

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ



**Grafen Oksit ve Titanyum Oksit Nanopartiküllerinin Su Baz Akışkanına
Karıştırılması Yoluyla Boru İçi Akışta Isı Transferi İyileştirilmesinin
DeneySEL ve Numerik Olarak Araştırılması**

Proje No: FBA-2016-6824

Normal Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Veysel ÖZCEYHAN
Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü

Araştırmacılar:

Arş. Gör. Orhan KEKLİKCİOĞLU
Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü

Arş. Gör. Toygun DAĞDEVİR
Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği Bölümü

Kasım 2017

KAYSERİ

TEŞEKKÜR

FBA-2016-6824 proje kodlu bu çalışma, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü bünyesinde yapılmış olup, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından ile desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürü bir borç biliriz.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	1
ABSTRACT	2
1. GİRİŞ	3
2. GENEL BİLGİLER	5
3. GEREÇ VE YÖNTEM	8
3.1. Nanoakışkanların Hazırlanması	8
3.2. Nanoakışkanın Termo-Fiziksel Özelliklerinin Ölçülmesi	10
3.3. Deney Sistemi	12
3.4. Sayısal Analiz Yöntemi	15
4. BULGULAR	18
4.1. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Bulgular	18
4.2. Sayısal Analizden Elde Edilen Bulgular	19
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	21
5.1. Isı Transferi	21
5.1.1. Termal İletkenlik	21
5.1.2. Taşınım ile Isı Transferi Katsayısı	22
5.2. Basınç Düşümü	23

ÖZET

Bu projede sabit ısı akısı ile ısıtılmakta olan düz yatay bakır boru içerisinde geçen su akışkanına farklı ağırlıksal fraksiyonlarda nano boyutta çaplara sahip GO (Grafenoksit) ve TiO_2 (Titanyumoksit) partiküller katılarak ısı transferinin iyileştirilmesi hakkında deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Isı transferi akışkanı olarak yaygınca kullanıldığı bilinen suya metalik nanopartiküller eklenmesinin temel sebebi, ısıtılan borudan akışkana olan ısı transferini moleküller arası iletimini hızlandırmaktır. Moleküller arası iletimle ısı transferinin hızlanmasının sebebi suya nazaran nanopartiküllerin termal iletkenlik katsayısının GO ve TiO_2 için sırasıyla yaklaşık 4000 ve 15 kat olmasıdır. Deneysel çalışmalar ve sayısal analizler Reynolds sayısının yaklaşık 2000-7200 arasında sınırlandırıldığı ölçüde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları ile sayısal analiz sonuçları (mixture model kullanarak) arasında yaklaşık en fazla %10 hata oranı elde edilmiştir. En fazla taşınım ile ısı transferi katsayısı suyla kıyaslandığında %1 ağırlıksal orana sahip GO-su nano akışkanı konfigürasyonu, 7270 Re sayısında 8.44 olarak elde edilmiştir. En fazla basınç düşümü de yine aynı Re sayısı ve aynı deney konfigürasyonunda suya nazaran 16.8 kat fazla gözlemlenmiştir.

Keywords: Deneysel ve sayısal çalışma, nanoakışkan, ısı transferi, basınç düşümü, Grafenoksit, Titanyumoksit

ABSTRACT

In this project, the effect of adding GO and TiO₂ nanoparticles into water flow through straight and horizontal tube which is heated with constant heat flux on heat transfer enhancement is experimentally and numerically investigated. The reason of adding metal nanoparticles to water which is commonly used as a working flow is to swift conductive heat transfer from heated tube to fluid. Main reason of swifting conductive heat transfer is GO and TiO₂ have thermal conductive coefficient of approximately 4000 and 15 much more, respetively. Experimental studies and numerical analyses are conducted with limit of Reynolds number from 2000 to 7000, approximately. The highest error ratio is obtained approxiamtely as 10% between experimental studies and numerical analyses by which using mixture model. The highest convective heat transfer coefficient is obtained for GO-water nanofluid, weight fraction of 1% and Re number of 7270 as 8.44 times greater than water flow with same Re number. The highest pressure drop is obtained with same experiment configuration as 16.8 times greater than water flow.

Keywords: Experimental and numerical study, nanofluid, heat transfer, pressure drop, Graphenoxide, Titaniumoxide

1. GİRİŞ

Gelişen sanayi ve artan nüfuza bağlı olarak gün geçtikçe tüketilen enerji miktarları ve harcamaları aile ölçütünden ülke ölçütüne kadar artmaktadır. Enerjiye sahip olma, ulaşma, dönüştürme, kullanma gibi birbirlerine bağlı mekanizmalardaki ülkesel stratejiler son yüzyılda savaş sebebi olmuş durumdadır. Yapılacak enerji tasarrufları veya sistemsel olarak daha verimli bir başka deyişle daha az enerji tüketerek aynı işin elde edildiği sistemler, günümüz araştırmacıların öncelikli konuları arasındadır.

Enerji, rüzgâr, güneş, kimyasal, mekanik, potansiyel ve ısı gibi olmak üzere birçok türde karşımıza çıkmaktadır. Enerji dönüşüm sistemi ve makinalar sayesinde kullanılacak alana göre bu enerjiler seçilmektedir. Makine ve sistemler sayesinde enerjiler birbirlerine dönüştürülebilir; ancak enerjinin son formu ısı enerjisidir. Genel olarak ısı enerjisi kullanıldıktan sonra çok düşük ekserjiye sahip olmakta ve doğaya atık ısı olarak atılmaktadır. Neredeyse tüm mühendislik uygulamalarında makinaların ve makine elemanlarının periyodik, sürekli ve uzun çalışmaları için içerileninde ısı transferi mekanizmaları bulunmaktadır. Bunlara içten yanmalı motorların soğutulması, CNC tezgahların kalem uçlarının soğutulması, havalandırma veya ısıtma sistemlerinde ısı değiştiricilerin kullanılması, yüksek kapasiteli özel bilgisayarların elektronik komponentlerinin soğutulması, enerji santrallerinde çevrimler içerisinde bulunan kazan, boiler, ısı değiştiricisi rejenaratör gibi sistemleri içerisinde medikal sektörde dezenfektasyon cihazlarının ısıtılması soğutulması gibi sıralanabilir.

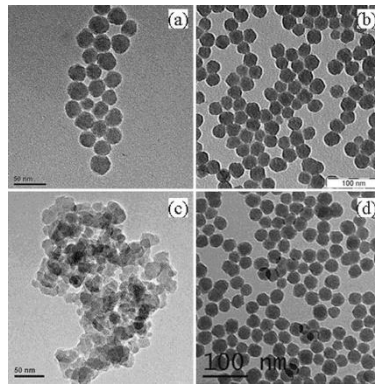
Teknolojinin gelişmesi ile kompleks tasarımlar kolaylıkla üretilebilir hale gelmiş, makinaların boyutları küçülmüş ve verimleri arttırılabilecek neredeyse en üst düzeye gelmiştir. Özellikle ısı değiştiricileri tasarımlarında yüzey alanı artırımı ve türbülans üreticiler gibi metotlar ile ısı değiştiricilerin verimleri mümkün olabilecek üst seviyeler ulaşmıştır. Mühendisler, sistemleri fiziksel olarak tasarlayanın yanında artık kullanılan malzemelerin içeriklerine de müdahale ederek sistemlerin verimlerini arttırmaya yönelmişlerdir. Nano teknolojinin gelişmesi ile metalik malzemeler nano boyutta (10^{-9} m çapında) bir başka deyişle mm den milyonda bir daha küçük parçacıklar halinde üretilebilir hale gelmiştir. Bu nano parçacıklar su gibi bir iş akışkanına sınırlı ağırlıksal fraksiyonlarda ultrasonik karıştırılarak katıldığında homojen yeni bir akışkan ortaya çıkmaktadır. Bu akışkanlara nano akışkan denmektedir. Metallerin termal iletkenlikleri örnek olarak su gibi sıvılara nazaran 10 kattan daha fazla değerlerdedir. Metalik malzeme-Su nanoakışkanı elde edilmesi ile termal iletkenliği daha yüksek olan akışkanlar elde edilir ve bu yeni form ısı transferi akışkanı olarak kullanılabilir. Bu çalışmada da termal iletkenliği çok çok yüksek, ancak üretim ve temini çok

pahalı ve zor olan GO ve termal iletkenliği yüksek ve üretim ve temini kolay ve ucuz olan TiO_2 nanoparçacıkların suya katılmasıyla ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmış ve çalışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Son yıllarda gelişen teknoloji ile nano malzeme üretimi yaygınlaşmakta ve kullanım alanlar yapılan ön çalışmalar ile gün geçtikçe artmaktadır. Isı transferi mekanizmaları hemen hemen tüm mühendislik uygulamalarında olması ve enerji sarfiyatı açısından önem arz etmesi sebebiyle, daha az enerji ile daha çok ısı transferi gerçekleştirmek günümüze kadar birçok araştırmacının alanı olmuş ve olmaya da devam etmektedir. Nano malzemelerin (partiküllerin) ısı transferi alanında kullanımı, temel ısı transferi akışkanı olan akışkana karıştırılarak nanoakışkan elde edilmesine dayanır. Temel akışkana karıştırılan bu nanopartiküller eğer metalik bir malzeme başka deyişle ısı iletim özelliği iyi olan malzeme olması durumunda; ortaya çıkan nanoakışkanın da ısı iletim özelliği iyileşmektedir. Dolayısıyla moleküller arası ısı transferi daha etkin gerçekleşmektedir.

Nanoakışkan kelimesini ilk olarak 1995 de Choi (1995) isimli araştırmacının ileri sürdüğü literatürde yer almaktadır. Choi'nin ardından birçok araştırmacı nanoakışkanın ısı transferine etkisini incelemek üzere birçok çalışmada bulunmuştur. Bu çalışmalarda genel olarak varılan sonuç termal açıdan, temel akışkana katılan nanopartikül miktarı arttıkça ısı taşınım katsayısının arttığı; dolayısıyla ısı transferinin iyileştiği, hidrolik açıdan ise düşük fraksiyonlarda (% 2 ye kadar) sürtünme katsayısını çok az arttırdığıdır Sürtünme katsayısında çok fazla bir artış olmamasının temel sebebi nanoakışkan içerisindeki parçacıkların çok küçük boyutta olması ve bu sebeple bu akışkanların tek fazlı bir akışkan gibi davranabildiği de yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Örnek olarak Şekil 2.1 de Yang ve Liu (2010) tarafından çekilmiş TiO_2 -su nanoakışkanına ait TEM (Transmisson Electron Microscope) resmine yer verilmiştir.



Şekil 2. 1. SiO_2 - su nanoakışkanına ait TEM resimleri

Nanoakışkanlarla ilgili ısı değıştiricisi uygulamaları literatürde farklı çalışma gruplarınca deneysel olarak incelenmiştir. Madhesh vd. (2016) yakın zamanda yaptıkları deneysel

çalışmada Ag/su ve CuO/su nanoakışkanları ile ısı değiştiricide deneysel olarak ısı transferi performanslarını incelemişlerdir. Ag/su nanoakışkanı ile nanoparçacık hacimsel fraksiyonu %1 olduğunda suya göre ısı transferi katsayısındaki artış %52 ve Nu sayısındaki artış ise %47,5 bulunurken bakır oksit-su nanoakışkanı ile aynı nanoparçacık hacimsel fraksiyonunda artışlar sırasıyla %27,6 ve %24,3 bulunmuştur. Sadeghinezhad vd. (2015) Grafensu nanoakışkanının boru içi akışta deneysel ve sayısal ısı transferi performansını incelemişler ve farklı nanoparçacık konsantrasyonlarında (0.025; 0.05; 0.075; 0.1) viskozite ve ısı iletkenlik ölçümü yapmışlardır. Yapılan testler sonucunda nanoakışkanın Nu sayısının taban akışkanı olan sudan %3 – 83 daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Akhavan-Zanjani vd. (2016) Grafen-su nanoakışkanının boru içi laminar akış durumunda ısı transferi katsayısını deneysel olarak araştırmışlardır. Nanoparçacık hacimsel fraksiyonu %0,02 olduğunda ısı iletkenlik katsayısındaki artış suya göre %10,3, Reynolds sayısı 1850 olduğunda ısı transferi katsayısındaki artış ise suya göre %14,2 bulunmuştur. Mehrali vd. (2015) yatay bir boruda Grafen levha-su nanoakışkanının laminar akışta entropi üretimi ve ısı transferi performansını incelemişlerdir. Nanoparçacığın spesifik yüzey alanı 750 m²/gr olduğunda nanoakışkanın ısı iletkenlikteki ve ısı transfer katsayısında artışın suya göre sırasıyla %12-28 ve %15 olduğunu ifade etmişlerdir. Amiri vd. (2016) yaptıkları çalışmada Grafen nanoparçacığı su ve etilen glikol bazlı akışkanlarda kullanmış, ağırlıkça konsantrasyon oranının artmasıyla ısı transfer kabiliyetinin iyileştiği sonucuna ulaşmışlardır. Yarmand vd. (2016) yüzeyine sabit ısı akısı uygulanan kare kesitli bir kanalda, Grafen-su nanoakışkanı ile ısı transferi iyileştirme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Türbülanslı akış koşullarında gerçekleştirilen deneylerde akışkan olarak yalnızca suyun kullanıldığı deney sonuçlarına göre ciddi oranda ısı transferi miktarında iyileştirme sağlandığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, en yüksek ısı transferi iyileştirme oranı 17,500 Reynolds sayısında ve %0,1 ağırlık konsantrasyonunda yaklaşık %19.68 olarak gerçekleşmiştir. Solangi vd. (2016) propilen glikol katkılı Grafen-su nanoakışkanı ile yaptıkları araştırmada yüzeyine sabit akısı uygulanan bakır bir boru içerisinde, 3900-11,700 Reynolds sayısı aralığında termohidrolik akış analizi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucuna göre saf suya oranla %20-32 aralığında ısı transferinde net iyileştirme sağlanırken, ısı transferi katsayısındaki artış maksimum %119 olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışma ile birlikte propilen glikol katkılı Grafen-su nanoakışkanının ısı sistemlerde kullanılan diğer geleneksel akışkanlara iyi bir alternatif akışkan olacağı önemle vurgulanmıştır. Goodarzi vd. (2016) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada nitrojen katkılı Grafen-su nanoakışkanı kullanarak 5000-15,000 Reynolds sayısı aralığında, ağırlık konsantrasyonunun ısı

transferi iyileştirmesine olan etkisini incelemişlerdir. Buna göre nano malzeme miktarının nanoakışkan içerisinde artması ile birlikte ısı transferinde önemli ölçüde iyileşme sağlandığı ortaya konulmuştur. Mehrli vd. (2016) bir boru içerisinde laminar akış koşullarında gerçekleştirdikleri çalışmada, nitrojen katkılı Grafen nanoakışkanının entropi üretimi analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu araştırmanın sonucunda entropi üretiminin kütle oranı ve hız ile orantılı bir biçimde azaldığı tespit edilmiştir. Abdul Hamid vd. (2016) deneysel olarak yaptıkları çalışmada %0.5-1.5 hacimsel fraksiyonda hazırladıkları titanyum oksit-su nanoakışkanının ısı transferi üzerine olan etkisini bir boru içerisinde, 3000 ile 24,000 Reynolds sayısı aralığında incelemişlerdir. Yazın alanları gerektiği kadar uzatılabilir Nanoakışkanın termal iletkenlik katsayısının, hacimsel konsantrasyon oranının artması ile yükseldiğinin belirtildiği deney sonuçlarına göre, bütün hacimsel fraksiyonlarda ısı transferi performans katsayısının 1’den büyük olduğu tespit edilmiştir. Khedkar vd. (2014) bakır borulara sahip bir ısı değiştiricisinde yaptığı deneysel araştırmada titanyum oksit-su nanoakışkanının, düşük ısı akısına sahip sistemlerde saf suya oranla daha etkin bir soğutma performansı gösterdiğini belirtmiştir. Kumar ve Sonawane (2016) üç farklı hacimsel fraksiyonda (%0.02, 0.04 ve 0.06) laminar ve türbülanslı akışta, bakır oksit ve titanyum oksit-su akışkanlarını kullanarak ısı transferi miktarında iyileştirme sağlamışlardır. Tabari vd. (2016) süt pastörize endüstrisinde kullanılan ısı değiştiricisi üzerinde yaptıkları araştırmada, akışkan olarak titanyum oksit-su nanoakışkanını üç farklı ağırlık konsantrasyonunda kullanarak, saf suya oranla ısı transferinde iyileşme elde etmişlerdir. Eiamsa-ard vd. (2015) yaptıkları deneysel çalışmada pasif ısı transferi iyileştirme tekniklerinden olan bükülmüş şerit elemanın iç eleman olarak yer aldığı bir boru içerisinde Titanyumoksit-su nanoakışkanını kullanarak kombine bir sistem tasarlamışlardır. Üç farklı hacimsel fraksiyonun kullanılması ile gerçekleştirdikleri deneysel incelemede, hacimsel fraksiyonun en yüksek olduğu değerde şerit elemanın büküm oranına bağlı olarak %9,9 - 11.2 aralığında ısı transferinde net iyileşme sağlamışlardır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Nanoakışkanların Hazırlanması

Proje kapsamında nanopartikül olarak 18 nm boyutunda TiO_2 ve GO (Şekil 3.1) alınmıştır. Bu aşamada gerçekleştirilen çalışmalara öncelikle TiO_2 nanopartikülü kullanılarak başlanılmıştır.



Şekil 3.1. TiO_2 (Titanyumoksit) ve GO (Grafenoksit) nanopartiküller

Temin edilen TiO_2 nanopartikülü öncelikle su akışkanı içerisine belirli ağırlık oranlarında hassas terazi (Şekil 3.2) ile tartılıp, (%0,5, %0,75, %1) katılarak mekanik olarak 30 dakika süresince mekanik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır.



Şekil 3.2. Hassas terazi



Şekil 3.3. Ultrasonik karıştırıcı

Daha sonra optimum ultrasonik karıştırma süresinin tespiti üzerine Mahbubul vd. (2017) tarafından yapılan araştırma önerisine göre, elde edilen karışım 2 litre hacmine sahip beherde

20 Hz şiddetinde ve 90 dakika boyunca süspansiyon oluşturmak amacıyla proje kapsamında temin edilen BANDELIN marka ultrasonik karıştırıcı (Şekil 3.3) kullanılarak karıştırılmıştır.

Üç farklı ağırlık fraksiyonunda oluşturulan süspansiyonlar çökelme sürelerinin tespiti için dinlenmeye bırakılmıştır (Şekil 3.4). Literatürde nanoakışkanların çökelme süreleri üzerine birçok araştırma yapılmış ve TiO_2 partiküllerin GO (Grafenoksit) nanopartiküllere oranla daha hızlı çökeldiği ve stabilitesinin daha kısa sürede bozulduğu belirtilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile elde edilen çökelme süresi ise TiO_2 -su akışkanı için 4 gün, GO-su akışkanı için ise 26 gün olmuştur. TiO_2 -su nanoakışkanının literatürde sunulan bilgilerin aksine beklenilenden çok daha kısa sürede stabilitesinin bozulması, kurulan deney sistemi içerisinde kullanılması ile deney elemanlarının yüzeyinde birikme, basınç ölçüm noktalarında düzensizliklere sebebiyet verme ve deney borusu içerisinde tıkanma vb. gibi birtakım aksaklıklara sebebiyet vereceğinden, TiO_2 -su nanoakışkanının stabilizasyon süresinin uzatılması amacıyla daha fazla araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar kapsamında çökelme önleyici yüzey aktif maddeler tespit edilmiş, Das vd. (2016) tarafından yapılan bir araştırma neticesinde karışımlara sırasıyla Setil Trimetil Amonyum Bromid (CTAB) ve Asetik Asit (AA) önerilen miktarlarda eklenerek hem TiO_2 -su hem de GO-su akışkanı için çökelme süreleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda etkili bir değişim gözlenmemiş, yüzey aktif madde kullanılması TiO_2 -su akışkanının stabilite süresini ancak 2 gün uzatabilmiştir. Bu süre ise deney sisteminin etkin bir şekilde kullanılması için yeterli olmamıştır. Yapılan son araştırmalar neticesinde TiO_2 -su akışkanı içerisine literatürde önerilen oranda etilen glikol katarak TiO_2 -su akışkanının stabilitesi 24 güne kadar uzatılabilmektedir. Bu netice ile elde edilen karışım oranı diğer akışkanlara da aynı şekilde uygulanarak, bütün nanoakışkanların üç farklı ağırlık oranında hazırlanmıştır.



Şekil 3.4. TiO_2 -su ve GO-su nanoakışkanları

3.2. Nanoakışkanın Termo-Fiziksel Özelliklerinin Ölçülmesi

Kapalı deney sistem döngüsü için gerekli olan 6 litrelik karışımdan alınan 1 litrelik süspansiyonlar, kapsamında alınan MRC marka viskozimetre kullanılarak her bir ağırlık oranı için proje 25-70 °C aralığında tekrarlı viskozite ölçümüne tabii tutulmuştur. Sıcaklık değişimi akışkanı tabandan ısıtmak suretiyle sağlanmış olup, ısıtıcı olarak ERÜ. Termodinamik Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.5 de verilen EKA marka ısıtıcı kullanılmıştır.

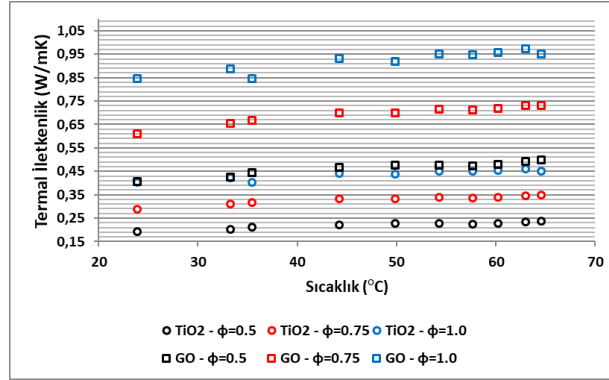


Şekil 3.5. EKA marka ısıtıcı

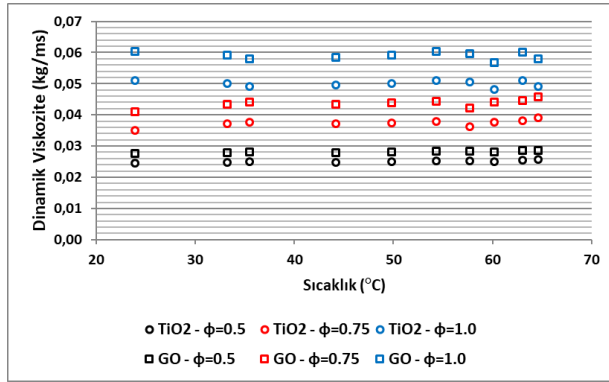
Aynı şekilde 6 litrelik karışımdan alınan 50 mililitrelik süspansiyonlar ise yine proje kapsamında alınan Decagon Devices marka KD2 Pro termal iletkenlik ölçer (Şekil 3.6) kullanılarak her bir ağırlık oranı için proje 25-70 °C aralığında tekrarlı ısıl iletkenlik katsayısı ölçümüne tabii tutulmuştur. Isıl iletkenlik katsayısı tespitinde sabit sıcaklık yine proje kapsamında alınan ve Şekil 3.6 görüldüğü üzere ALEX marka sıcaklık ayarlı ultrasonik banyo kullanılarak sağlanmıştır. Elde edilen deneysel verilerden, sıcaklığa bağlı viskozite ve ısıl iletkenlik katsayısı değişimi grafikleri (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8) oluşturulmuş ve bu grafiklere hesaplamalarda kullanmak üzere Curve Expert programı kullanılarak eşitlik (1) - (6) de verilen 4. Dereceden korelasyonlar geliştirilmiştir. Eşitlik (1-3) ve (4-6) sırasıyla TiO₂ ve GO için termal iletkenlik değerleri için, (7-9) ve (10-12) ise sırasıyla TiO₂ ve GO için dinamik viskozite değerleri için oluşturulmuştur.



Şekil 3.6. Sabit sıcaklıkta termal iletkenlik katsayısı ölçüm ekipmanları



Şekil 3.7. Isıl iletkenlik katsayısının üç farklı ağırlık oranı için sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.8. Dinamik viskozitenin üç farklı ağırlık oranı için sıcaklıkla değişimi

Termal iletkenlik için 3 farklı ağırlık oranında (%0.5, 0.75, 1) oluşturulan eşitlikler

$$k_{\varphi=0.5}(T) = 2 \times 10^{-7} T^4 - 3 \times 10^{-5} T^3 + 0.0018 T^2 - 0.0477 T + 0.626 \quad (1)$$

$$k_{\varphi=0.75}(T) = 7 \times 10^{-8} T^4 - 1 \times 10^{-5} T^3 + 0.0006 T^2 - 0.0114 T + 0.3449 \quad (2)$$

$$k_{\varphi=1.0}(T) = 3 \times 10^{-8} T^4 - 6 \times 10^{-6} T^3 + 0.0005 T^2 - 0.0138 T + 0.5328 \quad (3)$$

$$k_{\varphi=0.5}(T) = 4 \times 10^{-7} T^4 - 6 \times 10^{-5} T^3 + 0.0039 T^2 - 0.1008 T + 1.3216 \quad (4)$$

$$k_{\varphi=0.75}(T) = 1 \times 10^{-7} T^4 - 2 \times 10^{-5} T^3 + 0.0013 T^2 - 0.0241 T + 0.7281 \quad (5)$$

$$k_{\varphi=1.0}(T) = 5 \times 10^{-8} T^4 - 1 \times 10^{-5} T^3 + 0.001 T^2 - 0.029 T + 1.1247 \quad (6)$$

Dinamik Viskozite için 3 farklı ağırlık oranında (%0.5, 0.75, 1) oluşturulan eşitlikler,

$$\mu_{\varphi=0.75}(T) = -8 \times 10^{-10} T^4 + 2 \times 10^{-7} T^3 - 1 \times 10^{-5} T^2 + 0.0005 T + 0.0188 \quad (7)$$

$$\mu_{\varphi=0.75}(T) = 1 \times 10^{-8} T^4 - 2 \times 10^{-6} T^3 + 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.0016 T + 0.0427 \quad (8)$$

$$\mu_{\varphi=1.0}(T) = 1 \times 10^{-9} T^4 - 4 \times 10^{-7} T^3 + 4 \times 10^{-5} T^2 - 0.0018 T + 0.0732 \quad (9)$$

$$\mu_{\varphi=0.5}(T) = -8 \times 10^{-10} T^4 + 2 \times 10^{-7} T^3 - 2 \times 10^{-5} T^2 + 0.0005 T + 0.0212 \quad (10)$$

$$\mu_{\varphi=0.75}(T) = 1 \times 10^{-8} T^4 - 2 \times 10^{-6} T^3 + 1 \times 10^{-4} T^2 - 0.0018 T + 0.0499 \quad (11)$$

$$\mu_{\varphi=1.0}(T) = 1 \times 10^{-9} T^4 - 5 \times 10^{-7} T^3 + 5 \times 10^{-5} T^2 - 0.0021 T + 0.087 \quad (12)$$

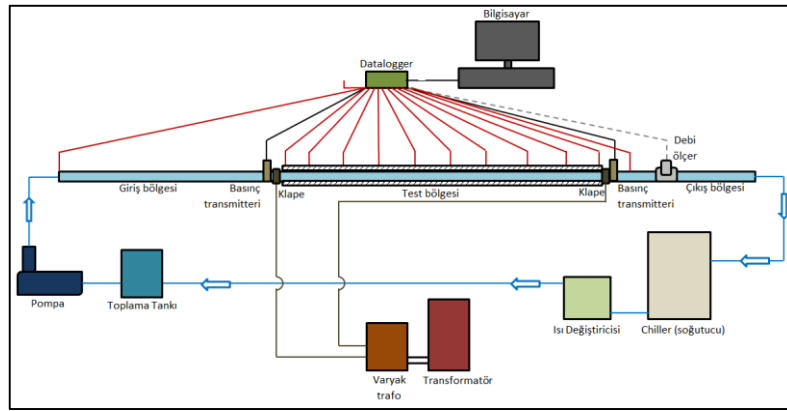
Nanoakışkanların sıcaklıkla değişen termal iletkenlik ve viskozite değerleri deneysel ölçümler ile belirlenirken; yoğunluk (13) ve özgül ısı (14) değerleri literatürde de sıkça uygulanan basit formülasyonlarla hesaplanabilir.

$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\rho_{su} + \varphi\rho_{np} \quad (13)$$

$$Cp_{na} = \varphi Cp_{np} + (1 - \varphi)Cp_{su} \quad (14)$$

3.3. Deney Sistemi

Bu projede, elektrik şase etkisi ile üzerine sabit ısı akısı sağlanan düz ve yatay bir boru içerisinde geçen akışkan olan suya farklı ağırlıksal fraksiyonlarda GO (Grafenoksit) ve TiO_2 (Titanyumoksit) katılarak nanoakışkan elde edilmiş ve bu nanoakışkanın ısı transferine ve basınç düşümüne nasıl bir etkisi olduğu deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. İncelenen ağırlıksal fraksiyonlar her iki nanopartikül için de %0.5, %0.75 ve %1 olarak belirlenmiştir. Deney düzeneğinin Şekil 3.9 (a) şematığı, (b) de görüntüsü verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.9. Deney düzeneğinin (a) şematik görünümü, (b) görüntüsü

Elektrik şasesi varyak (Şekil 3.10. (a)) ile gücü ayarlanan elektrik trafosu (Şekil 3.10. (b)) ile sağlanmıştır. Elektrik şasesi ile verilen ısı akısının hesaplanmasında akım şiddetinin ölçülmesi için akım transformatörü (Şekil 3.10. (c)) kullanılmıştır.



(a) Varyak



(b) Elektrik Trafosu



(c) Akım transformatörü

Şekil 3.10. Sabit ısı akısı sağlamak ve ölçmek için kullanılan cihazlar

Deneyde kullanılan düz yatay boru malzemesi bakırdır ve iklimlendirme sistemlerinde sıkça kullanılan standart iç çapta ($D=13.6$ mm) ve cidar kalınlığına ($t=0.7$ mm) sahiptir. Boru Şekil 3.9 (a) da gösterilen şematik diyagramdaki gibi üç farklı bölümden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla *Giriş Bölgesi*, *Test Bölgesi* ve *Çıkış Bölgesi*'dir. Deney düzeneğinde boruya giriş bölgesine yer vermenin amacı test bölgesine gelen akışın hidrolik olarak gelişip uygun akış profiline sahip olmasını sağlamaktır.

Test bölgesine hemen girişte ve çıkışta akışkanın basınçları basınç transmitterler (Şekil 3.11) ile ölçülmektedir.



Şekil 3.11. Basınç transmitteri

Yine test bölgesi girişinde, çıkışında ve ortamın sıcaklıkları ölçülürken, boru dış yüzeyinin de sıcaklıkları 15 er cm aralıklarla termokuplalar ile ölçülmektedir. Termokuplalar ile ölçülen

sıcaklık değerleri dataloger (Şekil 3.12) ile bilgisayar ortamına aktarılarak hesaplamalar yapılmak üzere kaydedilmektedir.



Şekil 3.12. Datalogger

Test bölgesinden sonra çıkış bölgesine yer verilmesinin amacı ise; akışın debisini ölçecek debimetre (Şekil 3.13) için bir miktar mesafenin gerekmesidir.



Şekil 3.13. Debimetre

Çıkış bölgesinden ayrılan sıcak akışkan tekrar sisteme başlangıç şartı olan ortam sıcaklığında verilebilmesi için chiller (soğutucu) (Şekil 3.14) ile soğutulmaktadır. Soğuyan akışkan toplama tankına (Şekil 3.15) gönderilir ve toplama tankından beslenen pompa (Şekil 3.16) akışkanı tekrar giriş bölgesine basmaktadır.



Şekil 3.14. Chiller



Şekil 3.15. Toplama tankı

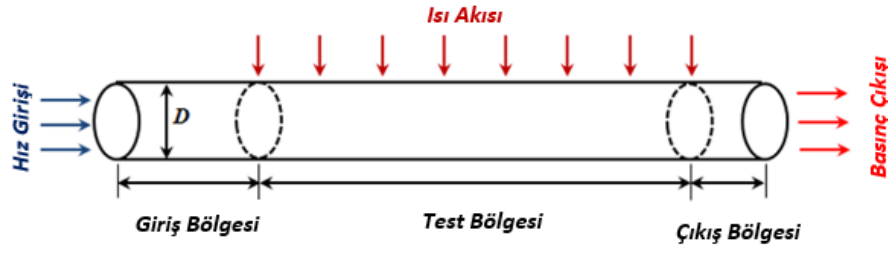


Şekil 3.16. Pompa

Kapalı çevrim gerçekleştiren bu sistem en az 2 saat çalıştırılarak alınan değerlerin kararlı hale gelmesi beklenir. Alınan sıcaklık, debi, basınç, akım ve voltaj değerleri Fortran programında yazılan kod sayesinde çözümü yapılarak Reynolds sayısı (Re) (15), Nusselt sayısı (Nu) (16), basınç düşümü (ΔP) ve sürtünme katsayısı (f) (17) gibi parametreler ile kullanılan akışkan termal ve hidrolik olarak değerlendirilir.

3.4. Sayısal Analiz Yöntemi

Deney düzeneğinde olduğu gibi sabit ısı akısı altındaki düz yatay boru içerisinde geçen su akışkanına projede göz önünde bulundurulan ağırlıksal fraksiyonlarda GO ve TiO_2 nanopartikülleri katılarak, bu işlemin etkilerinin termal ve hidrolik performansa etkileri araştırılmıştır. Analiz işlemleri Termodinamik laboratuvarından bulunan iş istasyonu bilgisayarında Ansys-Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17 de şematik olarak çözüm alanı verilen sayısal modelin sınır şartı ve fiziksel tanımlamaları görülmektedir.



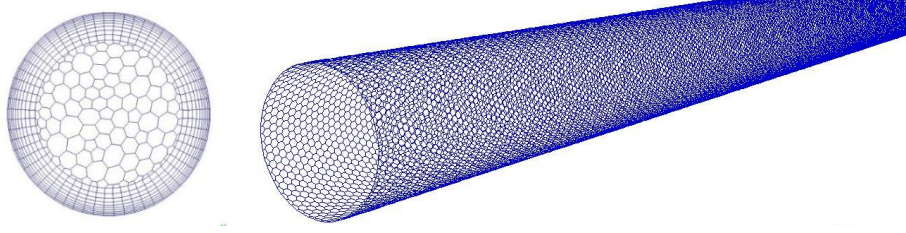
Şekil 3.17. Sayısal analiz için oluşturulan model

Geometrik özellikleri deney düzeneği ile aynı olan sayısal modelde boru çapı 13.6 mm, test bölgesi 1.5 m uzunluğundadır. Giriş bölgesi ve çıkış bölgesi uzunlukları literatürde önerildiği gibi sırasıyla boru iç çapının 10 katı ve 5 katı uzunluğundadır. Boru yüzeyi CFD programında kalınlığı 0.7 mm verilirken malzeme türü de yine deneyde olduğu gibi bakır olarak girilmiştir. Sayısal analizde kullanılan sınır şartları tanımlamaları ve fiziksel boyutlar Tablo 3.1 de özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan sınır şartı tanımlamaları ve fiziksel boyutlar

	<i>Tanım</i>	<i>Değer</i>
D [mm]	Boru iç çapı	13.6
L_1 [mm]	Giriş Bölgesi	10D
L_2 [mm]	Test Bölgesi	1500
L_3 [mm]	Çıkış Bölgesi	5D
q'' [kW/m ²]	Sabit Isı Akısı	50
V [m/s]	Hız Girişi	Reynolds sayısına bağlı olarak hesaplanmıştır.
<i>Etkin Basınç</i> [Pa]	Basınç Çıkışı	0

Boru içi akışta CFD programının enerji, türbülans ve momentum diferansiyel denklemlerini çözeceği mesh (ağ) yapısı Şekil 3.18 de gösterildiği üzere oluşturulmuştur. Boru iç yüzeyinden uygun hız profilinin oluşabilmesi ve hassas enerji denklemi çözülebilmesi amacıyla sınır tabaka mesh oluşturulmuş, diğer bölgelerde daha seyrek mesh oluşturulurken mesh yapısının polihedral yapıda düzenlenerek çözüm kolaylaştırılarak daha az iterasyonda yakınsama sağlanmıştır. Ayrıca mesh element sayısının sonuçlara etki etmediği, farklı mesh yapıları analiz edilerek mesh bağımsızlığı sağlanmıştır.



Şekil 3.18. Sayısal analiz için oluşturulan mesh (ağ) yapısı

Sayısal analiz sonuçlarının deney düzeneği ve literatürle uyumluluğunun kıyaslaması yapılması için baz boyutsuz sayılar kullanılmıştır. Bu boyutsuz sayılar aşağıda eşitlikleri ile birlikte verilmiştir.

Reynolds sayısı:

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (15)$$

Nusselt sayısı:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (16)$$

Sürtünme faktörü:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2 \frac{L}{D}} \quad (17)$$

Gnielinski eşitliği (Incropera, 2006):

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1 + \left[12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3}-1)\right]} \quad (18)$$

Dittus-Boelter eşitliği (Incropera, 2006):

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{1/3} \quad (19)$$

Blaisus eşitliği (Petukhov, 1970):

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (20)$$

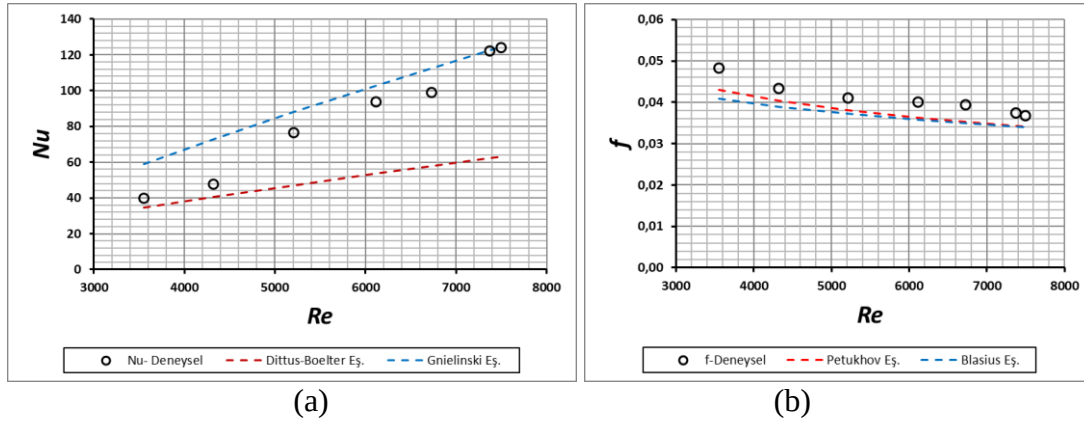
Petukhov eşitliği (Petukhov, 1970):

$$f = (0.790\ln Re - 1.64)^{-2} \quad (21)$$

4. BULGULAR

4.1. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Bulgular

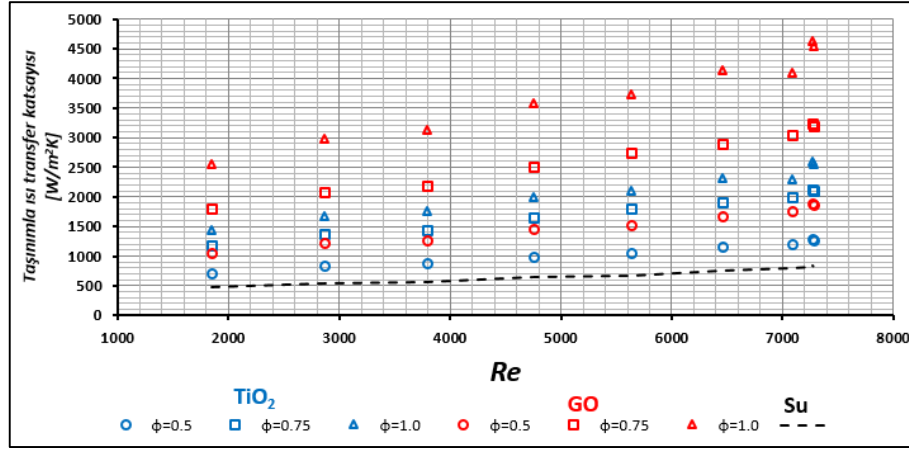
Deney düzeneğinin doğru bir şekilde çalıştığı, ölçümlerin sağlıklı bir şekilde alındığından emin olunması amacıyla ilk olarak akışkanın su olduğu deneyler yapılmış ve literatür ile kıyaslanmıştır. Deney düzeneğinden alınan veriler (sıcaklık, basınç, debi, voltaj ve akım) Fortran programında yazılan kod ile sistemin termal ve hidrolik performansı göstermektedir. Termal açıdan Nusselt sayısı (Nu), hidrolik açıdan da sürtünme faktörünün (f) Reynolds sayısı (Re) ile değişimini veren grafikler oluşturulmuş (Şekil 4.1 (a), (b)) ve literatürdeki korelasyonlar ile kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçların mühendislik uygulamalarında yeterli kabul edilen hata oranları içerisinde olması sebebiyle deney düzeneği ve ölçüm sisteminin doğru olduğu kanısına varılmıştır. Bu doğrulama çalışmasından sonra suya GO ve TiO_2 nanopartikülleri ağırlıksal olarak %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında katılarak nanoakışkan deneyleri yapılmıştır.



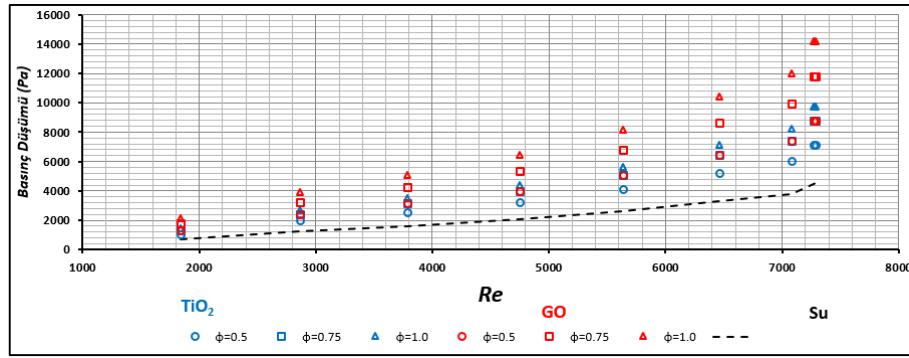
Şekil 4.1. Deneysel sonuçların literatür ile kıyaslanması

Nusselt sayısı yüzey ile akışkan arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transferinin iletim ile ısı transferine oranını vermektedir. Birçok ısı transferi iyileştirme çalışmasında (pasif teknik ile) Nu sayısının kıyaslamada kullanılmasına karşın; nanoakışkan deneyleri sonucunda kullanılması uygun değildir. Çünkü, akışkana katılan nanoparçacıklar akışkanın termal iletkenlik katsayısını artırırken (amaç da budur), taşınım ile ısı transferi katsayısını da arttırmasına rağmen bu oran düşük ağırlıksal oranlarda suya nazaran az olabilmektedir. Bir başka deyişle; düşük ağırlıksal oranlara sahip nanoakışkanlar, su ile kıyaslandığında daha düşük Nu sayısı gösterebilir. Bu durum sanki sistemin termal açıdan kötüleştiğini gösterebilir; fakat durum öyle değildir. Taşınım ile transfer olan toplam ısı transferi miktarı göz önüne alınmalıdır,

bu durumu kıyaslamak için de Şekil 4.2 (a) da gösterildiği gibi taşınım ile ısı transferi katsayısı (h) kullanılabilir.



(a)



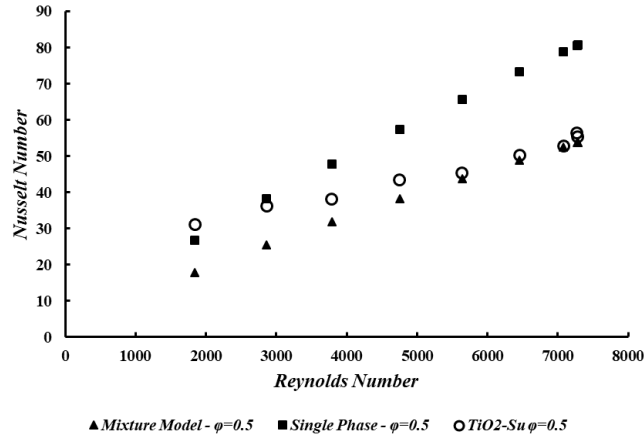
(b)

Şekil 4.2. TiO_2 ve GO nanoakışkanların taşınım ile ısı transferi katsayısı (a) ve basınç düşümü (b) değerlerinin Re sayısı ile ilişkisi

4.2. Sayısal Analizden Elde Edilen Bulgular

Bölüm 3.4 de yer verildiği gibi sayısal analiz sonuçlarının doğruluğundan emin olunabilmesi ve kıyaslama için kullanılabilmesi için temel bir çalışma veya korelasyonlar ile uyumluluğunun ispatlanması gerekmektedir. Su akışkanı için yapılan uyumlama çalışmasından sonra tıpkı deneysel çalışmada olduğu gibi farklı ağırlıksal oranlar (%0.5, %0.75 ve %1) hem TiO_2 hem de GO nanopartikülleri için uygulanmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde nanoakışkan akışının modellenmesinde iki farklı yol denenmiş ve literatüre daha yakın olan model tüm analizlerde tercih edilmiştir. Bu iki farklı model tek fazlı akışın kabul edildiği *single phase model* ve iki farklı fazda akışın kabul edildiği *mixture model*dir. Nanoakışkan uygulamalarında son yıllarda CFD uygulamalarının yaygınca kullanılması, araştırmacıları nanoakış için daha uygun modeller seçimine yöneltmiştir. Bu projedeki çalışmada da deneysel

veriler ile kıyaslandığında *mixture model* in *single phase model* e nazaran daha yakın sonuçlar verdiği (ağırlıkça oranın %0.5 olduğu TiO₂-su nanoakışkanı için) Şekil 4.3 göstermektedir.



Şekil 4.3. %0.5 ağırlıkça orana sahip TiO₂-su nanoakışkanı Nu sonuçları için sayısal modellerin kıyaslaması

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

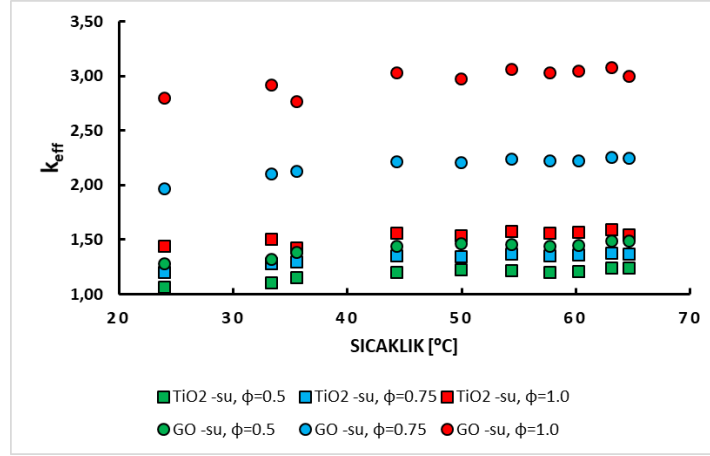
Bu çalışmada deneysel ve sayısal olarak suya eklenen TiO₂ (Titanyumoksit) ve GO (Grafenoksit) nanopartiküllerin ısı transferi ve hidrolik performansa nasıl bir etkisinin olduğu araştırılmıştır. Yapılan ön araştırma ve literatür araştırması sonucunda su gibi metallere nazaran termal iletkenlik özelliği düşük akışkanlara nano boyutta metalik partiküllerin eklenmesi, yeni ve termal iletkenlik özelliği artmış bir akışkan olmasını sağlamaktadır. Bu da moleküller arası iletimle ısı transferinin daha etkin ve hızlı olması anlamına gelmektedir. Ancak; sıvıya eklenen nanopartiküllerin yoğunluk ve viskozitesinin artması daha güçlü pompa seçimini gerektirmektedir. Ayrıca, sıvı ile metal arasındaki yoğunluk farkından dolayı, partiküllerin sıvı içerisinde zamanla çökme gibi bir problemi olmaktadır. Her ne kadar karışım ultrasonik (ses dalgası) ile oluşturulsa da bu durum zamanla karşımıza çıkmaktadır. Yapılan literatür araştırmalarına göre TiO₂ in GO e nazaran çökme süresinin daha kısa olduğu görülmüştür. Yapılan çökme süresi ölçümlerinde TiO₂-su nanoakışkanı 4 gün, GO-su nanoakışkanı ise 26 gün olduğu ölçülmüştür. TiO₂-su nano akışkanının 4 gün çökme süresi, deney sistemi içerisinde 4 günden fazla kullanılmama durumunda tıkanma vb. probşemler doğuracağı sebebiyle, çökme süresini artırmaya yönelik literatür araştırması yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda çökme önleyici yüzey aktif maddeler kullanılmıştır. Bu maddeler Setil Trimetil Amonyum Bromid (CTAB) ve Asetik Asit (AA) dir. Bu yüzey aktif maddeler kullanımı durumunda çökme süresi 2 gün arttırılabilmektedir. Çökme problemi için yapılan uygun araştırma ve uygulamadan sonra deneyler yapılmış ve herhangi bir problem olmadan sonuçlandırılmıştır. Sonuçlar ısı transferi ve hidrolik olarak iki başlık altında açıklanmıştır.

5.1. Isı Transferi

5.1.1. Termal iletkenlik

Çalışmanın temel amacı ısı değıştircilerinde kullanılan akışkanın (suyun) termal iletkenlik özelliğini arttırarak ısı transferi performansını iyileştirmek olması sebebiyle Şekil 5.1 de incelenen ağırlıksal oranlar (%0.5, %0.75, %1.0) için GO-su ve TiO₂-su nanokakışkanlarına ait termal iletkenliklerin iyileşme oranları (k_{eff}) (16) verilmiştir.

$$k_{eff} = \frac{k_{na}}{k_{su}} \quad (22)$$



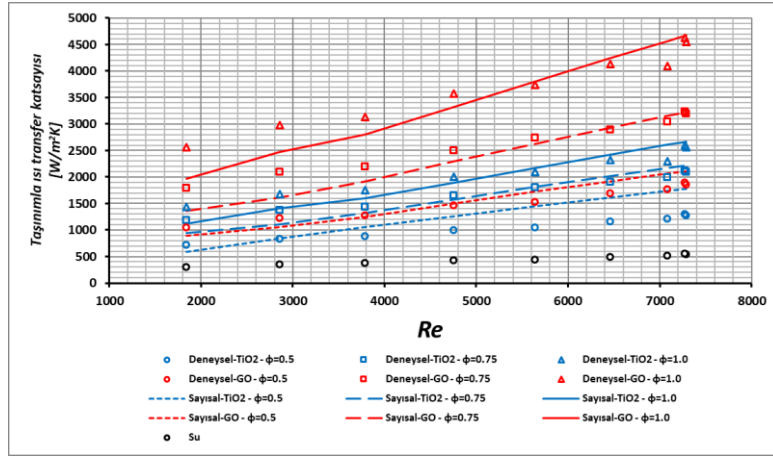
Şekil 5.1. İncelenen ağırlıksal oranlardaki GO ve TiO₂ nanoakışkanların termal iletkenliklerindeki iyileşmenin sıcaklıkla değişimi

Şekil 5.1. de görüldüğü üzere suya eklenen nanopartiküller suyun termal iletkenliğini olumlu yönde arttırdığını göstermiştir. TiO₂ ve GO nanopartiküllerin termal iletkenliği değişen sıcaklıklarda ortalama sırasıyla 8.2 W/mK ve 2320 W/mK olarak ölçülmüştür. GO nano teknolojide yeni ve zor üretim metodolojisi olan bir üründür ve buna bağlı olarak temin edilebilmesi ve fiyatı oldukça yüksektir. Ancak TiO₂ kolayca üretilebilen ve fiyat açısından da makul fiyatı olan nanopartiküller arasındadır. Bu projede birbirleri ile avantajlı dezavantajlı olan nanopartiküller kıyaslanmıştır. Nanopartiküllerin suya eklenmesi ile oluşan nanoakışkanın termal iletkenlik özelliği, nano partikülün termal iletkenliği ve ağırlıksal oranla doğrusal bir ilişkisi olmamaktadır. Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen denklemler de 4. Derece polinomial denklemler olmasıyla bunu göstermektedir. Suya eklenen %1.0 ağırlıksal oranlı GO nano partikülü suyun termal iletkenliğini yaklaşık 2.5 kat arttırmaktadır. Ancak, Şekil 5.1 de görüldüğü gibi her ne kadar GO in TiO₂ den 280 kat iyi termal iletkenlik özelliği olsa da; ağırlıksal oranı %1 olan TiO₂-su yun termal iletkenliği %0.5 GO-su dan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.2. Taşınım İle Isı Transferi Katsayısı

Termal iletkenliği farklı olan akışkanlar aynı Re sayısında farklı taşınım ile ısı transferi katsayısı sonuçları verebilmektedir. Bu durum boru içi akışta Pr sayısı ile de ilgilidir. Suya metalik nanopartiküller eklenmesi termal iletkenliği artırırken Pr sayısını azaltmaktadır. Eşitlik 12 ve 13 de de görüleceği gibi Nu sayısı Pr sayısı ile doğru orantılıdır. Isı transferi sistemlerinin verimleri incelenirken Nu sayısı yaygın olarak kullanılan bir parametredir. Ancak

nanoakışkanların incelenmesinde ısı transferi miktarı arttığı bilinmesine rağmen Nu sayısının azalmasından dolayı Nu sayısı verim kıyaslama için kullanılan bir parametre değildir. Bu yüzden ısı transferi açısından sonuçlar taşınım ile ısı transferi katsayısındaki artış açısından değerlendirilmiştir. Şekil 5.2 de deneysel ve sayısal sonuçların taşınım ile ısı transferi katsayısının Re sayısı ile değişimi verilmiştir.



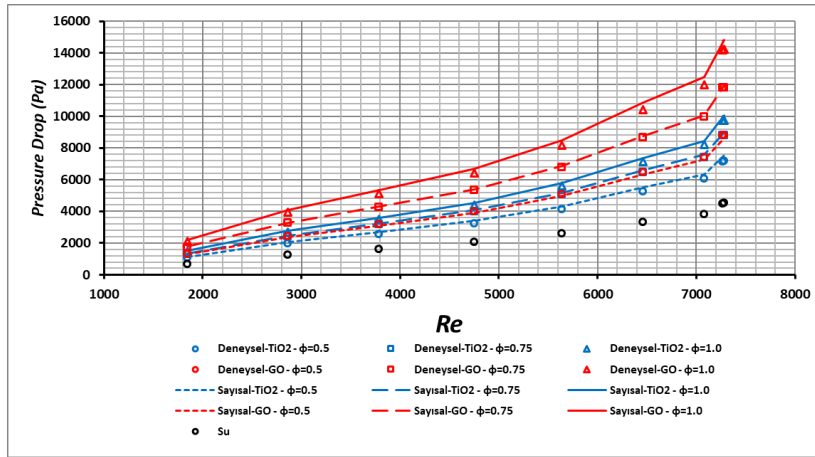
Şekil 5.2. Deneysel çalışma ve sayısal analiz sonuçlarının ısı taşınım katsayısı açısından kıyaslanması

Şekil 5.2. de görülen sayısal analiz sonuçları mixture model kullanılarak elde edilmiştir. Bir önceki bölümde mixture modelin single phase a göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği Şekil 4.3 de gösterilmişti. Deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçları kıyaslandığında uygun bir yaklaşım sağlandığı görülmektedir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, GO nanopartiküllü TiO_2 den daha iyi termal iletkenlik özelliğe sahip olması sebebiyle boru iç cidar yüzeyi ile akışkan arasında daha etkin bir ısı transferi gerçekleştirdiği söylenebilir. Yine benzer nedenle suya eklenen nanopartikül miktarı (ister TiO_2 ister GO olsun) ısı transferi miktarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Artan Re sayısı (bir başka deyişle artan akışkan hızı) ile türbülansın artması sebebiyle ısı transferi miktarının arttığı görülmüştür. Sonuçlar sayısal olarak özetlenirse, en yüksek taşınım ile ısı transferi katsayısı %1 ağırlıksal orana sahip GO-su nanoakışkanında Re sayısının 7270 olduğu deneyde 8.44 kat fazla gerçekleştiği görülmüştür.

5.2.Basınç Düşümü

Boru yüzeyine verilen aynı ısı gücü ile akışkanın çıkış sıcaklığı arttırılırken hemen hemen tüm çalışmalarda çıkış basıncı da düşmektedir. Dolayısıyla daha güçlü bir pompa kullanılması ve daha maliyetli bir sistem tasarımı gerekmektedir. Enerji sarfiyatının önemli olmadığı, ısıtma

soğutma sisteminin önemli olduğu yerlerde yapılan her ısı transferi iyileştirme sisteme adapte edilebilir. Ancak, enerji sarfiyatının da önemli olduğu yerde kazanılan-kaybedilen ilişkisi düşünülmelidir. Bu kapsamda suya katılan nanopartiküllerin basınç düşümünü nasıl etkilediği de incelenmek zorundadır. Şekil 5.3 de suya eklenen nanopartiküllerin artan Re sayısı ile basınç düşümüne olan etkisini göstermektedir. Şekil 5.3 de görüldüğü üzere sayısal analiz sonuçları ile deney verileri en fazla %10 hata oranı ile uyum sağlanmıştır. Isı transferinde GO in nasıl olumlu bir etkisi var ise basınç düşümünde de olumsuz bir etki gösterdiği görülmektedir. Yine artan ağırlıksal oranlardaki nanoakışkanlar, boru hattının referans alındığı değere basması için daha güçlü bir pompalama gücü istemektedir. Nanopartikül katılmamış akışkan olan su ile en yüksek basınç düşümü gözlemlenen %1 ağırlıksal orana sahip GO arasında yaklaşık 16.8 kat fark bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Deneyel çalışma ve sayısal analiz sonuçlarının basınç düşümü açısından kıyaslanması

Yapılan deneylerde nanoakışkanın homojenliği stabil haldeyken deneyler yapılmış ve çökelme olup olmama durumunun, ısı transferi ve basınç düşümü açısından uygulamada nasıl sonuçlar doğuracağı incelenmemiştir. Isı transferi mekanizmaları (kazan, klima, ısı değiştiricisi vs) sürekli çalışmadıkları bilinmektedir. Nanopartiküllerin akışkan içerisinde zamanla çökelme problemi söz konusu olması sebebiyle bir sonraki çalışma da sistemin zamana bağlı (en az 1 aylık) rastgele ve periyodik on-off çalışma şartlarında sonuçları değerlendirilerek uygulanabilirliğinin tespiti yapılması planlanmaktadır.