel Grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkan konsantrasyonları ve ayrıca PLA'dan üretilen dört kanallı burulmuş şerit eklerinin arttırılmasıyla oluşan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla, bu çalışmadan çıkan korelasyon denklemleri literatürde ilk niteliğindedir. Nusselt sayısı için önerilen regresyon korelasyonu, Reynolds sayısı, Prandtl sayısı, hibrit nanofluidin hacim konsantrasyonu ve burulmuş şerit uzunluğu bir fonksiyonu olarak tanımlanır:

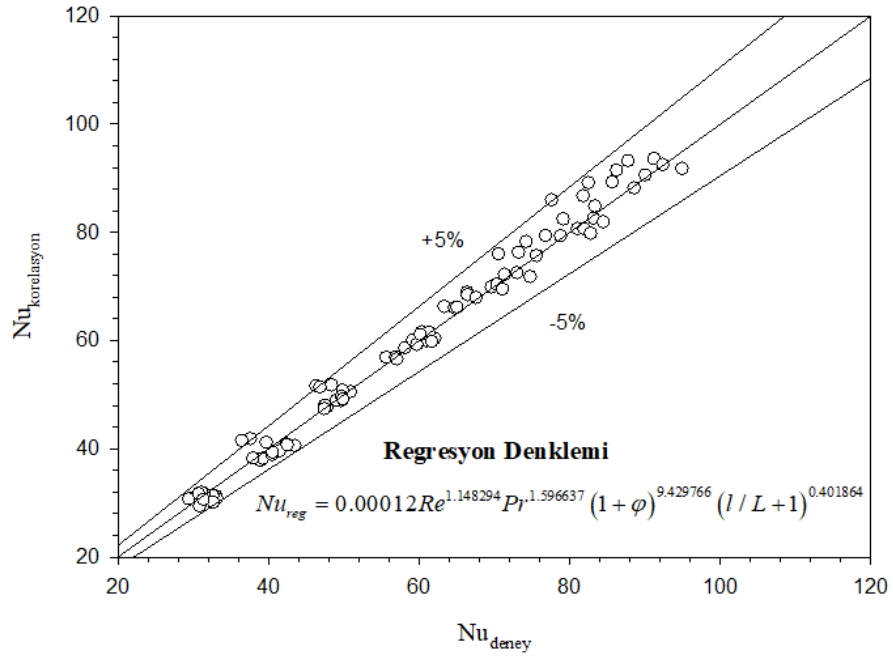
$$Nu_{reg} = 0.00012 Re^{1.148294} Pr^{1.596637} (1 + \phi)^{9.429766} (l / L + 1)^{0.401864} \quad (4.12)$$

Buradaki belirleme katsayısı (R^2) 0.99 ve standart SE hatası 0.014'tür. Ölçülen Nusselt sayıları ile önerilen regresyon denklemi Nusselt sayılarının karşılaştırılması Şekil 4.15'te $\pm 5\%$ hata payıyla gösterilmiştir. Sonuçlar, dört kanallı burulmuş şerit ekleri ve Grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkanı için 25°C sabit giriş sıcaklığında 3400 < Re < 11000, hacimsel konsantrasyonları %0,5 ve %1 birlikte 14, 28 ve 42 cm'lik şerit ek uzunlukları için değerlendirilir ve karşılaştırılır. Önerilen regresyon korelasyonunun dört kanallı burulmuş şerit ekleri ile Nusselt Grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkanın değerlendirilmesi için yeterince doğru olduğu gözlenmiştir.

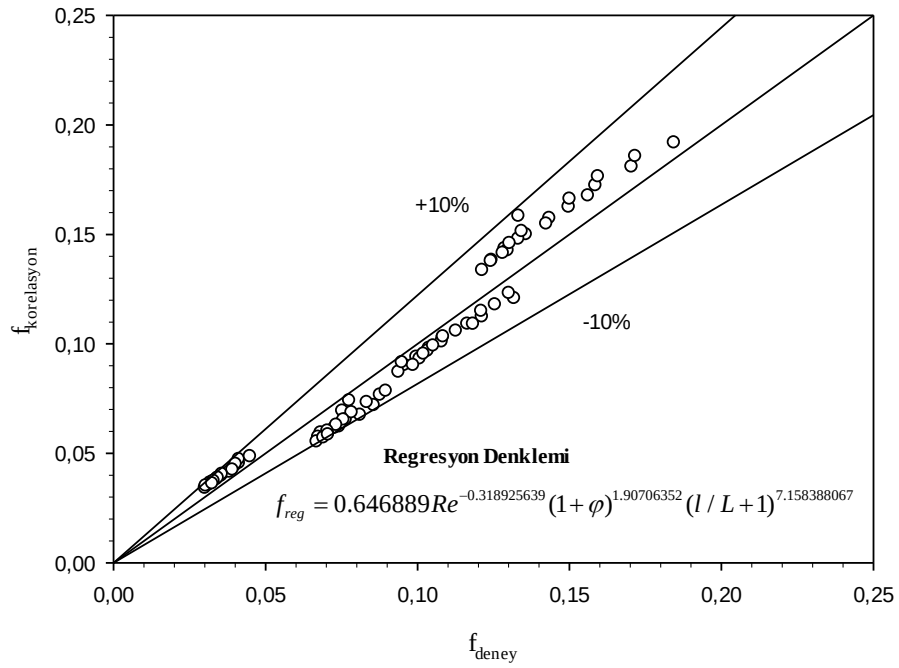
Su için sürtünme faktörü regresyon korelasyonu ve tüm deneysel veriler için QCTT ekleri olan ve olmayan Grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkanı için oluşturuldu. Sürtünme faktörü için önerilen regresyon denklemi, Reynolds sayısı, konsantrasyonu ve burulmuş şerit ek parçasının uzunluğu bir fonksiyonu olarak tanımlanır:

$$f_{reg} = 0.646889 Re^{-0.318925639} (1 + \phi)^{1.90706352} (l / L + 1)^{7.158388067} \quad (4.13)$$

Buradaki belirleme katsayısı (R^2) 0.96'dır. Regresyon denklemleri kullanılarak elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ile Eşitlik (4.7) ile elde edilen değerler Şekil 4.16'da $\pm 10\%$ luk bir hata payı içinde gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Nusselt sayısı için deneysel dataların regresyon denklemi ile karşılaştırılması



Şekil 4.16 Sürtünme faktörü için deneysel dataların regresyon denklemi ile karşılaştırılması

Grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkanının, sabit ısı akısı altında iki farklı hacim konsantrasyonu ve üç farklı uzunluktaki PLA dört kanallı burulmuş şerit ekleri için ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyden çıkan bazı önemli sonuç ve öneriler şu şekilde özetlenmiştir.

- Nano akışkan hacimsel konsantrasyonu arttıkça artan kütsel debi için ısı transfer katsayısı artmaktadır ve Nusselt sayısı, Reynolds sayısı arttıkça artış göstermektedir.
- Çalışma sıvısı olarak saf su ve hibrit nano akışkan için, artan dört kanallı burulmuş şerit eki uzunluğu arttıkça ısı transfer katsayısı artmaktadır.
- Yüksek Reynolds sayılarında, hem hibrit nano akışkan konsantrasyonu artması hem de burulmuş şerit uzunluğunun artmasıyla Nusselt sayısı artmaktadır.
- Genel olarak, sürtünme faktörü beklendiği gibi artan Reynolds sayısı azaldığı ile artış göstermekte, ancak daha yüksek hacimsel konsantrasyon ve daha uzun şerit eklerinde için her zaman sürtünme faktörü daha yüksektir.
- Ayrıca, Reynolds sayısı arttıkça basınç düşümü artmakta ve daha yüksek konsantrasyon ile daha uzun şerit eklerinde de sistemin basınç düşümü artmaktadır.
- Değişen konsantrasyonlar grafit-SiO₂/Su hibrit nano akışkan ile dört kanallı burulmuş şerit ekleri için sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı için ampirik korelasyonlar üretildi. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için hata marjları sırasıyla $\pm\%5$ ve $\pm\%10$ 'dur.

- [1] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 33 (2009) 706-714.
- [2] K. Bashirnezhad, S. Bazri, M.R. Safaei, M. Goodarzi, M. Dahari, O. Mahian, A.S. Dalkiliç, S. Wongwises, Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 73 (2016) 114-123.
- [3] T. Yiamsawas, O. Mahian, A.S. Dalkilic, S. Kaewnai, S. Wongwises, Experimental studies on the viscosity of TiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, *Appl. Energy*. 111 (2013) 40-45.
- [4] T. Yiamsawas, A.S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises, Measurement and correlation of the viscosity of water-based Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids in high temperatures and comparisons with literature reports, *J. Dispers. Sci. Technol.* 34 (2013) 1697-1703.
- [5] P. Nitiapiruk, O. Mahian, A.S. Dalkilic, S. Wongwises, Performance characteristics of a microchannel heat sink using TiO₂/water nanofluid and different thermophysical models, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 47 (2013) 98-104.
- [6] N. Kayaci, M. Balcilar, M. Tabatabaei, A. Celen, O. Yildiz, A.S. Dalkilic, S. Wongwises, Determination of the single-phase forced convection heat transfer characteristics of TiO₂ nanofluids flowing in smooth and micro-fin tubes by means of CFD and ANN analyses, *Curr. Nanosci.* 9 (2013) 61-80.
- [7] M.M. Tafarroj, O. Mahian, A. Kasaeian, K. Sakamatapan, A.S. Dalkilic, S. Wongwises, Artificial neural network modeling of nanofluid flow in a microchannel heat sink using experimental data, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 86 (2017) 25-31.
- [8] A. Celen, N. Kayaci, A. Çebi, H. Demir, A.S. Dalkiliç, S. Wongwises, Numerical investigation for the calculation of TiO₂-water nanofluids' pressure drop in plain and enhanced pipes, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 53 (2014) 98-108.
- [9] L.S. Sundar, M.K. Singh, A.C.M. Sousa, Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 52 (2014) 73-83.
- [10] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *Int. J. Heat Mass Transf.* 52 (2009) 2059-2067.
- [11] C.J. Ho, C.Y. Chang, W.M. Yan, An experimental study of forced convection effectiveness of Al₂O₃-water nanofluid flowing in circular tubes, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 83 (2017) 23-29.

- [12] M. Khoshvaght-Aliabadi, M. Eskandari, Influence of twist length variations on thermal-hydraulic specifications of twisted-tape inserts in presence of Cu-water nanofluid, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 61 (2015) 230-240.
- [13] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Curr. Appl. Phys.* 9 (2009) e119-e123.
- [14] C. Jumpholkul, O. Mahian, A. Kasaeian, A.S. Dalkilic, S. Wongwises, An experimental study to determine the maximum efficiency index in turbulent flow of SiO₂/water nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 112 (2017) 1113-1121.
- [15] W.H. Azmi, K. V. Sharma, P.K. Sarma, R. Mamat, S. Anuar, L. Syam Sundar, Numerical validation of experimental heat transfer coefficient with SiO₂ nanofluid flowing in a tube with twisted tape inserts, *Appl. Therm. Eng.* 73 (2014) 294-304.
- [16] E. Esmaeilzadeh, H. Almohammadi, A. Nokhosteen, A. Motezaker, A.N. Omrani, Study on heat transfer and friction factor characteristics of γ -Al₂O₃/water through circular tube with twisted tape inserts with different thicknesses, *Int. J. Therm. Sci.* 82 (2014) 72-83.
- [17] H. Maddah, M. Alizadeh, N. Ghasemi, S.R. Wan Alwi, Experimental study of Al₂O₃/water nanofluid turbulent heat transfer enhancement in the horizontal double pipes fitted with modified twisted tapes, *Int. J. Heat Mass Transf.* 78 (2014) 104-1054.
- [18] C. Man, X. Lv, J. Hu, P. Sun, Y. Tang, Experimental study on effect of heat transfer enhancement for single-phase forced convective flow with twisted tape inserts, *Int. J. Heat Mass Transf.* 106 (2017) 877-883.
- [19] N.T. Ravi Kumar, P. Bhramara, A. Kirubeil, L. Syam Sundar, M.K. Singh, A.C.M. Sousa, Effect of twisted tape inserts on heat transfer, friction factor of Fe₃O₄ nanofluids flow in a double pipe U-bend heat exchanger, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 95 (2018) 53-62.
- [20] L. Syam Sundar, N.T. Ravi Kumar, M.T. Naik, K. V. Sharma, Effect of full length twisted tape inserts on heat transfer and friction factor enhancement with Fe₃O₄ magnetic nanofluid inside a plain tube: An experimental study, *Int. J. Heat Mass Transf.* 55 (2012) 2761-2768.
- [21] S. Eiamsa-ard, K. Kiatkittipong, W. Jedsadaratanachai, Heat transfer enhancement of TiO₂/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 18 (2015) 33-350.
- [22] A.S. Dalkılıç, Ö. Açıkgöz, B.O. Küçükyıldırım, A.A. Eker, B. Lülecı, C. Jumpholkul, S. Wongwises, Experimental investigation on the viscosity characteristics of water based SiO₂-graphite hybrid nanofluids, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 97 (2018) 30-38.
- [23] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer: Fundamentals & applications*. New York: McGraw-Hill.

- [24] Kakac, S., Bergles, A. E., Mayinger, F., ve Yüncü, H., (1998). Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers, Kluwer Academic Press, London.s
- [25] F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, Int. Commun. Heat Mass Transf. 12 (1985) 3-22.
- [26] C.A. Sleicher, M.W. Rouse, A convenient correlation for heat transfer to constant and variable property fluids in turbulent pipe flow, Int. J. Heat Mass Transf. 18 (1975) 677-683.
- [27] V. Gnielinski, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, Int. Chem. Eng. 16 (1975) 359-368.
- [28] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Exp. Heat Transf. (1998) 151-170.
- [29] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂ -water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, Int. J. Heat Mass Transf. 53 (2010) 334-344.
- [30] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, J. of Heat Trans. 125 (2013) 151-155.
- [31] B.S. Petukhov, Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties, Adv. Heat Transf. 6 (1970) 503-564.
- [32] H. Blasius, The boundary layers in fluids with little friction, Grenzschichten Flüssigkeiten Mit Kleiner Reibung. (1950) 1-57.
- [33] G.K. Filonenko, Hydraulic resistance of pipes, Teploenergetika 1 (1954) 40-44.
- [34] L.S. Sundar, M.T. Naik, K.V. Sharma, M.K. Singh, T.Ch Siva Reddy, Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid, Exp. Therm. Fluid Sci. 37 (2012) 65-71.
- [35] Angayarkanni, A., ve Philip, J., (2015). "Review on Thermal Properties of Nanofluids: Recent Developments", Advances in Colloid and Interface Science, (225):146-176.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: osmanalperenturk@gmail.com

Uluslararası Makale

1. A. Selim, O. Alperen, H. Mercan, S. Nakkaew, An experimental investigation on heat transfer characteristics of graphite- SiO₂ / water hybrid nano fluid flow in horizontal tube with various quad- channel twisted tape inserts, 107 (2019) 1-13.